



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



**UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**Mémoire de fin d'étude**  
Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Réseaux Electriques

**Vieillessement d'huile de transformateurs**  
**Borak22**  
**(Utilisée par SONELGAZ)**

**Réalisé par :**

- ❖ AOUMEUR El hachmi
- ❖ MAHMOUDI Issam

**Dirigé par :**

**Dr. KHECHEKHOUCHE Ali**

**Promotion 2018**

## *Dédicace*

À nos chers parents

Aux frères et sœurs

Pour la chère femme

Aux parents et aux proches

A tous ceux qui nous sont chers

À tous mes amis qui se sont joints à nous pendant ce cours

## *Remerciements*

Nous voudrions exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à Dr. khechekhouche Ali Chef du laboratoire de Haute Tension à la faculté de technologie de l'université de Hama Lakhdar d'El oued, et le Mr. Namoussa tedjani à l'Institut des Sciences exactes de l'Université de Hama Lakhdar d'El oued, parce qu'on nous a confié ce sujet et la chère assistance qu'ils nous ont apportée jusqu'à la fin de ce travail, leurs commentaires et suggestions profonds ont été une contribution majeure à son succès.

En remercie beaucoup, les employés de la société GRTE / SONELGAZ d'el oued, pour leur témoignage, et notre profonde gratitude pour leur grande aide, en particulier, M. Ahmed Ghouri directeur de Société GRTE d'El oued.

Enfin, nous remercions tous les membres de notre famille, en particulier notre famille et tous ceux qui ont contribué à ce travail.

## ملخص

يركز عملنا هذا على دراسة زيت المحول Borak22 تحت توتر عالي متناوب ذو تردد 50 Hz الذي اخذنا منه ثلاثة عينات الاولى غير مستخدمة والثانية في الخدمة و الثالثة خارج الخدمة وطبقنا عليها تجارب قوة العازلة بحيث غيرنا درجة الحرارة من 22 C° الي 40 C° و ثم الي 70 C° وفي كل مرة نأخذ قيمة توتر الانهيار و قوة العازلة.

وقمنا ايضا بدراسة فيزيو-كيميائية للعينات الثلاثة في نفس درجات الحرارة السابقة وسجلنا النتائج.

## الكلمات المفتاحية

- الزيوت المعدنية

- انهيار التيار الكهربائي

- العوائق الهدامة

- الحرارة

- الكثافة

- مؤشر الحموضة

## Résumé

Nos travaux portent sur l'étude de l'huile de transformateur Borak 22 sous haute tension alternative à 50HZ, dont nous avons prélevé trois échantillons: le premier neuve, le deuxième en service, et le troisième hors service, nous avons appliqué les essais diélectrique alors est changé la température de 22C° à 40C° au 70C° et chaque fois que nous prenons la valeur de la tension de claquage et la rigidité diélectrique .

Nous avons également fait des études physico-chimiques des trois échantillons à la même température et enregistré les résultats.

## les mots clés

- Les huiles minérales
- la Tension de claquage
- la Rigidities diélectrique
- la température
- La Densité
- l'Indice d'acidité

## **Abstract**

Our work focuses on the study of transformer oil Borak 22 under high voltage AC at 50HZ, from which we took three samples: the first new, the second in service, and the third out of service, we applied the dielectric tests then the temperature is changed from 22C ° to 40C ° at 70C ° and every time we take the value of the breakdown voltage and the dielectric strength.

We also did physico-chemical studies of the three samples at the same temperature and recorded the results.

## **Keywords**

- Mineral oils
- the breakdown voltage
- the dielectric Rigidities
- temperature
- The density
- the acidity index

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Variation de la permittivité relative en fonction de la température.....	10
<b>Figure I.2:</b> Variation de la résistivité en fonction de la température .....	10
<b>Figure I.3:</b> Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température .....	11
<b>Figure I.4:</b> Variation de la Tension de claquage en fonction de la température.....	13
<b>Figure I.5:</b> Variation de la Rigidities diélectrique en fonction de la température .....	13
<b>Figure I.6:</b> Variation de la Viscosité cinématique en fonction de la température.....	16
<b>Figure I.7:</b> Variation de l' Indice d'acidité en fonction de la température .....	18
<b>Figure I.8:</b> Variation de la Teneur en eau en fonction de la température.....	19
<b>Figure II.1:</b> Formes des streamers dans le cyclohexane .....	28
<b>Figure II.2 :</b> Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale.....	35
<b>Figure II.3 :</b> Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau.....	36
<b>Figure II.4 :</b> Représentation schématique de la longueur de.....	37
<b>Figure III.1:</b> Panneau de contrôle utilisé pour effectuer les tests .....	41
<b>Figure III.2:</b> Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai de claquage de l'air.....	43
<b>Figure III.3:</b> Electrodes de mesure de tension de claquage pour huiles isolantes.....	44
<b>Figure III.4:</b> circuit d'essai.....	45
<b>Figure III.5:</b> circuit d'essai pratiquement .....	45
<b>Figure III.6:</b> Conception du transformateurs de puissances.....	46
<b>Figure III.7:</b> La tension de claquage sur l'huile neuve .....	47
<b>Figure III.8:</b> Variation de la Tension de claquage en fonction de la température.....	48
<b>Figure III.9:</b> Variation de la Rigidities diélectrique en fonction de la température.....	48
<b>Figure III.10:</b> Variation de la Densité en fonction de la température.....	49
<b>Figure III.11:</b> Variation de l' Indice d'acidité en fonction de la température.....	50
<b>Figure III.12:</b> La tension de claquage sur l'huile en service (8 ans).....	51
<b>Figure III.13:</b> Variation de la Tension de claquage en fonction de la température.....	52
<b>Figure III.14:</b> Variation de la Rigidité diélectrique en fonction de la température.....	52
<b>Figure III.15:</b> Variation de la Densité en fonction de la température.....	53
<b>Figure III.16:</b> Variation de l' Indice d'acidité en fonction de la température.....	54
<b>Figure III.17:</b> La tension de claquage sur l'huile hors service (30 ans).....	55
<b>Figure III.18:</b> Variation de la Tension de claquage en fonction de la température.....	56
<b>Figure III.19:</b> Variation de la Rigidité diélectrique en fonction de la température.....	56
<b>Figure III.20:</b> Variation de la Densité en fonction de la température.....	57
<b>Figure III.21:</b> Variation de l' Indice d'acidité en fonction de la température.....	58

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Variation de Tension de claquage et la Rigidité diélectrique en fonction de la température .....	12
<b>Tableau I.2:</b> Variation de Viscosité cinématique en fonction de la température.....	15
<b>Tableau I.3:</b> Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température.....	17
<b>Tableau I.4:</b> Variation de Couleur en fonction de la température.....	18
<b>Tableau I.5:</b> Variation de Teneur en eau en fonction de la température.....	19
<b>Tableau III.1.</b> Équipements des circuits .....	44
<b>Tableau III.2:</b> les Caractéristiques de l'huile isolent Borak22.....	46
<b>Tableau III.3:</b> Variation de Tension de claquage et la Rigidité diélectrique en fonction de la température .....	47
<b>Tableau III.4:</b> Variation de la Densité en fonction de la température.....	49
<b>Tableau III.5:</b> Variation de la Indice d'acidité en fonction de la température.....	50
<b>Tableau III.6:</b> Variation de la Tension de claquage et la Rigidité diélectrique en fonction de la température .....	51
<b>Tableau III.7:</b> Variation de la Densité en fonction de la température.....	53
<b>Tableau III.8:</b> Variation de l' Indice d'acidité en fonction de la température.....	54
<b>Tableau III.9:</b> Variation de Tension de claquage et la Rigidité diélectrique en fonction de la température .....	55
<b>Tableau III.10:</b> Variation de la Densité en fonction de la température.....	57
<b>Tableau III.11:</b> Variation de l' Indice d'acidité en fonction de la température.....	58

## Sommaire

<b>Introduction Générale</b> .....	1
------------------------------------	---

**Chapitre I :****Huiles minérales isolantes pour transformateurs**

I.1. Introduction .....	4
I.2. Différentes catégories d'huiles isolantes .....	4
I.2.1. Les huiles synthétiques.....	4
I.2.1.1. Hydrocarbures halogénés .....	4
I.2.1.2. Hydrocarbures aromatiques et aliphatiques.....	5
I.2.1.3. Les esters .....	5
I.2.1.4. Les huiles silicones.....	5
I.2.2. Les huiles d'origine végétale .....	6
I.2.3. Les huiles minérales .....	6
I.2.3.1. Origine .....	6
I.2.3.2. Présentation des huiles minérales.....	6
❖ Tendance paraffinique.....	7
❖ Tendance naphénique .....	7
❖ Tendance aromatique.....	7
❖ Choix des huiles de bases .....	8
I.2.3.3. Caractéristiques des huiles minérales isolantes .....	8
❖ Caractéristiques électriques .....	9
1. Permittivité .....	9
▪ La permittivité d'huile neuve.....	10
2. Résistivité .....	10
▪ La résistivité d'huile neuve.....	10
3. Conductivité et facteur de pertes diélectriques.....	11
▪ La facteur de pertes diélectriques d'huile neuve.....	11

4. Rigidité diélectrique .....	12
▪ La Tension de claquage et la Rigidité diélectrique d'huile neuve .....	12
❖ Caractéristiques d'étude .....	14
1. Masse volumique et coefficient de dilatation volumique.....	14
2. Capacité thermique massique à pression constante.....	14
3. Conductivité thermique .....	15
4. Viscosité .....	15
▪ La viscosité cinématique d'huile neuve.....	15
5. Point d'écoulement .....	16
❖ Caractéristiques de service .....	17
1. Solubilité des gaz.....	17
2. Solubilité de l'eau.....	17
3. Acidité et couleur.....	17
▪ La Indice d'acidité d'huile neuve.....	17
▪ La couleur d'huile neuve.....	18
4. La teneur en eau.....	19
▪ La teneur en eau d'huile neuve.....	19
5. Stabilité à l'oxydation.....	20
6. Stabilité thermique.....	20
7. Stabilité électrique aux décharges partielles.....	20
❖ Sécurité d'emploi.....	21
1. Point d'éclair et point de feu.....	21
2. Température d'auto- inflammation .....	21
3. Caractéristiques de combustion .....	21
I.2.3.4. Huiles minérales isolantes usagées.....	22
❖ Définition.....	22
❖ Altération des huiles en service.....	22
❖ Facteurs favorisant l'altération de l'huile minérale isolante.....	22

1. Produits volatils .....	22
L'eau .....	22
L'air.....	23
Gaz dissou.....	23
2. Produits insolubles dans l'huile minérale isolante .....	23
3. Produits solubles dans l'huile minérale isolante.....	23
4. Facteur favorisant la formation de gaz.....	24
Décharges partielles .....	24
L'arc électrique.....	24
La chaleur.....	24
❖ Rappels sur la régénération des huiles minérales isolantes usagées.....	24
1. Principe général de la régénération .....	25
I.3. Conclusion .....	26

## Chapitre II: le claquage dans les isolants liquide

II.1. Introduction .....	27
II.2. Mécanismes de claquages dans les diélectriques liquides .....	28
II.2.1. Mécanisme de multiplication électronique .....	28
II.2.2. Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse.....	30
II.2.2.1. Mécanisme thermique .....	30
II.2.2.2. Mécanisme de cavitation.....	31
❖ Cavitation d'origine électrique.....	31
❖ Cavitation électro hydrodynamique .....	32
II.2.3. Mécanisme de claquage par pont .....	33
II.2.3.1. Origine des particules.....	33
II.2.3.2. Teneur des particules.....	33
II.2.3.3. Rôle des particules dans le claquage .....	34
Particules isolantes .....	34
Particules conductrices.....	34
II.2.4. Longues décharges dans les liquides.....	34
II.3. Facteurs influant sur la rigidité diélectriques des liquides.....	35
II.3.1. Paramètres électro géométriques.....	35
II.3.2. Pression hydrostatique.....	36
II.3.3. Température .....	36
II.3.4. Tension .....	36
II.3.5. Humidité.....	36
II.3.6. Influence de l'insertion d'une barrière isolante.....	37
II.3.6.1. Influence de la position de la barrière .....	37
II.3.6.2. Influence des dimensions et du nombre de barrières .....	38
II.3.6.3. Influence de la perforation de la barrière .....	38
II.4. Conclusion.....	39

### Chapitre III:

#### L'étude expérimentale sur le Vieillessement de (borak22)

III.1.Introduction.....	40
III.2.Équipement utilisé.....	41
III.2.1.Panneau de contrôle.....	41
III.2.2.Disjoncteur .....	41
III.2.3.Transformateur à haute tension.....	42
III.3. Essais d'huiles isolante.....	43
III.4.LaCaractéristiques de Borak 22 .....	46
III.4.1 La Conception du transformateurs de puissances.....	46
III.5. les Essais sur l'huile neuve.....	47
III.5.1. les Essais diélectriques.....	47
III.5.2. les Essais physico-chimiques.....	49
❖ La Densité.....	49
❖ Indice d'acidité.....	50
III.6. les Essais sur l'huile en service (8 ans).....	51
III.6.1. les Essais diélectriques.....	51
III.6.2. les Essais physico-chimiques.....	53
❖ La Densité.....	53
❖ Indice d'acidité.....	54
III.7. les Essais sur l'huile hors service (30 ans).....	55
III.7.1. les Essais diélectriques.....	55
III.7.2. les Essais physico-chimiques.....	57
❖ La Densité.....	57
❖ Indice d'acidité.....	58
III.8. Résumé des résultats .....	59
III.9. Conclusion .....	59
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>60</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	

# Introduction générale

## **Introduction Générale**

L'intérêt porté aux liquides est aussi vieux que la science elle-même et l'on s'est toujours rendu compte de l'importance de leurs propriétés dans presque toutes les sciences. Les diélectriques liquides sont utilisés par l'industrie dans diverses applications. C'est ainsi que l'étude des phénomènes de conduction et de claquage dans les diélectriques liquides revêt d'une grande importance [1]. Depuis le début du siècle précédent, des progrès significatifs concernant ce sujet ont été accompli et une quantité importante d'informations a été accumulée.

Il existe de nombreuses interprétations de l'apparition du claquage dans les diélectriques liquides. Certains auteurs tels que Von Hippel, Adamcezewski et Lewis, proposaient d'adopter les résultats acquis dans les solides et les gaz [2]. Cette théorie suppose que des mécanismes basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications électroniques, intervenaient dans le claquage des diélectriques liquides. Cependant, les résultats obtenus restaient limités et n'arrivaient pas à expliquer par exemple, l'influence de la pression sur la tension de claquage [3]. D'autres auteurs l'attribuent aux phénomènes d'ionisation par avalanches dans les bulles d'air et de vapeur incluses dans le liquide qui, éventuellement, prennent naissance lors des fortes impulsions des courants qui précèdent le claquage. Les partisans de cette opinion qui sont entre autres : Sharbaugh, Watson (USA) et Krasucki (Angleterre), ont proposé des processus de claquage avec intervention d'une phase gazeuse [2]. Cette phase gazeuse est une cavité (ou bulle) résultant d'une ébullition locale du liquide ou d'une cavitation due à une dépression locale par action du champ électrostatique ou du mouvement électrohydrodynamique du liquide [3]. En plus de ces mécanismes, le claquage peut être dû à la présence d'impureté de diverses natures, conductrices ou isolantes, déformables ou rigides, en suspension dans le diélectrique liquide ; on parle dans ce cas de mécanisme de claquage par pont.

L'utilisation simultanée de techniques ultrarapides d'enregistrement optiques et de mesures électriques a permis de réaliser d'importants progrès dans la compréhension des processus fondamentaux à savoir : électronique, optique, thermique, mécanique et hydrodynamique conduisant au claquage des diélectriques liquides [4]. Ainsi, il est devenu possible de photographier et de suivre l'évolution des différents événements précédant le claquage [5]. Durant cette phase de préclaquage, une phase de génération donne naissance à une perturbation, dont l'indice de réfraction

est différent de celui du liquide. De l'instabilité de l'interface de cette perturbation, dépendent les événements ultérieurs ; une phase de propagation correspondant au développement des phénomènes prenant naissance à l'interface de la perturbation. En général, ces phénomènes sont appelés streamers « zones ionisées » revêtant la forme d'arborescences. Leurs structures peuvent être en forme de buisson, en forme de parapluie ou encore très filamenteuses. Ils sont caractérisés également par plusieurs paramètres : vitesse, courant, charge et émission lumineuse [6].

Il ressort des nombreux travaux rapportés dans la littérature que les facteurs essentiels influant sur la forme et la fréquence d'apparition des streamers, par conséquent, sur la forme et l'amplitude du courant et de la charge correspondants sont : l'amplitude et la polarité de la tension appliquée, la géométrie des électrodes exceptionnellement le rayon de courbure de la pointe, la distance inter-électrodes, la nature du liquide, la pression hydrostatique, la température etc... En effet, des travaux de recherche [6-8] ont montré que, la fréquence d'apparition des streamers est d'autant plus importante que le niveau de tension appliquée est élevé. Selon, certains chercheurs [9-11], la longueur finale des streamers dans un système pointe-plan sous tension alternative et impulsionnelle, augmente avec l'accroissement de la tension appliquée. Le courant et la charge correspondant aux streamers évoluent dans le même sens que la tension appliquée [6, 12-15] et le rayon de courbure de l'électrode pointe [17]. Cependant, ils sont d'autant plus faibles que la distance inter-électrodes est élevée [6, 12].

L'utilisation des huiles minérales dans le matériel électrique remonte pratiquement au début de leur production industrielle [18]. Elles sont des substances naturelles obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, utilisées comme imprégnants d'isolation solide ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers [19]. Ces huiles devront s'adapter à des contraintes de plus en plus sévères et leur dégradation au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement.

Le but de notre travail est une étude pilote sur le vieillissement des huiles isolantes pour les convertisseurs de métaux communément appelé "Borak 22" à exploités températures, où la restriction de fréquence industrielle (50 Hz) est appliquée. Pour étudier cette huile, nous avons effectué des analyses de physico-chimie et des mesures de rigidité diélectriques.

Cette manuscrit contient trois chapitres distincts:

Nous commençons le premier chapitre avec un rappel des différentes huiles utilisées à l'échelle industrielle. Nous sommes intéressés à isoler l'huile de transformateur métallique car elle est la plus largement utilisée dans la fabrication d'isolants électriques. À cette fin, nous nous concentrons sur la présentation de ses différentes caractéristiques: électrique, physique et chimique. Nous mentionnons également les facteurs soutenant la modification du pétrole en service. Enfin, nous avons discuté de la gamme de processus qui permettent la régénération des huiles minérales usagées.

Le chapitre 2 traite des différents mécanismes de fissuration des isolants liquides. Rappelez les facteurs qui affectent la force du liquide.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié le comportement trois échantillons de Borak 22 d'abord Neuve et le deuxième a été retiré en service (8ans) et le troisième hors service (30ans).

**Chapitre I**  
**huile minérales**  
**isolante pour les**  
**transformateurs**  
**de haut tension**

## **I.1. Introduction**

L'industrie électrique fait un grand usage d'huiles isolantes. En effet, ces dernières contribuent à l'élaboration de matériels électriques très divers : transformateurs, condensateurs, câbles et disjoncteurs etc... Les tensions nominales dans ces appareils s'étendent de quelques centaines de volts à un millier de kilovolts [12].

Les huiles diélectriques sont classées selon leur origine en huiles minérales, huiles végétales et huiles de synthèses. Les huiles minérales sont des produits naturels obtenues directement par raffinage de bruts pétroliers. Elles sont les plus répandues en industrie d'isolation électrique en raison de leur coût de revient réduit. Ces huiles utilisées comme imprégnants d'isolation solide ou comme produits de remplissage de matériels électriques, ont notamment deux fonctions principales : l'isolation électrique et le transfert thermique [12].

Les huiles minérales isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes : électriques, thermiques, chimiques etc... Malgré les avantages qu'ils présentent, ces diélectriques se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes. L'analyse des performances de l'huile en service peut être appréciée par le diagnostic des différentes caractéristiques physico-chimiques et diélectriques. Ces dernières nous renseignent quant au degré de détérioration de l'huile [12].

## **I.2. Différentes catégories d'huiles isolantes**

On distingue trois classes d'huiles utilisées à l'échelle industrielle

### **I.2.1. Les huiles synthétiques**

Les liquides de synthèse sont utilisés lorsque des propriétés particulières sont recherchées (résistance au feu, tenue aux décharges partielles, gassing négatif,...). Ces produits de synthèse ont été différenciés par leur type de structures chimiques.

#### **I.2.1.1. Hydrocarbures halogénés**

La nécessité de réduire les risques d'incendie de matériels électriques est à l'origine de la synthèse des hydrocarbures halogénés. L'industrie électrotechnique a essentiellement employé des produits chlorés qui présentaient l'avantage de ne pas donner de gaz inflammables ou explosibles sous décharges partielles ou dans un claquage électrique. Le principe est de remplacer une partie des atomes d'hydrogène de la molécule par des atomes de chlore. Sous ionisation ou arc électrique, il se forme des molécules HCl au lieu d'hydrogène gazeux.

Les premières fabrications industrielles de polychlorobiphényles (PCB) datent de 1929. Ils sont désignés sous le nom générique d'askarel. Ils étaient employés essentiellement dans les transformateurs pour leur résistance au feu et les condensateurs (pour leur tenue aux décharges partielles) jusqu'à ce que leur persistance dans l'environnement conduise à leur interdiction progressive dans tous les pays [13].

#### **I.2.1.2. Hydrocarbures aromatiques et aliphatiques**

Ils sont caractérisés par un fort pouvoir d'absorption gazeux sous ionisation (les alkybenzènes), utilisés dans les câbles à haute tension et notamment pour le remplissage des diviseurs capacitifs. Les polybutènes utilisés essentiellement dans les câbles « imprégnés masse » se caractérisent par une haute viscosité [13].

#### **I.2.1.3. Les esters**

Il existe plusieurs types d'ester en électrotechnique. Les phtalates ont été utilisés dès le début de la remise en question des PCB, pour l'imprégnation de condensateurs basse et moyenne tension, actuellement seul le dioctylphtalate (DOP) est encore utilisé pour l'imprégnation de condensateurs basse tension. Les tétraesters sont utilisés pour le remplissage de transformateurs de distribution « résistants au feu », leur point de feu élevé ( $> 300^{\circ}\text{C}$ ) étant la caractéristique primordiale de ces produits [13].

#### **I.2.1.4. Les huiles silicones**

Les huiles silicones les plus couramment utilisées sont des diméthyl-polysiloxanes. Elles se présentent sous la forme de liquides non toxiques ayant la consistance d'une huile, caractérisées par les propriétés suivantes [14].

- Leur viscosité peut aller de 10 à 100 centistokes. Celle-ci varie beaucoup moins avec la température que celle des huiles minérales ou des diphényles chlorés.
- Leur point de congélation est exceptionnellement bas ( $-60^{\circ}\text{C}$ ).
- Leur bonne stabilité thermique (température d'utilisation jusqu'à  $200^{\circ}\text{C}$ ).

Compte tenu de leur prix élevé, les huiles silicones sont utilisées dans l'isolation de petits matériels travaillant à haute température.

