

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Ecole Nationale Polytechnique**



Département de Génie Electrique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique  
Laboratoire de Haute Tension

**Mémoire de Magister**

Spécialité : **Génie Electrique**  
Option : **Réseaux Electriques et Haute Tension**

Session : **2008**

Présenté par

**BENAMAR Rabah**

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique  
de l'Ecole Nationale Polytechnique

Directeur de Thèse :

**Professeur Ahmed BOUBAKEUR**

Thème :

***INFLUENCE DU NOMBRE DE CLAQUAGES SUR  
LES PROPRIETES DE L'HUILE DE  
TRANSFORMATEUR***

Soutenu publiquement le *26 juin 2008* devant le jury composé des membres :

<b>Président :</b>	<b>A. Mekhaldi</b>	<b>Professeur</b>	<b>E.N.P</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>A. Boubakeur</b>	<b>Professeur</b>	<b>E.N.P</b>
<b>Examineurs :</b>	<b>M. Tegar</b>	<b>Maître de conférence</b>	<b>E.N.P</b>
	<b>S. Bouazabia</b>	<b>Maître de conférence</b>	<b>U.S.T.H.B</b>
	<b>H. Moulai</b>	<b>Maître de conférence</b>	<b>U.S.T.H.B</b>
<b>Invité :</b>	<b>B. Safta</b>	<b>P.D.G</b>	<b>S.K.M.K</b>

Année universitaire: 2007/2008

## ملخص:

نعرض في هذا العمل تأثير عدد الانفصامات الكهربائية على الخصائص الفيزيائية, الكيميائية والكهربائية لزيت المحولات الكهربائية "بوراك 22", الخصائص المدروسة هي: عامل الضياع الكهربائي, الانسيابية, الناقلية, الحموضة, اللزوجة الحركية, مؤشر الانعكاس, الكثافة, نقطة الإشعاع و مؤشر اللون. كما درسنا أيضا التأثير المركب للحرارة و عدد الانفصامات الكهربائية على عامل الضياع الكهربائي, الإنسيابية و الناقلية.

## الكلمات المفتاحية:

زيت المحولات, بوراك 22, عدد الانفصامات الكهربائية, الحرارة, العوامل الفيزيائية, الكيميائية والكهربائية.

## Résumé :

Nous présentons dans ce travail, l'effet du nombre de claquages sur les propriétés physiques, chimiques et électriques de l'huile de transformateur "BORAK 22". Les propriétés étudiées sont: le facteur de pertes diélectriques, la permittivité, la conductivité, l'acidité, la viscosité cinématique, l'indice de réfraction, la densité, le point d'éclair et l'indice de couleur. Nous avons étudié aussi l'effet combiné de la température et du nombre de claquages sur le facteur de pertes diélectriques, la permittivité et la conductivité.

**Mot clés :** Huile de transformateur, BORAK 22, Nombre de claquages, Température, propriétés physiques, chimiques et diélectriques.

## Abstract:

We present in this work, the effect of the breakdown number on the physical, chemical and electrical properties of transformer oil "BORAK 22". The studied properties are: the dielectric losses factor, the permittivity, the conductivity, the acidity, the cinematic viscosity, the refraction index, the density, the flash point and the colour index. We have also studied the combined effect of the temperature and the number of breakdowns on the dielectric losses factor, the permittivity and conductivity.

**Key word:** Transformer oil, BORAK 22, breakdown number, temperature, physical, chemical and dielectric properties.

# *Dédicaces*

*A Khedidja*

*A Kenza et Sid Ahmed*

*A mes parents*

*A mes frères et soeurs et surtout Dahmane*

*A tous ceux qui me sont chers*

# ***Remerciements***

Je remercie très vivement Monsieur Ahmed Boubakeur, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, de m'avoir confié le sujet, et de l'aide précieuse qu'il a toujours bien voulu m'apporter. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Abdelouahab Mekhaldi, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour l'honneur qu'il me fait de Présider le jury. Je ne saurais omettre de reconnaître sa disponibilité à chaque sollicitation et sa générosité scientifique, ainsi que ses rapports humains.

Que Monsieur Slimane Bouazabia, Maître de conférences à l'U.S.T.H.B, soit remercié à plus d'un titre. En plus de l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner la thèse, Il a toujours été derrière le travail en ne cessant jamais de m'encourager dans les moments de faiblesses et à croire en moi. Ces encouragements ont été un véritable stimulant pour son aboutissement.

Je remercie chaleureusement Monsieur M.Teguar, maître de conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et Monsieur H.Moulai, Maître de conférences à l'U.S.T.H.B, qui ont bien voulu examiner mon travail et m'honorer de leur participation dans le jury.

Mes sincères remerciements accompagnés de vive reconnaissance vont aux personnels de l'Entreprise de Réparation des Transformateurs, SKMK/SONELGAZ de Blida et l'entreprise CABEL. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude pour avoir mis à ma disposition les différents appareils de leurs laboratoires ainsi que leurs aide et disponibilité significatives à chaque sollicitation. Je remercie plus particulièrement Monsieur Bachir SAFTA, Président Directeur Général de l'entreprise (S.K.M.K) et Madame Dalal RAHAL, Chef de laboratoire d'analyse des huiles (S.K.M.K). Que Monsieur Bachir Safta soit vivement remerciée de m'avoir honorer par sa présence.



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE:</b> .....	<b>6</b>
<b>I. HUILE MINERALE ISOLANTE POUR TRANSFORMATEURS ; PARAMETRES ET CARACTERISATION :</b> .....	<b>9</b>
I.1 INTRODUCTION : .....	9
I.2 CARACTERISTIQUES DES HUILES MINERALES : .....	9
I.2.1 <i>Rôle des huiles isolantes</i> : .....	10
I.2.2 <i>Catégories d'huiles et de liquides isolants</i> : .....	10
i- <i>Huiles minérales isolantes</i> .....	12
ii- <i>Hydrocarbures de synthèse</i> .....	12
iii- <i>Hydrocarbures halogénés</i> .....	12
iv- <i>Esters organiques</i> .....	13
v- <i>Huiles silicones</i> .....	13
vi- <i>Liquides divers</i> .....	14
I.3 FORMULATION DES HUILES MINERALES ISOLANTES. ....	14
I.3.1 <i>Les huiles de base</i> .....	15
I.3.2 <i>Les différentes tendances des huiles</i> .....	15
i. <i>La tendance paraffinique</i> : .....	15
ii. <i>La tendance naphténiq</i> ue .....	16
iii. <i>La tendance aromatique</i> .....	16
I.3.3 <i>Les différents additifs</i> .....	16
I.4 CRITERES DE CHOIX D'UN LIQUIDE DIELECTRIQUE : .....	17
I.5 CARACTERISTIQUES D'UNE HUILE MINERALE ISOLANTE .....	18
I.5.1 <i>les propriétés électriques</i> .....	18
i. <i>La permittivité ou la constante diélectrique</i> .....	18
ii. <i>La rigidité diélectrique</i> .....	18
iii. <i>Le facteur de dissipation diélectrique (tg δ)</i> .....	19
I.5.2 <i>Les propriétés physiques</i> .....	19
i. <i>La viscosité</i> .....	19
ii. <i>Le point d'écoulement</i> .....	20
iii. <i>Le point de feu</i> .....	20
iv. <i>Le point d'éclair</i> .....	21
v. <i>Capacité thermique</i> .....	21
vi. <i>Conductivité thermique</i> .....	21
vii. <i>Aspect et couleur</i> .....	21
I.5.3 <i>Les propriétés chimiques</i> : .....	22
i. <i>L'acidité totale</i> .....	22
ii. <i>Oxydation des huiles minérales isolantes</i> .....	22
iii. <i>La teneur en soufre</i> .....	22
I.6 INFLUENCE DES DIFFERENTS FACTEURS SUR LES CARACTERISTIQUES DES DIELECTRIQUES LIQUIDES : .....	23
I.6.1 <i>Humidité</i> .....	23
I.6.2 <i>Distance entre les électrodes</i> .....	24
I.6.3 <i>Température</i> .....	24
I.6.4 <i>Durée d'application de la tension</i> .....	26
I.6.5 <i>Nombre de claquages</i> .....	27
<b>II. PRECLAQUAGE ET CLAQUAGE DES HUILES MINERALES ISOLANTES :</b> .....	<b>29</b>
II.1 INTRODUCTION : .....	29
II.2 POINTS COMMUNS AU CLAQUAGE DES MATERIAUX : .....	30
II.3 CAS DES LIQUIDES : .....	30
II.4 TECHNIQUE D'ETUDE ET TEST DE CARACTERISATION DU CLAQUAGE DES LIQUIDES : .....	32

II.5	CELLULE DE MESURE POUR LIQUIDES : .....	33
II.6	MÉCANISME DE STREAMERS : .....	34
II.6.1	<i>Streamers et claquage</i> : .....	34
II.6.2	<i>Caractéristiques générales des streamers</i> : .....	35
II.6.3	<i>Propagation des streamers dans les huiles de transformateur</i> : .....	36
II.6.4	<i>Streamers et claquage en champ uniforme</i> : .....	37
II.7	PHÉNOMÈNES DE CLAQUAGE DANS LES HUILES DE TRANSFORMATEUR : .....	39
II.7.1	<i>Influence de la distance entre électrodes sur le claquage de l'huile de transformateur</i> : .....	40
II.7.2	<i>Influence de la pureté d'huile</i> : .....	41
II.7.3	<i>Dispersion des résultats</i> : .....	41
II.7.4	<i>Influence de la composition de l'huile</i> : .....	42
II.7.5	<i>Influences des particules sur la rigidité</i> : .....	42
II.7.6	<i>Influence de l'eau sur la rigidité</i> : .....	43
II.7.7	<i>Influence de l'aire des électrodes et du volume de liquide soumis au champ</i> : .....	44
<b>III.</b>	<b>EFFET DU NOMBRE DE CLAQUAGES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DE L'HUILE MINÉRALE DE TRANSFORMATEUR.....</b>	<b>47</b>
III.1	INTRODUCTION : .....	47
III.1.1	<i>Mode opératoire</i> : .....	47
III.1.2	<i>Caractérisation de l'huile neuve</i> : .....	48
III.2	ESSAIS DIELECTRIQUES : .....	48
III.2.1	<i>Mesure de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique</i> : .....	48
III.2.2	<i>Mesure du facteur de dissipation diélectrique <math>tg\delta</math></i> : .....	50
i-	<i>Variation de la <math>tg\delta</math> en fonction du nombre de claquages à <math>T=90^{\circ}C</math> (CEI247) [13]</i> .....	51
ii-	<i>Variation du facteur de dissipation diélectrique <math>tg\delta</math> en fonction de la température et du nombre de claquages</i> : .....	53
III.2.3	<i>Mesure de la permittivité relative <math>\epsilon_r</math></i> : .....	56
i-	<i>Variation de la permittivité relative <math>\epsilon_r</math> en fonction du nombre de claquages à <math>T=90^{\circ}C</math></i> : .....	56
ii-	<i>Variation de la permittivité relative en fonction de la température et du nombre de claquages</i> : .....	57
III.2.4	<i>Mesure de la conductivité <math>\sigma</math></i> : .....	59
III.2.5	<i>Mesure de l'indice d'acidité</i> : .....	63
III.2.6	<i>Mesure de la viscosité cinématique absolue à <math>40^{\circ}C</math></i> : .....	65
III.2.7	<i>Mesure de l'indice de réfraction</i> : .....	66
III.2.8	<i>Mesure de la densité de l'huile</i> : .....	67
III.2.9	<i>Point d'éclair</i> : .....	68
III.2.10	<i>Indice de couleur</i> : .....	69
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE : .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES : .....</b>	<b>74</b>



**LISTE DES TABLEAUX**

<i>Tableau I-1 : Caractéristiques et domaines d'application des diverses catégories d'huiles diélectriques [15].</i>	11
<i>Tableau III-1 : Caractéristiques de l'huile neuve.</i>	48
<i>Tableau III-2: Tension de claquage en fonction du nombre de claquages.</i>	49
<i>Tableau III-3: Variation du facteur de dissipation diélectrique <math>tg\delta</math> en fonction du nombre de claquages à <math>T=90^{\circ}C</math>.</i>	52
<i>Tableau III-4: Variation de la <math>tg\delta</math> en fonction de la température et du nombre de claquages.</i>	53
<i>Tableau III-5 : Variation de la permittivité relative <math>\epsilon_r</math> en fonction du nombre de claquages à <math>90^{\circ}C</math></i>	56
<i>Tableau III-6 : Variation de la permittivité relative <math>\epsilon_r</math> en fonction du nombre de claquages et de la température</i>	58
<i>Tableau III-7 : Variation de la conductivité <math>\sigma_r</math> en fonction du nombre de claquages à <math>90^{\circ}C</math>.</i>	61
<i>Tableau III-8 : Variation de la conductivité <math>\sigma</math> en [pS/m] en fonction du nombre de claquages et de la température</i>	61
<i>Tableau III-9: Variation de l'acidité en fonction du nombre de claquages</i>	64
<i>Tableau III-10 : Variation de la viscosité cinématique absolue en fonction du nombre de claquages à <math>40^{\circ}C</math>.</i>	66



## LISTE DES FIGURES

<i>Figure I-1 : Influence de la teneur relative en eau sur la rigidité diélectrique mesurée en tension alternative, entre électrodes planes et parallèles [24].</i>	24
<i>Figure I-2 : Variation du champ en fonction de la température d'après Adamcewski [31].</i>	25
<i>Figure I-3 : Durée d'application de la tension [17].</i>	26
<i>Figure II-1 : configuration des électrodes utilisés pour l'étude de claquage.</i>	34
<i>Figure II-2: Vitesse moyenne et allure schématisée des streamers positifs selon les différents modes de propagation entre pointe et plan soumis à des crêteaux de tension [52].</i>	37
<i>Figure II-3 : Enregistrement de la lumière émise lors de la propagation de streamers positifs entre pointe et plan, à l'aide d'une caméra à balayage de fente [52].</i>	37
<i>Figure II-4 : Aspect des streamers dans les liquides isolants.</i>	38
<i>Figure II-5 : Tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative en fonction de l'écartement des électrodes en géométrie quasi uniforme et en géométrie très divergente [53].</i>	40
<i>Figure II-6 : Valeur crête de la tension de claquage d'une huile de transformateur en fonction de la distance entre les électrodes en géométrie divergente (tige-plan) pour différentes formes d'onde de tension [54].</i>	41
<i>Figure II-7 : Influence de la teneur relative en eau sur la rigidité sous tension alternative.</i>	44
<i>Figure III-1: Spintermètre, OTS 100 AF/2.</i>	49
<i>Figure III-2 : Variation de la tension de claquage en fonction du nombre de claquages.</i>	49
<i>Figure III-3 : Pont de Scherring</i>	51
<i>Figure III-4: Cellule d'essai du pont de Scherring TETTEX 2903</i>	51
<i>Figure III-5: Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction du nombre de claquages à 90°C.</i>	52
<i>Figure III-6: Variation du facteur de dissipation en fonction de la température pour différents nombres de claquages</i>	54
<i>Figure III-7 : Variation du facteur de dissipation en fonction du nombre de claquages pour différentes températures de mesure.</i>	55
<i>Figure III-8 : Variation de la permittivité relative en fonction du nombre de claquages à 90°C.</i>	57
<i>Figure III-9: Variation de la permittivité relative en fonction de la température et du nombre de claquages.</i>	58
<i>Figure III-10 : Variation de la permittivité relative en fonction de la température pour différents nombres de claquages.</i>	59
<i>Figure III-11 : Conductimètre pour isolant liquide VZ220A[65].</i>	60
<i>Figure III-12 : Exemple de calcul à l'aide du LCM-8716 CALCULATOR [65].</i>	60
<i>Figure III-13 : Variation de la conductivité en fonction du nombre de claquages à 90°C.</i>	61
<i>Figure III-14 : Variation de la conductivité en fonction de la température après différents nombres de claquages.</i>	62
<i>Figure III-15: Variation de la conductivité en fonction de la température après différents nombres de claquages.</i>	63
<i>Figure III-16: Système de neutralisation.</i>	64
<i>Figure III-17 : Variation de l'acidité de l'huile en fonction du nombre de claquages.</i>	65
<i>Figure III-18 : Viscosimètre.</i>	65
<i>Figure III-19 : Variation de la viscosité cinématique en fonction du nombre de claquages à 40°C.</i>	66
<i>Figure III-20: Réfractomètre.</i>	66
<i>Figure III-21 : Variation de l'indice de réfraction en fonction du nombre de claquages.</i>	67
<i>Figure III-22: Densimètre MBL</i>	67
<i>Figure III-23: Variation de la densité en fonction du nombre de claquages.</i>	68
<i>Figure III-24: Autoflash.</i>	68
<i>Figure III-25: Variation du point d'éclair en fonction du nombre de claquages.</i>	69
<i>Figure III-26: Colorimètre.</i>	69



**INTRODUCTION GENERALE**

---

**INTRODUCTION GÉNÉRALE:**

Les isolants électriques étaient, à l'origine, des produits naturels non imprégnés qui, en contact direct avec l'air, s'oxydaient rapidement. Il n'était guère possible ni évident, d'utiliser des liquides, bien qu'en 1854 on eût plongé des enroulements dans l'essence térébenthine augmentant leur tenue diélectrique, leur durée de fonctionnement et montrant que l'on peut soustraire l'isolation solide à l'oxydation directe [1].

Les premières bobines d'induction, les transformateurs primitifs, les transformateurs industriels, réalisés dès 1884, étaient du type sec. Il fallait attendre 1891 pour que l'huile de pétrole soit utilisée à titre expérimental dans l'isolation de transformateurs triphasés ; mais, la fin du XIX<sup>e</sup> siècle verra encore des appareils dans l'air de 1000 kVA sous 30 kV, tous ventilés à partir de 50 kVA.