L'inconvénient des diméthylsiloxanes est que leur rigidité diélectrique diminue considérablement à la suite d'une rupture diélectrique, et que la présence d'un arc dégage une grande quantité de gaz [14].

### **I.2.2. Les huiles d'origine végétale**

Les huiles végétales ont fait partie des premiers liquides isolants utilisés pour la fabrication d'appareils électriques. Il existe une grande variété d'huiles végétales. Seule l'huile de ricin est utilisée depuis de longues années. Elle sert à l'imprégnation des condensateurs de stockage d'énergie.

Elles sont généralement peu toxiques et biodégradables. Ces qualités sont dues notamment à une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Ces deux caractéristiques, qui sont favorables pour l'aspect écotoxicologique, représentent un inconvénient important pour les applications électrotechniques. Par ailleurs, leur tenue diélectrique n'est pas très élevée. Pour ces raisons, les huiles végétales sont relativement peu utilisées (essentiellement dans certains types de condensateurs pour courant continu), bien que leur emploi dans les transformateurs ait été proposé récemment [14].

### **I.2.3. Les huiles minérales**

#### **I.2.3.1. Origine**

Ce sont des produits naturels obtenus de la distillation fractionnée de bruts de pétrole sélectionnés, soumis ensuite à un raffinage poussé. Leur composition chimique est extrêmement compliqué (plusieurs milliers de molécules différentes) d'hydrocarbures, de composés soufrés, oxygénés, azotés et de traces de composés organométalliques .

Pour obtenir des huiles minérales de qualité diélectrique, les bruts pétroliers doivent être raffinés suivant un procédé qui inclut habituellement une distillation, suivie d'une opération de déparaffinage, d'une extraction par solvant et d'une hydrogénation catalytique [15].

Les huiles ainsi obtenues sont des diélectriques non polaires, dont la permittivité relative reste voisine de 2.2 dans un large domaine de fréquence et de température.

#### **I.2.3.2. Présentation des huiles minérales**

Une huile minérale isolante ou diélectrique est une huile qui présente une faible conductivité électrique du fait d'une densité de charges peu importante. Elle se compose principalement [15] .

- D'une huile dite de base (ou d'un mélange d'huiles de base) obtenue selon des procédés traditionnels de raffinage du pétrole brut .
- De composés chimiques appelés additifs, en teneur très variable, qui permettent d'atteindre les spécifications d'emploi des huiles finies.

La composition d'une huile minérale reflète, en général, celle du distillat d'origine. Les huiles de base en électrotechnique réparent à trois grandes classes de tendances chimiques. Elles sont définies par leur teneur en carbone paraffinique ( $C_p$ ), en carbone naphhténique ( $C_n$ ) et en carbone aromatique ( $C_a$ ).

#### ❖ **Tendance paraffinique**

Dans ce type d'huile, la tendance paraffinique ou 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 [17].

#### ❖ **Tendance naphhténique**

C'est une huile riche en hydrocarbures naphhténique, 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 graissages.

#### ❖ **Tendance aromatique**

Ce sont des huiles composées de fonctions à noyau benzéniques se caractérisant par une densité très élevée, un indice de viscosité très faible, une très faible résistance à l'oxydation, un point d'aniline très bas (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 ou

asphaltiques accompagnées de dérivées corrosifs. La fabrication d'huiles finies lubrifiantes, isolantes ou autres, est orientée par les tendances des huiles de base [17].

Le point d'aniline de l'huile, qui est défini comme la température minimale pour laquelle des volumes égaux d'huile et d'aniline sont miscibles en toute proportion, mesure le pouvoir solvant de l'huile. Sa vapeur est en relation avec la teneur en hydrocarbures aromatiques de l'huile, mais est influencée également par d'autres facteurs chimiques : ramifications, insaturation et masse moléculaire.

#### ❖ **Choix des huiles de bases**

Le choix des huiles de base est déterminé par rapport :

- A la nature chimique recherchée de l'huile : paraffinique, naphthénique ou aromatique.
- Aux caractéristiques physiques et chimiques que l'on désire conférer à l'huile finie : la

viscosité, la densité, l'indice de viscosité, la résistance à l'oxydation, etc...

L'obtention d'une huile finie apte à répondre aux exigences des diverses contraintes d'utilisation, fait appel à l'usage d'un certain nombre d'additifs. Ces derniers, qui sont d'une importance capitale dans l'industrie des huiles minérales isolantes sont des produits chimiques incorporés en petite quantité dans l'huile de base, pour améliorer certaines propriétés tels que l'indice de viscosité, le pouvoir antioxydant pouvant retarder l'action de l'oxygène sur l'huile en service, le point d'écoulement, etc...

#### **I.2.3.3. Caractéristiques des huiles minérales isolantes**

Les propriétés des liquides sont généralement divisées en propriétés physiques, chimiques et électriques. Cependant, certaines propriétés appartiennent indifféremment à l'une ou l'autre de ces divisions. Les propriétés chimiques relatives aux applications électriques étant limitées, et les propriétés électriques étant prépondérantes. La division se fait en caractéristiques électriques, caractéristiques d'étude, caractéristiques de service et autres caractéristiques [18].

### ❖ Caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques des liquides en général, dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire etc...), et de leurs conditions d'utilisation au conditionnement (filtration, déshydratations etc...). On cite : la permittivité, la conductivité, le facteur de pertes diélectriques et la rigidité diélectrique.

#### 1. Permittivité

C'est une caractéristique électrique liée à la formation du liquide, elle dépend essentiellement de sa structure chimique. Pour une huile diélectrique, la permittivité définit la possibilité de libérer des charges sous l'action d'un champ électrique [15]. Elle résulte des phénomènes de polarisation électronique et atomique.

La permittivité relative  $\epsilon_r$  d'un produit est définie comme le rapport entre la capacité d'un condensateur rempli de ce produit et la capacité du même condensateur vide .

$$\epsilon_r = C_p / C_0 \quad (I.1)$$

La permittivité relative des hydrocarbures est faible et voisine de 2. La présence d'hétéroatomes (oxygène, chlore...), en créant des dipôles de fortes intensités, confère aux molécules une permittivité élevée.

La permittivité relative décroît avec la température et la fréquence du courant. Cependant, pour les produits polaires et visqueux, on observe, au-dessous d'une certaine température, une brusque chute de la permittivité due à l'immobilisation des dipôles.

▪ La permittivité d'huile neuve

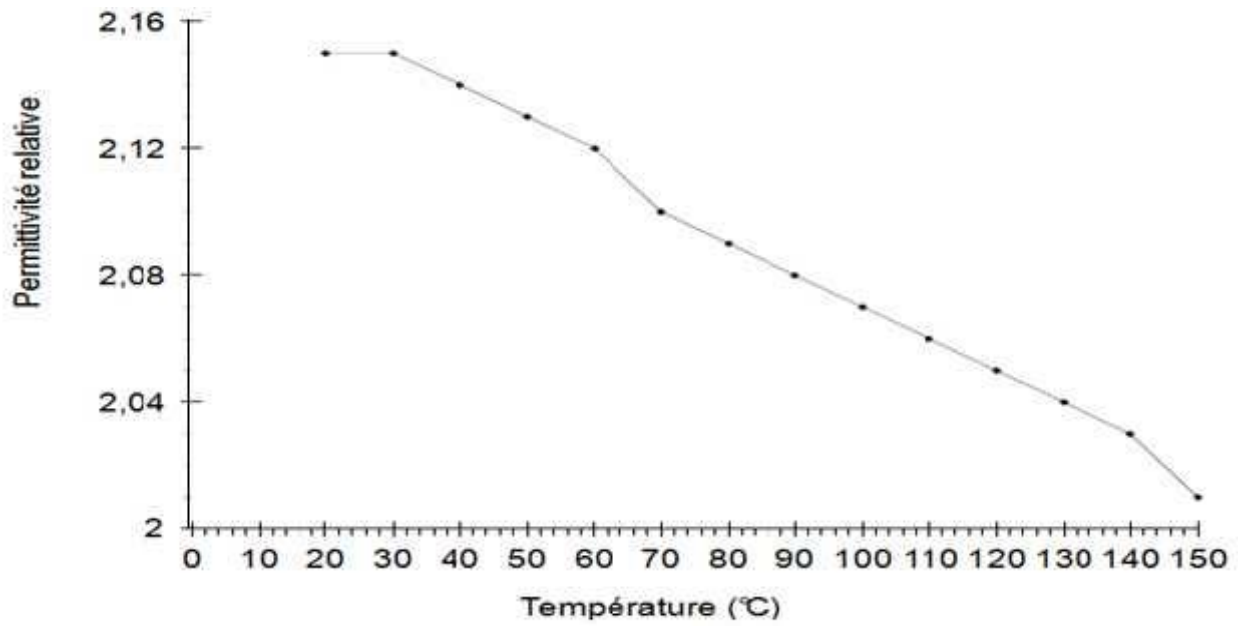


Figure I.1: Variation de la permittivité relative en fonction de la température [16].

2. Résistivité

▪ La résistivité d'huile neuve

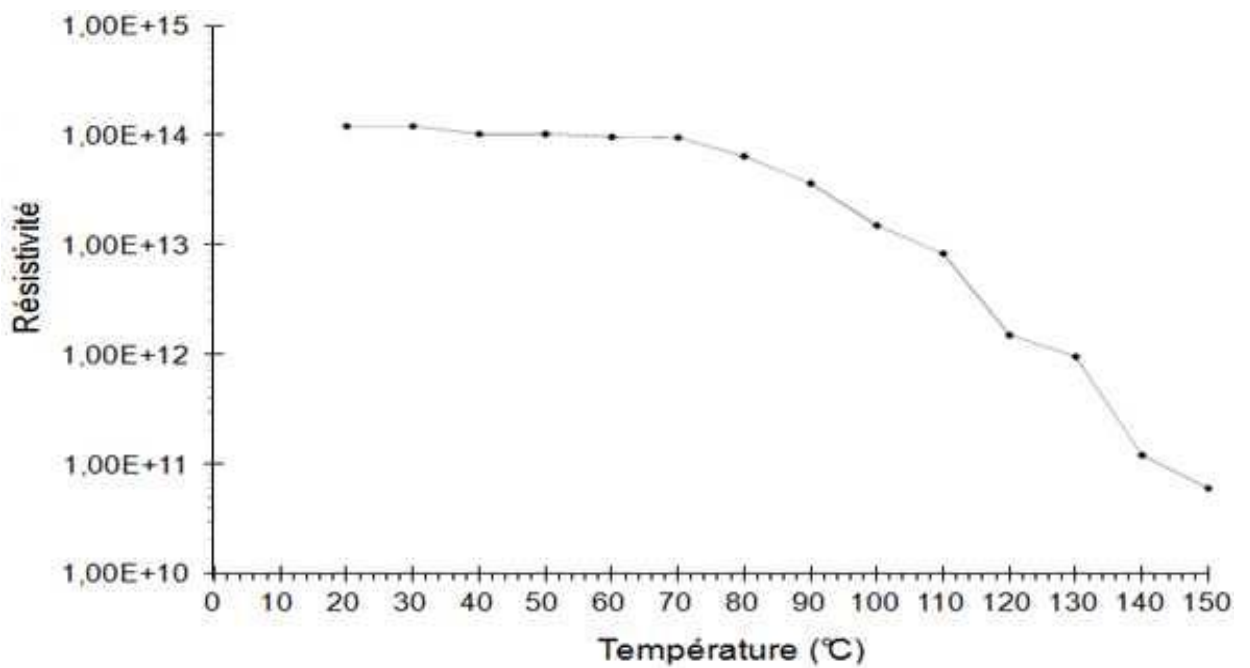


Figure I.2: Variation de la résistivité en fonction de la température [16].

### 3. Conductivité et facteur de pertes diélectriques

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est de toute évidence, la présence de courant qui traverse le liquide. Ce courant caractérisant la conductivité électrique du fluide est le résultat de déplacement des charges libres existantes (positive et négative), sous l'effet du champ électrique [19].

Aux faibles champs, la conduction présente généralement un caractère ohmique. Aux champs élevés, la conduction des isolants perd son caractère ohmique. Plusieurs théories rendent compte des courants élevés selon qu'ils sont contaminés ou non par des impuretés [15].

En pratique, pour mieux caractériser un diélectrique du point de vue pertes, il est usuel d'utiliser la tangente de l'angle de perte  $\text{tg}(\delta)$  qui est l'angle complémentaire du déphasage

entre la tension appliquée et le courant qui résulte lorsque le diélectrique se compose exclusivement du matériau isolant. Cette caractéristique est une fonction croissante de la

Sachant que beaucoup de liquides isolants ont des dipôles dans leurs structures moléculaires, la polarisation par orientation a une importance particulière. En effet, elle est la cause majeure des pertes par polarisation et responsable de la dépendance fréquentielle de  $\epsilon_r$ , et de  $\text{tg}(\delta)$  [20].

▪ La facteur de pertes diélectriques d'huile neuve

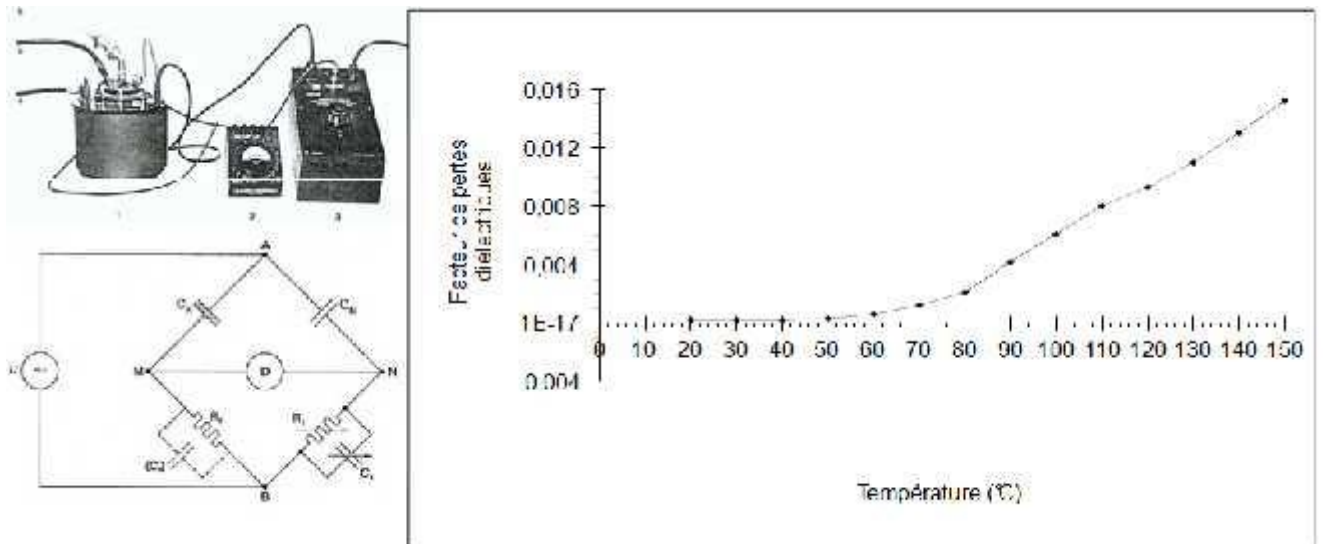


Figure I.3: Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température [16].

#### 4. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique à fréquence industrielle est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à l'huile sans décharge [15]. Comme la conductivité, la rigidité diélectrique à fréquence industrielle est une caractéristique de conditionnement du liquide mais l'est aussi de sa formulation.

Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans les conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, distance et nature sont spécifiées, d'où son nom de « tension de claquage » [19].

##### ▪ La Tension de claquage et la Rigidité diélectrique d'huile neuve

A l'état neuf, toutes les huiles ont généralement une rigidité diélectrique comprise entre 220 et 380 kV/cm.

La valeur de la tension de claquage de l'huile BORAK 22 neuve est de 63 kV. Elle correspond à une valeur de la rigidité diélectrique de 282,2 kV/cm.

Cette valeur correspond au rapport tension – distance interélectrode, multiplié par le coefficient géométrique qui est de l'ordre de 1,12 [16].

##### Comment calculer de la Rigidité diélectrique d'huile:

$$R = T * 1.12 / 0.25$$

R: rigidité diélectrique (k v /cm)

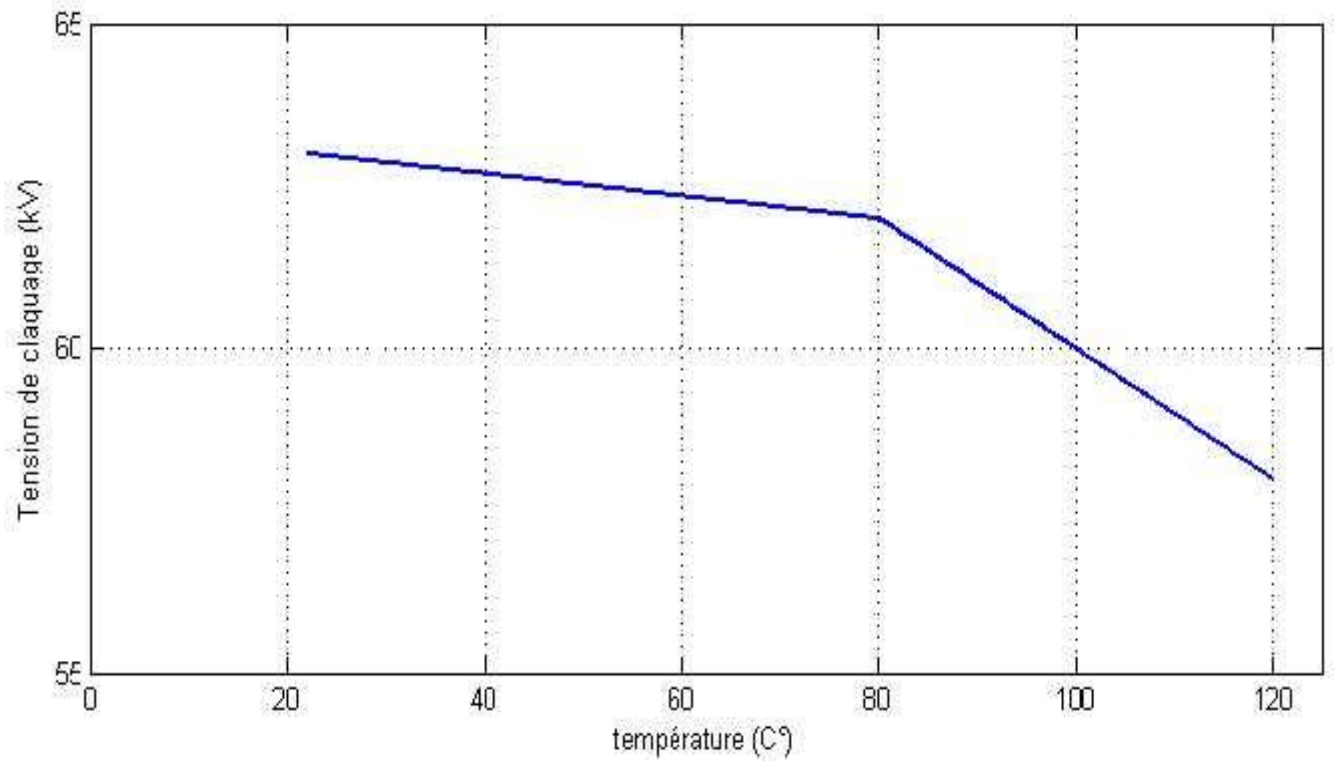
1.12 : le coefficient géométrique

T: la tension de claquage (k v)

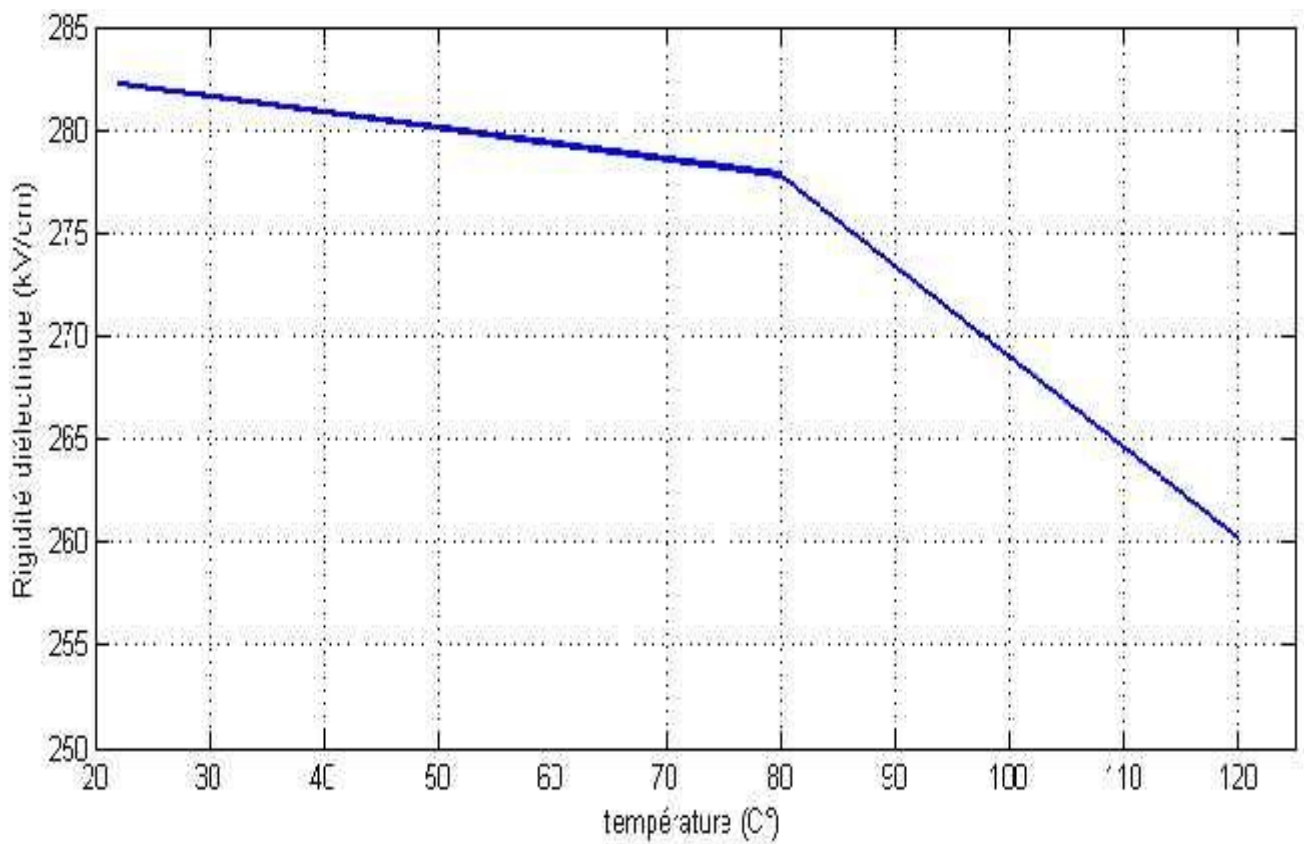
0.25 : la distance inter électrode (cm)

Etat de l'huile	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique (kV/cm)
Neuve à 22 °C	63	282,2
Vieillie à 80°C	62	277,8
Vieillie à 120°C	58	260,2

**Tableau I.1:** Variation de Tension de claquage et la Rigidité diélectrique en fonction de la température [16].



**Figure I.4:** Variation de la Tension de claquage en fonction de la température [16].



**Figure I.5:** Variation de la Rigidités diélectrique en fonction de la température [16].

## ❖ Caractéristiques d'étude d'huile

### 1. Masse volumique et coefficient de dilatation volumique

La masse volumique  $\rho_\theta$  exprimée en kilogrammes par mètre cube, est le rapport d'une masse  $m$  du liquide à son volume  $v$ , mesuré à la température  $\theta$ . Elle est déterminée à 20°C, et diminue quand la température augmente [18].

La masse volumique est obtenue à 20 °C par la formule suivante :

$$\rho_{20} = \rho_\theta [1 + \alpha_v (\theta - 20)] \quad (I.2)$$

où

$\alpha_v$  : coefficient moyen de dilatation volumique du liquide au voisinage de la température  $\theta$ .

$\alpha_v$  : est définie par:

$$\alpha_v \Delta\theta = \Delta v/v \quad (I.3)$$

et peut être déterminé à partir de deux valeurs  $\rho_{01}$  et  $\rho_{02}$  de la masse volumique ( $\rho_{01} > \rho_{02}$ )

par :

$$\alpha_v = (\rho_{01} - \rho_{02}) / \rho_{02} \Delta\theta \quad (I.4)$$

La masse volumique est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend de la composition chimique. Ainsi, les huiles minérales paraffiniques ont une masse volumique plus faible que les huiles naphthéniques.

Le coefficient de dilatation volumique  $\alpha_v$  définit la variation de la masse volumique en fonction de la température [13].

### 2. Capacité thermique massique à pression constante

Pour les huiles minérales, la capacité thermique massique à pression constante croît avec la température et décroît avec la masse volumique suivant la relation suivante [13] :

$$C_p = (1684 - 3.39\Theta) / \sqrt{\rho_{15}} [J / Kg.K] \quad (I.5)$$

avec  $\rho_{15}$ : masse volumique à 15°C.

A 20°C, la capacité thermique varie de 1000 à 2300 J / (kg.K).

### 3. Conductivité thermique

Mesurée en Watt par mètre Kelvin, elle exprime le flux thermique s'écoulant, en régime permanent sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent. La valeur moyenne est  $\lambda = 0,14 W / (m.K)$  [13, 18].

### 4. Viscosité

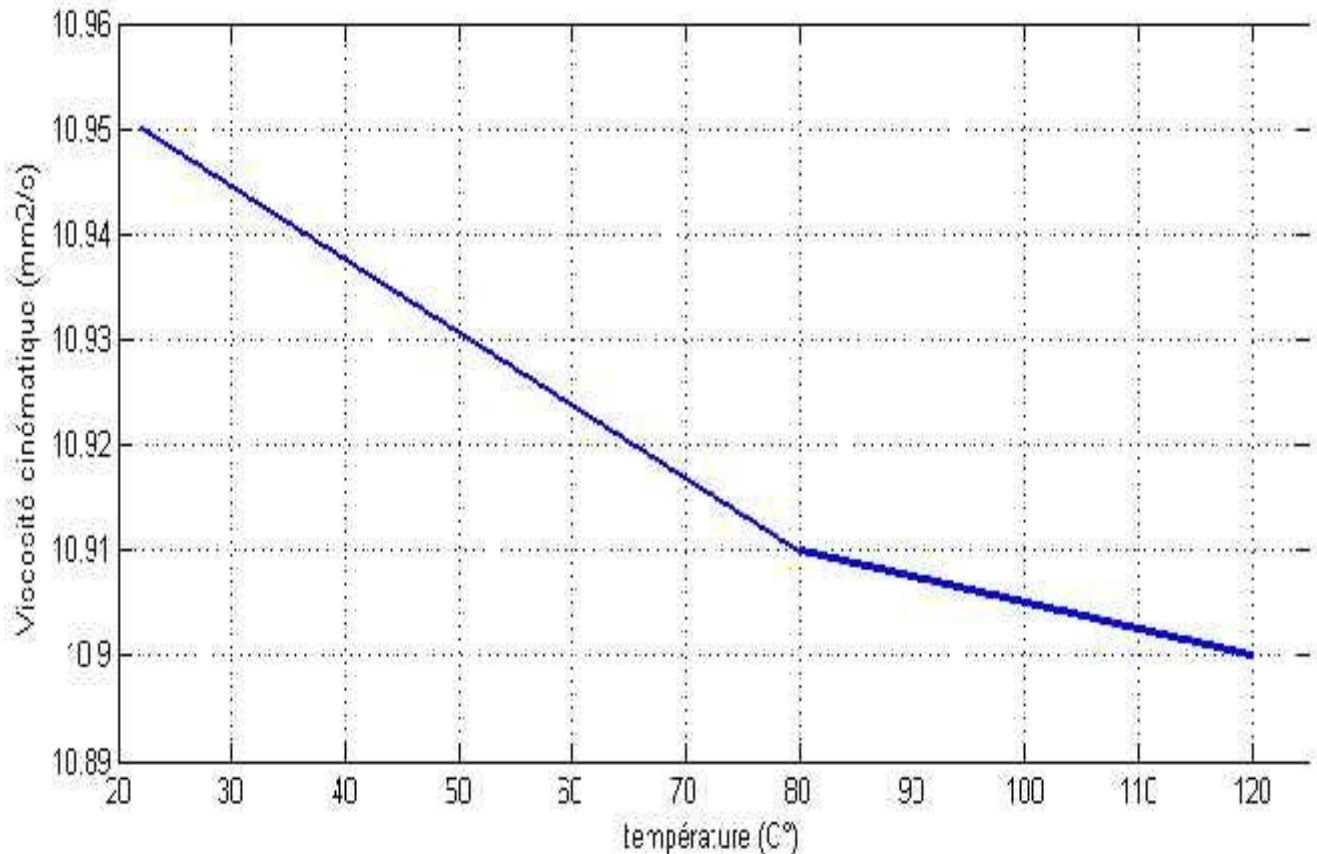
La viscosité et sa variation avec la température sont des paramètres de première importance pour le transfert thermique. En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil, pour refroidir les parties actives chaudes .

La viscosité d'un fluide traduit les forces qui opposent les molécules de ce fluide à une force tendant à les déplacer. C'est donc, la résistance au mouvement que manifeste tous les fluides. L'indice de viscosité exprime la variation de la viscosité en fonction de la température. Les huiles pour transformateur ont un indice très bas ; ce qui permet une circulation plus facile, donc un refroidissement plus efficace.

#### ▪ La viscosité cinématique d'huile neuve

Etat de l'huile	Viscosité cinématique (mm <sup>2</sup> /s)
Neuve à 22°C	10,95
Neuve à 80°C	10,91
Neuve à 120°C	10,90

**Tableau I.2:** Variation de Viscosité cinématique en fonction de la température[16].



**Figure I.6:** Variation de la Viscosité cinématique en fonction de la température [16].

### 5. Point d'écoulement

L'utilisation de matériels électriques extérieurs nécessite de connaître la viscosité des liquides à basses températures correspondant au fonctionnement en hiver ( $-25^{\circ}\text{C}$ ) ou dans des conditions climatiques extrêmes ( $-60^{\circ}\text{C}$ ).

Les liquides utilisés se figent généralement à températures pouvant aller à  $-60^{\circ}\text{C}$  (polybutènes, huiles silicones), à  $-30^{\circ}\text{C}$  (huile minérale), sans parler des liquides de synthèse ayant un haut point d'écoulement ( $+9^{\circ}\text{C}$  pour les chlorobiphényles), et des huiles pour câbles à matière non migrante dont les points d'écoulement sont de  $80$  à  $100^{\circ}\text{C}$  [21].

Le point d'écoulement est défini comme la température la plus basse, pour laquelle un liquide peut couler lorsqu'il est refroidi à des conditions fixées. Lorsqu'un liquide est refroidi, il acquiert une certaine consistance qui n'est pas la congélation, correspondant à l'état solide d'un corps pur à température fixe. Cette consistance est liée à la masse moléculaire, à la composition du liquide en mélange de différentes molécules (isomères et additifs) [21].

Les huiles à point d'écoulement plus bas sont obtenues à partir des coupes naphéniques.

## ❖ Caractéristiques de service

### 1. Solubilité des gaz

Tous les gaz se dissolvent plus au moins dans l'huile minérale, comme d'ailleurs dans les liquides. La plus grande valeur du volume de gaz qui peut être mis en solution à la saturation, s'appelle coefficient de solubilité S. Ce coefficient est défini comme étant le rapport du volume du gaz dissous au volume d'huile et est exprimé en pour-cent.

### 2. Solubilité de l'eau

Les propriétés électriques des liquides sont affectées par leur teneur en eau. Cette dernière dépend de la température et de la pression partielle d'eau dans l'atmosphère au dessus du liquide. La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de la composition chimique de celle ci. Elle croit avec la concentration en hydrocarbures aromatiques. Dans le cas d'une huile vieillie, les produits de dégradation augmentent la quantité d'eau qu'elle peut contenir [18].

### 3. Acidité et couleur

Dans les huiles neuves, on ne constate pas de présence d'acides minéraux, mais celle d'acides organiques.

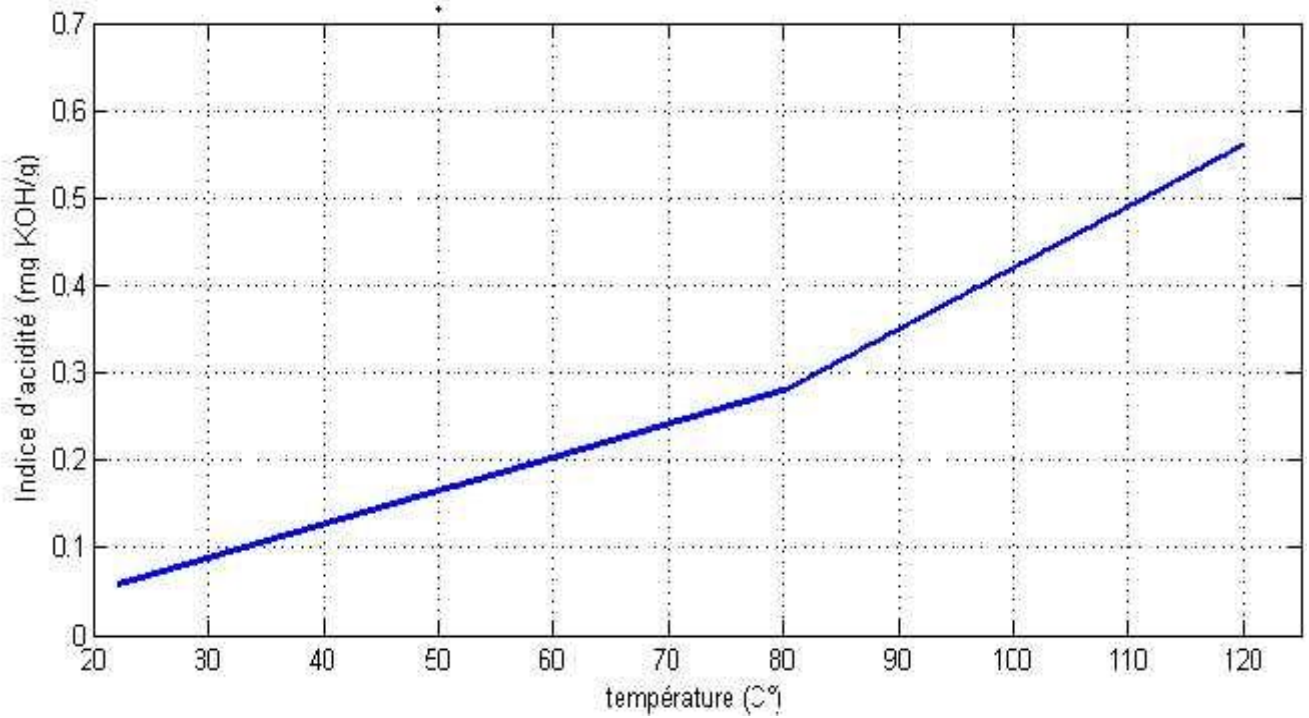
L'acidité d'une huile neuve est très faible. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante. Cette stabilité s'explique par les dépôts qui précipitent [22].

La couleur est une propriété intrinsèque de l'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 de l'huile, puisque celle-ci devient plus foncée avec l'âge [23].

#### ▪ L'Indice d'acidité d'huile neuve

Etat de l'huile	Indice d'acidité (mg KOH/g)
Neuve à 22 °C	0.058
Neuve à 80°C	0.280
Neuve à 120°C	0.56

**Tableau I.3:** Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température [16].



**Figure I.7:** Variation de la Indice d'acidité en fonction de la température [16].

▪ **La couleur en fonction d'huile neuve**

L'indice de couleur de l'huile neuve est compris entre 0,5 et 1.5

Etat de l'huile	Indice de couleur	Couleur
Neuve à 22 °C	1.5	Blanc crème
Neuve à 80°C	2.5	Citron extra pâle
Neuve à 120°C	3.5	Orange extra pâle

**Tableau I.4:** Variation de Couleur en fonction de la température [16].

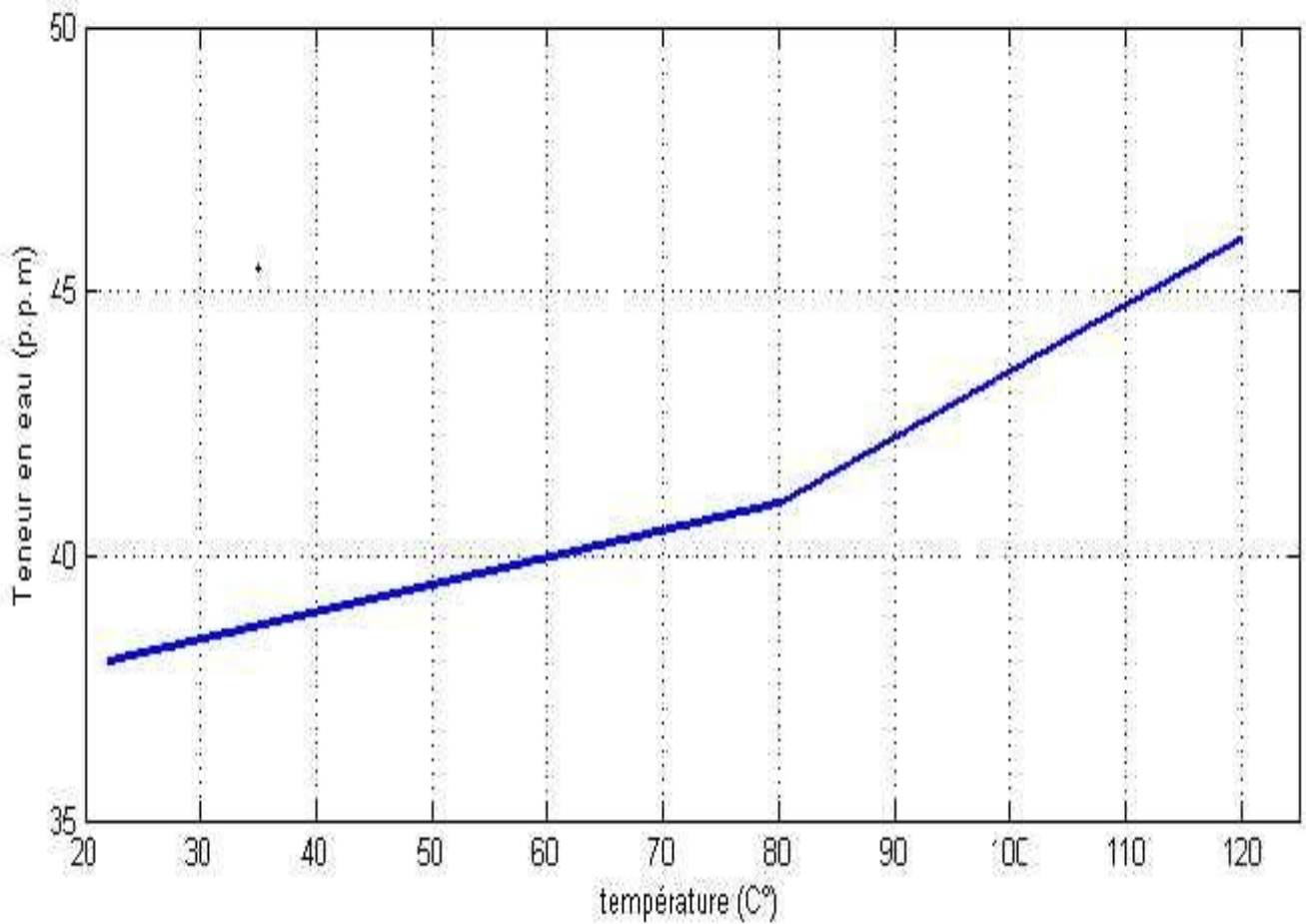
**4. La teneur en eau**

▪ **La teneur en eau de d'huile neuve**

La mesure de la teneur en eau de l'huile neuve étudiée a donné une quantité d'eau de 30 p.p.m

Etat de l'huile	Teneur en eau (p.p.m)
Neuve à 22 °C	38
Neuve à 80°C	41
Neuve à 120°C	46

**Tableau I.5:** Variation de Teneur en eau en fonction de la température [16].



**Figure I.8:** Variation de la Teneur en eau en fonction de la température [16].

## 5. Stabilité à l'oxydation

On désigne par oxydation, un ensemble de réactions complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissout. La vitesse des réactions d'oxydation croît avec la température et la concentration en oxygène. Les conséquences de l'oxydation de l'huile sur l'isolation sont [21] :

- Une mauvaise évacuation de la chaleur par augmentation de la viscosité ;
- Une augmentation des pertes diélectriques et de la conductivité ;
- Une corrosion des pièces métalliques ;
- Une dégradation plus rapide de l'isolation cellulosique.

## 6. Stabilité thermique

La stabilité thermique concerne généralement les matériaux en association avec l'huile. Cependant, la connaissance du comportement de l'huile seule présente de l'intérêt, dans le cas de points chauds hors bobinage. L'oxygène joue un rôle prépondérant dans la décomposition thermique des huiles, pour des températures de 175°C à 235°C [24].

## 7. Stabilité électrique aux décharges partielles

Sous l'action d'un champ électrique intense et par l'intermédiaire de décharges partielles dans des occlusions gazeuses qui se forment ou qui préexistent, les liquides se décomposent en donnant des gaz. La stabilité électrique, désignée sous le vocable Gassing, s'évalue par le coefficient de Gassing G. Deux méthodes indiquent, suivant les conditions d'essai, si les isolants liquides sont des absorbeurs ou des émetteurs de gaz. Le comportement au gassing d'un isolant liquide est particulièrement fonction de sa composition chimique, mais des variations de certains paramètres d'essais peuvent modifier les résultats de façon considérable. Ces deux méthodes se différencient par leurs conditions d'essais.  $G_A$  exprimé en millimètres cube par minute est positif ou négatif suivant qu'il y ait émission ou absorption de gaz. Dans le cas d'arc électrique, et donc de températures très élevées (supérieure à 2000°C), il n'y a pas de liquides qui puissent résister. La nature des gaz formés et leurs proportions relatives permettent de caractériser la sévérité de la contrainte [25].

## ❖ Sécurité d'emploi

La sécurité d'emploi des liquides isolants concerne les risques d'incendies et d'explosions, dont ils pourraient être la cause de la santé des individus et les risques pour l'environnement. Le danger d'incendie repose sur des caractéristiques d'inflammabilité (point d'éclair, point de feu, température d'auto inflammation) et certaines caractéristiques de combustion (indice d'oxygène, quantité de chaleur dégagée). Le danger d'explosion est lié à la nature des gaz produits par décomposition des liquides sous arcs électriques et points chauds, hydrogène, méthane et acétylène étant les principaux gaz concernés.

### 1. Point d'éclair et point de feu

Le chauffage progressif d'un liquide provoque le dégagement de vapeurs suivant sa courbe de tension de vapeur, qu'il s'agisse d'un corps pur ou d'un mélange. Dès que la concentration de ces vapeurs dans l'atmosphère surmontant le liquide, devient suffisante pour former un mélange inflammable, elles brûlent à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée le point d'éclair du liquide [18].

En poursuivant le chauffage, l'expérience montre qu'une combustion permanente s'établit en présence d'une flamme à partir d'une certaine température qui correspond au point de feu du liquide. Les liquides ininflammables n'ont pas de point de feu.

### 2. Température d'auto- inflammation

La température d'auto-inflammation d'un liquide est la température minimale à laquelle se produit une combustion instantanée, elle peut être supérieure à celle du point d'éclair. Cette température correspond au comportement d'un liquide dans un incendie, alors que le point de feu caractérise des limites thermiques de service (par exemple, 105 °C pour une isolation papier-huile) [18].

### 3. Caractéristiques de combustion

Le point de feu permet de distinguer les liquides inflammables et les liquides ininflammables, situation simple quand la construction électrique disposait seulement d'huiles minérales et d'Askarels. L'interdiction des Askarels et l'apparition de liquides de remplacement pose le problème de l'inflammabilité en termes nouveaux. Ces liquides de remplacement ont un point de feu élevé (> 300 °C) qui peut réduire les risques d'incendie, mais, quoique dits peu inflammables, ils n'en brûlent pas moins et leur comportement dans les matériels pris dans un incendie pose problème. Pour

répondre à cette interrogation, les caractéristiques de combustion (indice limite d'oxygène, capacité thermique de combustion, dégagement de fumées) sont maintenant considérées, associées en outre à la corrosivité des produits de combustion et à leur toxicité .

#### **I.2.3.4. Huiles minérales isolantes usagées**

##### **❖ Définition**

Une huile usagée est conventionnellement définie comme étant une huile qui ne remplit plus tous les rôles qui lui sont assignés ; c'est donc une huile qui a perdu certaines de ces qualités ou de ces caractéristiques du fait de son utilisation. La détérioration de l'huile en service résulte non seulement de la dégradation de quelques additifs améliorant ses caractéristiques, mais également de la présence de contaminants d'origine extérieure à l'huile.

##### **❖ Altération des huiles en service**

En service, l'huile quelque soit sa qualité et sa stabilité, qu'elle soit inhibée ou non, finit par s'oxyder et s'altérer. Le maintien de l'huile altérée en exploitation peut constituer un danger potentiel. L'altération de l'huile se traduit par l'oxydation de cette dernière et par une augmentation accentuée de son acidité.

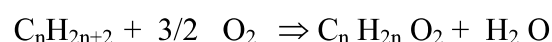
##### **❖ Facteurs favorisant l'altération de l'huile minérale isolante**

Les contaminants d'une huile minérale isolante usagée peuvent se diviser en trois grandes classes.