Devant la multiplication des réseaux de distribution d'énergie électrique et l'accroissement des puissances installées, les transformateurs dans l'air deviennent énormes et ne peuvent fonctionner sans pertes d'énergie, ce qui se traduit par une élévation de la température de leurs parties constituantes. Il en découle la nécessité d'un refroidissement pour obtenir l'équilibre thermique, compatible avec une durée de vie normale des équipements. Les liquides le permettent, mais doivent en outre assurer l'isolation électrique des conducteurs sous tension, ce qui place leurs propriétés électriques au premier plan [1].

Pour certaines applications, cet accroissement important de la puissance a fait que le rôle d'évacuation des pertes (thermiques) par l'huile est prioritaire devant l'isolation électrique.

Peu à peu, les paramètres électriques se précisèrent sous l'influence de diverses contraintes d'emploi. Les askarels, suspectés dès 1966, ont été progressivement interdits dans tous les pays. On a alors assisté à l'apparition d'un nombre important de nouveaux liquides qui ont posé le problème de choix et de définition de critères de sélection [2].

Dans le domaine des transformateurs, l'interdiction des askarels et de tous les produits chlorés n'a pas permis de conserver la propriété de résistance au feu. En effet, ces produits sont inflammables à des températures très élevées (supérieures à 300°C) par rapport aux températures maximales de fonctionnement (90°C).

Les diélectriques liquides pour l'électrotechnique appartiennent à un ensemble de fluides industriels (huiles lubrifiantes, solvants, liquides caloporteurs, etc. ...). Ils sont désignés, dans la pratique courante, sous le terme d'huile isolante ou de liquide isolant et sont utilisés, en électrotechnique, dans les matériels dits immergés (disjoncteurs, transformateurs, condensateurs, câbles d'énergie, etc. ...).

Durant la mise en service de ces appareils électriques, l'huile est soumise à différentes contraintes électriques, mécaniques, thermiques, etc. ... qui à plus ou moins long terme peuvent affecter ses caractéristiques.

Une des contraintes qui se présente dans les transformateurs et plus particulièrement les disjoncteurs est le claquage. En effet, à chaque ouverture ou fermeture d'un disjoncteur, une décharge peut survenir et le rôle de l'huile est d'assurer l'extinction de cette décharge. Notre travail s'inscrit dans cet axe.

Pour cela, on se propose d'étudier la variation des propriétés physiques et chimiques de l'huile de transformateur soumise à une série de claquages. Il s'agira de la permittivité, le coefficient de pertes diélectriques  $\tan\delta$ , la conductivité électrique, l'acidité, la viscosité cinématique, l'indice de réfraction, la densité, .....

Dans le premier chapitre, nous présentons la classification et le rôle des huiles isolantes, leurs caractéristiques et les différents facteurs qui peuvent influencer sur ces caractéristiques, entre autre l'humidité, la pression hydrostatique, la distance entre les électrodes et la température.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation générale de travaux de recherche ultérieurs effectués sur l'huile minérale de transformateurs. On s'intéressera, en particulier, aux phénomènes de préclaquage, claquage et propagation des streamers en champ uniforme et en champ non uniforme.

Le dernier chapitre est une présentation des différents essais que nous avons réalisés dans deux laboratoires (SKMK et Cabel) sur l'huile de transformateur (Borak 22), utilisée dans les transformateurs et disjoncteurs de la SONELGAZ. Ils seront suivis des résultats et commentaires sur les différentes caractéristiques étudiées. On examinera la variation de chacune des caractéristiques en fonction du nombre de claquages, pour différentes températures. Ces résultats seront confrontés aux recommandations des normes en vigueur [3 –13].

Nous terminerons par une conclusion et des perspectives.

**CHAPITRE I**

**HUILE MINERALE ISOLANTE POUR  
TRANSFORMATEURS**

**PARAMETRES ET CARACTERISATION**

---

## I. HUILE MINÉRALE ISOLANTE POUR TRANSFORMATEURS ; PARAMÈTRES ET CARACTÉRISATION :

### I.1 Introduction :

L'emploi d'une huile minérale en tant que moyen de refroidissement et d'isolement n'est pas nouveau. Aujourd'hui, l'huile minérale est toujours utilisée comme isolant parce qu'elle offre non seulement le meilleur compromis prix/performance, mais également un haut niveau de compatibilité avec les autres matériaux utilisés dans les transformateurs. D'autres fluides bien plus coûteux, tels que les huiles silicone, certains types d'esters, etc...., sont réservés à des applications particulières pour lesquelles le prix élevé peut être justifié [14].

### I.2 Caractéristiques des huiles minérales :

Les isolants électriques furent, à l'origine, des produits naturels non imprégnés qui, en contact direct avec l'air, s'oxydaient facilement. La première tentative pour protéger des enroulements de la corrosion en les plongeant dans de l'essence de térébenthine date de 1854. Cette immersion dans un liquide organique a amélioré la tenue électrique, allongé la durée de fonctionnement et soustrait l'isolation solide à l'oxydation directe. Il a fallu attendre 1891 pour que l'huile de pétrole soit utilisée à titre expérimental dans l'isolation de transformateurs triphasés.

La nécessité d'employer des liquides de sécurité révéla, à la fin des années vingt, avec les askarels et liquides de synthèse, la possibilité de créer des molécules adaptées, par exemple de permittivité plus grande que celle des huiles minérales.

Peu à peu les paramètres électriques se précisèrent sous l'influence de diverses contraintes d'emploi. Les askarels, suspectés dès 1966, puis interdits dans certains pays en 1972 (en Algérie à partir de 1985) sont peu à peu remplacés par d'autres liquides, notamment par la Borak 22 (huile minérale) dans le cas des huiles de transformateurs utilisés par la SONELGAZ.

### I.2.1 Rôle des huiles isolantes :

Les huiles et liquides isolants sont utilisés comme imprégnants d'isolants solides et produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs, condensateurs, câbles, disjoncteurs, etc....

Ces appareils présentent des pertes d'énergie qui, aussi faibles soient-elles (0,1 à 1% de la puissance nominale), provoquent une élévation de la température. Celle-ci peut être limitée par l'emploi d'huile ou de liquide ou par refroidissement naturel (convection) ou forcé (circulation).

90 à 95% des liquides isolants sont représentés par les huiles minérales, dont l'importance commerciale s'explique par la facilité de les obtenir (à partir des coupes pétrolières) et par leur prix, le plus bas de tous les isolants. Cette masse d'huile ne représente cependant qu'une infime partie (2%) de l'ensemble des lubrifiants [15].

Les trois fonctions principales d'une huile isolante sont :

- ↪ évacuer les pertes d'énergie;
- ↪ isoler au sens strict (c'est-à-dire ralentir l'oxydation de l'isolation solide),
- ↪ isoler au sens électrique.

A côté de ces trois fonctions fondamentales, il y a lieu d'ajouter la fonction de résistance à l'incendie, dont le pouvoir d'extinction des arcs électriques, et le pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement.

### I.2.2 Catégories d'huiles et de liquides isolants :

Le tableau I-1 présente, par catégorie, les types les plus courants d'huiles et de liquides isolants. On notera que ces liquides sont généralement des liquides organiques, composés de molécules des séries d'hydrocarbures les plus stables : aliphatiques (alcanes), alicycliques (cyclanes), aromatiques ou de leur dérivés halogénés; ce sont rarement des composés à groupements fonctionnels.

Cela correspond à la propriété évidente d'utilisation, qui est la stabilité en service sous contraintes thermique et électrique, afin d'assurer aux matériels les durées de vies constatées de plus de 30 ans [16].

<b>Différentes catégories de diélectriques liquides</b>				
<b>N°</b>	<b>Catégorie</b>	<b>Type</b>	<b>Application</b>	<b>Caractéristiques particulières</b>
I.	Huiles minérales	Naphténiques	tous types : transformateurs, condensateur, câbles, etc.	- Bas point d'écoulement sans additif
		Paraffiniques		- Teneur en hydrocarbures aromatique > 12%
		A masse moléculaire élevée	transformateurs de distribution (remplacement des PCB)	- Indice de viscosité de 115 à 120 ( 60 pour une huile naphténique)
II.	hydrocarbure de synthèse	polybutènes	câbles d'énergie	- Pertes diélectriques très faible $\text{tg}\delta < 0,0005$ à 50 Hz et 90°C
		Alkylbenzènes	Traversées	- Rigidité électrique au choc de foudre élevée
		Alkylnaphtalènes	Condensateurs	
		Alkylbiphéniles	Condensateurs tout film	
III.	Hydrocarbures halogénés	Perchloréthylène	Transformateurs de distribution	- Résistant au feu
		Trichlorobenzènes	liquides d'attente en rétrofilling (post-remplissage)	- Appareils scellés et à points chauds limités par la température d'ébullition
		Polychlorobiphéniles (PCB)	Transformateurs	- Solvant des PCB
		Polychlorophénylalcane		- Ininflammabilité
		Trichlorotrifluoroéthane	transformateurs pour équipement électronique et rayon X	- Biodégradabilité
			- Ininflammabilité	
IV.	Esters organiques	Néocaprato de benzyle	Condensateur au papier	- Permittivité relative > 5 à 20°C à 50 Hz
		Diocetylphthalate	Remplacement des PCB	- Permettent en mélange d'accroître le point de feu des diélectriques liquides
		Esters phosphates	organe de coupure immergé	
		Esters du pentaérythrol	Transfo de traction et de distribution	- Point de feu > 300°C
V.	Silicones liquides	Polydiméthylsiloxanes	Transfo de traction	- Point de feu > 300°C
		polyméthylphénylsiloxane	Liquide expérimental	- Indice de viscosité élevé : 170
VI.	Liquides divers	éthers-oxydes (alkyldiphényle-éther, ditolyléther)	Condensateurs	- Absorption gazeuse sous décharge partielle
		Mélanges de liquides	Condensateurs	- Permittivité relative, à 20°C, supérieur à 3, adaptabilité.
		Gaz liquéfiés (Argon)	Enroulement supraconducteur et cryogénique	- Adaptabilité
				- Réduction ou suppression de pertes Joule.

**Tableau I-1** : Caractéristiques et domaines d'application des diverses catégories d'huiles diélectriques [15].

*i- Huiles minérales isolantes*

Les huiles minérales isolantes résultent de bases lubrifiantes choisies, provenant de distillats de pétrole sélectionnés soumis à un raffinage poussé. Ce sont des liquides dont les performances en service n'ont cessé de s'améliorer depuis maintenant plus d'un siècle [15].

La première phase de leur développement a concerné l'amélioration de leur stabilité à l'oxydation qui a atteint un niveau satisfaisant, permettant leur utilisation pendant toute la durée de vie de matériels les plus contraints thermiquement.

La deuxième phase de leur évolution a été consacrée à la recherche de leur stabilité sous contraintes électriques et ionisantes. Les constructeurs ont pu avoir une huile minérale stable sous décharges électriques.

*ii- Hydrocarbures de synthèse*

Elaborés principalement par l'industrie pétrochimique, ces liquides appartiennent à deux groupes de liquides : les polybutènes et les hydrocarbures aromatiques. Ils ont révélé un comportement diélectrique meilleur que celui des huiles minérales dans la réalisation de liquides à haute viscosité pour câbles (polybutènes) et à fort pouvoir d'absorption gazeuse sous ionisation (alkylbenzènes). Ils peuvent être utilisés en mélange avec les huiles minérales pour améliorer une caractéristique particulière, par exemple la viscosité ou l'absorption gazeuse sous ionisation [15].

*iii- Hydrocarbures halogénés*

Les huiles minérales et les hydrocarbures de synthèse sont inflammables et produisent, sous l'action d'arcs électriques de puissance, des gaz eux-mêmes inflammables (hydrogène, méthane, etc...).

La nécessité de réduire les risques d'incendie des matériels électriques est à l'origine de la synthèse des hydrocarbures halogénés, principalement des dérivés aromatiques chlorés et des polychloroalcanes.

Les premiers hydrocarbures halogénés connus, et désignés sous le terme générique d'askarels, sont des polychlorobiphényles (PCB), obtenus à partir du biphényle et pouvant être utilisés en mélange avec des chlorobenzènes. Ils n'ont pas de point de feu et sont ininflammables, pour autant que l'ininflammabilité d'un liquide résulte de



---

l'ininflammabilité de ses vapeurs. Ces produits sont connus commercialement sous les noms de *pyralène*, *Arochlor*, etc....

Ces produits présentent une stabilité chimique éprouvée par des décennies d'utilisation. Non biodégradables et pouvant donner des produits toxiques à haute température.

#### *iv- Esters organiques*

Les esters pour l'électrotechnique, nés dans les années cinquante, sont les premiers produits hydrocarbonés à groupement fonctionnels.

Ils résultent de la condensation d'un acide organique sur un alcool avec élimination d'une molécule d'eau. Ces composés sont modérément polaires du fait de l'électronégativité des atomes d'oxygènes présents dans le squelette hydrocarboné [17].

On distingue différents types d'ester, selon que l'on part d'acide minéraux ou d'acides organiques.

A partir d'acides minéraux ; on obtient les esters arylphosphoriques qui possèdent un bon comportement au feu (point de feu d'environ 350°C), mais n'ont pas de bonnes propriétés électriques. En revanche, les esters d'acides organiques représentés au début par le dioctylsébaçate (DOS) et les esters comme les huiles végétales présentent de bonnes propriétés électriques. Ce sont, comme les hydrocarbures halogénés, des liquides dipolaires de constante diélectrique de l'ordre de 3 – 5 à 50 Hz et 90°C et permettent d'obtenir des liquides pour condensateurs à diélectrique mixte satisfaisants.

Depuis le début des années quatre-vingts, les esters organiques pour hautes températures (phtalates ou esters du pentaérythrol) ont été étudiés pour emploi dans les transformateurs en remplacement des PCB. Ils peuvent supporter des échauffements de plus de 100°C.

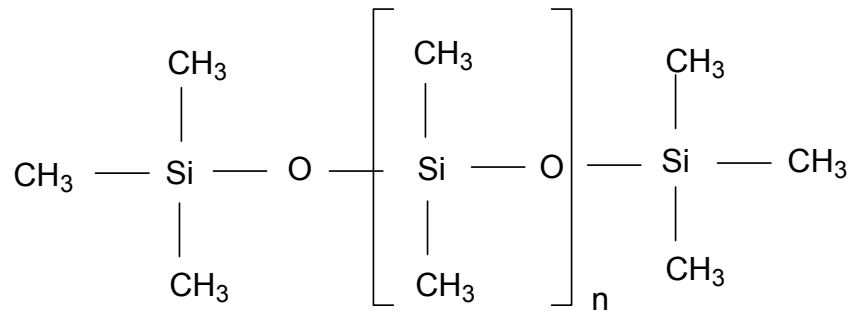
Actuellement, on compte plus d'une dizaine de marques commerciales d'esters organiques. Tous ces produits sont biodégradables et non toxiques.

#### *v- Huiles silicones*

Les silicones pour l'électrotechnique, polymères liquides du diméthylsiloxane, ou polydiméthylsiloxanes (PDMS), peuvent être considérées comme relevant de la chimie minérale. Les silicones liquides présentent simultanément de bons comportements à basse température (point d'écoulement de -60°C) et à haute température (température

d'utilisation de 150°C), appréciables dans certains matériels soumis à des variations thermiques importantes.

Ces huiles sont constituées d'une chaîne moléculaire linéaire, dont les éléments sont formés d'atomes de silicium et d'oxygène alternés. Les groupements organiques latéraux saturants les valences libres de l'atome de silicium sont dans ce cas des groupements méthyle. La formule générale est la suivante:



La valeur de l'indice (n) caractérise son degré de polycondensation, il est environ de 30 [15].

#### vi- *Liquides divers*

Ces liquides peuvent correspondre à des conceptions nouvelles: transformateurs à points chauds limités par enthalpie de vaporisation, bobines cryogéniques ou condensateurs de puissance à champ électrique élevé.

### 1.3 *Formulation des huiles minérales isolantes.*

La réalisation d'une formule d'huile consiste à trouver la composition optimale de base et les additifs permettant de répondre aux exigences des diverses contraintes d'utilisation. La solution "cocktail" contient :

- ↪ des produits de base.
- ↪ des additifs servant, soit à renforcer les propriétés des produits de base, soit à conférer à l'ensemble des caractéristiques spécifiques.

### I.3.1 Les huiles de base

Selon leur viscosité, les fractions lubrifiantes sont appelées distillat léger, distillat moyen, distillat lourd. Chacune de ces fractions est caractérisée par ses propriétés usuelles, telle que: densité, viscosité, point d'éclair, etc....

Pour aboutir aux limites de base proprement dites, les fractions lourdes subissent une série de traitements destinés à en retirer les constituants indésirables. Ces traitements sont nombreux, parmi les plus utilisés, nous citerons:

- Le traitement à l'acide sulfurique;
- Les traitements aux solvants tels que le phénol et le furfuro;
- Les traitements de déparaffinage;
- Les traitements de neutralisation et de décoloration avec des terres spéciales.

### I.3.2 Les différentes tendances des huiles

Les huiles de base répondent à de grandes tendances chimiques de caractères spécifiques particuliers qui sont:

*i. La tendance paraffinique :*

Elle est représentée par l'ensemble des hydrocarbures saturés à chaîne droite ramifiée ou non, mais non cyclique.

Les paraffines qui sont plus intéressantes se rencontrent en qualité appréciable dans les fractions de bruts paraffiniques. Alors que les paraffines à chaîne droite de poids moléculaire élevé sont retirées par déparaffinage. Les caractères de cette famille d'huiles riches en hydrocarbures paraffiniques sont:

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

---

*ii. La tendance naphténiq*

Les types de naphténes ayant seulement quelques cycles par molécule et une prépondérance d'atomes de carbone sous forme de longues chaînes paraffiniques possèdent probablement les propriétés qui sont les plus désirées dans les huiles de graissage. 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.