#### **1. Produits volatils**

Les produits volatils les plus communs des huiles en service sont :

**a- L'eau** : la présence de l'eau dans l'huile peut avoir des origines diverses. Elle peut provenir de la condensation de l'air atmosphérique et des réactions chimiques d'oxydation. En effet, au contact d'une atmosphère humide, l'huile se charge d'humidité dans une proportion égale par rapport à la saturation et la réaction d'oxydation est [10] :



L'eau peut se présenter sous forme dissoute ou libre. Sa solubilité dépend de la température, elle augmente avec cette dernière. Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau- huile [21].

**b- L'air** : la solubilité des gaz dans l'huile dépend de la pression de la phase gazeuse. Les bulles d'air peuvent présenter un risque sur l'isolation papier-huile [21].

**c- Gaz dissous** : Les différentes catégories de gaz dissous proviennent de la décomposition de l'huile. Les gaz sous forme de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> sont susceptibles de se libérer sous l'effet d'un champ électrique intense, provoquant alors l'apparition de décharges partielles et la formation de nouveaux produits de dégradation [26].

Les huiles minérales renferment un certain nombre de gaz, parmi lesquels l'oxygène qui provoque une oxydation de l'huile d'autant plus rapide que la température est élevée. Cette oxydation entraîne la formation de produits acides et dans une phase ultérieure, de dépôts solides, en partie solubles dans l'huile, mais qui augmentent sa viscosité et peuvent se déposer sur les isolations avec lesquelles l'huile est en contact. Les produits d'oxydation sont toujours des peroxydes, produits éminemment instables amorçant de véritables réactions en chaîne, souvent nommés « oxydation autocatalytique » [26].

## **2. Produits insolubles dans l'huile minérale isolante**

Les produits insolubles proviennent de l'oxydation de l'huile, de la dégradation du papier isolant (carbone), des usures mécaniques (métal, oxydes métalliques) et de l'air ambiant (poussières). En service, les produits insolubles sont entraînés par l'huile en circulation et finissent par se déposer sur les parois des canaux de circulation et sur les conducteurs. En raison de leur conductivité très faibles, ils ralentissent les échanges thermiques entre l'huile et les différents organes à refroidir, tout en provoquant en ce point des échauffements exagérés. Le retrait de ces produits insolubles pose, en général, moins de problèmes que les produits volatiles et solubles [17].

## **3. Produits solubles dans l'huile minérale isolante**

Les produits solubles correspondent à l'ensemble de la famille des corps formés par oxydation, des produits réactifs, aux acides et non acides, des résines et des asphaltes [21].

#### **4. Facteur favorisant la formation de gaz**

Dans un appareil dont l'isolation comporte de l'huile, la présence de points trop chauds, de décharges partielles ou d'un arc électrique se traduisent par la décomposition de l'huile et la formation de gaz. Ces gaz, en partie se dissolvent dans l'huile et en partie s'en dégagent, pour venir se rassembler soit en certain points de l'appareil, soit comme c'est souvent le cas dans des accessoires spécialement conçus pour les collecter. La nature des gaz formés, leurs proportions relatives, la vitesse du dégagement gazeux varient avec la nature et l'intensité du défaut qui leur donne naissance et d'autre part avec la constitution de l'isolation détériorée. L'analyse des gaz dégagés ou dissous peut donc, dans une certaine mesure servir à caractériser le défaut et sa gravité.

##### **➤ Décharges partielles**

Les gaz formés par les décharges partielles dans l'huile contiennent de l'hydrogène en très grande proportion et de petites quantités d'hydrocarbures [22].

##### **➤ L'arc électrique**

Les gaz formés par la présence d'un arc électrique dans l'huile contiennent surtout de l'hydrogène, du méthane, de l'éthylène et de l'acétylène. Dans le cas d'un arc grêle, la composition se rapproche de celle des gaz de décharges partielles, c'est à dire que l'hydrogène prédomine : quand l'intensité de l'arc augmente, le mélange s'appauvrit en hydrogène et s'enrichit en hydrocarbures (méthane, éthylène, acétylène) [22].

##### **➤ La chaleur**

La décomposition thermique de l'huile conduit à la formation d'hydrogène et d'hydrocarbures gazeux en même temps qu'elle libère l'air dissous [22].

#### **❖ Rappels sur la régénération des huiles minérales isolantes usagées**

La régénération est un ensemble de procédés permettant la production à partir d'une charge d'huile usagée, une ou plusieurs huiles de base. Le recyclage des huiles usagées permet l'économie de recourir à la consommation de nouvelles quantités d'huiles neuves. Par conséquent, la régénération se présente comme étant une autre forme d'économie d'énergie et de lutte contre la pollution de l'environnement.

## 1. Principe général de la régénération

Les opérations successives pour l'obtention d'un produit de haute qualité, constituent une nouvelle forme de raffinage de l'huile usagée. Ce cycle comprend habituellement les phases successives dans l'ordre suivant [17] :

- a. **la décantation** qui a pour but d'éliminer les corps solides, les grosses impuretés et l'eau libre.
- b. **La séparation des impuretés** en suspension dans l'huile. Cette opération représente à l'heure actuelle la phase la plus difficile de la régénération. En effet, les particules très fines qui sont en suspension dans l'huile, demeurent insensibles par rapport aux anciens procédés de précipitation des sédiments par rupture de la suspension colloïdale ou par électrolyte tel que le silicate de soude.
- c. **La déshydratation** qui a pour but d'éliminer l'eau par chauffage à une température de 150°C. On peut aussi utiliser un desséchant à savoir le  $\text{CaCl}_2$
- d. **Le traitement à l'acide** conduit à la floculation des suspensions carbonées et la sulfonation des produits oxydés, mais sans qu'il en résulte une attaque sur l'huile même. Ce traitement s'opère sur l'huile chauffée à une température de l'ordre de 30°C à laquelle est ajoutée 4% en volume d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  à 90-92%. Ces produits sont mélangés soit au préalable, soit directement dans un bac de décantation à fond conique. Les boues acides sont précipitées au fond du bac et séparées de l'huile épurée. L'huile épurée fera l'objet de traitements ultérieurs. Ces traitements permettent la réduction des teneurs en métaux provenant des additifs et de l'usure mécanique à quelques PPM (parties par millions) dans l'huile régénérée.
- e. **La neutralisation** de l'huile intervient après le traitement à l'acide. En effet, l'huile épurée contient encore des acides de différentes sortes, en particulier sulfonique et petites particules d'acide sulfurique. La neutralisation a pour but de transformer les restes acides dans l'huile épurée en sels. A cet effet, la soude et le carbonate de chaux à 1% en poids sont généralement utilisés.
- f. **Le passage à la terre** est une opération qui se fait dans une cuve conique munie d'un agitateur. Elle précède directement le mélange de l'huile à la terre activée. Après neutralisation l'huile est malaxée avec 1 à 10% de terre activée durant 15 à 20 minutes, à une température variable entre 80 et 100°C. En fin l'huile mélangée est filtrée à travers des filtres presse. Ce traitement permet d'améliorer leurs qualités par décoloration et élimination des produits aisément oxydables.

### I.3. Conclusion

Évalué en terme de risques, la nécessité de surveiller les transformateurs en service, est d'une première importance. Les techniques actuelles les plus puissantes pour évaluer l'état d'un transformateur sont fondées sur l'analyse physico-chimique des différentes propriétés de l'huile. En effet, pour assurer la continuité de fonctionnement de l'appareil, l'huile isolante doit avoir les qualités suivantes [27] :

- Forte rigidité diélectrique .
- Stabilité thermique dans une large gamme de température .
- Grande pureté, ce qui entraîne une homogénéité et une bonne reproductibilité de la rigidité diélectrique .
- Non polaire, ce qui conduit à une faible dissociation d'espèces et conduit à une faible contamination .
- Non toxique et biodégradable, et donc conforme à la loi en vigueur sur la protection de l'environnement .
- Grand indice d'aromaticité, ce qui lui .

**Chapitre II**  
**Le claquage**  
**dans les**  
**isolantes liquide**

## II.1. Introduction

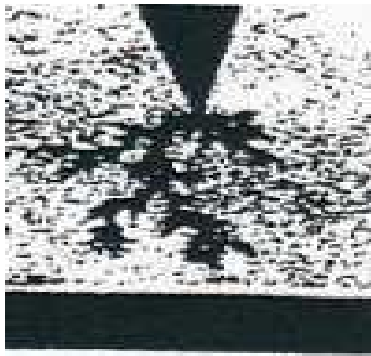
Les isolants liquides ont une grande importance dans la technique de haute tension, car ils jouent un double rôle : isolation et refroidissement. On doit leur intégration en tant que diélectrique en 1887 par G. Westinghouse. Les huiles hydrocarbures sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie des transformateurs de puissance [34].

Ils présentent une bonne rigidité diélectrique (plusieurs fois supérieure à celle des gaz), des permittivité et pertes diélectriques très faibles ( $\epsilon_r = 2 \text{ à } 2.5$  et  $\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$ ). Cependant, leur principal inconvénient est leur inflammabilité, sans compter d'autres problèmes liés à la santé publique dont font l'objet les PCB (polychlorobiphényles) [35].

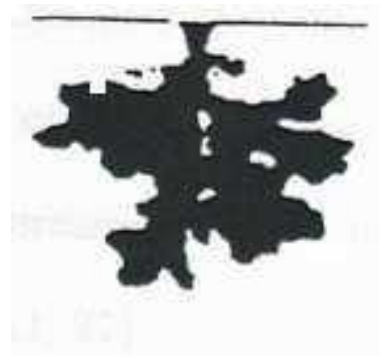
Les études sur le mécanisme de la conduction et du claquage dans les liquides se sont développées de façon considérable depuis quelques décennies, car ces processus ont une grande importance dans de nombreux domaines contemporains de la physique, de la chimie, de l'électrotechnique et de la radiobiologie. Ces études sont étroitement liées à d'autres domaines très importants, comme la physique des plasmas, les semi-conducteurs, la physique et la technique de la résistance des matériaux au claquage électrique, etc ... [2].

Le claquage des isolants liquides diffère fondamentalement de celui des gaz, et des solides. Dans les huiles techniquement pures, le claquage est dû essentiellement à la présence d'impuretés, au phénomène de vieillissement, ou encore à la charge d'espace.

Durant ces dernières décennies, des progrès importants ont été réalisés en matière d'explication du mécanisme de décharges dans les huiles. En effet, il est généralement admis que le claquage d'un isolant liquide est précédé d'une phase de préclaquage. Cette dernière comporte deux phases : une phase de génération et une phase de propagation. La phase de génération correspond à l'apparition d'une perturbation dans le liquide soumis à un champ élevé, dont l'indice de réfraction diffère de celui du liquide. Cette perturbation évoluant en streamer prend naissance au voisinage de l'électrode acérée, se propage dans le liquide et conduit au claquage. En général, dans les liquides purs et pour un système d'électrodes pointe-plan, les streamers positifs (produits lorsque la pointe est anode) sont filamenteux (Figure II.1.a), et leur vitesse moyenne est supérieure ou très supérieure (2 à 50 fois) à celle des streamers négatifs ; elle excède la vitesse du son (environ 1 km/s) dans la plupart des liquides et peut atteindre 100 km/s. Les streamers négatifs sont plutôt lents et leur allure rappelle celle des buissons (Figure II.1.b) [36].



(a) Pointe positive



(b) Pointe negative

**Figure II.1:** Formes des streamers dans le cyclohexane [tension appliquée :  $U=40$  kV, distance inter-électrodes :  $L=2$  mm, rayon de courbure de l'électrode pointe :  $r_p=3$   $\mu\text{m}$ ][36]

## II.2. Mécanismes de claquages dans les diélectriques liquides

Deux conceptions théoriques différentes du claquage dans les diélectriques liquides ont été avancées. La première est basée sur le phénomène de l'ionisation par avalanche dans le liquide (comme dans les gaz), et la seconde sur le phénomène d'ionisation par avalanche dans les bulles d'air et de vapeur incluses dans le liquide qui, éventuellement, prennent naissance lors de fortes impulsions de courants qui précèdent le claquage. En présence d'impuretés, le claquage peut intervenir suite à l'établissement d'un pont de particules entre les électrodes [2].

### II.2.1. Mécanisme de multiplication électronique

Les premiers travaux proposaient d'adopter les résultats acquis dans les gaz, pour expliquer le claquage dans les diélectriques liquides. Ils supposèrent que des mécanismes d'ionisation de type  $\alpha$  basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications électroniques, intervenaient dans le claquage des diélectriques liquides.

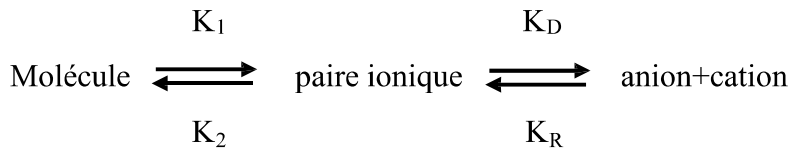
Le processus de multiplication électronique a été proposé à l'origine par Townsend, pour décrire les phénomènes d'amorçage dans les gaz. Ce processus est une conséquence de l'accélération d'un ou plusieurs électrons par le champ, sur une distance égale au libre parcours moyen. Le gain d'énergie acquis par ces charges permet l'ionisation à la suite de collisions, d'une ou plusieurs molécules [3].

La connaissance de la conduction des liquides s'est améliorée, quand les liquides polaires tels que le nitrobenzène, ont été étudiés. L'aspect chimique des phénomènes de conduction et ses relations avec l'électrochimie furent alors les premiers compris. Plus tard les notions de cinétiques électrochimiques furent appliquées avec succès aux liquides polaires et non polaires [37].

La conduction électrique des liquides a pu être parfaitement comprise à partir du moment où des mesures de distribution du champ électrique entre les électrodes ont été faites à différents instants sous tension. On a pu alors connaître la provenance des porteurs de charge et leur vitesse de déplacement [17].

Les porteurs de charge sont créés au sein du liquide (création en volume) ou aux électrodes. En volume, l'apparition de nouveaux porteurs est due à une réaction que l'on peut schématiser comme suit [17] :

Une molécule neutre se dissocie en ions libres (monovalent) selon le processus suivant :



L'étape de formation de la paire ionique dépend du processus chimique plus au moins complexe.

Les constantes de vitesses  $K_1$  et  $K_2$ , indépendantes du champ électrique ne sont pas calculables à l'aide de modèle simple. Par contre, la formation des paires d'ions résultant des interactions coulombiennes  $K_R$  et de dissociation  $K_D$  de deux charges de signe opposé en interaction électrostatique peuvent être calculées [17].

L'application d'un champ électrique dans le liquide modifie les énergies d'interaction entre les ions dans le liquide. La théorie cinétique exacte du champ sur la dissociation des paires, est due à Onsager. Elle prévoit que  $K_D$  varie avec la valeur absolue du champ alors que  $K_R$  est indépendante du champ [24].

Des porteurs de charges peuvent être aussi créés aux électrodes, soit par décharge des ions du liquide sur les électrodes, soit par création de nouveaux ions. La décharge d'ions cause la formation dans le liquide, d'une charge d'espace de signe opposé (hétérogène) à l'électrode voisine, alors que l'injection s'accompagne d'une charge d'espace de même signe (homocharge). L'échange de charges à l'électrode peut donc être caractérisé par la mesure du champ électrique près des électrodes [38].

La décharge des ions ne pose pas de problèmes, ni théoriques car elle semble toujours se produire, ni pratique car elle élimine les ions de la solution. Par contre, l'injection qui est responsable de l'accroissement très rapide de la conduction des liquides aux champs élevés, dépend beaucoup du système liquide-électrodes [37].

Plusieurs mécanismes de création d'ions peuvent être envisagés [37] :

- Injection d'électrons par la cathode et capture des électrons : les liquides ne sont pas suffisamment purs dans leurs conditions d'utilisation, pour que leur conduction soit électronique et les électrons soient immédiatement piégés par des composés accepteurs d'électrons ( $O_2, \dots$ ) .
- Ionisation du liquide .
- Réaction électrochimique.

La formation d'avalanches électroniques dans un liquide, susceptibles de conduire au claquage (comme dans les gaz) a été très controversée. Plusieurs arguments sont en défaveur d'une telle hypothèse. Dans la plupart des liquides [39] :

- Le libre parcours moyen  $l_m$  est vraisemblablement de l'ordre des dimensions intermoléculaires (quelques dizaines de manomètres), donc très inférieur à celui d'un électron dans un gaz à pression atmosphérique .
- Une pression de quelques bars a un effet remarquable sur l'apparition des streamers, d'autant plus que de telles pressions sont incapables d'agir sur le libre parcours moyen des électrons dans les liquides, quasiment incompressibles.

### **II.2.2. Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse**

Dans les liquides ultra purs et en géométrie pointe-plan, sous tension continue, il a été observé qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan. Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation des bulles, soit de la cavitation. Certains auteurs supposent que les cavités gazeuses existent à priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités [39].

#### **II.2.2.1. Mécanisme thermique**

Le mécanisme thermique se traduit par le phénomène d'ébullition locale du liquide suite à une dissipation d'énergie, associée à de fortes impulsions de courant, à partir d'aspérités de l'électrode pointe.

Watson et Sharbaugh, partisans de l'opinion qui stipule que suite à une grande concentration d'ions près des électrodes, des échauffements locaux du liquide peuvent faire apparaître des bulles de vapeurs [2]. Le courant correspondant à l'injection de charges à partir de la cathode serait limité par la charge d'espace. Ce courant est donné sous forme suivante :

$$I = A V^n \quad (\text{II.1})$$

$$A = \text{Cste} \quad \text{Et } 1.5 < n < 2$$

Le champ de claquage  $E_c$  est lié à l'énergie  $W$  nécessaire à la vaporisation du liquide par la relation :

$$W = cte E_c^n \tau \quad (\text{II.2})$$

Avec  $\tau$  : temps de séjour du liquide dans la région de champ fort.

D'autre part, pour vaporiser un volume de liquide donné, il faut lui fournir une énergie :

$$W = C_p (T_b - T_a) + L_v \quad (\text{II.3})$$

$C_p$  : Capacité thermique massique à pression constante ;

$T_b$  : Température d'ébullition ;

$T_a$  : Température ambiante ;

$L_v$  : Chaleur latente de vaporisation à volume constant.

### II.2.2.2. Mécanisme de cavitation

Un liquide soumis à une dépression à température constante donnera naissance à une bulle, si la pression devient inférieure à sa pression de vapeur saturante [12].

L'application d'un champ électrique au liquide peut engendrer une dépression soit par [12] :

- Le phénomène d'électrostriction du liquide, là où le champ est renforcé.
- La mise en mouvement du liquide.

### 1. Cavitation d'origine électrique

Le modèle est basé à la fois sur l'existence de particules en suspension et sur la formation de bulles par cavitation. Il prévoit les variations du champ disruptif avec la pression du liquide étudié.

Il assimile les zones instables à des bulles qui se formeraient en des points de pression nulle, liées à des particules solides en suspension ou éventuellement aux électrodes. Le phénomène de cavitation est d'origine électrique, c'est à dire que ce sont les forces inter-faciales d'origine électrique qui auraient tendance à soulever le liquide, des électrodes. Le décollement est si rapide que la cavité formée serait du vide. Le métal (coté cathode) émettrait des électrons dans la cavité. Ces électrons, accélérés par le champ électrique, bombarderaient le liquide dissipant ainsi, lors de l'impact, une énergie suffisante pour vaporiser assez de liquide pour que la bulle puisse se développer. Le claquage se produira lorsque la bulle aura dépassé une taille limite, désignée sous le nom de taille critique [3].

## 2. Cavitation électrohydrodynamique

L'apparition d'une phase gazeuse pourrait résulter d'une cavitation due à une dépression locale dans le liquide. Cette dépression est induite par la mise en mouvement du liquide, sous l'effet d'une tension appliquée au système. Les écoulements peuvent atteindre une vitesse [3] :

$$V_{EHD} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} \quad (\text{II.4})$$

en un temps

$$t \cong \frac{\eta}{\epsilon E_0^2} \quad (\text{II.5})$$

ou

$\epsilon$  : Permittivité du liquide ;

$\eta$  : Viscosité du liquide ;

$E_0$  : Champ sur la pointe.

Ce mouvement induit une dépression dans le liquide donnée par la relation suivante :

$$\Delta p = (1/2) \rho V_{EHD}^2 \quad (\text{II.6})$$

$\rho$  : Masse volumique du liquide

$V_{EHD}$  : Vitesse d'écoulement électrohydrodynamique.

La dépression pourrait être suffisante pour générer une bulle par cavitation électrohydrodynamique.

### II.2.3. Mécanisme de claquage par pont

Les grands volumes de liquides, utilisés dans l'industrie électrique, contiennent généralement des impuretés sous forme de particules en suspension : fibres, poussières, débris métalliques, gouttelettes d'eau, bulles de gaz,... Ces particules (isolantes ou conductrices) présentes dans le liquide, sont responsables d'une diminution significative de sa rigidité diélectrique [35]. Sous l'action d'un champ électrique, les particules sont attirées vers les zones de champ intense pour former des ponts entre les électrodes, facilitant ainsi le claquage du liquide [34]. Dans le cas des particules déformables (bulles de gaz, gouttelettes d'eau), le claquage peut intervenir suite à l'élongation de ces particules reliant ainsi les électrodes par un canal, après ionisation.

#### II.2.3.1. Origine des particules

Du point de vue de leur origine, les particules de faibles dimensions présentes dans les transformateurs peuvent être classées en trois catégories :

- Particules existant initialement dans l'huile de remplissage de la cuve .
- Particules qui apparaissent ensuite dans l'huile provenant des éléments du transformateur, comme les enroulement, les circuits magnétiques et autres parties solides et qui s'étaient trouvées fixées sur ceux-ci lors des opérations d'assemblage .
- Particules apparaissant durant le service.

Les particules existant dans l'huile neuve sont très fines et ne sont pas éliminées par les opérations de filtrage et de rinçage. Il peut s'agir d'impuretés du pétrole brut lui même ou d'impuretés pouvant avoir été introduites durant les opérations de raffinage.

Les particules introduites durant les opérations de fabrication et d'assemblage, comprennent des fibres de cellulose, des particules de résine, de métal (acier, aluminium, cuivre) et des poussières.

#### II.2.3.2. Teneur des particules

D'après une analyse quantitative des particules recueillies en filtrant une huile de transformateur, 94% étaient combustibles (c'est à dire constituées de fibres de cellulose), le reste étant constitué de matériaux ou de poussières. Durant le service, la teneur en particules, telles que les fibres de cellulose, de métal et de résine, doit vraisemblablement augmenter lentement par suite de vieillissement des métaux et de l'usure due à la circulation forcée de huile pour le refroidissement. En outre, en cas de situation anormale, comme l'échauffement local ou l'existence de décharges partielles, la teneur en particules de carbones tend à augmenter [24].

### II.2.3.3. Rôle des particules dans le claquage

La présence d'impuretés dans les liquides isolants conduit au renforcement local du champ électrique. La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme [24] :

- Formes, dimensions, permittivité et conductivité des impuretés .
- Concentration des impuretés entre les électrodes .
- Intervalles et formes des électrodes .
- Valeurs des charges libres existant à la surface des particules.