*iii. La tendance aromatique*

Ces fractions présentent des caractères encore plus prononcés que les hydrocarbures naphténiq. Du fait de leur densité élevée et de leur indice de viscosité faible, ces fractions présentent une importance limitée dans la composition des huiles finies. Elles sont faiblement oxydables, ce qui provoque la formation de produits résineux ou asphaltiques accompagnés de dérivés corrosif.

### I.3.3 Les différents additifs

Ce sont des produits chimiques qui sont ajoutés en faible quantité aux huiles de base pour améliorer certaines de leurs propriétés tels que l'indice de viscosité, le pouvoir antioxydant, etc. Il existe de nombreux additifs qui sont d'une importance capitale dans les huiles minérales isolantes.

*a. Les anti-oxydants*

La durée de vie d'une huile dépend d'abord de sa résistance à l'oxydation. Bien que ce phénomène ne puisse jamais être évité, il est possible de le limiter d'une façon très efficace en utilisant des composés chimiques dotés d'une activité particulière sur une ou plusieurs des différentes étapes chimiques de la réaction d'oxydation des hydrocarbures. On distingue deux catégories d'huile minérale isolante selon qu'elle contienne ou ne contienne pas d'agents antioxydants:

- 
- Huile non inhibée: c'est une huile isolante qui ne contient pas d'antioxydant, mais qui peut contenir d'autres additifs (Borak 22).
  - Huile inhibée: c'est une huile isolante qui contient de 0,15 à 0,4% en masse d'un antioxydant, par exemple le 2.6 diterbutyl-paracrésol (DBPC) ou 2.6 diterbutyl-phenol (DBP), pour augmenter la stabilité de l'huile à l'oxydation [17].

b. Les améliorants de l'indice de viscosité

Ces produits ont pour action d'épaissir l'huile lorsque la température s'élève. Ce sont des polymères du type polyisobutène et surtout polyméthacrylates dont la masse moyenne peut varier de 200.000 à 800.000 UMA (unité de masse d'atome). Les produits de plus haut poids moléculaire sont les plus efficaces pour améliorer l'indice de viscosité, mais sont aussi les plus sensibles à la dégradation.

#### *1.4 Critères de choix d'un liquide diélectrique :*

Avant de choisir un liquide diélectrique, il faut prendre en considération certains facteurs, à savoir:

- La toxicité du produit (pollution froide): la toxicité du produit est à prendre en compte dans tous les cas d'éclatement de transformateur sans incendie.
- Le vieillissement: le liquide a-t-il tendance à vieillir et s'altérer très vite en fonction du temps ?
- L'embrassement du diélectrique dépend de son point d'ébullition et de la résistance mécanique du transformateur. Les huiles minérales isolantes remplissent ces conditions; pour cela elles sont très utilisées.
- L'opacité des fumées : de toute évidence, un diélectrique ne dégage de fumées qu'à partir du moment où il a pris feu; l'opacité des fumées peut gêner gravement les secours.

Toutefois, la fabrication de l'huile isolante finie est orientée par les tendances des huiles de base; le choix d'une ou plusieurs huiles de base est à déterminer en fonction :

- Des caractéristiques physiques et chimiques que l'on désire conférer à l'huile finie comme la viscosité, la densité, la stabilité,.....
- De la nature chimique recherchée : paraffinique, naphténique ou mixte [18].

## 1.5 Caractéristiques d'une huile minérale isolante

Le choix d'une huile isolante repose sur un nombre important de propriétés qu'on regroupe en trois (03) :

- Les propriétés électriques ;
- Les propriétés physiques;
- Les propriétés chimiques.

### 1.5.1 les propriétés électriques

Les caractéristiques électriques des liquides dépendent de leur formation. L'étude des propriétés électriques est un domaine qui se caractérise par sa pluridisciplinarité puisqu'il touche à la chimie, à l'électronique et à la mécanique des fluides.

#### i. La permittivité ou la constante diélectrique

Les huiles minérales isolantes sont constituées en majeure partie par des hydrocarbures saturés dont les molécules ne sont pas polaires [19]. La permittivité d'une huile minérale pure est, surtout, due aux phénomènes de polarisation électronique et atomique. C'est une caractéristique électrique liée à la formation du liquide. La permittivité absolue s'exprime en Farad par mètre. Elle définit la possibilité, sous l'action du champ électronique, à libérer des charges.

La **constante diélectrique** ( $\epsilon_r$ ) est définie comme étant le rapport de la capacité (C) d'une cellule remplie de liquide à la capacité ( $C_v$ ) de la même cellule ayant le vide comme diélectrique

$$\epsilon_r = C/C_v \quad (I-1)$$

Elle est influencée par la température ainsi que la fréquence appliquée à ce liquide isolant, elle donne donc une idée sur la charge électrique qu'elle contient. Elle est comprise entre 2.0 et 2.2 pour les huiles minérales isolantes [19].

#### ii. La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans décharge [15], [20].

Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans des 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 ».

La rigidité diélectrique n'est pas un critère de la qualité de fabrication des huiles isolantes, mais une grandeur conventionnelle destinée à déceler leur état plus ou moins grand de pollution physique par l'eau et d'autres matières en suspension et à conclure ou non de l'opportunité de faire un traitement de décharge et filtration avant introduction dans les appareils auxquels, elles sont destinées.

*iii. Le facteur de dissipation diélectrique ( $\text{tg } \delta$ )*

Le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau isolant est la tangente de l'angle de perte qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte.

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes diélectriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est la présence d'un courant de fuite qui traverse le liquide sous un champ électrique [19].

Cette caractéristique est très sensible à la présence de produits de vieillissement de l'huile. Il existe une relation entre le facteur de dissipation et l'acidité de l'huile. Une acidité élevée est accompagnée par une valeur élevée de  $\text{tg } \delta$ , mais l'inverse n'est pas vérifié. Une valeur défavorable de  $\text{tg } \delta$  peut être due à la dissolution dans l'huile des produits qui n'ont pas pour origine l'altération de l'huile.

Une huile neuve possède un facteur de dissipation diélectrique inférieur ou égale à  $5 \cdot 10^{-3}$  [5].

## 1.5.2 Les propriétés physiques

*i. La viscosité*

Elle traduit les forces qu'opposent les molécules d'huile à une force tendant à les déplacer. En d'autres termes, elle mesure les frottements dus aux mouvements internes entre les molécules du fluide.

Il existe deux types de viscosité : la viscosité dynamique qui visualise l'aspect microscopique et la viscosité cinématique exprimé en centistokes (cst) qui est la plus importante car elle traduit l'aspect macroscopique.

Le choix d'une huile dépend essentiellement de la valeur de la viscosité, c'est un critère particulièrement important pour apprécier la qualité de l'huile.

Elle s'exprime par la relation suivante :

$$CST = Ct - \frac{B}{t} \quad (I-2)$$

*CST* : Viscosité en centistokes.

*C* : Constante de viscosité.

*t* : Durée de l'écoulement en secondes.

*B* : Coefficient du viscosimètre.

L'indice de viscosité est une caractéristique donnant la variation de la viscosité d'une huile en fonction de la température.

Une huile est d'autant meilleure que la variation de sa viscosité en fonction de la température est faible.

#### ii. *Le point d'écoulement*

L'utilisation de matériels électriques extérieurs nécessite de connaître la viscosité des liquides à basse température correspondant au fonctionnement en hiver (-25°C) ou dans des conditions climatiques extrêmes (-60°C).

Les liquides utilisés se figent généralement à des températures pouvant aller de -60°C (polybutènes, huiles silicones) à -30°C (huile minérale).

Le point d'écoulement, température à laquelle les liquides se figent, 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).

#### iii. *Le point de feu*

Le point de feu est la température minimale pour laquelle la combustion des vapeurs d'un liquide sera entretenue.



*iv. Le point d'éclair*

C'est la température minimale à laquelle les vapeurs d'un produit s'enflamment à l'approche d'une flamme nue.

Le point d'éclair et le point de feu servent ainsi à caractériser l'inflammabilité d'une huile.

*v. Capacité thermique*

La capacité thermique massique et la masse volumique permettent de définir en partie la constante de temps thermique des matériels à pleine charge, suivant le type de refroidissement, naturel ou forcé.

La capacité thermique des huiles isolantes exprimée en Joules par kilogramme Kelvin croît avec la température et est généralement d'autant plus élevée que la masse volumique est plus faible [19].

*vi. Conductivité thermique*

La conductivité thermique ( $\lambda$ ), mesurée en watts par mètre.Kelvin [W/m.K] 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. Les valeurs usuelles sont de l'ordre de 0,14 W/(m.K) .

*vii. Aspect et couleur*

L'aspect est un test visuel de l'huile qui permet de détecter la présence des corps en suspension (poussière, humidité) et d'évaluer la couleur et la viscosité. Un bon état visuel de l'huile, signifie un aspect limpide.

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.

L'aspect, la couleur et l'odeur, nous renseignent sur l'état général de l'huile, en effet ; une mauvaise odeur renseigne sur la présence d'amorçages d'arcs électriques dans l'huile, une couleur sombre indique une dégradation de l'huile et l'aspect trouble signifie la présence d'eau et d'impuretés [19].

---

### 1.5.3 Les propriétés chimiques :

#### *i. L'acidité totale*

L'acidité représente les dérivés acides formés au cours du vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de l'huile. Elle est exprimée par la mesure de l'indice d'acidité qui est le nombre de mg de KOH normale nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile.

L'acidité d'une huile neuve est très faible en service. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile en service [5]. 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.

#### *ii. Oxydation des huiles minérales isolantes*

On désigne par oxydation, un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène. Il se produit tout d'abord des produits de décomposition solubles : aldéhydes, cétones, acides organiques, puis par condensation et polymérisation, des dépôts insolubles.

Les conséquences de l'oxydation de l'huile pour les isolations sont :

- Une mauvaise évacuation de la chaleur par suite de l'accroissement de la viscosité et de la présence de dépôts
- Une détérioration des propriétés électriques de l'huile ; sa conductivité et sa tangente de l'angle de pertes augmente,
- Une augmentation des pertes dans les isolations imprégnées qui peuvent entraîner le claquage thermique,
- L'apparition de l'acidité dans l'huile.

#### *iii. La teneur en soufre*

Une huile minérale peut contenir des traces de soufre, soit sous la forme de soufre libre, soit sous forme de composés sulfurés; les premiers sont très corrosifs, les seconds le sont beaucoup moins, tant que la température ne dépasse pas 100°C environ.

La présence de soufre est détectée par la corrosion d'une lame de cuivre électronique immergée dans une huile à 140 °C pendant 19 heures [5], la coloration qu'elle prend permet de juger si les composés soufrés sont corrosifs ou non.

---

## I.6 Influence des différents facteurs sur les caractéristiques des diélectriques liquides :

Il existe plusieurs facteurs qui ont une influence sur la valeur du champ disruptif. Parmi ces facteurs, les plus importants sont l'humidité, les impuretés et les gaz dissous dans le liquide, la pression hydrostatique, la configuration des électrodes, la température, la durée d'application de la tension et l'état antérieur du liquide.

### I.6.1 Humidité

L'eau est le contaminant le plus courant qui affecte les huiles minérales. Elle ne réduit sensiblement ces caractéristiques qu'au-delà du point de saturation [21] qui représente une dizaine de ppm d'eau à température ambiante dans les huiles minérales. D'une manière continue il a été observé que la quantité d'eau dissoute augmente avec le degré d'oxydation [22].

Au-delà de 3% d'eau, la dégradation de la tenue diélectrique est accélérée par l'action combinée de la température ( $> 55^{\circ}\text{C}$ ) et du champ électrique [23]. Il y a électrolyse de l'eau avec formation de gaz produisant des décharges partielles conduisant au claquage.

Les variations de la tenue diélectrique sont d'autant plus sensibles que le liquide est pur et qu'il a une valeur élevée pour son champ de rupture [23].

La rigidité diélectrique en champ alternatif uniforme peut-être divisée par un facteur supérieur à 3 quand un liquide est fortement hydraté: le paramètre important n'est pas la teneur absolue en eau, mais sa valeur relative par rapport à la saturation (figure I-1)

L'eau peut faciliter l'injection, les mouvements électrohydrodynamiques et la cavitation [24].

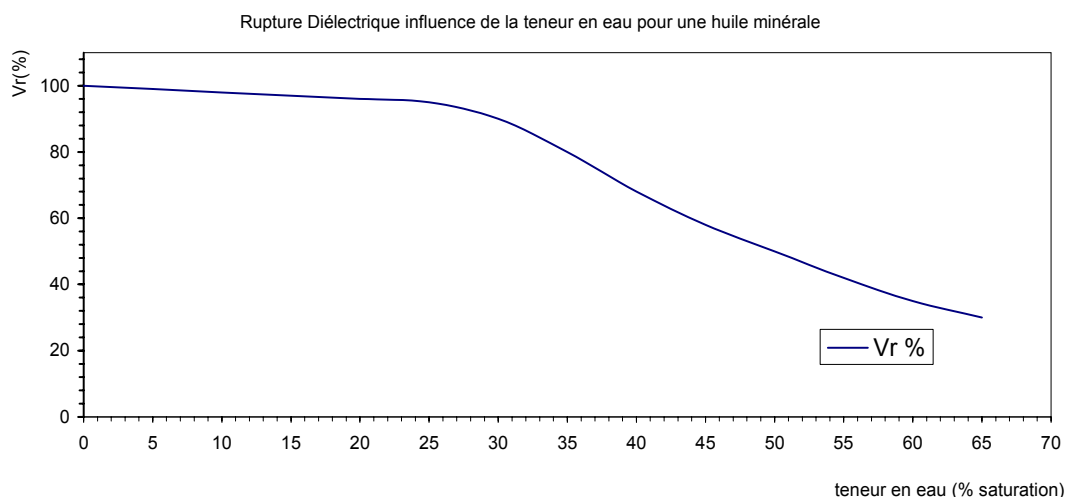


Figure I-1 : Influence de la teneur relative en eau sur la rigidité diélectrique mesurée en tension alternative, entre électrodes planes et parallèles [24].

### 1.6.2 Distance entre les électrodes

En augmentant la distance entre les électrodes, la tension de claquage augmente mais la rigidité diélectrique du liquide diminue. Dans le cas de champ électrique non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain seuil, l'effet couronne apparaît [17].

### 1.6.3 Température

Le claquage aux champs électriques élevés dans les liquides peut s'expliquer par plusieurs théories, les théories électroniques très voisines des mécanismes de décharges électriques dans les gaz [28], les théories des bulles [29] et la théorie des particules [30].

La température agit indirectement par la modification de la permittivité, de la résistivité et du facteur de dissipation diélectrique entraînant très probablement un phénomène du type claquage thermique.

Sur un liquide diélectrique pur, si on utilise une onde de choc de courte durée ( $1 < t < 50 \mu s$ ) pour éviter le claquage thermique, on observe que l'augmentation de la température provoque en général une diminution de la valeur du champ de claquage (figure I-2).

Ce phénomène s'explique entre autre par la diminution de la densité et de la viscosité du liquide qui augmente la mobilité des ions et des électrons.

D'après la théorie de I. Adamczewski [31], les phénomènes de ralentissement des électrons dans les liquides sont différents de ceux observés dans les gaz (densité mille fois plus grande). La structure moléculaire du liquide devient un facteur important pour la valeur du champ de claquage. Une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et cette théorie a permis d'établir (pour les alcanes) des relations entre  $E_c$  (champ de claquage),  $m$  (nombre de ramifications latérales C-C) et,  $n$  (nombre d'atomes de carbone) du type :

$$E_c (MV / cm) = 1,60 \times 10^6 (2,45 + 0,35m) \frac{(n - m - 1)}{n + 2,27} \quad (I-3)$$

Avec  $n = 5$  et  $m = 0$  pour le pentane,  $E_c = 1,44$  MV/cm

Ou pour les hydrocarbures,

$$E_c (MV / cm) = 1,06 \times 10^6 (4,24 + 0,35) \frac{(n - m - 4)}{n + 0,427} \quad (I-4)$$

Sur les mêmes bases il a établi des relations du type :

$$E_c (MV / cm) = K1 \times 10^6 \frac{(n - 1)}{(n + 2,27)} \frac{1}{\left(1 + \frac{K2}{n + 8} T\right)} \quad (I-5)$$

Avec  $K1$  et  $K2$  des constantes dépendants du liquide qui permettent une évaluation théorique de l'influence de la température sur les huiles isolantes.

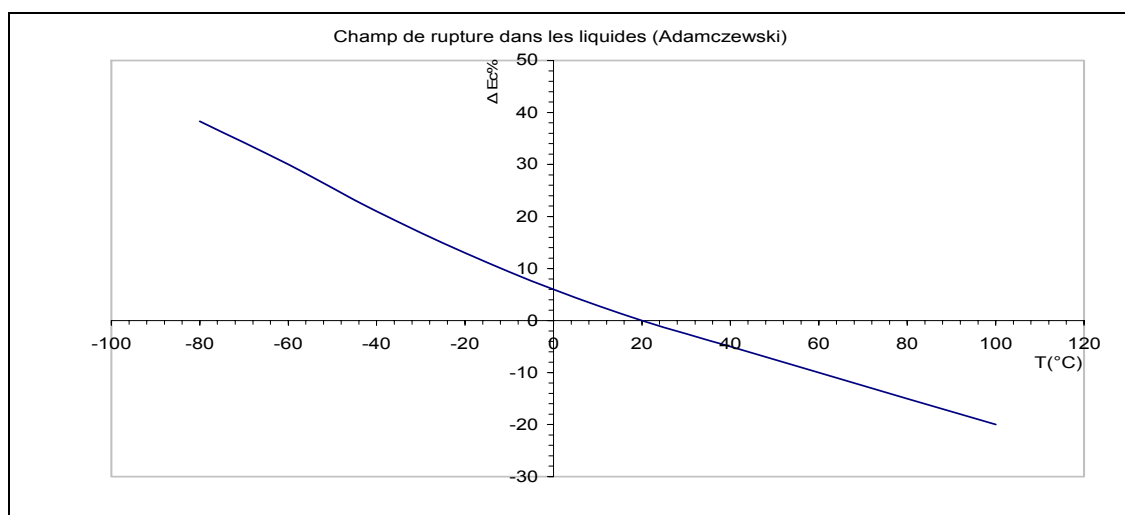


Figure I-2 : Variation du champ en fonction de la température d'après Adamczewski [31].

La quantité de gaz dissous augmente avec la température provoquant des décharges partielles et des réactions chimiques avec le milieu. Les gaz le plus souvent rencontrés sont : L'hydrogène, le méthane, l'éthane, l'éthylène, l'acétylène, etc....

La concentration d'un gaz dans l'huile et sa pression dans la phase gazeuse satisfait la loi de HENRY dépendant de la température :

$$C_i = k_i p_i \quad (I-6)$$

$$\text{Avec } k_i = A_i e^{(B_i/T)} \quad (I-7)$$

$C_i$  : concentration du gaz (en  $\mu\text{g/g}$ )                       $A_i$  : constante ( $\mu\text{moles/g/atm}$ )

$p_i$  : pression (en mm Hg)                                       $B_i$  : constante (en Kelvin)

$T$  : température (en Kelvin)

On peut aussi noter que la température peut accélérer des réactions chimiques avec le milieu ambiant (oxygène de l'air) ou avec des impuretés présentes dans le liquide et ainsi diminuer la durée de vie [23], [25].

#### I.6.4 Durée d'application de la tension

La durée d'application de la tension à 50 Hz diminue la tension de claquage de l'huile. La figure I-3, représente la caractéristique  $U_c(t)$ , tension de claquage en fonction du temps, de l'huile de transformateur. Plus la durée d'application augmente, plus l'effet des différentes impuretés se fait ressentir et la tension de claquage diminue. Pour les temps inférieurs à  $10\mu\text{s}$ , le claquage a un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique [17].

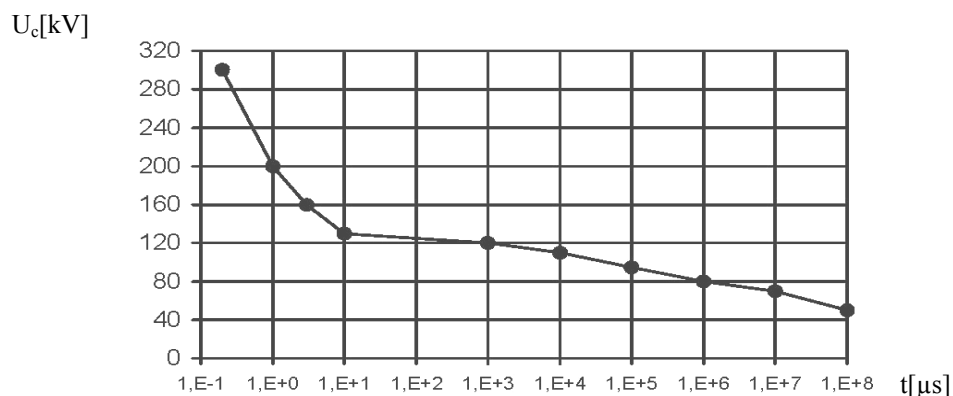


Figure I-3 : Durée d'application de la tension [17].

### I.6.5 Nombre de claquages

Il a été observé par plusieurs chercheurs, que la tension de claquage de l'huile, dans un système de configuration donnée, augmentait en fonction du nombre d'essais, restait ensuite constante et puis diminuait [17].

Ceci peut être expliqué par l'élimination, des bulles de gaz et des gouttelettes d'eau suspendues, par les premiers claquages. Cependant des claquages répétés et nombreux détériorent le liquide [27].

### I.6.6 Influence des écrans

Pour améliorer la rigidité diélectrique d'un système d'isolation, soit qu'on recouvre les électrodes avec une couche mince isolante, soit qu'on introduise une barrière isolante entre les électrodes. Il existe une position optimale de la barrière dans l'intervalle, pour laquelle la rigidité du système est la plus élevée. Dans le cas du système pointe – plan, l'augmentation est observée dans les cas de la pointe sous haute tension de polarité positive ou alternative 50Hz, lorsque la barrière est située à proximité de la pointe [17].

### Conclusion :

Les différents travaux qui ont été réalisés jusqu'à présent pour étudier la variation des paramètres électriques et physico-chimiques de l'huile de transformateurs ne sont pas intéressés à leur variation en fonction du nombre de claquages qui peuvent se produire lors du fonctionnement de l'appareil (disjoncteur, transformateur, etc. ...).

Il n'est pas évident de comprendre ce qui se passe dans l'huile avant l'apparition de l'arc électrique caractérisant le claquage ; pour une meilleure compréhension, nous présentons dans le chapitre II les phénomènes de préclaquage et de claquage ainsi que la propagation des streamers et ce jusqu'au claquage.

**CHAPITRE II**  
**PRECLAQUAGE ET CLAQUAGE DES**  
**HUILES MINERALES ISOLANTES**



---

## II. PRECLAQUAGE ET CLAQUAGE DES HUILES MINÉRALES ISOLANTES :

### II.1 Introduction :

Les défaillances électriques du matériel électrique sont dues, dans une très large mesure, au claquage électrique des isolations. On désigne ainsi l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles où tout milieu diélectrique (solide, fluide, gaz) est soudainement traversé par un arc électrique entre conducteurs soumis à une différence de potentiel [32].

La tension de claquage d'une isolation ne dépend pas uniquement des propriétés des matériaux mais d'un très grand nombre des facteurs (mise en œuvre, environnement, type de tension utilisée, etc....). Les conséquences d'un claquage sont plus ou moins catastrophiques, selon le milieu où il se produit : un milieu gazeux aisément renouvelé, peut être réutilisé après coupure de l'arc ; un liquide également, quoique les bulles de gaz produites, souvent en abondance, peuvent constituer ultérieurement un danger : un solide, imprégné ou non, sera très généralement dégradé de façon irrémédiable et incapable de soutenir à nouveau la tension.

La majorité des équipements haute tension renfermant une combinaison d'au moins deux des milieux génériques (solide, fluide), le claquage de la totalité de l'isolation résulte d'interactions complexes.

Actuellement, on considère qu'avant le claquage proprement dit, où se développe l'arc, il existe une période de préclaquage comprenant elle-même deux phases :

- ↳ Une phase de génération pendant laquelle se créent les circonstances favorables (injection et multiplication localisées de charges dans le liquide) à l'apparition de l'étape suivante, en règle générale, celle d'un « **streamers** » (canal conducteur lumineux et ramifié)
- ↳ Une phase de propagation de la perturbation précédemment créée (streamers)

Cette séparation en deux phases pourrait, aux très courtes distances entre les électrodes, se révéler arbitraire, le même phénomène se développe au cours du temps (avalanches électronique). En revanche, elle est tout à fait justifiée en ce qui concerne le mécanisme de Streamers [32].

---

## II.2 Points communs au claquage des matériaux :

Plusieurs points concernant le claquage sont communs à tous les matériaux diélectriques :

- Le claquage est localisé : il n'affecte qu'une zone minime du milieu, la partie saine conservant souvent (même après une longue période sous tension) ses propriétés originelles [32].
- Les processus électroniques sont toujours impliqués dans la phase initiale : le claquage peut résulter d'un effet coopératif d'une très grande variété de phénomènes (thermique, mécanique, électro-hydro-dynamique, chimique, ...) plus ou moins inter corrélés, et donnant naissance à un streamer, arborescence plus ou moins lumineuse, ramifiée et conductrice qui précède l'arc [32].
- Les effets d'échelle sont considérables : l'accroissement des volumes et surfaces soumis au champ électrique et des distances entre conducteurs entraîne une réduction très sensible de la rigidité diélectrique.
- Le temps d'application et la forme de l'onde de tension (continue, alternative ou impulsionnelle) jouent un rôle considérable, le claquage peut avoir lieu après des temps extrêmement brefs (inférieur à 01 ps) ou ne se manifester qu'après de très longues périodes (plusieurs années) ; des transformations du matériau ont alors pu se produire (vieillessement) [32].
- Les effets de polarité sont souvent très marqués, les tensions de claquage étant presque toujours plus basses lorsque l'électrode acérée est anode.

## II.3 cas des liquides :

Les liquides isolants sont principalement utilisés en électrotechnique, presque toujours en association avec des solides isolants. Leur fonction électrique essentielle est d'éliminer les décharges partielles susceptibles de se produire dans des poches gazeuses, en remplissant les espaces entre solides isolants et conducteurs ainsi que les cavités au sein des solides eux-mêmes. Ces décharges, très agressives et destructrices pour les isolants solides, peuvent se déclencher à des tensions très basses (au-delà de la tension minimale de Paschen : environ 400 V dans l'air) [33].

Les décharges partielles sont des décharges électriques dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'intervalle isolant séparant des conducteurs ; ces

---

décharges peuvent être adjacentes ou non à un conducteur (on désigne ainsi le plus souvent les décharges produites dans une cavité gazeuse au sein d'un solide) [34].

Plus encore que dans l'étude des phénomènes de conduction, l'état liquide va, par l'extrême complexité et la grande diversité des mécanismes mis en jeu, rendre difficile l'étude et l'interprétation des phénomènes de claquage. Outre l'importance fondamentale de la structure chimique du liquide lui-même et les substances étrangères qu'il peut contenir accidentellement ou qu'on ajoute volontairement, les problèmes d'interface liquide/solide (eau, en particulier) sont posés en permanence, à la fois sur le plan théorique et sur le plan expérimental. Aussi doit-on, d'une part étudier de manière approfondie les propriétés microscopiques des liquides (en particulier les processus électroniques), et d'autre part, faire appel à des techniques modernes d'investigation très sophistiquées : purification extrême, spectroscopie d'émission et cinématographie ultrarapide à l'échelle des nanosecondes, claquage induit par éclair laser,...

Dans une large mesure, les efforts ont été concentrés sur quelques liquides simples, ainsi que sur l'huile minérale de transformateur qui fait l'objet de notre travail [35] [36] [37].

En ce qui concerne les liquides utilisés dans la pratique industrielle, la diversité des applications conduit à employer des produits très différents et à faire intervenir des considérations très variées (aptitude aux transferts thermiques, tenue thermique, inflammabilité, prix, toxicité). L'interdiction des PolyChloroBiphényles (PCB) a conduit à élaborer des liquides de substitution. En peu de temps, de nouveaux liquides d'imprégnation sont apparus et les recherches dans ce domaine ont abouti à améliorer les connaissances sur les phénomènes prédisruptifs liés à la génération et à la disparition des gaz dans les liquides.

L'expérience a montré que la tension de claquage, pour une distance donnée, ne suffit pas pour évaluer la tenue diélectrique d'un liquide et que la rigidité diélectrique n'est pas une caractéristique intrinsèque du matériau, mais elle dépend d'autres paramètres [32] :

- Les conditions de mise en œuvre du liquide (pureté chimique, matériaux avec lesquels il entre en contact, etc. ...).
- Les conditions d'essai, telle que la forme de l'onde de tension, la forme des électrodes et la distance inter électrodes.

---

Bien que les liquides diélectriques aient été employés comme imprégnants depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, les recherches sur le claquage de ces matériaux, tant sur le plan fondamental que sur celui des applications, ont pendant longtemps été peu développées. Cela est dû, d'une part, au nombre très restreint de travaux sur le sujet (les domaines d'application des liquides étant bien plus limités que ceux des gaz), d'autre part, à la méconnaissance des mécanismes de base sur la conduction dans l'état liquide. Aussi les connaissances sur le sujet demeurèrent-elles très fragmentaires, souvent contradictoires et largement empiriques jusqu'en 1950, alors que, pour les gaz et les solides ordonnés, avaient été établies des théories bien vérifiées par l'expérience [32].

Une approche plus systématique s'est développée par la suite, dans le souci :

- D'effectuer un contrôle strict visant à préciser le rôle d'agents étrangers aux liquides (particules, gaz dissous, etc....) qui affectent manifestement leur rigidité ;
- De faire porter les efforts sur des liquides de structure moléculaire simple ;
- De développer des techniques de mesure variées : visualisation ultrarapide des phénomènes, créneaux de tension de temps de montée ultracourt facilitant l'interprétation, analyse spectroscopique...

#### *II.4 Technique d'étude et test de caractérisation du claquage des liquides :*

Les expériences de recherche fondamentale visent à identifier et caractériser par une analyse aussi fine que possible les phénomènes prédisruptifs et disruptifs. Dans ce but, on s'efforce d'obtenir simultanément un maximum d'informations électriques, optiques, acoustiques, etc., en faisant varier, dans une large mesure, les conditions expérimentales (pression, température, géométrie des électrodes). On utilise le plus souvent des ondes de tension de forme simple, en particulier des créneaux de tension à temps de montée ultra-bref et de durée ajustable. Les investigations portent sur des liquides simples (hydrocarbures, gaz liquéfiés) et également sur des liquides industriels (huiles minérales, liquides de synthèse) de façon à établir des similitudes et différences de comportement. Dans certaines circonstances, le comportement d'une même substance sera étudié à l'état liquide et gazeux [38].

Des essais systématiques visent à étudier, pendant une période raisonnablement courte (quelques semaines), le comportement de matériaux et de matériels en les soumettant à des contraintes plus sévères que celles de l'utilisation industrielle.

---

Les essais industriels se pratiquent sur les matériaux (liquides seuls ou en association avec des isolants solides) et sur les matériels. Ils sont effectués soit pour la qualification des produits neufs, soit pour apprécier la résistance aux surtensions alternatives plus ou moins prolongées ou aux surtensions brèves engendrées par la foudre ou par les manœuvres sur le réseau.

Dans ces essais, on ne mesure généralement que la tension de claquage :

- Dans des essais à court terme, celle-ci est obtenue en quelques secondes ou dizaines de secondes, soit par l'application d'une rampe de tension (alternative ou continue), soit en employant une tension croissante par sauts d'amplitude et de durée choisie ;
- Lors des essais de choc, on emploie des ondes normalisées d'amplitude croissante qui simulent les surtensions dues à la foudre ou aux manœuvres.

Par ailleurs ; on s'efforce de détecter, sous tension alternative, la présence de décharges partielles et de les caractériser par leurs tensions d'apparition et d'extinction, leur amplitude, leur fréquence, etc. Ces décharges se manifestent quand du gaz subsiste ou est généré dans une isolation ; elles constituent un danger important, capable de conduire plus ou moins rapidement au claquage de l'isolation. Sur le liquide seul, on pratique le test de gassing qui permet d'évaluer l'aptitude que possède ce liquide à engendrer du gaz, puis à l'absorber, ou à en produire encore, sous l'action des décharges partielles en champs alternatif [2] [39].

Dans le but d'évaluer la durée de vie d'une isolation, on pratique des essais à long terme : on fixe la tension  $V$  à des valeurs bien supérieures à la valeur prévue pour l'application envisagée, et pour chacune d'entre elles, on relève le temps au bout duquel le claquage se manifeste : on trace ainsi (en quelques jours ou semaines) une courbe de vie  $V(t)$ , à partir de laquelle on estime, par extrapolation, la valeur qui ne donnera aucun claquage (ou très peu) pendant une très longue période (20 à 30 ans).

### *II.5 Cellule de mesure pour liquides :*

Les cellules utilisées pour les essais industriels et celles qui sont élaborées pour des études fondamentales présentent plusieurs similarités de conception et de mise en œuvre. Les premières, de réalisation simple, sont faites pour des mesures systématiques rapides des tensions de claquage ; la distance entre électrodes est fixe (quelques

millimètres à quelques centimètres), les essais se font à pression atmosphérique et généralement à température ambiante ; les profils d'électrodes, leur écartement sont fixés par les normes [32] ; diverses configurations d'électrodes sont schématisées à la figure II-1. Les secondes cellules, bien plus complexes, permettent la mesure simultanée de diverses grandeurs (courant, émission lumineuse) et de faire varier plusieurs paramètres (distance entre électrodes, pression appliquée au liquide, température).

Les essais s'effectuent soit en champ uniforme ou quasi uniforme, soit en champ modérément divergent (sphère-plan, tige-plan), soit en champ fortement divergent (pointe-plan).

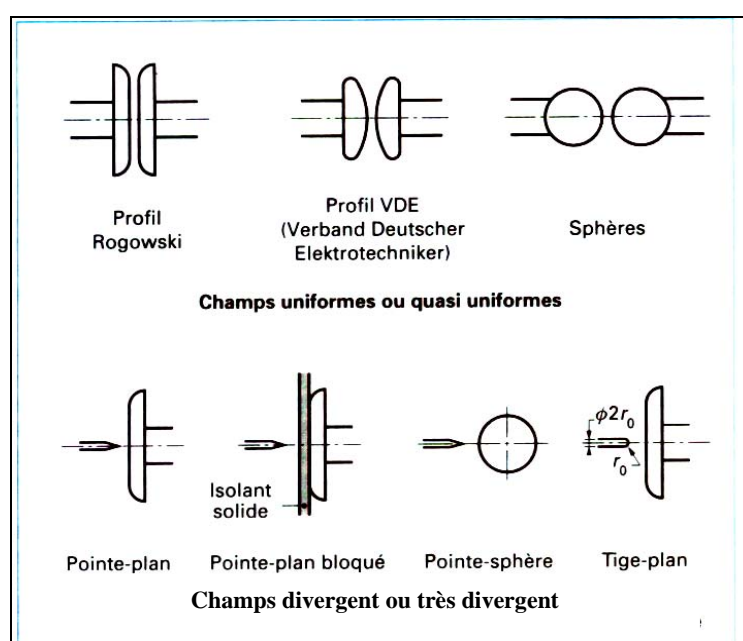


Figure II-1 : configuration des électrodes utilisés pour l'étude de claquage

## II.6 Mécanisme de streamers :

### II.6.1 Streamers et claquage :

Que le liquide soit soumis à un champ divergent ou à un champ uniforme, quelle que soit la forme de l'onde de tension (impulsionnelle, alternative, continue), les phénomènes pré disruptifs qui conduisent à l'établissement d'un arc électrique sont les **Streamers** : ainsi ont été dénommées toutes sortes de figures lumineuses et ramifiées, qui prennent naissance en général au voisinage d'une électrode (phase de génération) puis se déplacent à grande ou très grande vitesse vers l'électrode opposée (phase de propagation) [40].