#### a. Particules isolantes

Les particules isolantes, ayant la permittivité plus grande que celle du liquide, seraient attirées sous l'action du champ électrique vers les régions de champ intense et formeraient des ponts entre les électrodes. La rupture, dans ce cas, serait le résultat soit de l'échauffement produit par effet joule dans le pont qui est plus conducteur que le liquide, soit par la grande intensité locale du champ qui apparaît juste avant l'achèvement du pont.

#### b. Particules conductrices

Les particules conductrices peuvent se charger facilement au contact d'une électrode et transporter leur charge sur l'autre électrode. Lorsque la distance entre la particule et l'électrode ayant le signe opposé est très petite, le champ est si élevé qu'une microdécharge s'amorçant entre la particule et l'électrode déclencherait la rupture.

La rupture diélectrique est en général précédée par des phénomènes impulsions appelés « prédistruptifs » ou « préclaquage ».

### II.2.4. Longues décharges dans les liquides

Dans un liquide, des intervalles de quelques centimètres sont considérés comme longs intervalles. Le mécanisme d'évolution des décharges pour de tels intervalles est similaire dans ses caractéristiques générales, à celui observé dans l'air pour des intervalles de l'ordre de quelques mètres. Ce mécanisme est appelé comme dans le gaz : mécanisme de streamer- leader [5, 38, 40].

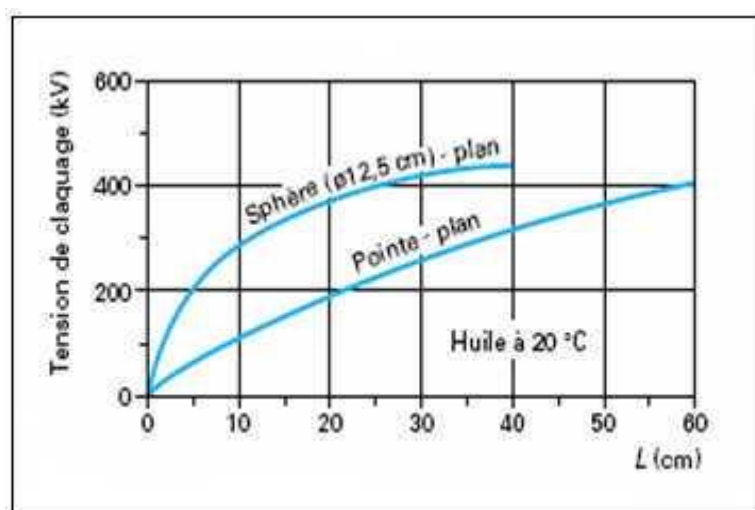
L'étude des mécanismes de streamers n'a cessé de se développer. De nombreux travaux ont porté sur la progression des streamers dans des géométries divergentes [36, 41]. Il est généralement admis que quelque soit la géométrie et la polarité des électrodes, le claquage est précédé d'une phase de préclaquage pouvant être elle même séparée en deux [36] :

- Une phase de génération ou peuvent se manifester simultanément ou successivement des phénomènes de diverses natures (électrique, optique, hydraulique,...), caractérisée par un temps  $t_g$  dit de génération, pendant lequel apparaît au voisinage d'une électrode, une perturbation revêtant la forme d'arborescence dénommée « streamer » dans la formulation anglaise.
- Une phase de propagation durant laquelle se développe la perturbation précédemment créée. Cette phase a été de loin la plus étudiée et est caractérisée par un temps  $t_p$  dit de propagation.
- Les streamers sont caractérisés par leur indice de réfraction qui est différent de celui du liquide. Ils produisent des courant et émettent de la lumière, de même que leur propagation est accompagnée d'ondes de choc quelle que soit leur vitesse.

### II.3. Facteurs influant sur la rigidité diélectriques des liquides

#### II.3.1. Paramètres électrogéométriques

L'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la tension de claquage [2, 9, 11, 38] (Figure II.2). Par ailleurs la rigidité diélectrique du liquide diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes [21]. En champ non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain niveau, une densité d'énergie sous forme d'impulsions est injectée à partir d'aspérités de la pointe. Le rayon de courbure de la pointe joue un rôle important sur la nature et la durée des phénomènes prédisruptifs, plus ce rayon est faible, plus l'intensité du champ électrique obtenu est considérable.



**Figure II.2** : Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan [38]

### II.3.2. Pression hydrostatique

Il est connu depuis longtemps que la pression hydrostatique a un effet considérable sur la tension de claquage des diélectriques liquides ; celle-ci est d'autant plus élevée que la pression est accrue [42, 43].

### II.3.3. Température

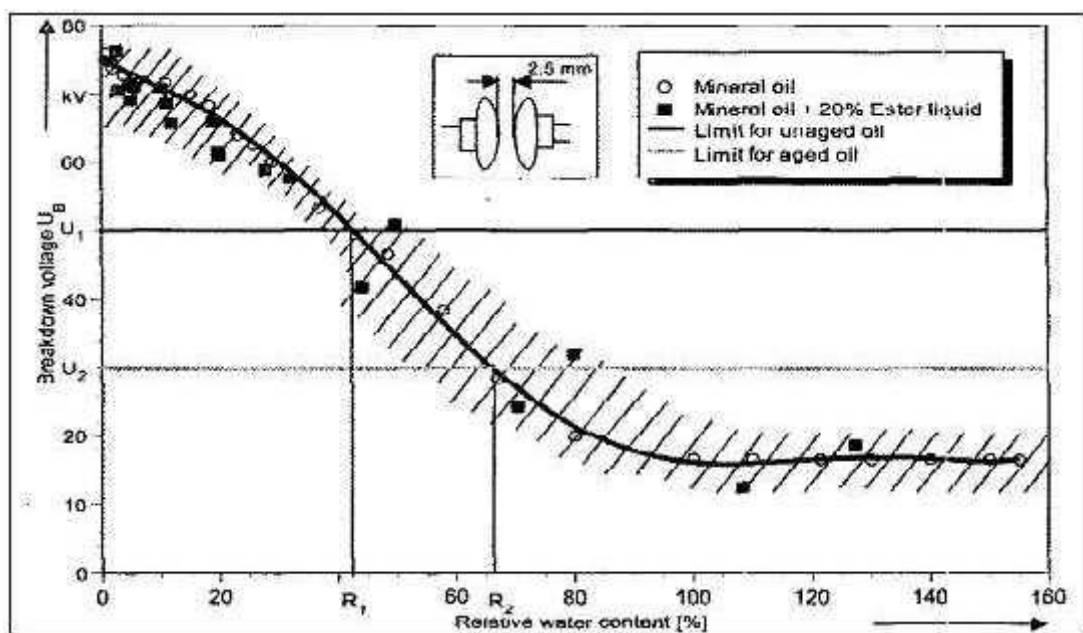
L'augmentation de la température entraîne la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile [24]. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent.

### II.3.4. Tension

Le temps de montée de la tension, sa polarité, sa durée et son amplitude affectent énormément la vitesse de propagation et la forme du streamer. Pour des niveaux de tension légèrement supérieurs à la tension seuil de génération, plusieurs auteurs confirment l'apparition de bulles gazeuses au voisinage de l'électrode pointe [3, 14, 15, 44-46].

### II.3.5. Humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier (Figure II.3) [21, 47]. Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes, suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau-huile [48].



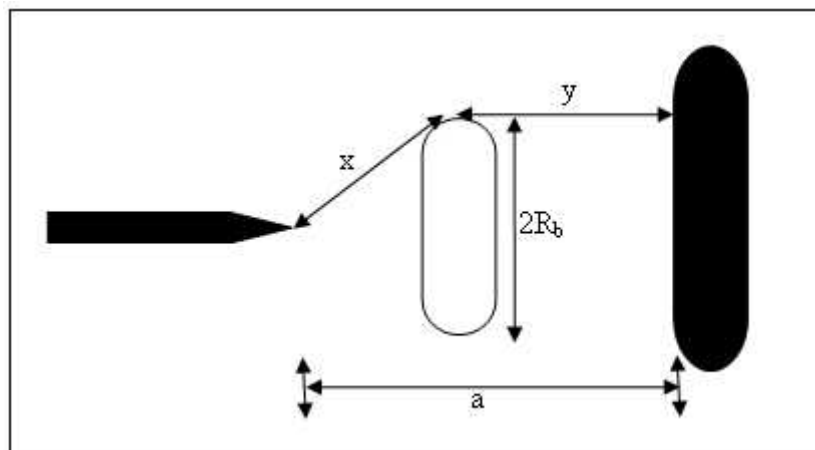
**Figure II.3 :** Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau, dans l'huile minérale et dans une solution composée de l'huile minérale avec 20% d'ester liquide [47].

### II.3.6. Influence de l'insertion d'une barrière isolante

En pratique, la majorité des configurations des électrodes peut être caractérisée par les géométries à champ électrique non uniforme : pointe-pointe ou pointe-plan ou par celle qui possède la rigidité électrique intermédiaire.

L'avantage fourni par l'utilisation des barrières isolantes dans un intervalle d'huile est l'amélioration de la rigidité diélectrique de celui-ci. Cet effet bénéfique fut remarqué dans l'air les années 1920 par C.P.Steinmetz. L'amélioration serait due surtout à l'uniformisation du champ dans l'espace barrière-plan, due à la charge positive déposée sur la surface de la barrière en face de la pointe [49].

Quand la barrière est à surface propre (grande résistivité superficielle), elle entraîne une augmentation considérable de la tension disruptive quand elle est placée près de la pointe. Cette augmentation est causée surtout par l'allongement du canal de la décharge disruptive qui suit un chemin allant de la pointe vers le bord de la barrière et de ce bord vers le plan mis à la terre [50] (Figure II.4).



**Figure II.4** : Représentation schématique de la longueur de fuite minimale de la décharge dans l'huile minérale [51, 52]

#### II.3.6.1. Influence de la position de la barrière

L'influence de la position de la barrière dépend également des paramètres électro géométriques du système à savoir la distance inter-électrodes, la configuration des électrodes. Les niveaux de tensions de claquages supérieurs sont obtenus dans l'huile minérale, quand la barrière est au voisinage de la pointe [51]. Dans un système pointe-plan, le maximum de la caractéristique tension de décharge en fonction de la position de la barrière, est obtenu dans l'air pour une position de la barrière à 20% de l'électrode pointe [50]. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge [49, 50, 53].

### II.3.6.2. Influence des dimensions et du nombre de barrières

L'influence de l'épaisseur de la barrière sur la tenue diélectrique du système dans l'huile est négligeable, aussi bien pour les petites distances inter-électrodes, que pour les grandes distances [51]. Toutefois ce paramètre influe sur la distribution de porteurs de charges positifs à la surface de la barrière. Par conséquent, le champ devient de plus en plus uniforme entre la barrière et le plan [49, 50, 53].

La rigidité diélectrique de l'arrangement pointe-barrière-plan augmente significativement avec la largeur de la barrière [51]. En effet, cette rigidité dépend de la longueur du canal de la décharge. Cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière et barrière plan [49, 50, 53].

Pour des petites largeurs, la décharge pourrait se faire de manière directe. Par contre, pour les grandes largeurs de la barrière devant la longueur de l'intervalle pointe-plan, la décharge se fait par étapes.

Dans l'huile minérale, le nombre de barrières n'a aucune influence apparente sur la tension de claquage d'une structure divergente [51], ceci peut être due au fait que l'angle solide constitué par la pointe et la barrière dépend uniquement du rayon de la première barrière et de sa position. Cependant, l'intérêt de cette association peut apparaître lors d'un défaut sur la première [49, 51].

### II.3.6.3. Influence de la perforation de la barrière

La présence d'une perforation sur la barrière dans l'huile minérale diminue significativement son efficacité et par conséquent la tenue diélectrique du système. Cette diminution est fonction de la position de la barrière et du rayon de l'ouverture. En effet, plus la barrière s'approche de la pointe, plus l'effet de la perforation augmente. Lorsque la barrière est placée au voisinage du plan, l'influence de ce défaut dépend de la probabilité du passage de la décharge à travers le trou qui dépend à son tour de la distribution des charges sur la surface de la barrière [51].

#### II.4. Conclusion

Les défaillances du matériel électrique sont dues, dans une très large mesure, au claquage ou rupture électrique des isolations. On désigne ainsi l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles où tout liquide diélectrique est soudainement traversé par un arc électrique. Les différents travaux et études réalisés sur le claquage des diélectriques liquides, ont permis d'accumuler une quantité très importante d'informations. Cependant, les processus fondamentaux conduisant au claquage sont toujours mal connus. Ceci est lié en grande partie au fait que la connaissance des propriétés physiques de l'état liquide est encore moins développée, que dans les gaz et les solides.

**Chapitre III**  
**Etude**  
**expérimentale**  
**sur le**  
**Vieillissement**  
**de (borak 22)**

### III.1.Introduction

Les techniques actuelles les plus utilisées pour surveiller l'état d'un transformateur en service sont fondées sur les analyses de l'huile : analyse des propriétés de l'huile, des gaz dissous et des produits de dissociations et de rupture de la cellulose.

Les huiles sont utilisées à des fins de refroidissement et d'isolation, elles doivent s'adapter à des contraintes de plus en plus sévères. Tout au long de leur utilisation, les huiles isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes : électrique, thermique, chimique, etc. Malgré les avantages qu'elles présentent, les huiles isolantes se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes.

La dégradation des matériaux au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement. L'étude du phénomène de vieillissement thermique d'un isolant a deux buts principaux : le premier est de déterminer l'évolution de sa durée de vie sous l'effet des contraintes thermiques ; le second but est de trouver une éventuelle corrélation entre le phénomène de vieillissement et les contraintes qui le provoquent.

Les huiles minérales ont pendant longtemps été fabriquées à partir de brut naphténiques, cependant, devant les craintes de raréfaction de ces bruts et devant leurs origines très limitées, on utilise maintenant et concurremment, des bruts paraffiniques.

Il a été prouvé que ces deux familles d'huiles naphténiques et paraffiniques ont des propriétés électriques très comparables.

Les propriétés des huiles isolantes sont généralement divisées en propriétés physiques, chimiques et électriques.

Cependant, la division se fait en caractéristiques électriques, caractéristiques d'étude, caractéristiques de service et autres caractéristiques.

## III.2.Équipement utilisé

### III.2.1.Panneau de contrôle

Il est celui de la partie intégrante importante pour conduire la tension de claquage de l'air en utilisant la méthode de l'écart de la sphère standard. Le panneau de commande se compose de tous les instruments de mesure, y compris la sécurité, le contrôle de commutation tels que voltmètre, ampèremètre, disjoncteur, alarme etc., qui est représenté sur la Figure III.1. La fonction principale du panneau de commande est de contrôler tous les équipements sous test.



**Figure III.1:** Panneau de contrôle utilisé pour effectuer les tests.

En changeant le bouton de la tension appliquée du régulateur de tension est changé sur les objets de test. Dans cette expérience, la distance d'écart entre les sphères est en train de changer à partir du panneau de commande en contrôlant la vitesse du moteur relié à la boîte de vitesses de l'électrode de sphère mobile. Au cours de l'expérience, la tension de claquage à la distance d'espacement particulier entre les électrodes sphériques sont affichées dans le panneau de commande.

### III.2.2.Disjoncteur

Un disjoncteur est un interrupteur électrique à commande automatique destiné à protéger un circuit électrique contre les dommages causés par une surcharge ou un court-circuit. La fonction principale du disjoncteur est d'identifier des défauts dans le circuit et l'isoler. Dans les circuits à haute tension défauts se produisant principalement des défauts symétriques, asymétriques défauts et les défauts de terre. Une fois qu'un défaut est détecté et les contacts dans le disjoncteur doit s'ouvrir pour

interrompre le circuit, de l'énergie emmagasinée mécaniquement contenue dans le disjoncteur est utilisé pour séparer les contacts et, bien que partie de l'énergie requise peut être obtenue à partir du courant de défaut lui-même. Les contacts du disjoncteur doivent porter le courant de charge sans échauffement excessif, et doivent également résister à la chaleur de l'arc produit lors de la coupure du circuit. Des contacts sont en cuivre ou en alliages de cuivre, alliages d'argent, et d'autres matériaux. La durée de vie des contacts est limitée par l'érosion due à l'interruption de l'arc. Disjoncteurs miniatures et haute tension ont des contacts remplaçables. Lorsqu'un courant est interrompu, un arc est généré. Cet arc doit être contenu refroidi et éteint de manière contrôlée, de sorte que l'écart entre les contacts peut encore supporter la tension dans le circuit d'alimentation. Par conséquent, une fois que la condition de défaut a été effacée, les contacts doivent être à nouveau fermés pour rétablir le courant au circuit interrompu. Les disjoncteurs sont faits dans différentes tailles, à partir de petits appareils qui protègent un appareil ménager individuel à grande appareillage conçu pour protéger les industries des circuits d'alimentation haute tension. Ces disjoncteurs hauts tension améliorent la stabilité et la disponibilité du système.

### **III.2.3. Transformateur à haute tension**

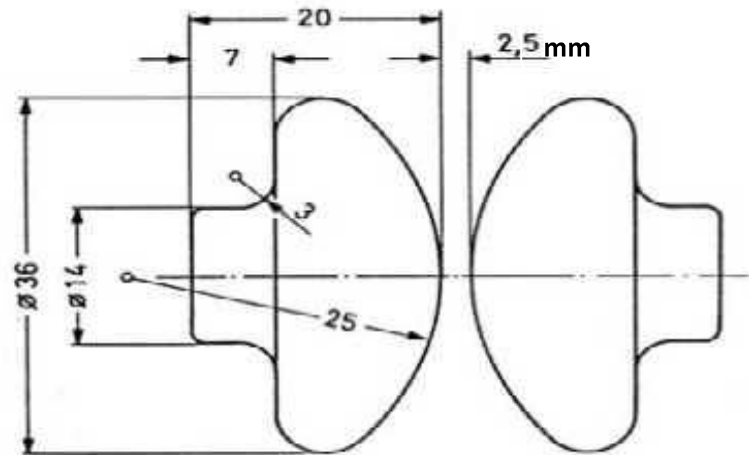
Un transformateur est un dispositif statique. Il transfère l'énergie électrique d'un circuit à un autre circuit à travers des conducteurs à couplage inductif les bobines de transformateurs. Un courant variant dans l'enroulement primaire crée un flux magnétique variable dans le noyau du transformateur et donc un champ magnétique variable à travers l'enroulement secondaire. Ce champ magnétique variable induit une force électromotrice variable (FEM) dans l'enroulement secondaire. Cet effet est appelé induction mutuelle. Dans cet agencement haute tension transformateur élévateur ayant la puissance nominale de 15 kVA, 400V / 100kV est utilisé qui est représenté sur la Figure III.2 Lorsque la tension augmente, le courant diminue dans la même proportion.



**Figure III.2:** Transformateur à haute tension utilisé pour l'essai de claquage de l'air.

### III.3. Essais d'huile isolante

Les Transformateurs de puissance pour la haute tension contiennent des quantités d'huile isolante pour l'isolation et refroidissement. Les bonnes propriétés diélectriques de l'huile isolante sont donc une condition préalable importante pour une parfaite isolation de ces transformateurs. Depuis la résistance de rupture d'une huile isolante dépend sensiblement de sa composition, de ses conditions de préparation et de la détermination est une partie importante des essais à haute tension des transformateurs. En IEC60296 valable pour les huiles isolantes, une qualité minimale est prescrite pour les huiles neuves ou usagées sous des procédures d'essai exactement spécifiées. Le programme de test complet couvre, viscosité, tension de claquage, facteur de dissipation diélectrique et résistivité volumique spécifique. La tension de claquage doit être mesurée à l'aide d'un cuve d'essai standard en tensions alternance à fréquence d'alimentation. Les calottes sphériques avec espacement  $s = 2,5$  mm, devrait être choisi comme électrodes. La tension d'essai devrait être augmentée de zéro à un taux d'environ 2 kV/s jusqu'à le claquage. Six expériences de décomposition doivent être effectuées pour chaque 2<sup>ème</sup> à la 6ème mesure ne peut être inférieure à certaines valeurs minimales. Ces valeurs sont 60 kV pour les huiles neuves dans les transformateurs et les transformateurs de mesure et jusqu'à 30 kV pour les appareillages de commutation; Des valeurs inférieures sont autorisées pour les équipements en service.



**Figure III.3:** Electrodes de mesure de tension de claquage pour huiles isolantes.

Pour Test de dégradation d'une huile isolante un circuit tel qu'illustré à la Figure III.4 doit être configuré. Un échantillon d'huile est prélevé du transformateur être testé. L'huile à étudier doit être versée lentement dans le cuve d'essai, en évitant la formation de bulles d'air (en lui permettant de courir le long d'une tige de verre), puis laissé à reposer pendant environ 10 min avant que la tension soit appliquée. La tension doit être coupée à l'instant de claquage. Un intervalle d'environ 2 minutes devrait être maintenu après chaque décharge et l'intervalle entre les électrodes ondées avec de l'huile neuve en passant soigneusement un agitateur à travers l'écart.

Transformateur test HT	HV9105	1
Tableau de control	HV9103	1
Capacité de mesure	HV9141	1
Voltmeter AC	HV9150	1
Conducteur rod	HV9108	1
Conducteur cup	HV9109	1
Misse à la terre	HV9110	1
Cuve d'essai	HV9137	1

**Tableau .III.1. Equipements des circuits**

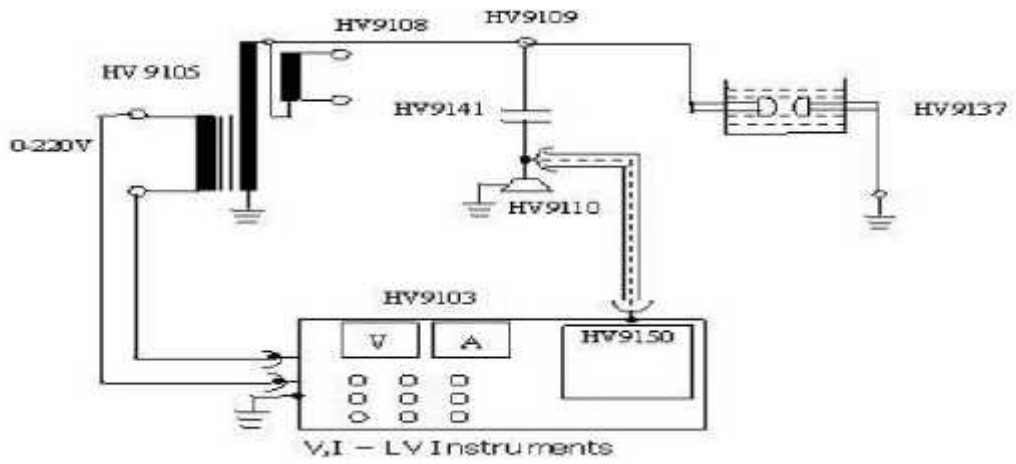


Figure III.4: circuit d'essai.



Figure III.5: circuit d'essai.

### III.4.Caractéristiques de Borak 22

<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 Igδ		≤ 5,00 E-03	CEI 247	0,87 E-03
<b>Propriétés physiques</b>				
Aspect		Limpide et exempte de matière solide	CEI 296	Limpide
Viscosité cinématique à 40°C	mm²/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>Propriétés chimiques</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

Tableau III.2: les Caractéristiques de l'huile isolent Borak22[16].