---

Selon la forme et la durée d'application de l'onde de tension, le streamer peut s'arrêter ou progresser jusqu'à l'électrode opposée ; en règle générale, lorsqu'il atteint cette électrode ou est très proche l'arc se produit. Ainsi, la tension de claquage d'un liquide est régie par le comportement des streamers : elle est contrôlée, soit par la phase de génération, soit par la phase de propagation et l'on conçoit qu'elle dépend, pour un même liquide, du type de tension appliquée et de la géométrie des électrodes [40].

La phase de propagation des streamers sous tension impulsionnelle et en champ divergent a fait l'objet de nombreux travaux [34] [39] [40] [41] ; en particulier, une avancée importante a été réalisée au cours des années 80 : elle a permis une caractérisation détaillée des streamers. La phase de génération, bien plus difficile à étudier, est moins documentée [32].

Une très grande diversité de comportements des streamers dans les liquides a été observée par plusieurs chercheurs, ce qui entraîne de très gros écarts sur les tensions de claquage selon les circonstances.

#### II.6.2 Caractéristiques générales des streamers :

Il est possible de sélectionner, à partir des données expérimentales, certaines caractéristiques des streamers relatives à leur aspect, leur évolution et leurs effets, quel que soit le liquide (non polaire, polaire, gaz liquéfié). La majorité des résultats a été obtenue en champ divergent, et sous tension impulsionnelle ; le champ étant fortement renforcé sur l'électrode à faible rayon de courbure (des pointes métalliques sont le plus souvent utilisées), la génération des streamers est facilitée tandis que leur propagation est plus limitée qu'en champ uniforme [33]. Aussi la polarité de la pointe influe sur les streamers dans le sens où la polarité positive génère des streamers positifs qui se propagent vers l'électrode négative [33] et la polarité négative génère des streamers négatifs qui se propagent vers l'autre électrode [38]. Pour un même liquide, les vitesses des streamers positifs sont supérieures à celles des streamers négatifs, et les distances d'arrêt plus longues, ce qui les rend plus dangereux [33].

Aussi, il a été observé une grande différence entre les streamers générés sous tension alternative et sous tension impulsionnelle à temps de montée bref : pour l'impulsionnelle, l'amplitude maximale peut être atteinte bien avant qu'un streamer se soit considérablement propagé et n'ait donné lieu au claquage ; dans ce régime, dit de

---

surtension, le comportement des streamers peut changer largement selon la nature du liquide [33] [42].

### II.6.3 Propagation des streamers dans les huiles de transformateur :

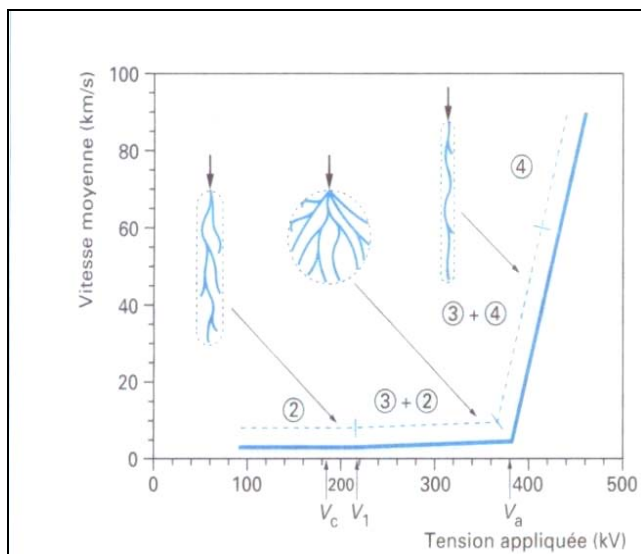
Les streamers positifs sont à l'origine du claquage dans la majorité des isolations à haute tension. Aussi, ont-ils été plus systématiquement étudiés, en particulier dans l'huile minérale, sous tension alternative [43] [44] [45] et sous créneau de tension [46] [47] [48] [49] [50].

Pour les huiles de transformateur, l'étude de propagation des streamers positifs a mené à une première classification proposée par Hebner [51] en 3 modes de propagation selon la vitesse des streamers, qui a été précisée et étendue par la suite par Lesaint [52] à 4 modes, suivant des critères faisant intervenir plusieurs paramètres en plus de la vitesse.

- i. Le premier mode est celui des streamers lents, en forme de buisson dont la vitesse ne dépasse pas quelques centaines de mètres par seconde ; quelle que soit la polarité, ils ne s'observent qu'avec des pointes à très faible rayon de courbure (quelques micromètres), aux faibles distances entre électrodes ; ils se propagent peu au-delà de la pointe et ne conduisent généralement pas au claquage.

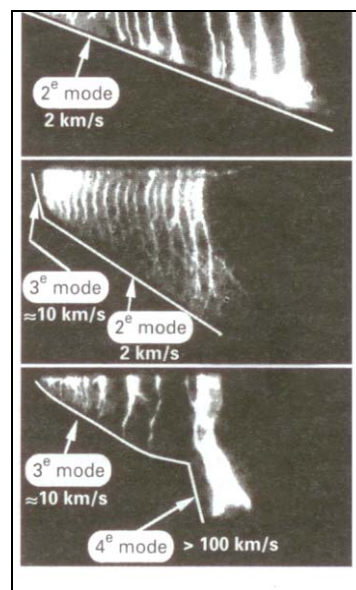
Les modes suivants (2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> mode) se succèdent quand on accroît la tension ; la figure II-2 représente, de façon schématique, l'allure et la vitesse moyenne des streamers positifs à l'intervalle de temps entre la naissance du streamer et le claquage en fonction de l'amplitude d'une impulsion de tension quasiment rectangulaire ; la figure II-3 montre le développement des streamers dans les différents modes.





$V_a$  : tension d'accélération ;  $V_c$  : tension de claquage  
 $V_1$  : tension d'apparition du 3<sup>ème</sup> mode

**Figure II-2:** Vitesse moyenne et allure schématique des streamers positifs selon les différents modes de propagation entre pointe et plan soumis à des crêneaux de tension [52]



**Figure II-3 :** Enregistrement de la lumière émise lors de la propagation de streamers positifs entre pointe et plan, à l'aide d'une caméra à balayage de fente [52]

ii. Le second mode est observé en champ divergent au-delà de la tension de claquage  $V_c$  jusqu'à une tension d'accélération  $V_a$ .

Dans ce mode, qui est le plus souvent observé, le claquage se produit avec de faibles champs moyens dans les grands intervalles d'huile, cas souvent rencontré dans les isolations sous haute tension alternative [52].

iii. Le 3<sup>ème</sup> mode apparaît en début de propagation à partir d'une tension  $V_1 > V_c$  figure II-3 ; la vitesse très élevée sur une fraction de l'intervalle (10 à 20 km/s) est d'autant plus grande que la tension excède fortement  $V_c$ . La propagation s'effectue ensuite selon le 2<sup>ème</sup> mode avec des caractéristiques identiques. Ce mode a été observé en champ alternatif divergent [45].

iv. Le 4<sup>ème</sup> mode apparaît pour  $V > V_a$  : la propagation débute selon le 3<sup>ème</sup> mode et se poursuit à des vitesses bien plus élevées ( $\geq 100$  km/s) ; les streamers sont filamenteux, peu ramifiés, très lumineux ; les pics de courant sont très intenses et très rapprochés.

#### II.6.4 Streamers et claquage en champ uniforme :

Il existe très peu d'observations expérimentales concernant les streamers en géométrie uniforme (électrodes planes) ou quasi uniforme (électrodes sphériques). La

plupart ont été effectuées aux faibles distances (inférieures ou égales à 01 cm), dans des hydrocarbures ou des huiles minérales. L'examen des résultats obtenus permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ↪ Les streamers négatifs apparaissent en général les premiers, sous forme de buissons (figure II-4-a) ; ils se propagent lentement et sur des courtes distances ;
- ↪ Les streamers positifs surviennent ensuite, se propagent rapidement et donne lieu au claquage ;
- ↪ Ni la génération, ni la propagation n'ont été caractérisées, le contrôle de la génération n'ayant pu être réalisé [32].

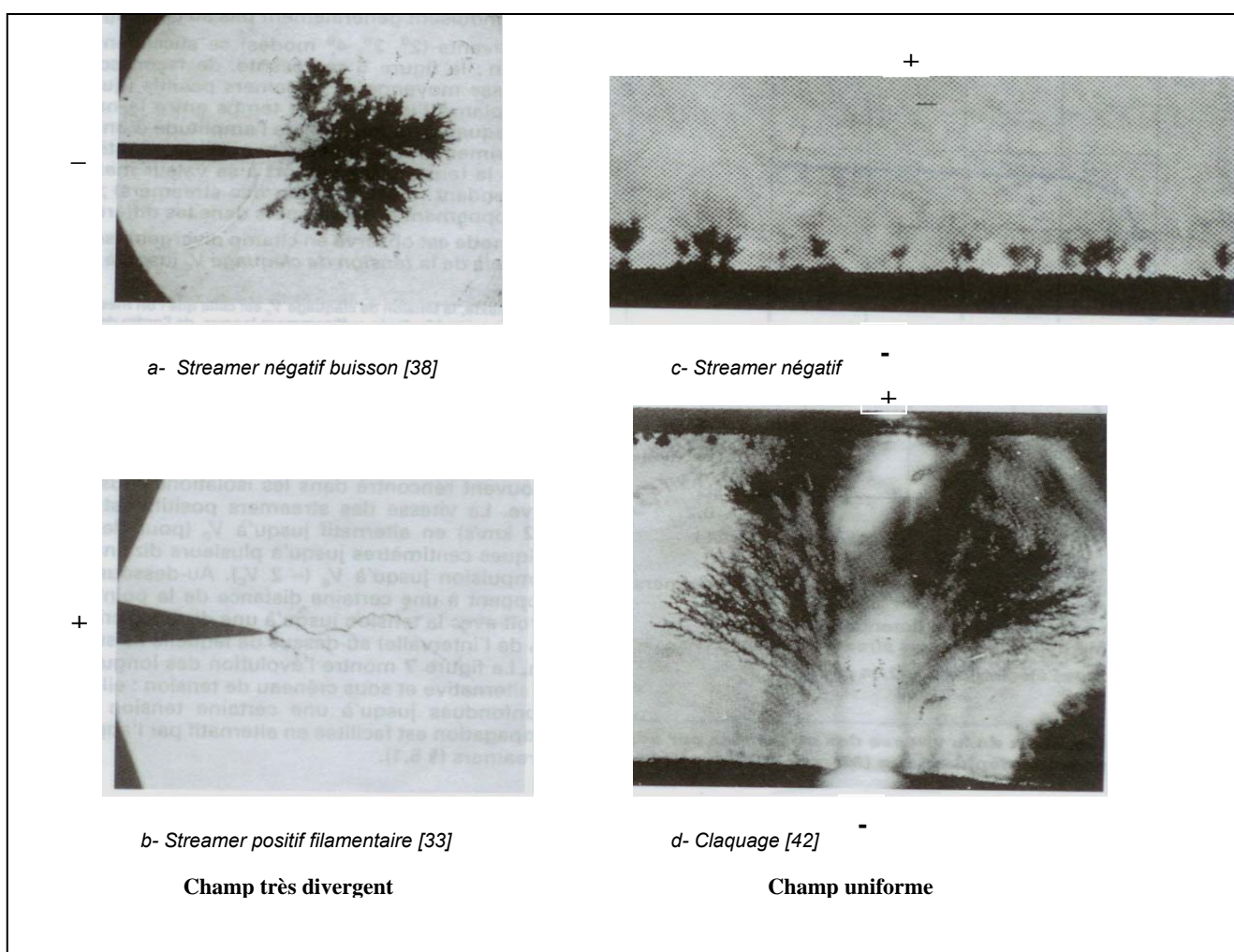


Figure II-4 : Aspect des streamers dans les liquides isolants.

La distance entre électrodes joue un rôle capital ; la rigidité décroît de plus de deux ordres de grandeur quand cette distance est accrue jusqu'à des distances de plusieurs dizaines de centimètres. Dans un champ divergent, les champs moyens de l'ordre des

---

dizaines de kV/cm suffisent à assurer la propagation des streamers ; donc, tout streamer qui apparaît peut se propager ; le claquage est principalement contrôlé par la génération.

De grands intervalles de liquides impliquent de grandes surfaces d'électrodes et de grands volumes de liquide ; par conséquent, on peut présumer que certains mécanismes vont faciliter la génération :

↳ Soit en renforçant le champ sur l'anode ou la cathode ; de tels renforcements peuvent être créés par des aspérités ou des particules conductrices entraînées par le champ ;

↳ Soit en facilitant l'échange d'électrons aux électrodes : à présent on ne dispose d'aucune indication précise à ce sujet dans les liquides ; une autre possibilité serait l'apparition des décharges dans des cavités gazeuses au contact des électrodes (créées par échauffement local, ou entraînées par le liquide en mouvement, ou par d'autres mécanismes) [32].

### *II.7 Phénomènes de claquage dans les huiles de transformateur :*

La pratique industrielle fait appel à des liquides dont les propriétés physico-chimiques sont extrêmement différentes ; de surcroît, leur mise en œuvre, les qualités de l'environnement due à la conception et aux contraintes de service des matériels varient considérablement.

A titre d'exemple, l'huile minérale de transformateur entre en contact avec différents matériaux et solides isolants, d'où la présence inévitable, dans le temps, de particules solides, d'eau, de gaz, une tendance à l'oxydation, la possibilité de génération et de transport de charges par frottement ( l'huile assure le refroidissement de l'appareil par circulation forcée) ; les volumes de liquides sont considérables ( ils peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres cubes), les intervalles de liquide libre sont quelquefois très grands.

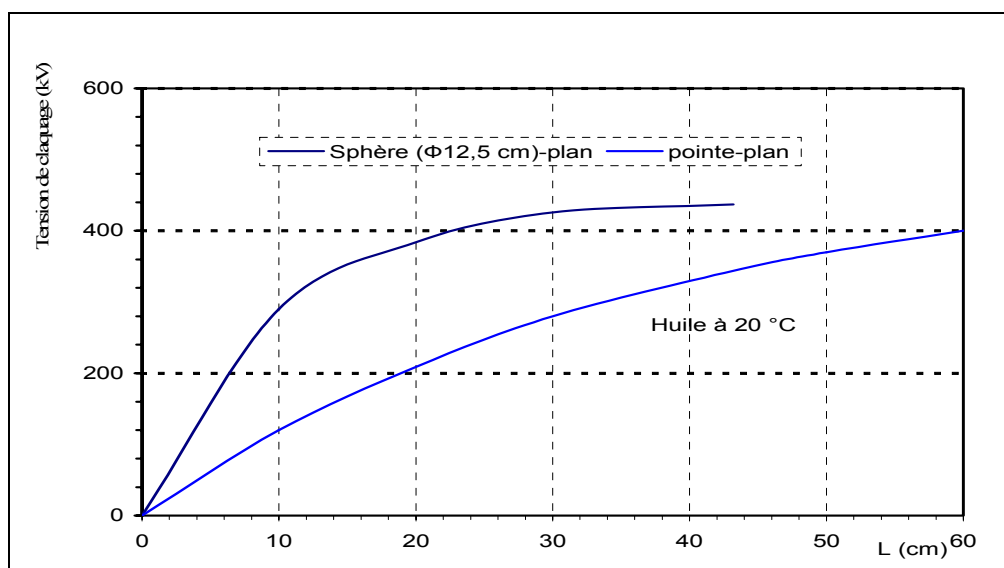
Plusieurs points doivent être pris en considération avant l'utilisation de l'huile minérale, entre autres :

- Prévoir son aptitude à soutenir sans défaillance les contraintes normales de fonctionnement ;

- Tenir compte de ses capacités à résister à diverses surtensions (ondes de foudre, surtension de manœuvres) ainsi qu'à des contraintes combinées continue et alternative, ou à la fréquence d'harmoniques d'amplitude importante ;
- S'assurer de sa tenue à long terme, donc apprécier son « vieillissement »
- Pour les appareils de grande puissance, contrôler son évolution au cours du temps et décider de la conduite à tenir.

### II.7.1 Influence de la distance entre électrodes sur le claquage de l'huile de transformateur :

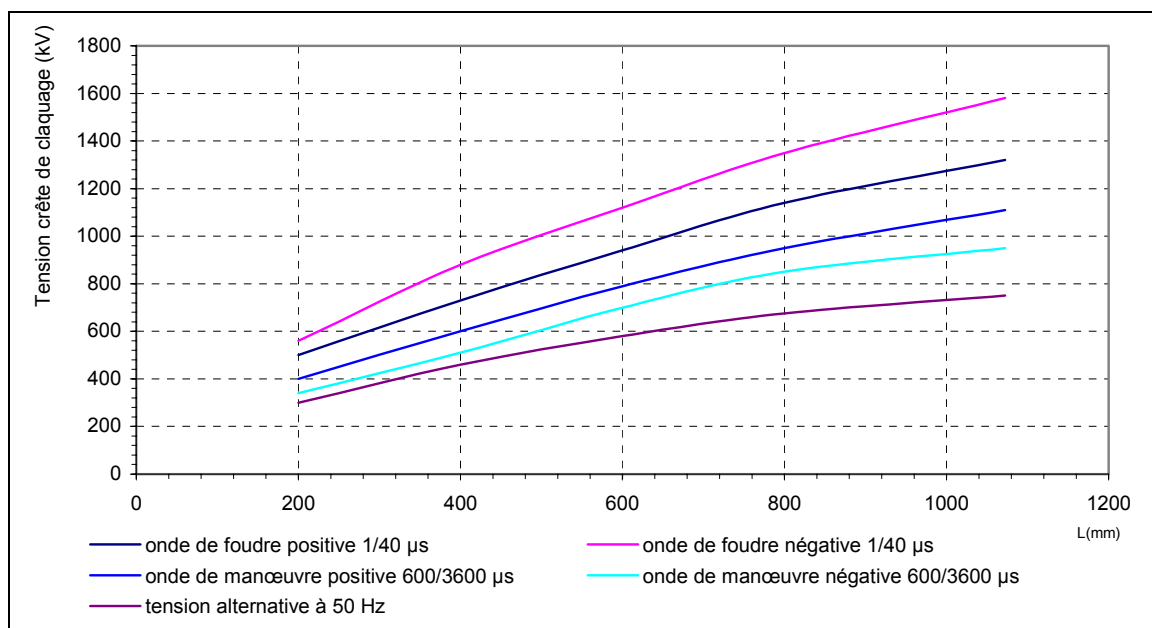
a. Sous tension alternative, la figure II-5 montre que la courbe représentant la tension de claquage en champ quasi uniforme (sphère-plan) en fonction de la distance s'infléchit très fortement au-delà de 5cm et se rapproche progressivement de la courbe relative à la géométrie très divergente pointe-plan [53] qui se confond avec celle d'un système tige-plan [54].



**Figure II-5 :** Tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative en fonction de l'écartement des électrodes en géométrie quasi uniforme et en géométrie très divergente [53].

b. Sous tension impulsionnelle, en champ divergent (tige-plan), les courbes s'infléchissent plus modérément que sous tension alternative [54] (figure II-6). Les tensions de claquage sont supérieures lorsque la polarité de la tige est négative en onde de foudre et la polarité de la tige positive en onde de manœuvre pour les grands volumes d'huile. En champ uniforme, l'infléchissement est moindre ; la rigidité en onde de foudre

est tout de même abaissée à 140 kV/cm pour une distance entre électrodes de 14,6 cm [55].



**Figure II-6 :** Valeur crête de la tension de claquage d'une huile de transformateur en fonction de la distance entre les électrodes en géométrie divergente (tige-plan) pour différentes formes d'onde de tension [54].

c. Sous tension continue, la tendance est la même qu'en alternatif : les tensions de claquage sont plus élevées en pointe négative qu'en pointe positive [53], les rigidités entre plans parallèles sont très basses en grandes distances : 16 kV/cm pour  $L = 30$  cm [56].

#### II.7.2 Influence de la pureté d'huile :

On obtient une bonne indication sur la qualité d'une huile en mesurant la rigidité en champ uniforme ou quasi uniforme (entre sphères), à faible distance sous rampe de tension alternative. La rigidité d'une huile bien filtrée et déshydratée peut être 2 à 3 fois supérieure à celle de la même huile hydratée et polluée par des particules [53].

#### II.7.3 Dispersion des résultats :

Elle dépend de très nombreux facteurs liés aux conditions d'essais qui doivent être bien contrôlées et précisées dans l'énoncé des résultats, notamment en ce qui concerne :

↪ La cellule de mesure : forme, nature et finition des électrodes, leur remplacement ou non après claquage, la présence ou non d'isolants solides ;

- 
- ↪ Le liquide : sa pureté initiale (teneur en eau, en particules), son remplacement ou non après claquage, s'il est soumis à un brasage ;
  - ↪ Les modalités d'application de la tension : accroissement par paliers, par rampe, à partir d'une certaine valeur ; période d'attente entre deux claquages consécutifs ; **nombre total de claquages effectués sur une même prise d'huile.**

Les dispersions les plus importantes sont observées en **champ uniforme** et lorsqu'il s'agit de tensions alternatives ou continues appliquées par paliers de longue durée ; le coefficient de variation peut atteindre 20%.

#### II.7.4 Influence de la composition de l'huile :

Il est important d'évaluer l'influence de la composition d'une huile sur sa tension de claquage. Les tests en champ alternatif uniforme ou quasi uniforme à faible distance ne permettent pas de déceler de différences notables d'une huile à l'autre. En géométrie pointe-sphère, à une distance de 2,5 mm sous onde de foudre, on observe que les tensions de claquage d'huiles de transformateur sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive. En polarité négative, la rigidité décroît quand la teneur en composés aromatiques augmente, en particulier, s'il s'agit de corps polyaromatique [57]. En polarité positive, des différences sensibles (jusqu'à 40%) peuvent exister, qui ne sont pas liées à la teneur en aromatique [58] [59].

#### II.7.5 Influences des particules sur la rigidité :

On sait depuis longtemps que les particules, dans la pratique industrielle, sont l'une des causes majeures d'abaissement de la rigidité de l'huile de transformateur sous tension alternative, continue et même impulsionnelle, surtout en champ uniforme (ou quasi uniforme).

Un liquide en service peut contenir des particules très diverses par la taille, la forme et la nature (particules organiques, minérales, isolantes, conductrices). L'observation par microscopie révèle que certaines sont ramassées alors que d'autres sont allongées, toutes présentant un contour plus ou moins irrégulier. Dans les grands volumes d'huile, leurs dimensions peuvent atteindre plusieurs centaines de micromètres ; de manière générale, les particules submicroniques, omniprésentes, sont difficiles et même impossibles à identifier et à compter. Le liquide contient, selon son origine, une certaine concentration en particules ; celle-ci peut être accrue lors de la construction, ou

---

de la mise en œuvre ou au cours du fonctionnement d'un appareil. Aussi la surveillance du taux de particules fait-elle l'objet d'un soin très attentif, en mettant en œuvre diverses méthodes de comptage et d'identification de particules [55] [60].

L'influence des particules a été principalement mise en évidence en mesurant l'évolution des tensions de claquage soit en améliorant la filtration soit en ajoutant au liquide des concentrations connues de petites particules ( $\leq 50 \mu\text{m}$ ) [55] [61]. Le danger qu'elles présentent dépend fortement des facteurs suivants :

↳ *Leur nature et leur forme* : les particules conductrices donnent lieu à des renforcements de champ bien plus élevés que les particules isolantes, surtout si leur forme est allongée ou si elles constituent des « ponts » en s'agrégeant ; elles peuvent servir de sites de nucléation pour des bulles, les particules de cuivre donnent lieu à une plus forte réduction de la rigidité que les particules de fer [61].

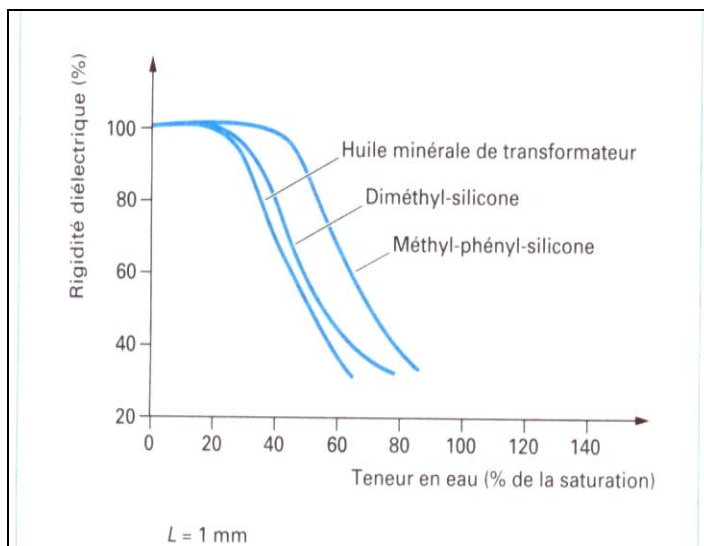
↳ *La teneur en eau du liquide* : dans l'huile, la rigidité décroît pour une concentration donnée de particules cellulosiques ( $45 \mu\text{m}$ ) quand la teneur en eau augmente du fait que les fibres deviennent plus conductrices. A  $90^\circ\text{C}$ , la rigidité de l'huile renfermant de très grandes concentrations de particules cellulosiques n'est pratiquement pas réduite, parce que la teneur en eau des particules diminue, ce qui les rend moins conductrices [61].

#### II.7.6 Influence de l'eau sur la rigidité :

L'eau constitue un danger potentiel pour les isolations ; elle peut intervenir soit à court terme (par son action directe ou indirecte), soit à long terme (en favorisant certains processus de dégradation), selon les conditions expérimentales ou celles rencontrées dans la pratique, la présence d'eau a plus ou moins d'effet sur la rigidité.

En champ alternatif uniforme et sur de faibles distances (quelques millimètres), la rigidité décroît d'abord lentement quand la teneur en eau augmente, puis plus rapidement à l'approche de la saturation (figure II-7), le paramètre important n'est pas la teneur absolue en eau, mais sa valeur relative, résultat vérifié non seulement dans les huiles minérales, mais également dans les liquides d'imprégnation de condensateurs : au voisinage de la saturation, des gouttelettes d'eau peuvent se former et s'allonger sous l'influence du champ ; elles se comportent comme des objets conducteurs allongés qui donnent lieu à des renforcements de champ entraînant une baisse de la rigidité. Rappelons que l'accroissement de la teneur en eau contribue à abaisser la rigidité de

l'huile renfermant soit des particules de cellulose, soit même des particules de cuivre ou d'acier [61].



**Figure II-7 :** Influence de la teneur relative en eau sur la rigidité sous tension alternative (Électrodes planes parallèles) [62]

#### II.7.7 Influence de l'aire des électrodes et du volume de liquide soumis au champ :

La diminution de la rigidité liée à l'accroissement de l'aire des électrodes a été observée il y a plusieurs décennies sur les matériaux solides (secs ou imprégnés) ou sur les liquides et principalement sur les huiles. La raison invoquée a été la plus grande probabilité d'obtenir des renforcements locaux de champs dus à des aspérités sur les électrodes. Une théorie basée sur une analyse statistique conduit à une dépendance linéaire de la rigidité en champ uniforme, en fonction du logarithme de l'aire des électrodes [63]. Ce type de variation a été observé par plusieurs auteurs mais dans des conditions expérimentales assez restrictives (variation de surface modérée, une seule distance). Une alternative à cet « effet de surface » est « l'effet de volume » proposé par Wilson [64]: le claquage prend naissance au point « le plus faible » de l'isolation ; si un plus grand volume est contraint au même niveau de champ, un point encore plus faible peu être présent, déclenchant le claquage à une tension plus basse. A partir de ce concept, Wilson montre que la rigidité peut être divisée par 5 lorsque le volume croît de  $10^{-3}$  à  $10^3 \text{ cm}^3$ .

Wilson [64] précise que si l'huile contient une contamination appréciable (particules, bulles, etc. ...), sa rigidité est modérée et l'effet de volume dominant ; si



l'huile est très pure, l'effet de surface domine ; une huile de qualité intermédiaire a un comportement combinant l'un et l'autre. Le bien-fondé de cette remarque a été prouvé par une étude étendue de la rigidité sous tension alternative et impulsionnelle entre plans parallèles d'huiles bien caractérisées en faisant varier dans une large mesure les aires des électrodes et les volumes des liquides [55] [60].

Conclusion :

Le claquage des huiles isolantes est parmi les phénomènes les plus observés qui affecte son état lors du fonctionnement des appareils (ouverture et fermeture des disjoncteurs, transformateurs, etc. ...).

Le travail que nous allons le présenter dans le chapitre suivant n'est qu'une continuité des travaux exposés dans le chapitre I et II, il consiste à étudier l'influence du nombre de claquages et de la température sur les propriétés de l'huile de transformateurs.

## **CHAPITRE III**

# **EFFET DU NOMBRE DE CLAQUAGES SUR LES CARACTERISTIQUES DE L'HUILE MINERALE DE TRANSFORMATEUR**

**(BORAK 22)**

---

### III. EFFET DU NOMBRE DE CLAQUAGES SUR LES CARACTERISTIQUES DE L'HUILE MINERALE DE TRANSFORMATEUR

#### III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons nos résultats expérimentaux et les interprétations concernant l'influence du claquage sur les paramètres d'une huile minérale de transformateur. Nous examinons la tension de claquage, la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation diélectrique  $\text{tg}\delta$ , la permittivité relative  $\epsilon_r$ , la conductivité  $\sigma$ , l'acidité, la viscosité cinématique, la densité, le point d'éclair et l'indice de couleur.

Nous avons effectué nos essais dans deux laboratoires :

- Le laboratoire d'analyses de l'Unité de Traitement des Huiles (UTH) de Sharikat Khadamet Mouhaouilat Kahraabaia (SKMK) située à la zone industrielle de Ouled Aïch, Blida
- Le laboratoire de mesure et de contrôle de l'entreprise des câbleries d'Alger CABEL sise Gué de Constantine, Alger.

Les différents échantillons sont prélevés d'un fût d'huile neuve. Il s'agit de la BORAK 22, qui est généralement utilisée, dans les transformateurs de puissance et disjoncteurs, des réseaux SONELGAZ.

#### III.1.1 Mode opératoire :

L'huile analysée est une huile neuve prélevée d'un fût fermé.

Un premier échantillon d'huile n'ayant subi aucun claquage a été caractérisé selon les normes en vigueur [4] à [13]. D'autres échantillons sont prélevés du spintermètre après un certain nombre de claquages afin d'être analysés et caractérisés. Les claquages sont automatiquement programmés avec un temps de repos de 30 secondes.

Lorsque le nombre d'échantillons prélevés du spintermètre réduit la quantité d'huile, nous vidons la cellule, pour remplacer cette huile par une nouvelle huile prise du fût. Ce remplissage est fait après nettoyage de la cellule.

Après ce nouveau remplissage, nous accomplissons un nombre de claquages égal à celui du nombre de claquages qu'a déjà subi l'huile vidée et continuons la série.

La série maximale étant de six mille (6000) claquages.

### III.1.2 Caractérisation de l'huile neuve :

Le tableau III-1, représente les caractéristiques de l'huile neuve selon la norme CEI 156 [4].

Mis à part la tension de claquage mesurée qui est inférieure à la valeur exigée par la norme, ce qui serait dû à la présence d'humidité [24], les autres paramètres satisfont les exigences de la norme.

<b>Propriétés électriques</b>	<b>Unité de mesure</b>	<b>Exigence de la norme huile neuve</b>	<b>Norme</b>	<b>Valeur mesurée</b>
Tension de claquage après repos	kV	> 70	CEI 156	38,8
Facteur de dissipation diélectrique à 90°C tgδ		≤ 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	mm <sup>2</sup> /s	< 11	ISO 3104	6,940
Point d'éclair	°C	> 130	ISO 2719	137
Densité		< 8,95 E-01	ISO 12185	8,57 E-01
<b>Propriétés chimiques</b>				
Indice d'acidité	g KOH/g	< 3,00 E-2	CEI 296	2,00 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-1** : Caractéristiques de l'huile neuve.

### III.2 Essais diélectriques :

#### III.2.1 Mesure de la tension de claquage et de la rigidité diélectrique :

Pour mesurer la tension de claquage, nous utilisons un spintermètre du type OTSA100 1F/2 (figure III-1.a) équipé d'une cellule (figure III-1.b) pouvant contenir 250 ml d'huile avec un système d'électrodes sphériques de diamètre 12,5 mm et de distance 2,5 mm. La tension maximale étant 100 kV (50 Hz).

Le spintermètre est programmé pour des claquages avec un temps de repos de 30 secondes. Ce temps de repos est largement suffisant pour permettre à l'huile de se stabiliser [19].

Ces essais sont réalisés à la température ambiante.



(a) : Vue d'ensemble



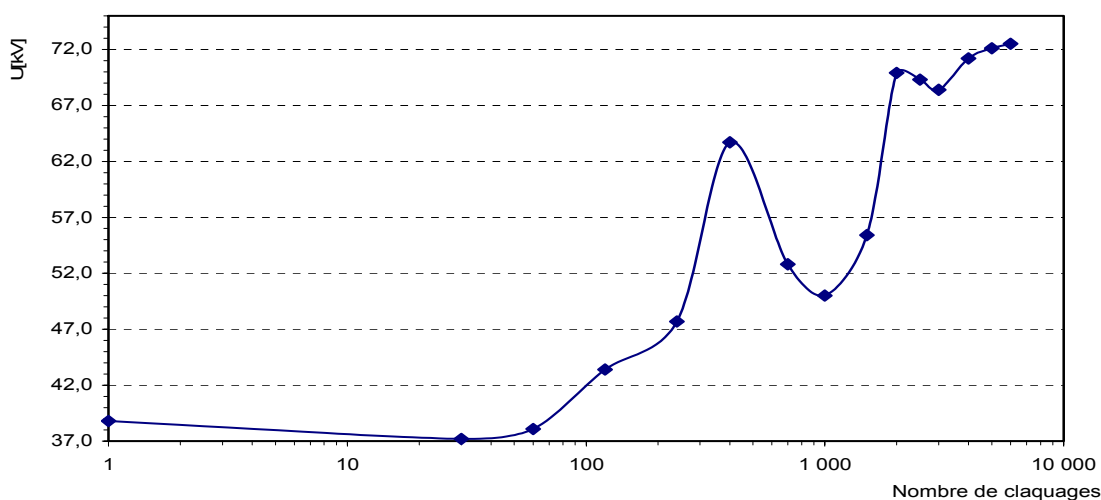
(b) : La cellule

Figure III-1: Spintermètre, OTS 100 AF/2

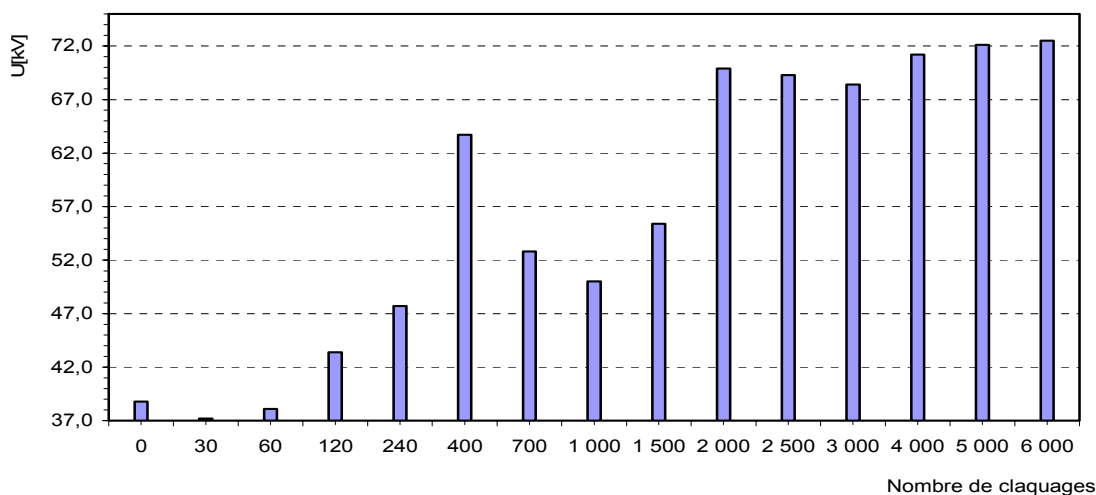
Nous présentons, dans le tableau III-2 et la figure III-2, les valeurs moyennes de la tension de claquage en fonction du nombre de claquages. Pour une série d'essais donnée, la valeur moyenne est la moyenne des tensions de claquage de la série totale.