#### III.4.1. Conception du transformateurs de puissances

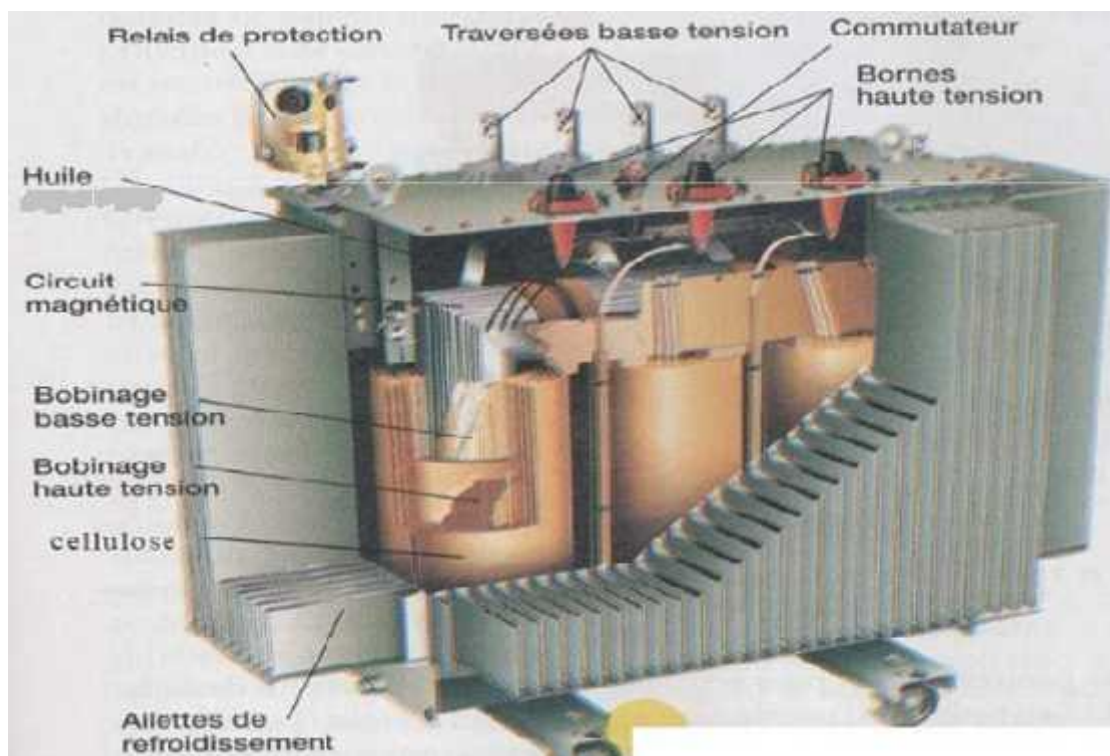
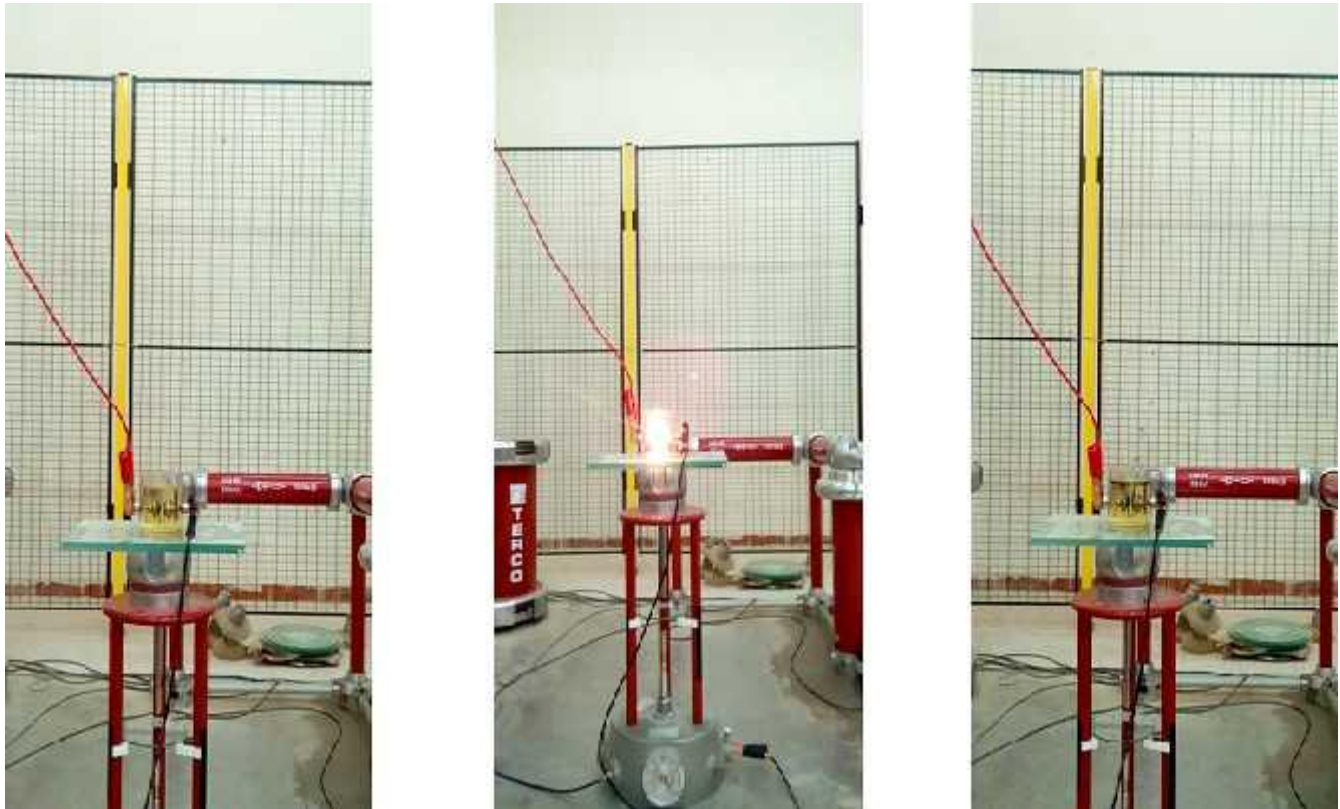


Figure III.6: Conception du transformateurs de puissances.

### III.5. les Essais sur l'huile neuve

#### III.5.1. les Essais diélectriques



a-Avant le claquage

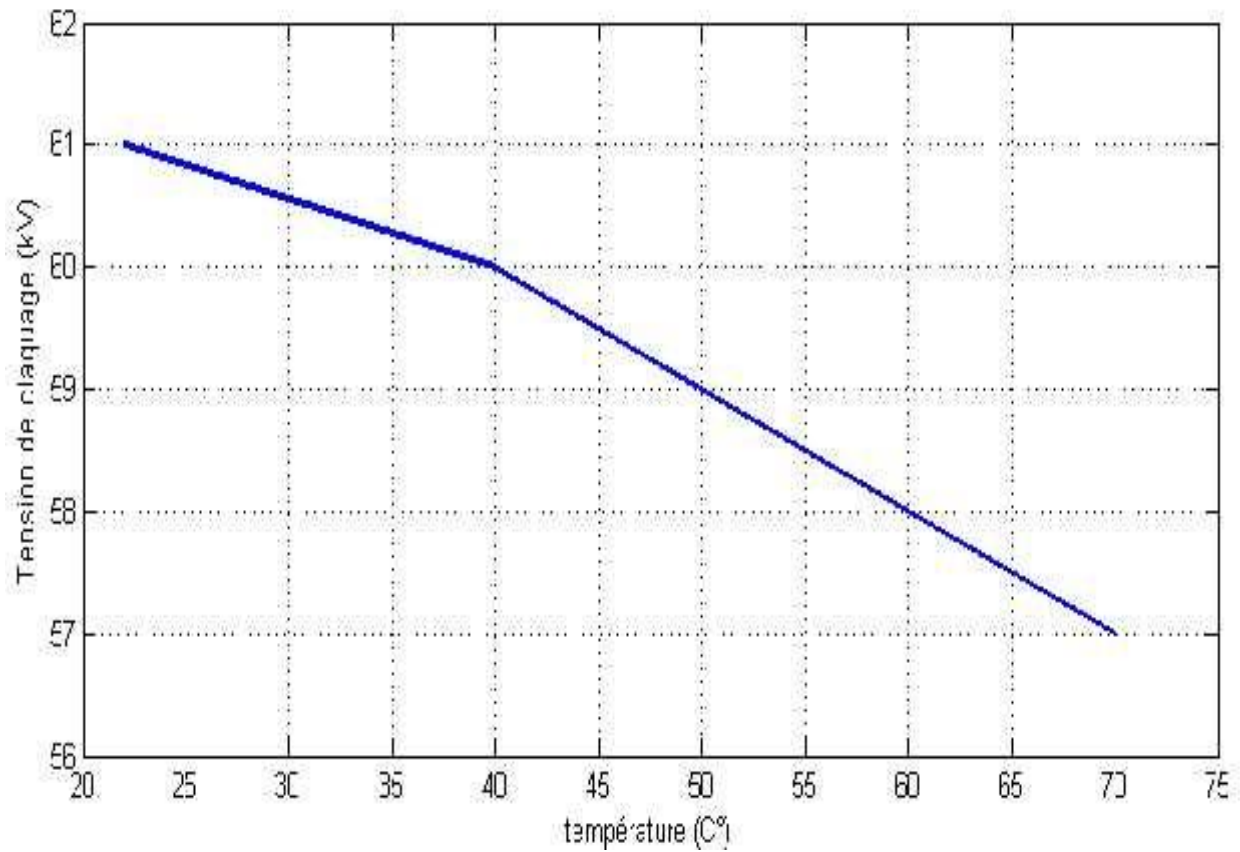
b- pendant le claquage

c- Après le claquage

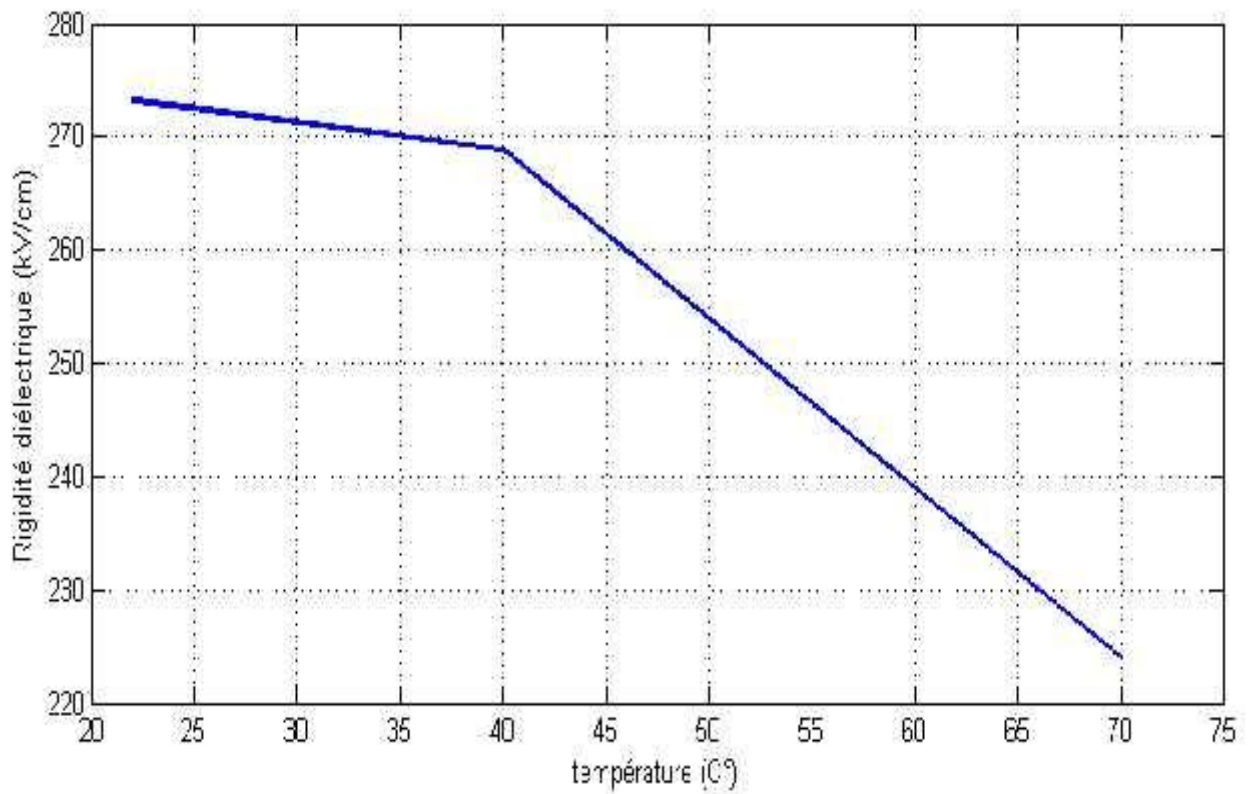
**Figure III.7:** La tension de claquage sur l'huile neuve

Etat de l'huile	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique (kV/cm)
Neuve à 22C°	61	273.2
Neuve à 40C°	60	268.8
Neuve à 70C°	57	224

**Tableau III.3:** Variation de Tension de claquage et la Rigidité diélectrique en fonction de la température.



**Figure III.8:** Variation de la Tension de claquage en fonction de la température.



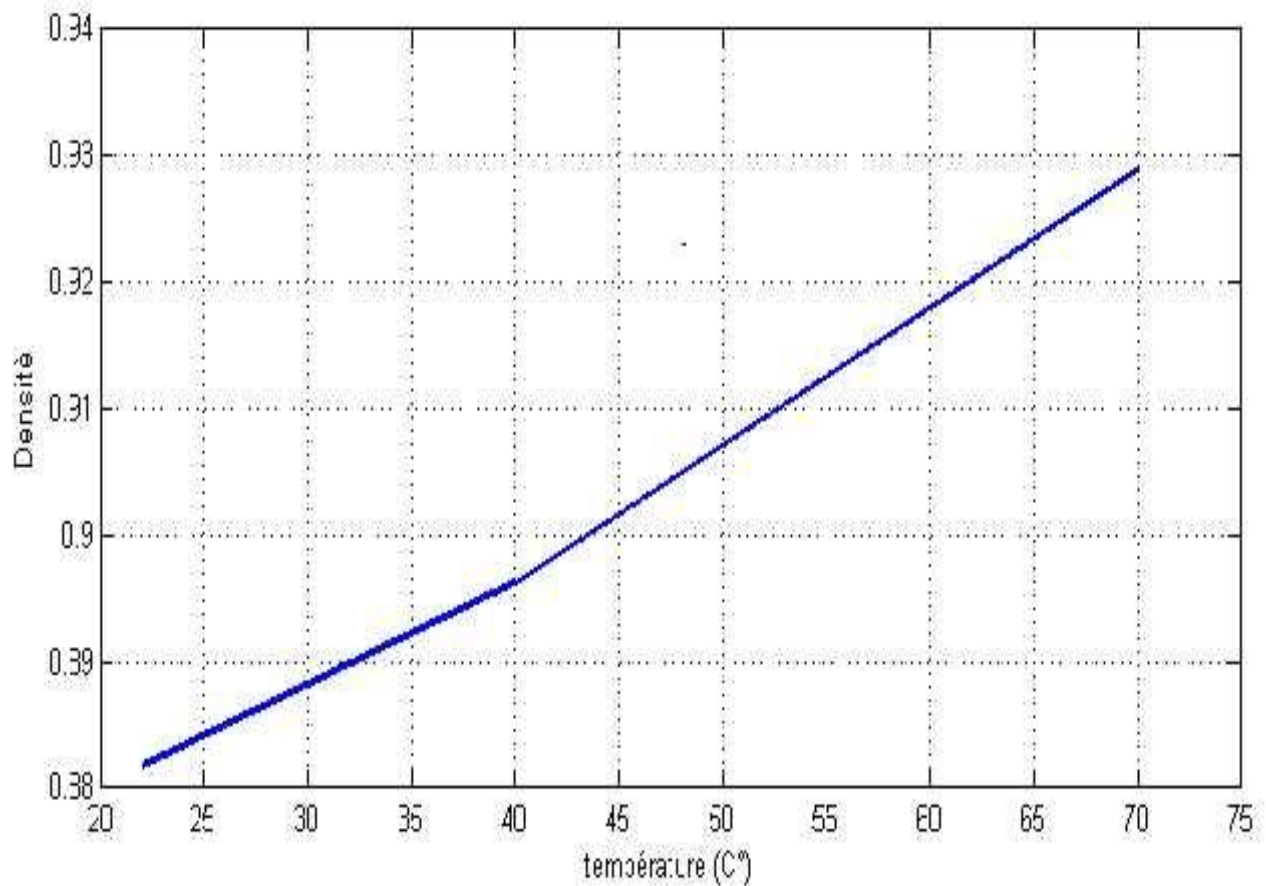
**Figure III.9:** Variation de la Rigidités diélectrique en fonction de la température.

### III.5.2. les Essais physico-chimiques

#### ❖ La Densité

Etat de l'huile	Densité
Neuve à 22 C°	0.8818
Neuve à 40C°	0.8963
Neuve à 70C°	0.9289

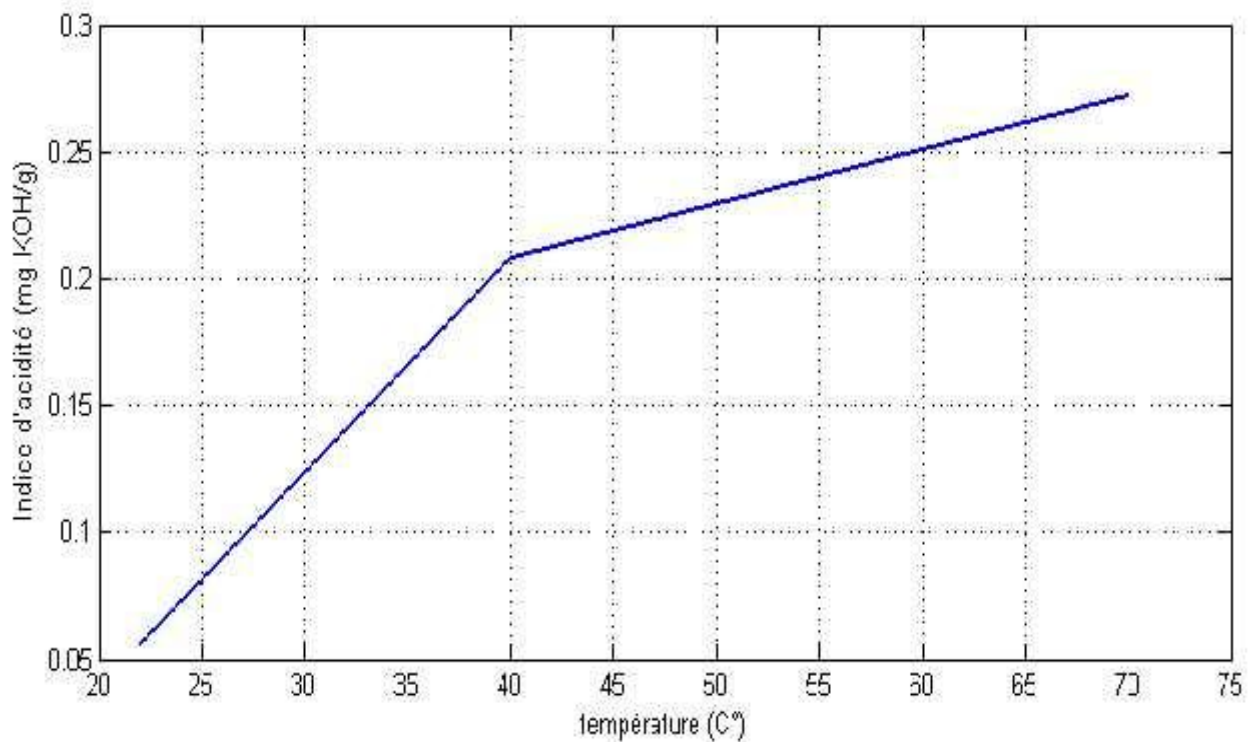
**Tableau III.4:** Variation de la Densité en fonction de la température.



**Figure III.10:** Variation de la Densité en fonction de la température.

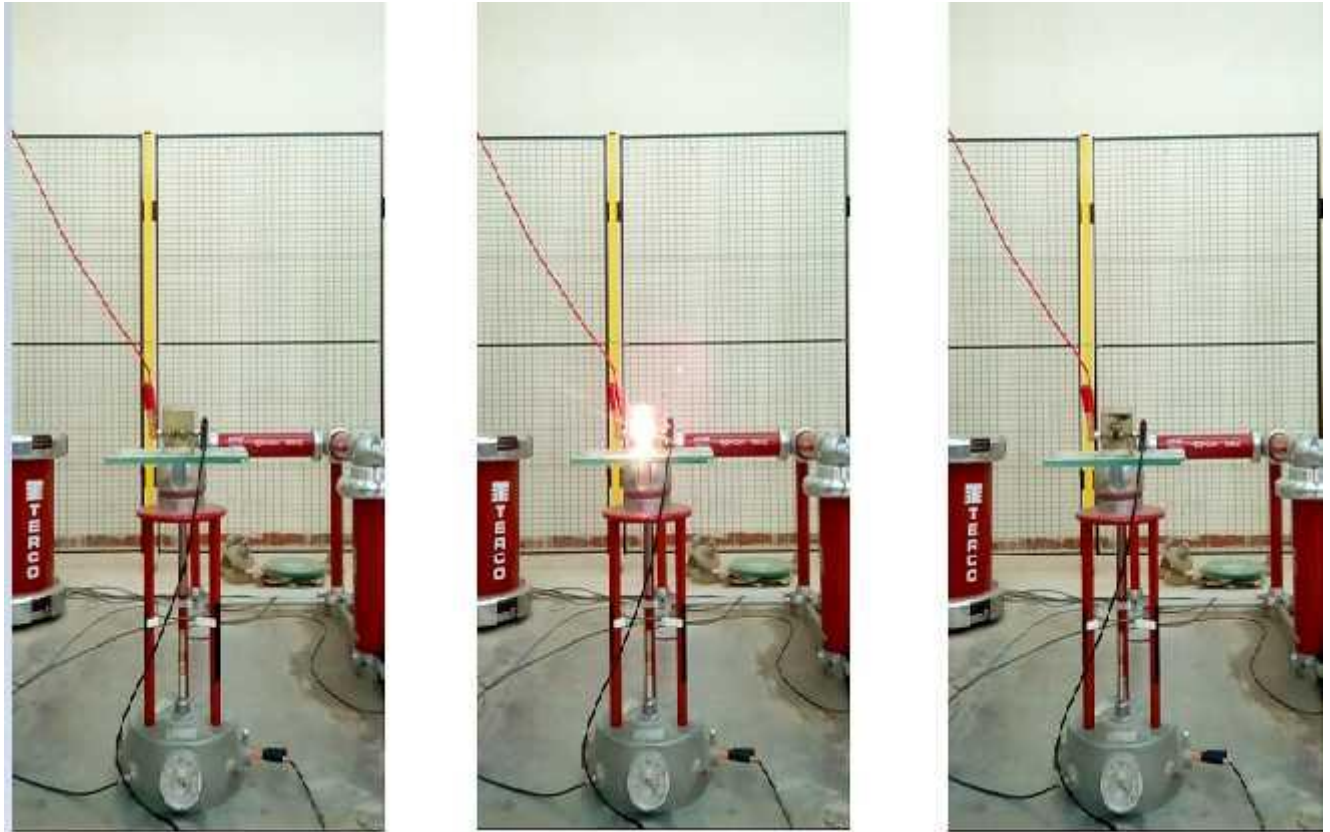
❖ **Indice d'acidité**

Etat de l'huile	Indice d'acidité (mg KOH/g)
Neuve à 22 C°	0.056
Neuve à 40C°	0.208
Neuve à 70C°	0.272

**Tableau III.5:** Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température.**Figure III.11:** Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température.

### III.6. les Essais sur l'huile en service (8 ans)

#### III.6.1. les Essais diélectriques



**a-Avant le claquage**

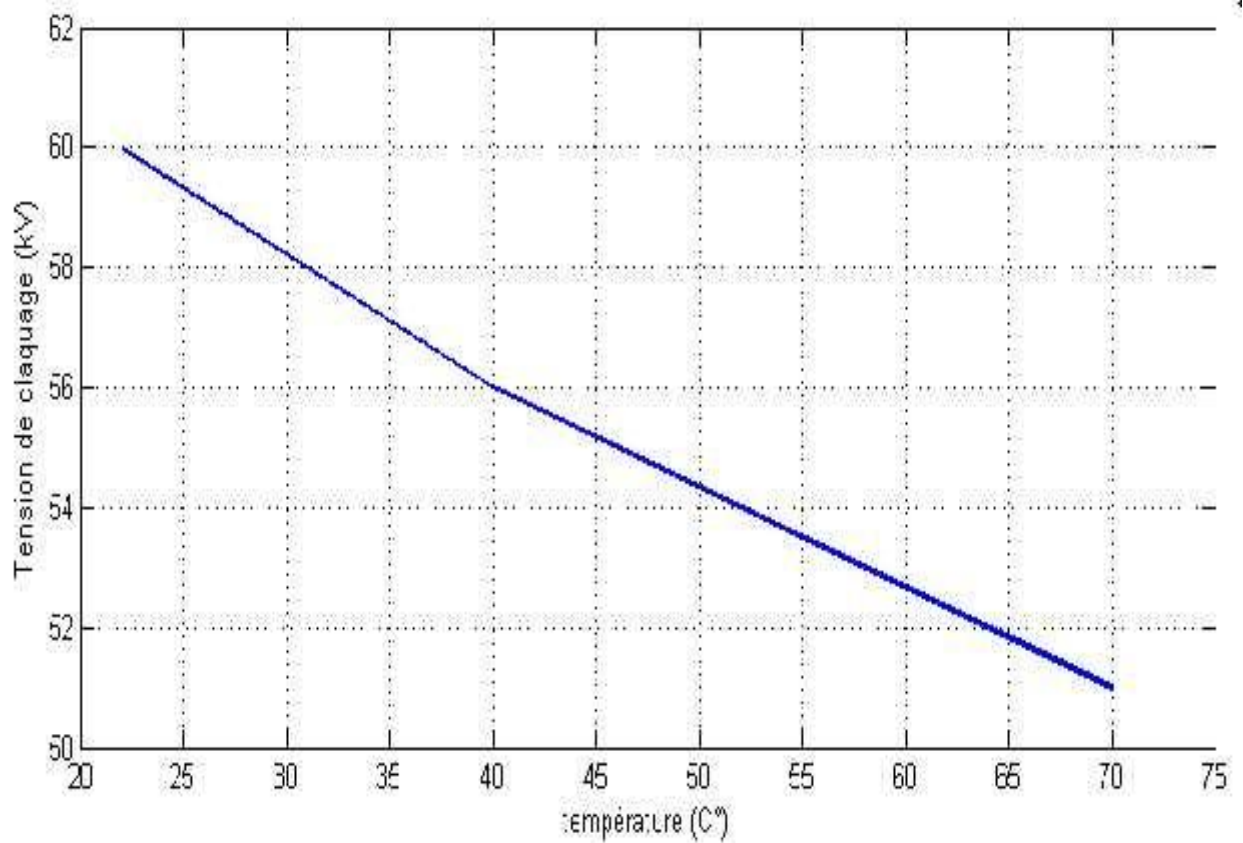
**b- Pendant le claquage**

**c- Après le claquage**

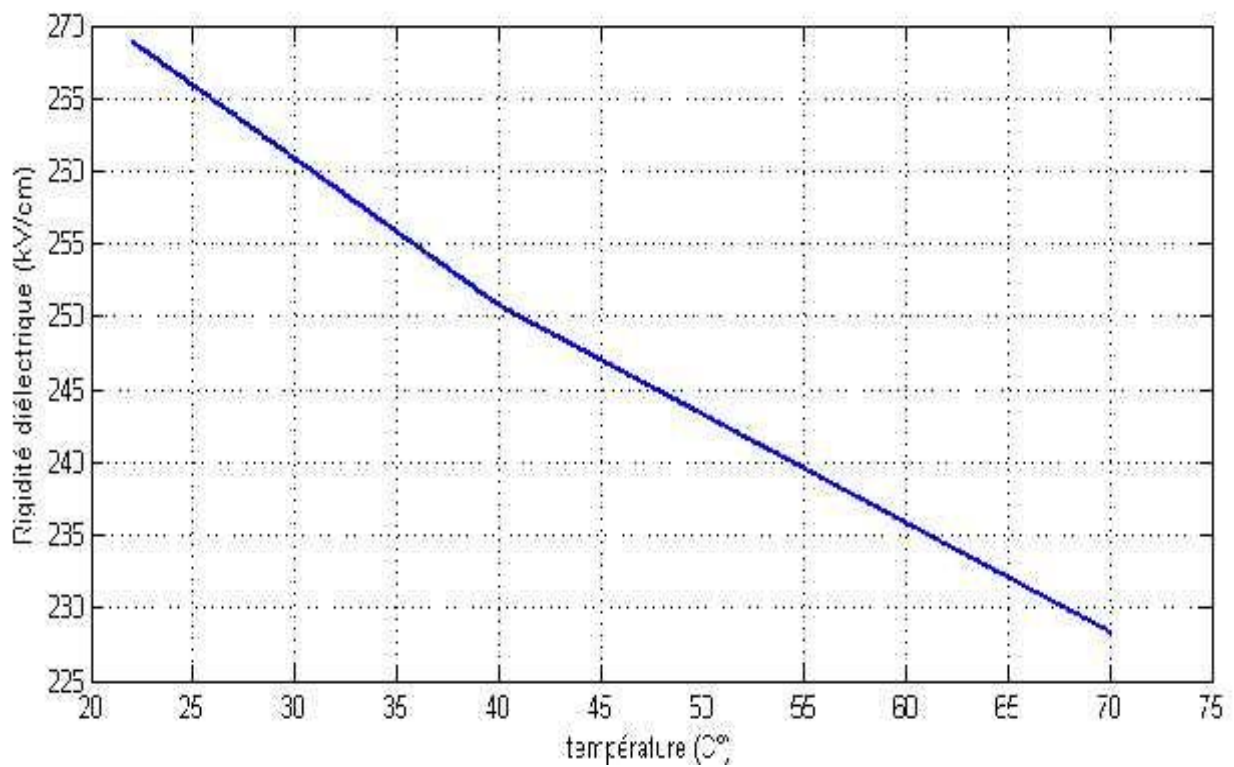
**Figure III.12:** La tension de claquage sur l'huile en service (8 ans)

Etat de l'huile	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique (kV/cm)
en service à 22 C°	60	268.8
en service à 40C°	56	250.8
en service à 70C°	51	228.4

**Tableau III.6:** Variation de la Tension de claquage et Rigidité diélectrique en fonction de la température.



**Figure III.13:** Variation de la Tension de claquage en fonction de la température.



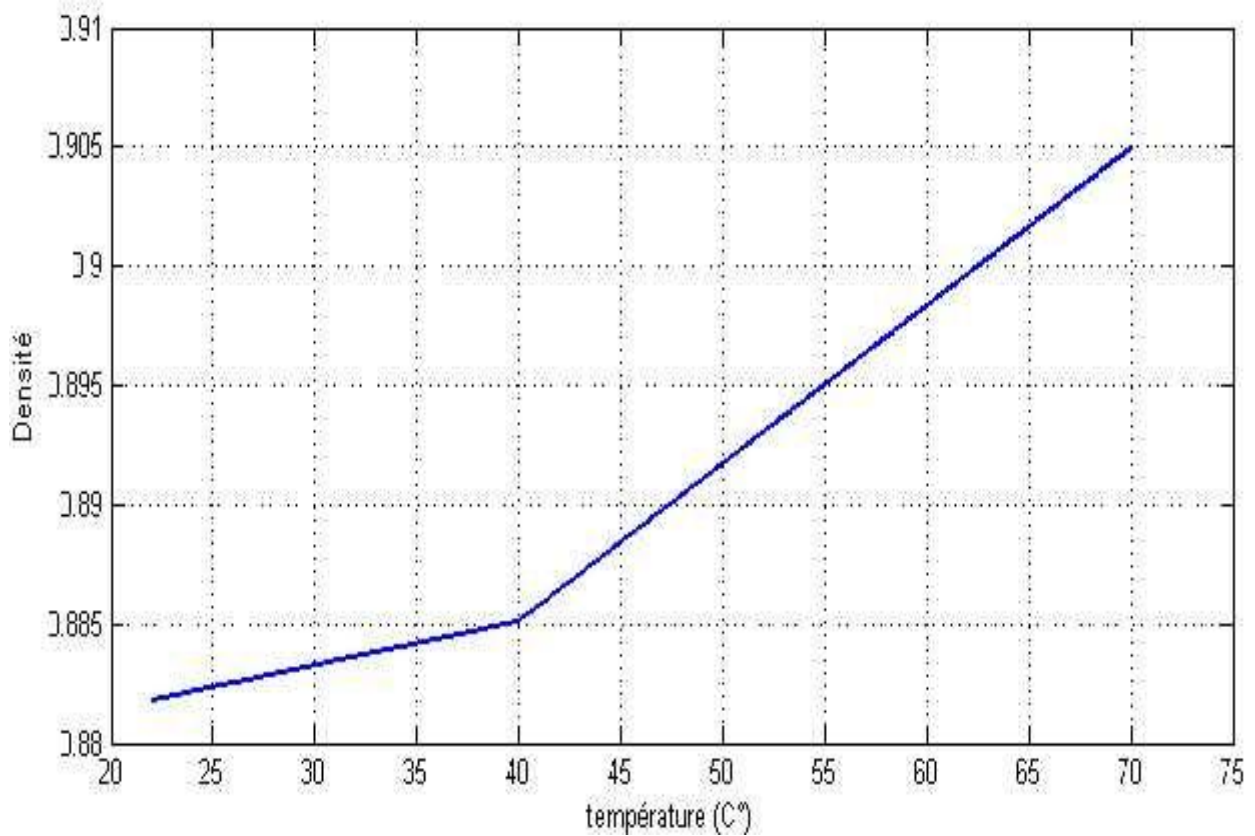
**Figure III.14:** Variation de la Rigidité diélectrique en fonction de la température.

### III.6.2. les Essais physico-chimiques

#### ❖ La Densité

Etat de l'huile	Densité
en service à 22 C°	0.8818
en service à 40C°	0.8851
en service à 70C°	0.9050

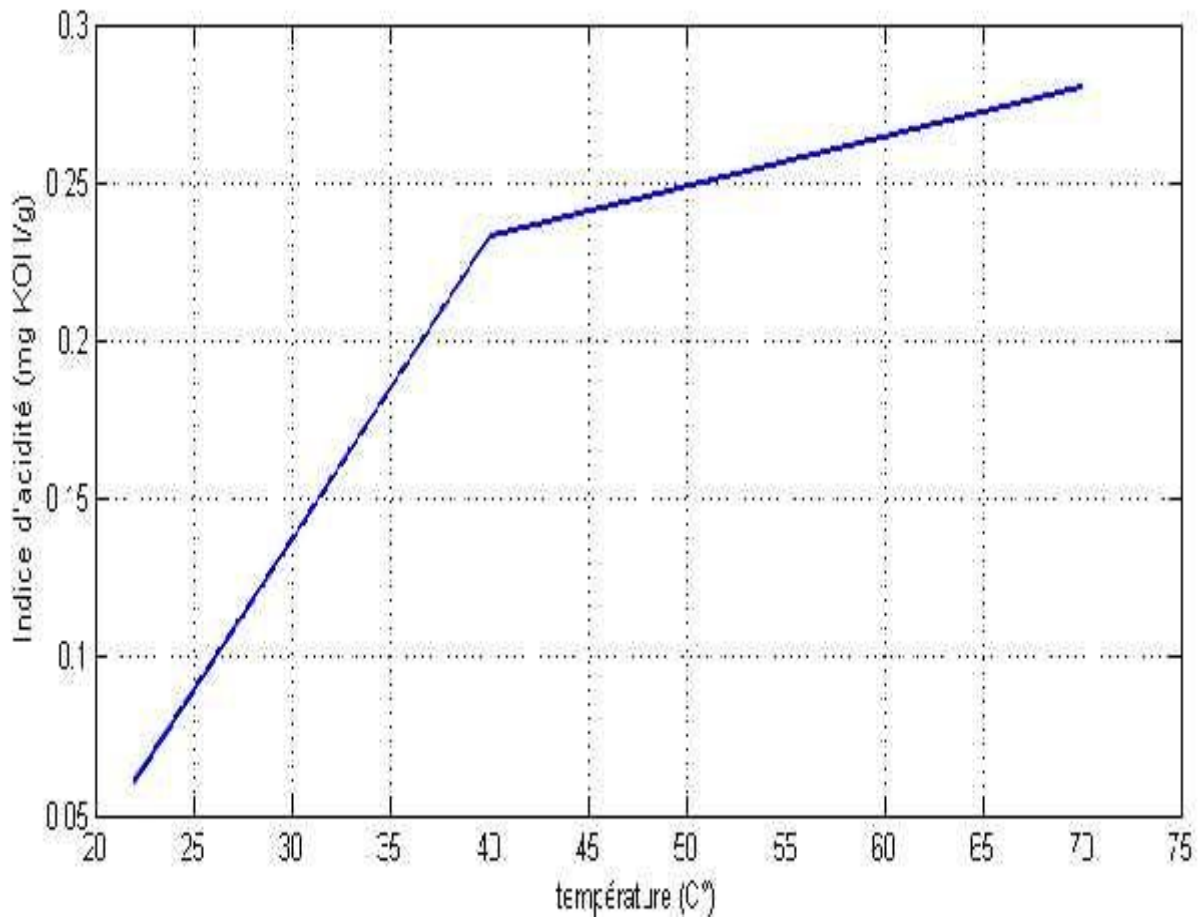
**Tableau III.7:** Variation de la Densité en fonction de la température.



**Figure III.15:** Variation de la Densité en fonction de la température.

❖ **Indice d'acidité**

Etat de l'huile	Indice d'acidité (mg KOH/g)
en service à 22 C°	0.061
en service à 40C°	0.233
en service à 70C°	0.280

**Tableau III.8:** Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température.**Figure III.16:** Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température.

### III.7. les Essais sur l'huile hors service (30 ans)

#### III.7.1. les Essais diélectriques

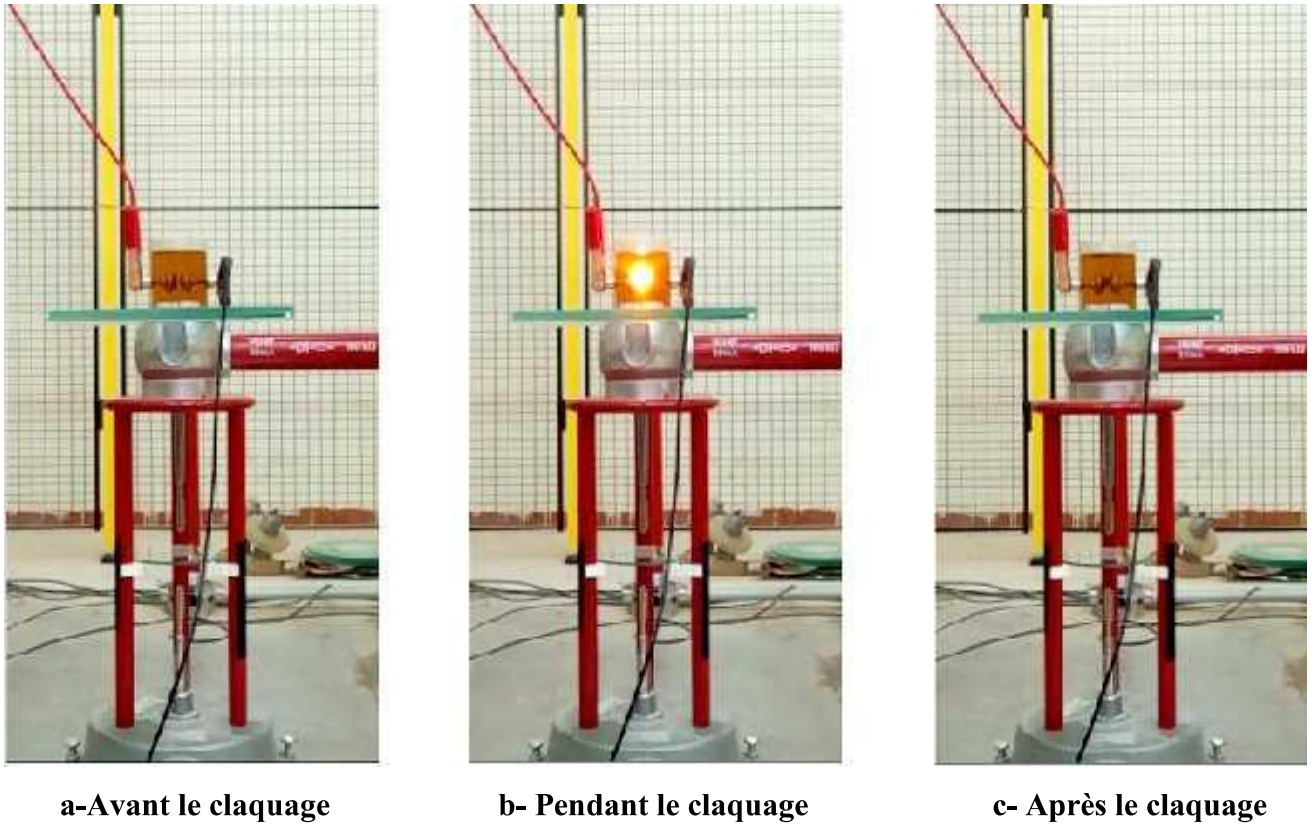
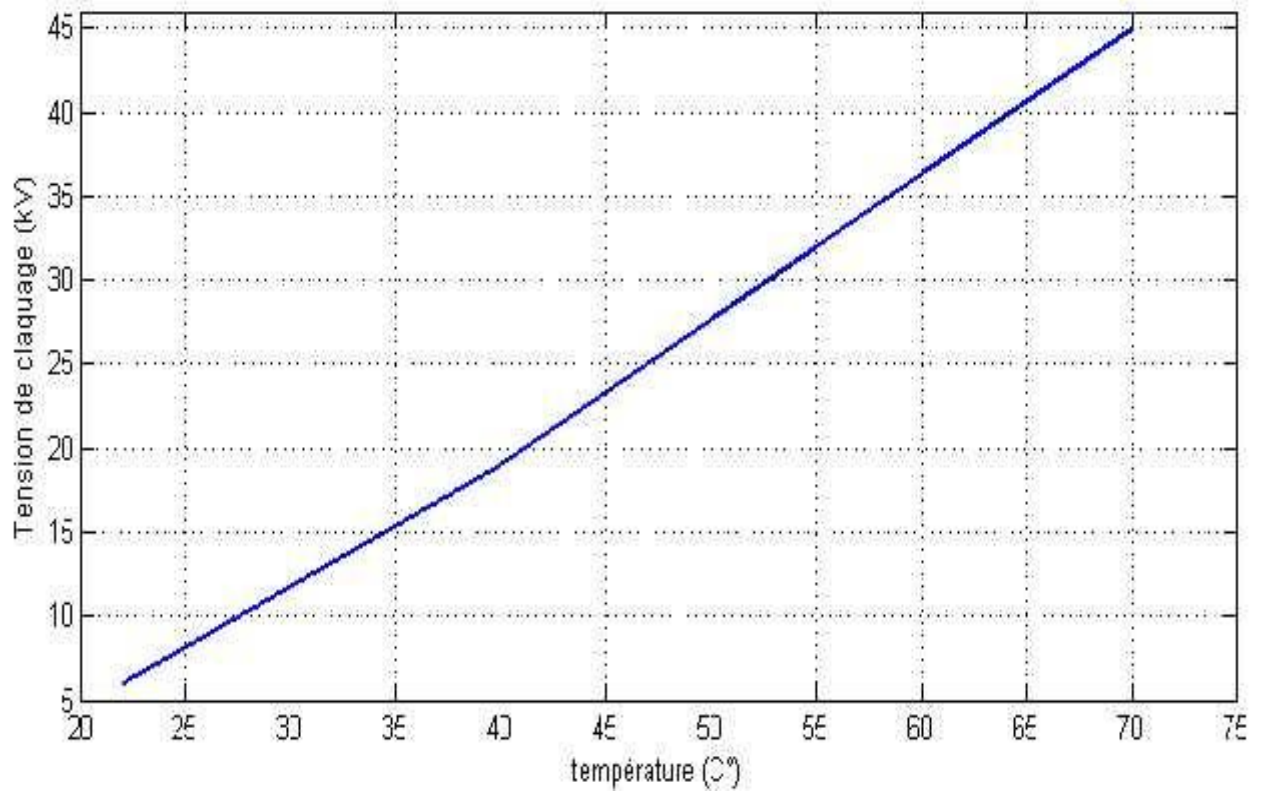


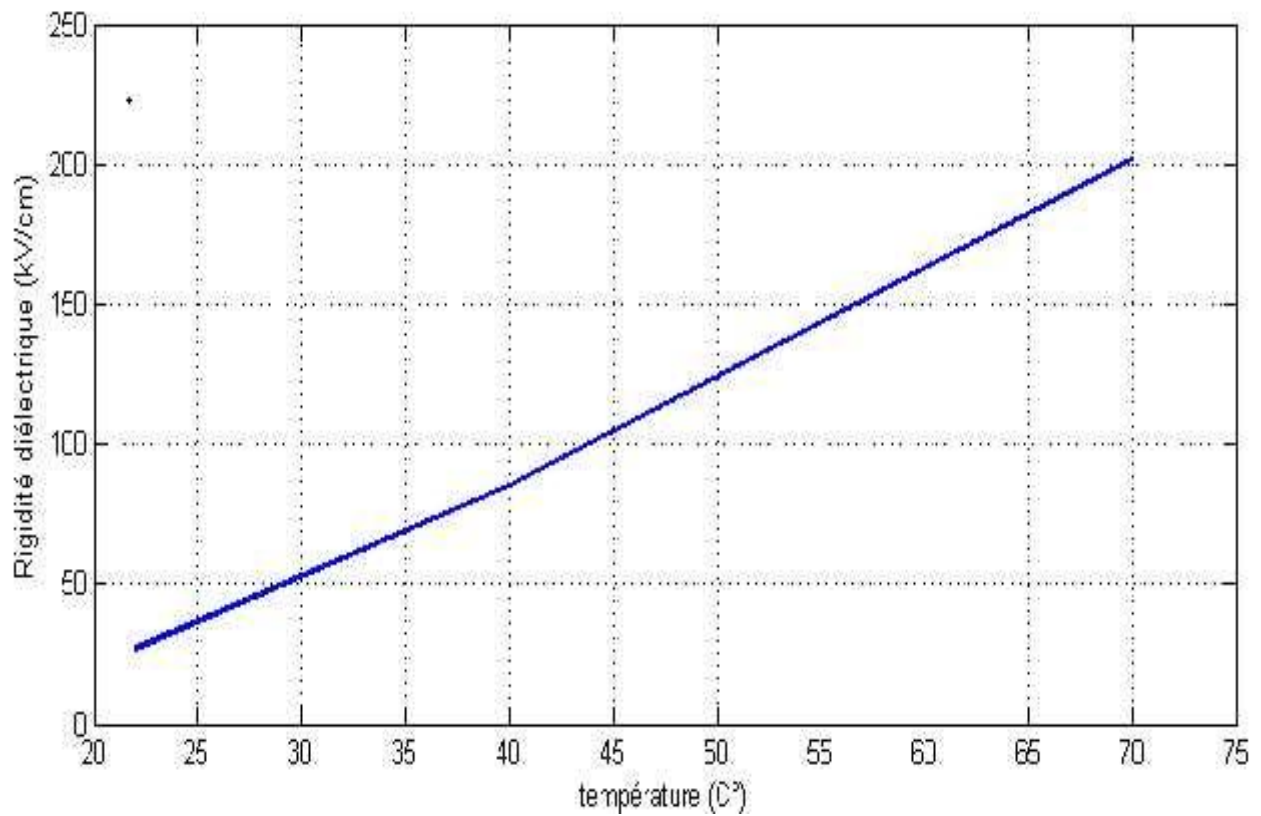
Figure III.17: La tension de claquage sur l'huile hors service (30 ans)

Etat de l'huile	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique (kV/cm)
hors service à 22 C°	6	26.88
hors service à 40C°	19	85.12
hors service à 70C°	45	201.6

Tableau III.9: Variation de Tension de claquage et la Rigidité diélectrique en fonction de la température.