Nombre de claquages	0	30	60	120	240	400	700	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	4 000	5 000	6 000
U[kV]	38,8	37,2	38,1	43,4	47,7	63,7	52,8	50,0	55,4	69,9	69,3	68,4	71,2	72,1	72,5

Tableau III-2: Tension de claquage en fonction du nombre de claquages



a. Echelle logarithmique



b. Histogramme

Figure III-2 : Variation de la tension de claquage en fonction du nombre de claquages.

Les graphes de la figure III-2 (a et b) montrent que la tension de claquage de l'huile est, initialement, inférieure à la valeur préconisée par la norme (70 kV) [4]. Elle augmente en fonction du nombre de claquages jusqu'à 400 claquages puis diminue pour atteindre 50 kV à 1000 claquages. Puis augmente de nouveau pour se stabiliser autour de 72 kV. Nous constatons aussi que la valeur exigée par la norme n'est obtenue qu'à partir de 2000 essais.

Ceci peut être expliqué par la présence d'humidité dans l'huile. Cette humidité disparaît au fur et à mesure que l'huile subit des claquages (échauffement et évaporation de l'eau) [24]. Ce qui démontre l'utilité des premiers claquages. En pratique, cette opération est remplacée par le chauffage de l'huile à une température comprise entre 70 et 75°C.

### III.2.2 Mesure du facteur de dissipation diélectrique $tg\delta$ :

Pour mesurer le facteur de dissipation diélectrique  $tg\delta$  et la permittivité relative, nous avons utilisé deux ponts de Scherring :

Le premier du type BAUER DTL (figure III-3) complètement automatisé, est programmé pour afficher 06 mesures et leur moyenne à la température de 90°C, tension 2kV et fréquence 50 Hz, selon la norme CEI 247 [13]. Cet appareil est disponible au laboratoire SKMK de Blida.

Le second du type TETTEX 2903 dont la cellule d'essais est présentée en figure III-4, de réglage manuel, permet de varier la température entre 30 et 150°C. Cet appareil est installé au laboratoire de la câblerie de Gué de Constantine.



Figure III-3 : Pont de Scherring BAUER DTL

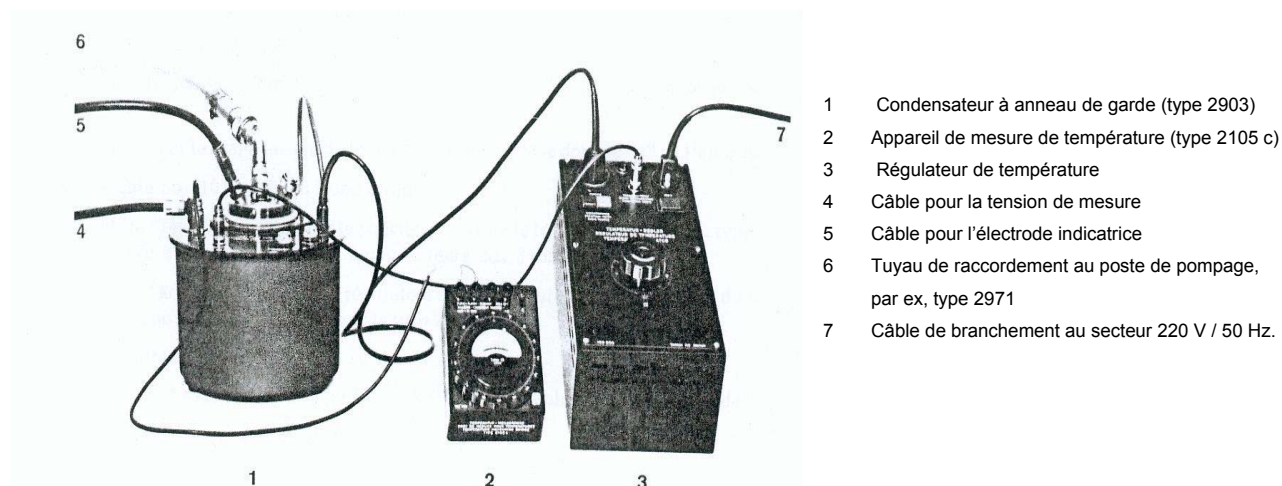


Figure III-4: Cellule d'essai du pont de Scherring TETTEX 2903

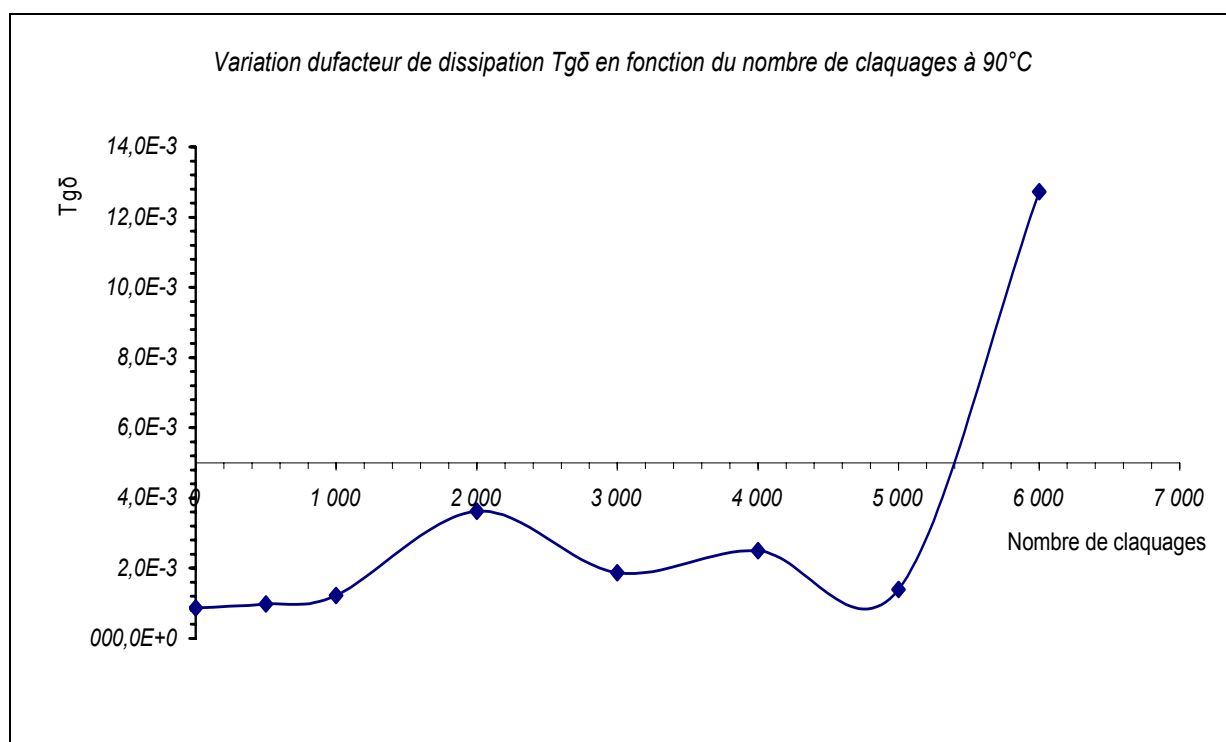
i- Variation de la  $tg\delta$  en fonction du nombre de claquages à  $T=90^{\circ}\text{C}$  (CEI247) [13].

Le tableau III-3, représente les valeurs moyennes du facteur de dissipation diélectrique  $tg\delta$  en fonction du nombre de claquages. Le graphe de la figure III-5 schématise la variation du facteur de dissipation diélectrique  $tg\delta$  en fonction du nombre de claquages avec pour axe horizontal la valeur consignée par la norme ( $5 \cdot 10^{-3}$ ).

Nous observons que le facteur de dissipation est pratiquement constant jusqu'à 1000 claquages, fluctue entre 1000 et 5000, tout en restant inférieur à la recommandation de la norme. Au-delà, il augmente fortement dépassant cette recommandation.

Nombre de claquages	0	500	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
facteur de dissipation $tg\delta$ ( $10^{-3}$ )	0,87	0,98	1,22	3,62	1,87	2,50	1,40	12,70

**Tableau III-3:** Variation du facteur de dissipation diélectrique  $tg\delta$  en fonction du nombre de claquages à  $T=90^{\circ}\text{C}$ .



**Figure III-5:** Variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction du nombre de claquages à  $90^{\circ}\text{C}$ .

De ces résultats, nous pouvons déduire que le facteur de dissipation diélectrique est très faiblement affecté par le claquage de l'huile, pour une série réduite. En effet, la valeur exigée par la norme n'est dépassée que si l'huile subit une série de l'ordre de 5400 claquages.

Toutefois, le claquage d'une huile induit des élévations de température qui dans certaines conditions peuvent largement dépasser les  $90^{\circ}\text{C}$ . Afin d'évaluer l'effet composé du nombre de claquage et la température, nous mesurons  $tg\delta$  pour des températures comprises entre  $30$  et  $150^{\circ}\text{C}$ .



- ii- Variation du facteur de dissipation diélectrique  $tg\delta$  en fonction de la température et du nombre de claquages :

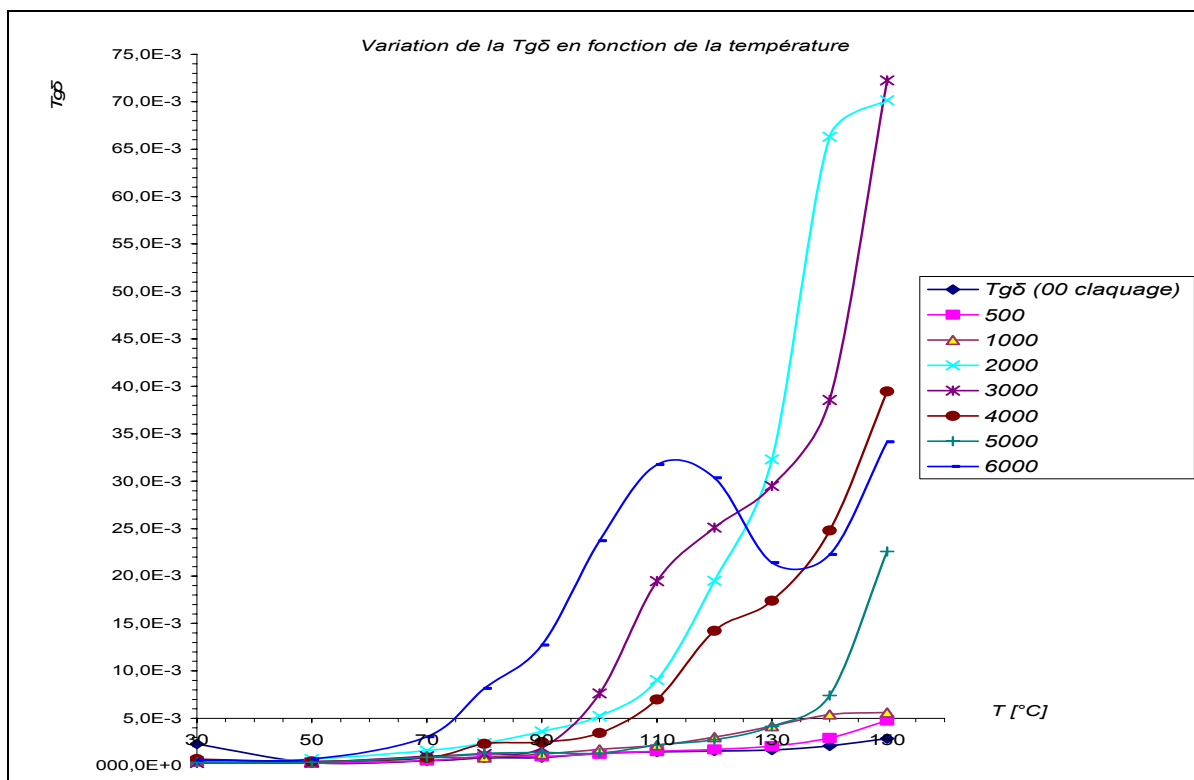
Le tableau III-4 et la figure III-6 représentent la variation de  $tg\delta$  en fonction de la température pour différents nombres de claquages. Dans la figure III-7, nous présentons la variation de  $tg\delta$  en fonction du nombre de claquages pour différentes températures de mesure.

Nous pouvons observer que le facteur de dissipation diélectrique reste bon pour toutes les températures inférieures ou égales à 70°C.

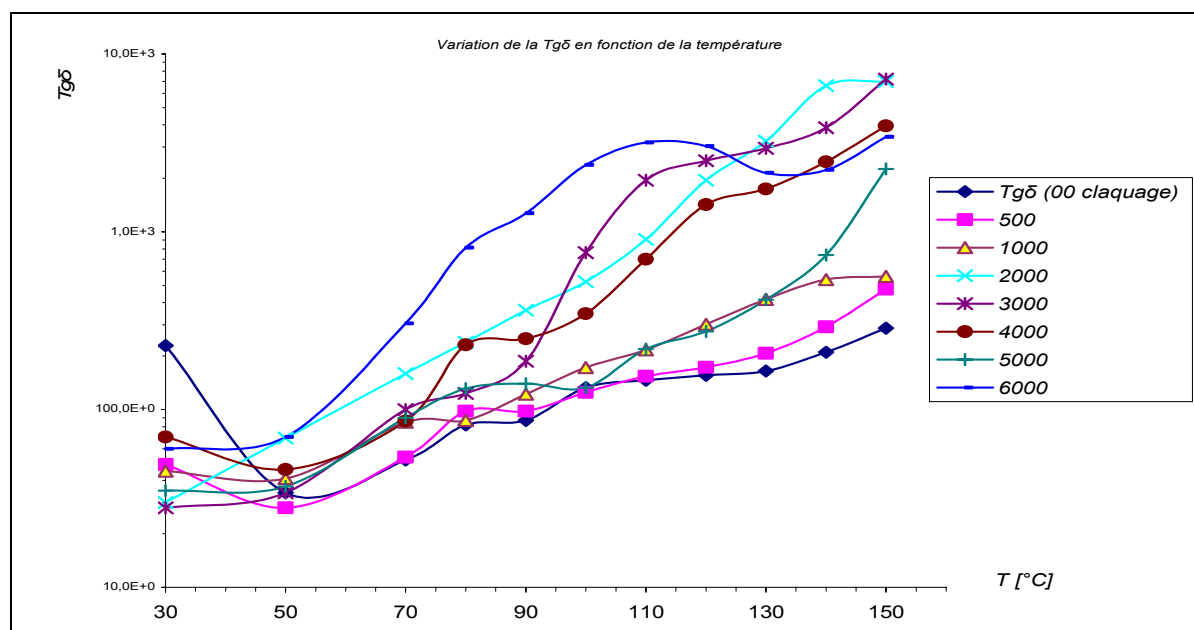
Entre 80°C et 150°C, cette valeur dépend du nombre de claquages. En effet, la valeur recommandée par la norme n'est dépassée que si le nombre de claquages est de 1000. Toutefois, pour un nombre élevée de claquages (supérieur à 3500), la valeur du facteur de dissipation diélectrique diminue jusqu'à être inférieur à la recommandation de la norme, pour les températures (80, 90, 100, 110, 120 et 130°C). Pour 140 et 150°C  $tg\delta$  reste toujours supérieure à cette recommandation.