**Figure III.18:** Variation de la Tension de claquage en fonction de la température.



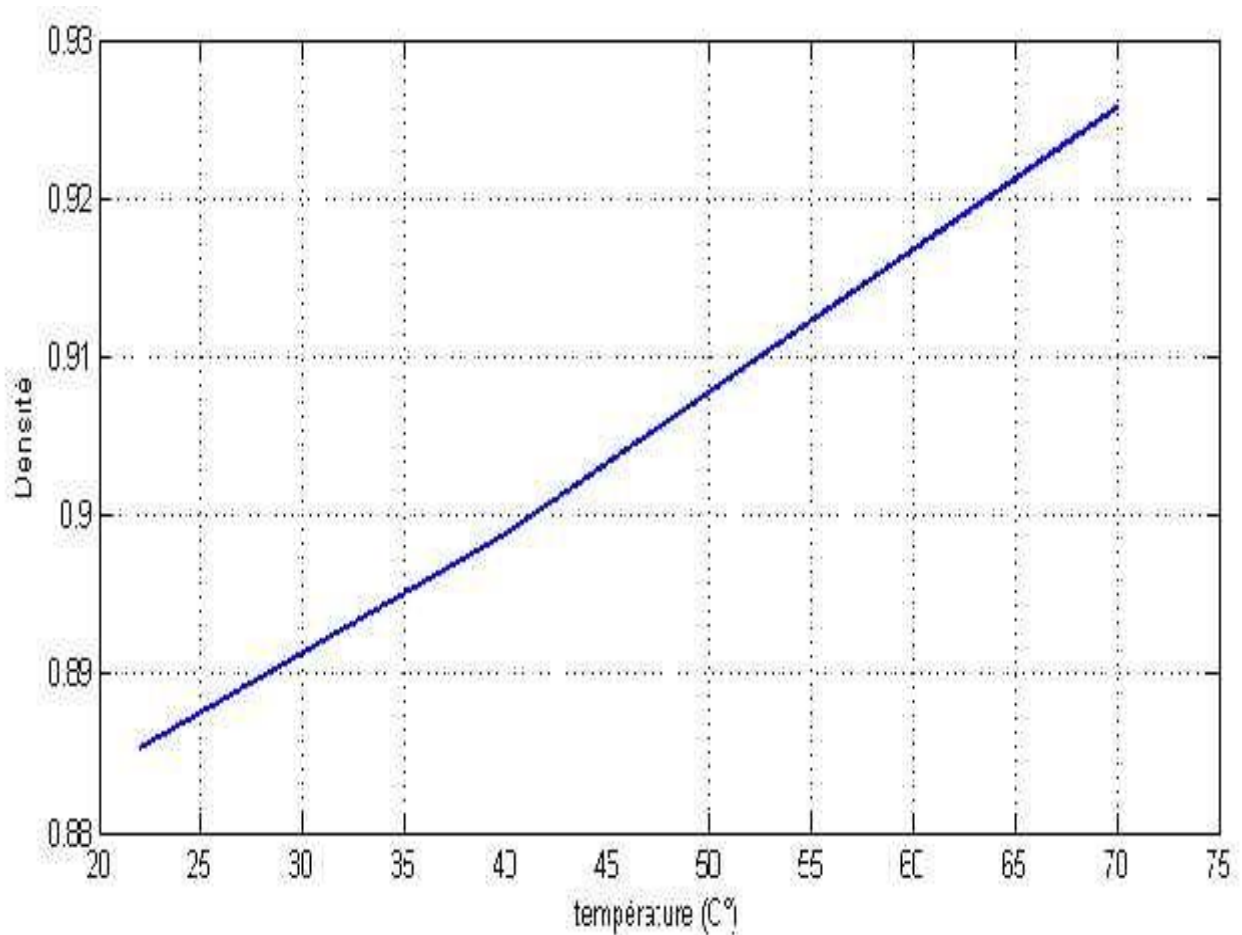
**Figure III.19:** Variation de la Rigidité diélectrique en fonction de la température.

### III.7.2. les Essais physico-chimiques

#### ❖ La Densité

Etat de l'huile	Densité
hors service à 22 C°	0.8854
hors service à 40C°	0.8989
hors service à 70C°	0.9257

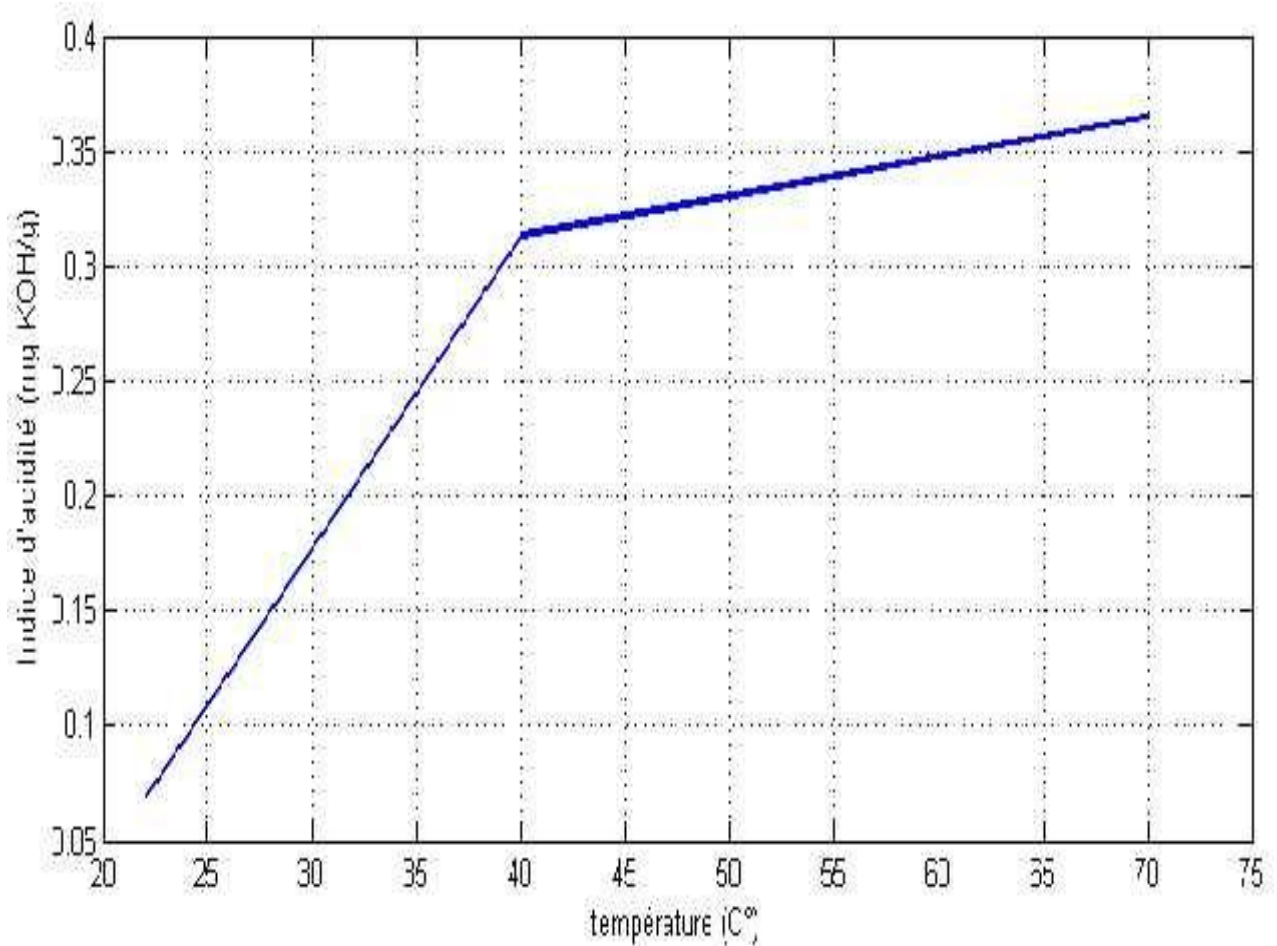
**Tableau III.10:** Variation de la Densité en fonction de la température.



**Figure III.20:** Variation de la Densité en fonction de la température.

❖ **Indice d'acidité**

Etat de l'huile	Indice d'acidité (mg KOH/g)
hors service à 22 C°	0.068
hors service à 40C°	0.313
hors service à 70C°	0.365

**Tableau III.11:** Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température.**Figure III.21:** Variation de l'Indice d'acidité en fonction de la température.

### III.8. Interprétation des résultats

Pour les propriétés électriques les résultats obtenus par l'étude expérimentale des deux échantillons d'huile neuve et en service (8ans), donne que, plus la température de l'huile est élevée, plus la rigidité diélectrique est faible et aussi la tension de claquage par rapport aux normes, ceci est particulièrement pertinent pour la durée de vie d'huile.

pour le huile hors service (30 ans), en note que la tension de claquage et la rigidité diélectrique pour une température 22 C° est très faible par rapport au huile neuve et en service (8 ans) , en augmentons la température à 70 C° la tension de claquage et la rigidité diélectrique se croîts.

En ce qui concerne les propriétés physico-chimiques, nous notons qu'il est presque constant entre les trois échantillons d'huile, malgré la différence de durée de service et qu'après avoir changé la température pour chaque échantillon. Cette stabilité des propriétés physico-chimiques a un effet positif sur le maintien de l'équipement des transformateurs de puissance.

### III.9. Conclusion

Nous avons expérimenté l'huile borak 22. Nous avons d'abord prélevé trois échantillons de cette huile : neuve, en service et le troisième hors service, en appliquant une haute tension alternative de 50Hz pour mesurer la Rigidité diélectrique de ces échantillons à différentes températures 22C°, 40C° et 70C°, et nous avons remarqué la différence. Tout cela en termes d'électricité.

Ce qui concerne les propretés physico-chimiques, nous avons mesuré la densité volumétrique de ces échantillons à la même température précédente et noté la différence entre eux ainsi que l'acidité.

Nous avons remarqué de expériences que les propriétés électriques pour l'huile minérale borak22 a un effet significatif sur la durée de service et nous avons constaté que dans les échantillons de neuve et en service, La température a un effet significatif sur le diminuer de la rigidité et la tension de claquage et vice versa pour le huile hors service.

En ce qui concerne l'effet sur les propriétés physico-chimiques (densité, acidité), nous notons que les trois échantillons précédents sont affectés par l'augmentation de la température.

# Conclusion générale

## Conclusion général

Les recherches théoriques que nous avons menées dans les premier et deuxième chapitres nous ont permis d'acquérir des connaissances sur les huiles isolantes en général et les huiles minérales du transformateur en particulier (Borak22) et d'approfondir notre compréhension des mécanismes conduisant à l'effondrement des isolants liquides.

Notre étude est avant tout une contribution à la compréhension du comportement des huiles minérales isolantes sous haute tension alternative (50Hz), ainsi que les transitions physiques et chimiques des échantillons d'huile.

Les résultats expérimentaux obtenus au chapitre trois donnent les conclusions suivantes:

- La rigidité diélectrique des huiles est fortement affectée par la température en fonction de l'âge de cette huile. Nous avons remarqué que la rigidité d'huile neuve est plus rigide que l'huile en service (8 ans) ou hors service (30 ans), à mesure que la durée de vie d'huile augmente, sa rigidité diélectrique diminue.
- Du point de vue physico-chimique, nous notons que dans les trois échantillons d'huile Neuve et en service (8ans) et hors service (30ans) est légèrement affecté par l'effet de la température utilisée.
- L'augmentation de la température de fonctionnement dégrade considérable la caractéristique d'huile, Au delà d'une certaine valeur, la température est un facteur plus critique dans la dégradation d'huile isolante.
- Le vieillissement thermique affecte considérablement les propriétés d'huile de transformateur, ce qui risque d'engendrée la dégradation des matériaux solide imprégnés, de favoriser les phénomènes de condition et conduire à des claquages peuvent mettre hors usage l'équipement de haute tension.

# Références bibliographiques

## Références Bibliographiques

- [1] **H.N.V. Temperley, D.H. Trevena**, « Les liquides et leurs propriétés » Edition Ellis Horwood, 1978.
- [2] **Ignoc Adamczeski**, « Les phénomènes d'ionisation et de conduction dans les diélectriques liquides », Edition Masson et Cie, Paris 1968.
- [3] **S. Bouazabia**, « Etude des phénomènes de génération des streamers dans les diélectrique liquides », Thèse de Doctorat d'Etat, ENP Alger, 2006.
- [4] **R. Tobazéon**, « Prebreakdown Phenoména in Dielectric Liquids », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N°.6, pp. 1132-1147, December 1994.
- [5] **D. Linhjell, L. Lundgaard and G. Berg**, « Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps », IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.1, N°. 3, pp. 447-458, June 1994.
- [6] **H. Moulai**, « Etude des courants de préclaquages dans les diélectriques liquides », Thèse de Doctorat d'Etat, ENP Alger, 2001.
- [7] **O. Lesaint, P. Gournay, A. Saker, R. Tobazéon, J. Aubin, M. Mailhot**, « Streamer propagation and breakdown under AC in mineral oil for gaps up to 80 cm », Conference Record of the ICDL 96 12<sup>th</sup> International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, pp. 251-254, Roma, Italy, july 15-19, 1996.
- [8] **A. Beroual et R. Tobazeon**, « Propagation et génération des streamers dans les diélectriques liquides », Revue Phys. Appl. 22, pp.1117-1123, 1987.
- [9] **O. Lesaint and R. Tobazéon**, « Streamer Generation and Propagation in Transformer Oil under ac Divergent Field Conditions », IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.23, N°.6, pp. 941-954, December 1988.
- [10] **F.M.J. McCluskey, A. Denat and O. Lesaint**, « Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids under positive impulse voltage », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N°. 3, pp. 377-382, June 1994.
- [11] **A. Hamimi**, « Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans une huile de transformateur sous champ alternatif divergent », Thèse de Magister, ENP Alger, 1997.
- [12] **F.M.J. McCluskey and A. Denat**, « Bubbles formation in synthetic insulating liquids in a pulsed divergent electric field », IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulations Vol.1, N°. 4, pp. 672-679, August 1994.
- [13] **F. Bitam, S. Bouazabia et M. Megherbi** « Modèle phénoménologique du processus de préclaquage dans les diélectriques liquides », 2<sup>ème</sup> Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.162-166, Tizi-Ouzou, 17.18 et 19 Novembre 1997.
- [14] **J.P Gosse**, « Conduction électrique et phénomènes prédisruptifs dans les liquides » 3<sup>èmes</sup> Journées Maghrébines des Sciences des Matériaux, Vol.1, pp.115-119, Alger 27-29 avril 1992.
- [15] **N. Berger**, « Liquides isolants en électrotechnique : caractéristiques des produits » Technique de l'Ingénieur, D2471, 2002.

- [16] **Pr A.Boubakeur**, « Vieillissement de l'huile de transformateur » EN polytechnique – ARELEC -23 Novembre 2011.
- [17] **P.J. Vuarchex**, « Diélectriques liquides de remplacement des PCB », RGE, N° 8, septembre 1987.
- [18] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechnique : Essai, Mécanismes de dégradation, Applications industrielles », Edition Eyrolles, Paris, 1990.
- [19] **F. Mohellebi**, « Analyse et régénération des huiles usagées », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2000.
- [20] **S. E. Chitour**, « Raffinage du pétrole », Tome 01, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, OPU 1983.
- [21] **S. Abdi**, « Influence du vieillissement thermique sur des propriétés de l'huile de transformateur », Mémoire de Magister, ENP Alger, 2002.
- [22] **S. Boudraa**, « Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [23] **D. Kind et H. Karner**, « High voltage insulating technology », Friedr. Vieweg and Sohn, Branschweig/ Wiesbaden, 1985.
- [24] **A. Labbaci**, « Contribution à l'étude de la régénération des huiles minérales isolantes », Thèse de Magister, ENP, Décembre 1991.
- [25] **W. H. Vandeschueren**, « Liquides diélectriques », Techniques de l'Ingénieur, D227, 1974.
- [26] **L. Mokhnache**, « Application des réseaux de neurones dans le diagnostic et la prédiction des isolants de haute tension », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2004.
- [27] **P. Vuarchex**, « Huiles minérales isolantes », Techniques de l'Ingénieur, D231, 1986.
- [28] Recommandations **CEI 268**, Gassing des isolants liquides sous contrainte électrique et ionisation, 1985.
- [29] **F. Viale**, « Les huiles isolantes », Techniques de l'Ingénieur, D230, 1968.
- [30] **M. Nemamcha**, « Décharges électriques dans différentes structures d'isolation imprégnée », Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences, ENP, 1993.
- [31] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechniques: concepts et théories », Edition Eyrolles, Paris, 1986.
- [32] **Z. Djemai**, « Détermination de la dimension fractale des décharges électriques radiales sur les surfaces isolantes », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 1998.
- [33] **A. Bérroual**, « Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension », Thèse d'Etat es Sciences Physiques. INPG, Grenoble, 1987.
- [34] **J. P. Gosse, B. Gosse, A. Denat**, « La conduction électrique des liquides diélectriques », Revue RGE, Vol N°10, 1985, pp733-744.
- [35] **R. Tobazéon**, « Préclaquage et claquage des diélectriques liquides », Technique de l'Ingénieur, D2450, 1997.
- [36] **R. Coelho**, « Conduction électrique dans les liquides : Interprétation des phénomènes », Technique de l'ingénieur, D227, 1986.

- [37] **A. Saker, N. Giao Trinh**, « Interpretation of the direct breakdown mechanism in long gaps in transformer oil », 10<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Montréal, Québec, Canada, August 25-29, 1997.
- [38] **L. Herous et M. Nemamcha**, « Etude comparative de la conduction électrique liquides dans différents diélectriques », Troisième Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp. 28-32, Guelma 16-17 Novembre 1999.
- [39] **A. Badent, K. Kist and A. J. Schwab, A. Beroual, W. G. Chadband, M. Danikas, A. B. Sierota, Y. Torshin, M. Zahn**, « Preliminary report for the IEEE deis liquid dielectics committee international study group on streamer propagation in liquids » Conference Record of the ICDL 96 12<sup>th</sup> International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, pp 375-378, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [40] **R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci**, « Formation of vapor bubbles in non-polar liquids initiated by current pulses » IEEE Transaction on Electrical Insulations Vol. 26, N°. 4, pp. 656-662, August 1991.
- [41] **F. Guerbas, S. Bouazabia, A. Beroual**, « Transition d'une bulle gazeuse au streamer », Troisième Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp. 33-36, Guelma 16-17 Novembre 1999.
- [42] **T.Aka-Ngnui, A. Beroual**, « Bubbles instabilities and transition to streamers in liquid dielectrics », Ecole Centrale de Lyon / CEGELY-UPRESA CNRS 5005, IEEE, 1998.
- [43] **I. Fofana, H. Borsi and E. Gockenbach**, « Fundamental Investigations on Some Transformer Liquids under Various Outdoor Conditions », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, N°.6, pp. 1040-1047, December 2001.
- [44] **R. Tobazéon**, « Conduction électrique dans les liquides », Technique de l'Ingénieur, D2430, 2003.
- [45] **L. Mokhnache**, « Contribution à l'étude de l'influence des barrières dans les intervalles d'air pointe-plan par le calcul numérique du champ à l'aide de la méthode des éléments finis avec et sans charge d'espace », Thèse de Magister, Université de Batna, 1997.
- [46] **A. Boubakeur**, « Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan », Thèse de Doctorat, EP. Varsovie, Pologne 1979.
- [47] **A. Zouaghi**, « Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [48] **A. Beroual and A. Zouaghi**, « Barrier effect on the prebreakdown and breakdown phenomena in long oil gaps », Conference Record of the ICDL 96 12<sup>th</sup> International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquid, pp. 300-303, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [49] **B. Boubekki**, « Mesure du champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre », Mémoire de Magister, ENP Alger, 2006.
- [50] **H. Moulai, A. Beroual**, « Courants de streamers dans l'huile minérale pour transformateurs sous tension alternative- transition au claquage », 3<sup>ème</sup> Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.45-48, Guelma, 16 et 17 Novembre 1999.
- [51] **F. Guerbas**, « Etude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition en streamers », Thèse de Magister, ENP Alger, 1994.
- [52] **A. Zouaghi and A. Beroual**, « Barrier effect on the time lag to breakdown of transformer oil gaps under lightning impulse voltage », Ecole Centrale de Lyon / CEGELY-UPRESA CNRS 5005, IEEE, 1998.
- [53] Norme Internationale **ISO 3104**, Produits pétroliers, liquides opaques et transparents détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique, 1994.