	nombre de claquages							
	neuve	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
30°C	$22,9 \times 10^{-4}$	$4,90 \times 10^{-4}$	$4,50 \times 10^{-4}$	$3,00 \times 10^{-4}$	$2,80 \times 10^{-4}$	$7,00 \times 10^{-4}$	$3,50 \times 10^{-4}$	$6,00 \times 10^{-4}$
50°C	$3,40 \times 10^{-4}$	$2,80 \times 10^{-4}$	$4,10 \times 10^{-4}$	$6,90 \times 10^{-4}$	$3,40 \times 10^{-4}$	$4,60 \times 10^{-4}$	$3,70 \times 10^{-4}$	$7,00 \times 10^{-4}$
70°C	$5,20 \times 10^{-4}$	$5,40 \times 10^{-4}$	$8,50 \times 10^{-4}$	$15,9 \times 10^{-4}$	$10,0 \times 10^{-4}$	$8,60 \times 10^{-4}$	$9,00 \times 10^{-4}$	$3,05 \times 10^{-4}$
80°C	$8,20 \times 10^{-4}$	$9,80 \times 10^{-4}$	$8,70 \times 10^{-4}$	$23,9 \times 10^{-4}$	$12,3 \times 10^{-4}$	$23,1 \times 10^{-4}$	$13,1 \times 10^{-4}$	$81,5 \times 10^{-4}$
90°C	$8,70 \times 10^{-4}$	$9,80 \times 10^{-4}$	$12,2 \times 10^{-4}$	$36,2 \times 10^{-4}$	$18,7 \times 10^{-4}$	$25,0 \times 10^{-4}$	$14,0 \times 10^{-4}$	$127 \times 10^{-4}$
100°C	$13,3 \times 10^{-4}$	$12,5 \times 10^{-4}$	$17,2 \times 10^{-4}$	$52,4 \times 10^{-4}$	$76,3 \times 10^{-4}$	$34,6 \times 10^{-4}$	$13,3 \times 10^{-4}$	$23,7 \times 10^{-4}$
110°C	$14,6 \times 10^{-4}$	$15,4 \times 10^{-4}$	$21,7 \times 10^{-4}$	$90,5 \times 10^{-4}$	$195 \times 10^{-4}$	$70,0 \times 10^{-4}$	$21,9 \times 10^{-4}$	$318 \times 10^{-4}$
120°C	$15,6 \times 10^{-4}$	$17,3 \times 10^{-4}$	$30,2 \times 10^{-4}$	$195 \times 10^{-4}$	$251 \times 10^{-4}$	$142 \times 10^{-4}$	$27,5 \times 10^{-4}$	$304 \times 10^{-4}$
130°C	$16,5 \times 10^{-4}$	$20,7 \times 10^{-4}$	$41,7 \times 10^{-4}$	$323 \times 10^{-4}$	$295 \times 10^{-4}$	$174 \times 10^{-4}$	$41,5 \times 10^{-4}$	$214 \times 10^{-4}$
140°C	$21,0 \times 10^{-4}$	$29,2 \times 10^{-4}$	$53,9 \times 10^{-4}$	$663 \times 10^{-4}$	$386 \times 10^{-4}$	$248 \times 10^{-4}$	$74,0 \times 10^{-4}$	$223 \times 10^{-4}$
150°C	$28,7 \times 10^{-4}$	$47,6 \times 10^{-4}$	$56,1 \times 10^{-4}$	$200 \times 10^{-4}$	$722 \times 10^{-4}$	$395 \times 10^{-4}$	$226 \times 10^{-4}$	$342 \times 10^{-4}$

Tableau III-4: Variation de la  $tg\delta$  en fonction de la température et du nombre de claquages

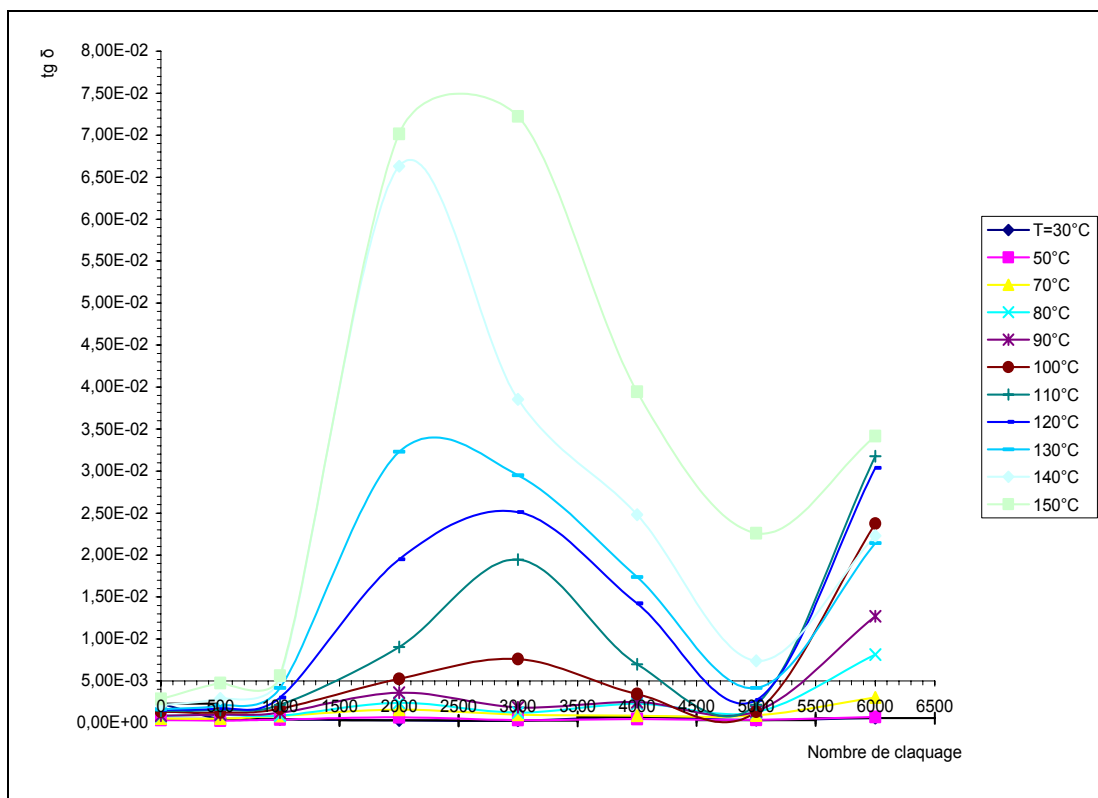


(a) : Echelle arithmétique

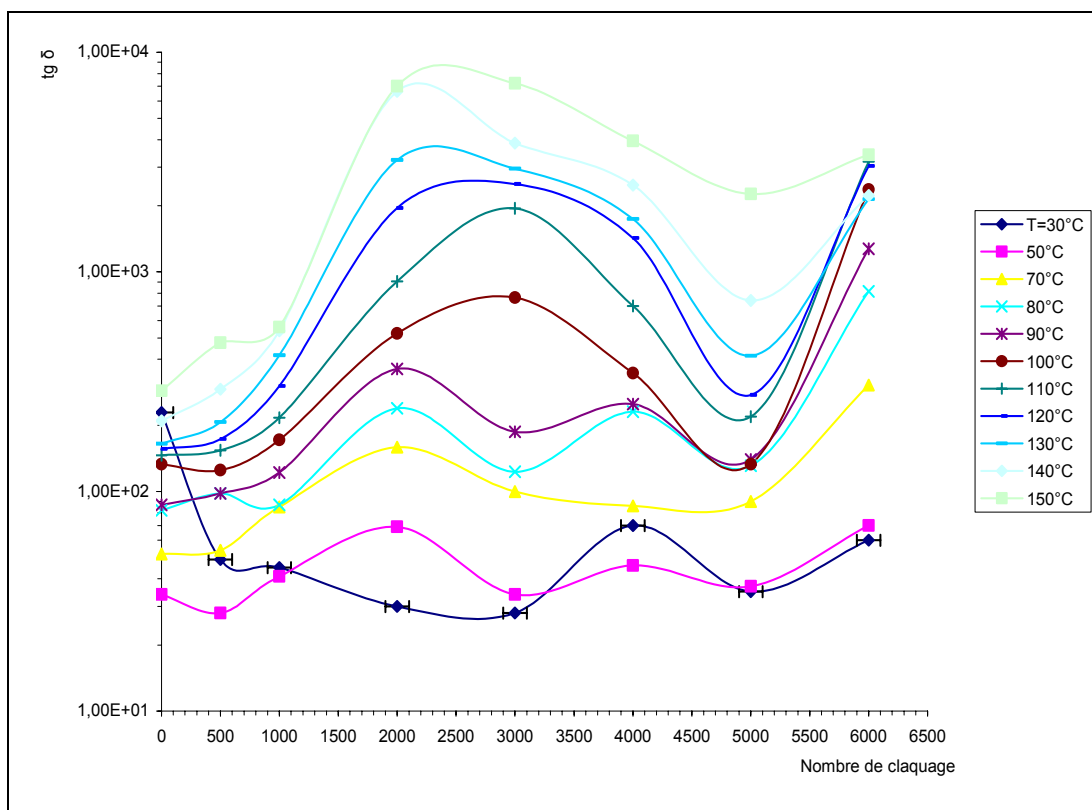


(b) : Echelle Logarithmique

Figure III-6: Variation du facteur de dissipation en fonction de la température pour différents nombres de claquages



(a) : Echelle arithmétique



(b) : Echelle Logarithmique

Figure III-7 : Variation du facteur de dissipation en fonction du nombre de claquages pour différentes températures de mesure.

D'après les résultats obtenus, nous concluons que pour une température de l'huile inférieure ou égale à 70°C le facteur de dissipation diélectrique reste bon même si l'huile subi 6000 claquages. Au-delà de cette température l'huile commence à subir l'effet combiné des deux paramètres et le facteur de dissipation diélectrique peut dépasser la valeur limite ( $5 \times 10^{-3}$ ).

### III.2.3 Mesure de la permittivité relative $\epsilon_r$ :

La capacité d'un système contenant un matériau dépend directement de la permittivité relative  $\epsilon_r$  de ce dernier :

$$\epsilon_r = C/C_0 \quad (\text{III-1})$$

Avec  $C_0$  capacité du vide (60,8 pF) de la cellule de mesure.

Présenter la variation d'un des paramètres revient à présenter la variation de l'autre.

Pour mesurer la permittivité relative  $\epsilon_r$  pour différentes températures (entre 30 et 150°C), nous utilisons le second pont de Scherring (figure III-4). Ce dernier affiche la valeur de la capacité du système que nous divisons par la capacité du système sous vide ( $C_0$  donnée par le constructeur) pour déduire la permittivité relative.

#### i- Variation de la permittivité relative $\epsilon_r$ en fonction du nombre de claquages à $T=90^\circ\text{C}$ :

Dans le tableau III-5, nous donnons les valeurs de  $\epsilon_r$  en fonction du nombre de claquages à la température  $T=90^\circ$ .

Nous présentons dans la figure III-8 la variation de la permittivité relative  $\epsilon_r$  en fonction du nombre de claquages à la température 90°C.

La permittivité de l'huile diminue pour atteindre une valeur minimale à 500 claquages. Après, elle augmente, dans la zone de 500 à 3000 claquages, puis oscille autour de la valeur 2,1. Cette dernière valeur est la valeur initiale de la permittivité (huile neuve).

Nombre de claquages	0	500	1 000	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
permittivité relative $\epsilon_r$	2,09	1,84	1,91	1,93	2,08	2,12	2,08	2,10

**Tableau III-5** : Variation de la permittivité relative  $\epsilon_r$  en fonction du nombre de claquages à 90°C

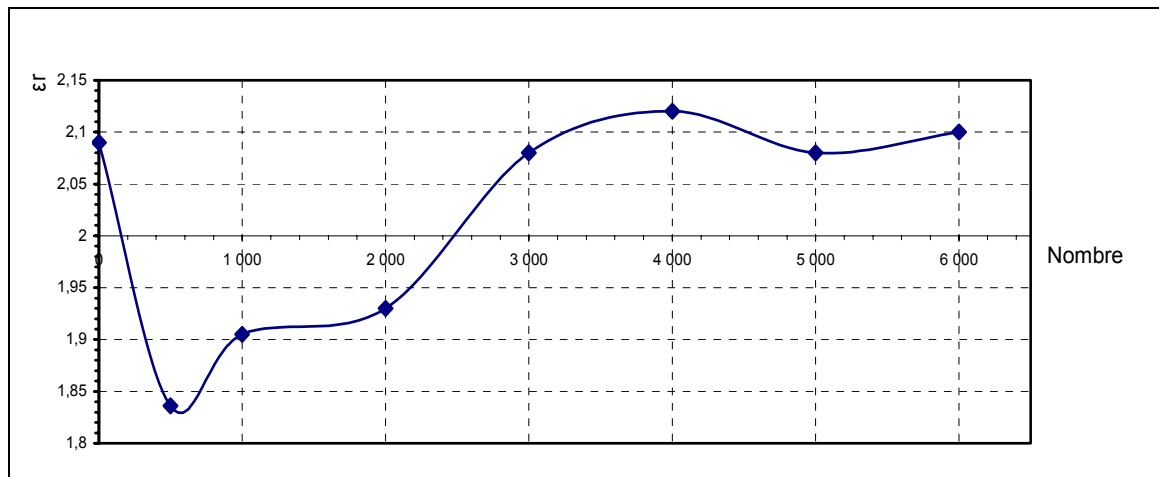


Figure III-8 : Variation de la permittivité relative en fonction du nombre de claquages à 90°C.

La permittivité relative est un facteur intrinsèque de l'huile, elle diminue en fonction du nombre de claquages puis augmente pour se stabiliser à la valeur proche de la valeur que l'huile la possède avant le claquage. Ce résultat démontre que la permittivité de l'huile n'est pas détériorée par le nombre de claquages. En effet, une huile est d'autant meilleure que sa permittivité est faible.

ii- Variation de la permittivité relative en fonction de la température et du nombre de claquages :

Nous présentons au tableau III-6 les valeurs de la permittivité relative de l'huile en fonction de la température après différents nombres de claquages. Les résultats de ce tableau sont reproduits sur les figures III-9 et III-10.

La figure III-9 montre que la permittivité relative diminue quand la température augmente. Quel que soit le nombre de claquages.

L'évolution de  $\epsilon_r$  en fonction du nombre de claquages pour différentes températures (figure III-10) est similaire à ce qui a été obtenu pour 90°C.

Les différents résultats obtenus sur la permittivité démontrent les effets positifs de la température et du nombre de claquage et justifie l'augmentation de la tension de claquage, confirmant ainsi, l'hypothèse selon laquelle toute l'humidité présente dans le liquide disparaît en augmentant la température ou en soumettant le liquide à des claquages.

	Nombre de claquages							
	Neuve	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000
30	2,18	1,84	1,92	1,95	2,16	2,20	2,16	2,16
50	2,16	1,84	1,91	1,95	2,14	2,18	2,14	2,14
70	2,13	1,84	1,91	1,94	2,11	2,15	2,11	2,12
80	2,11	1,84	1,91	1,94	2,09	2,13	2,10	2,11
90	2,09	1,84	1,91	1,93	2,08	2,12	2,08	2,10
100	2,08	1,83	1,90	1,93	2,07	2,10	2,08	2,09
110	2,06	1,83	1,90	1,93	2,06	2,09	2,06	2,08
120	2,06	1,83	1,90	1,93	2,05	2,08	2,05	2,06
130	2,04	1,83	1,90	1,92	2,03	2,06	2,04	2,05
140	2,03	1,82	1,89	1,92	2,03	2,05	2,02	2,04
150	2,02	1,82	1,89	1,92	2,01	2,03	2,01	2,03

Tableau III-6 : Variation de la permittivité relative  $\epsilon_r$ , en fonction du nombre de claquages et de la température

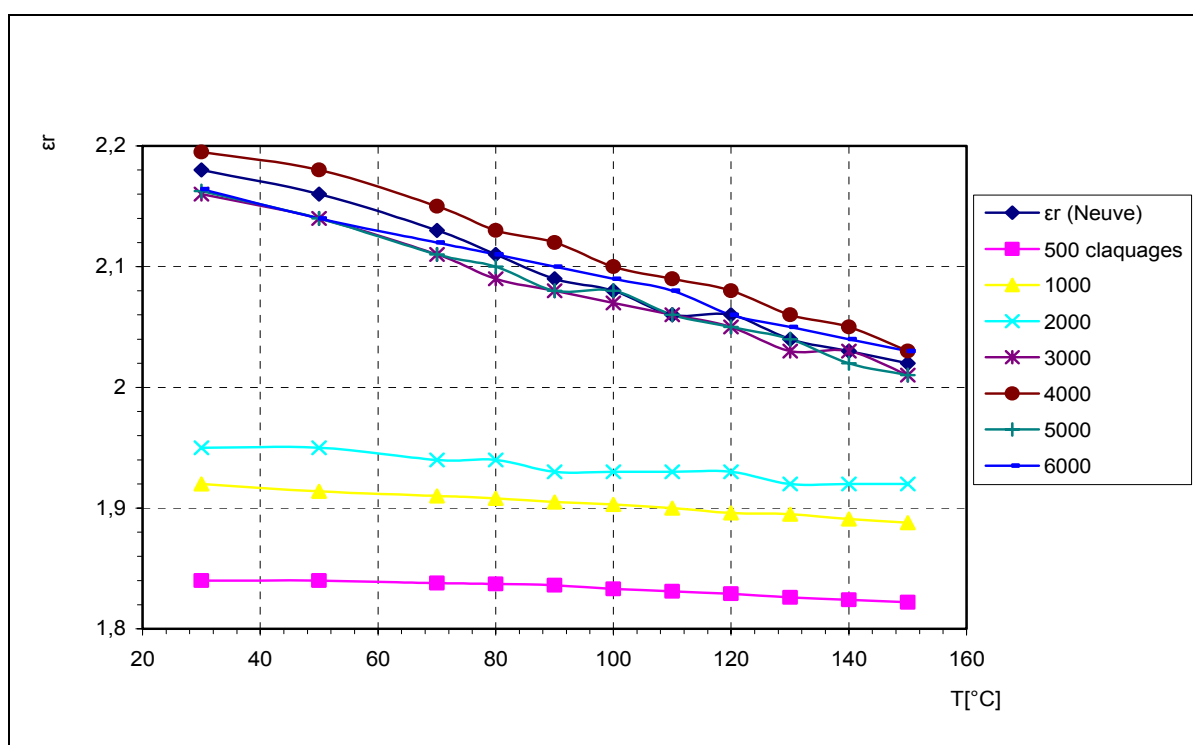


Figure III-9: Variation de la permittivité relative en fonction de la température et du nombre de claquages.

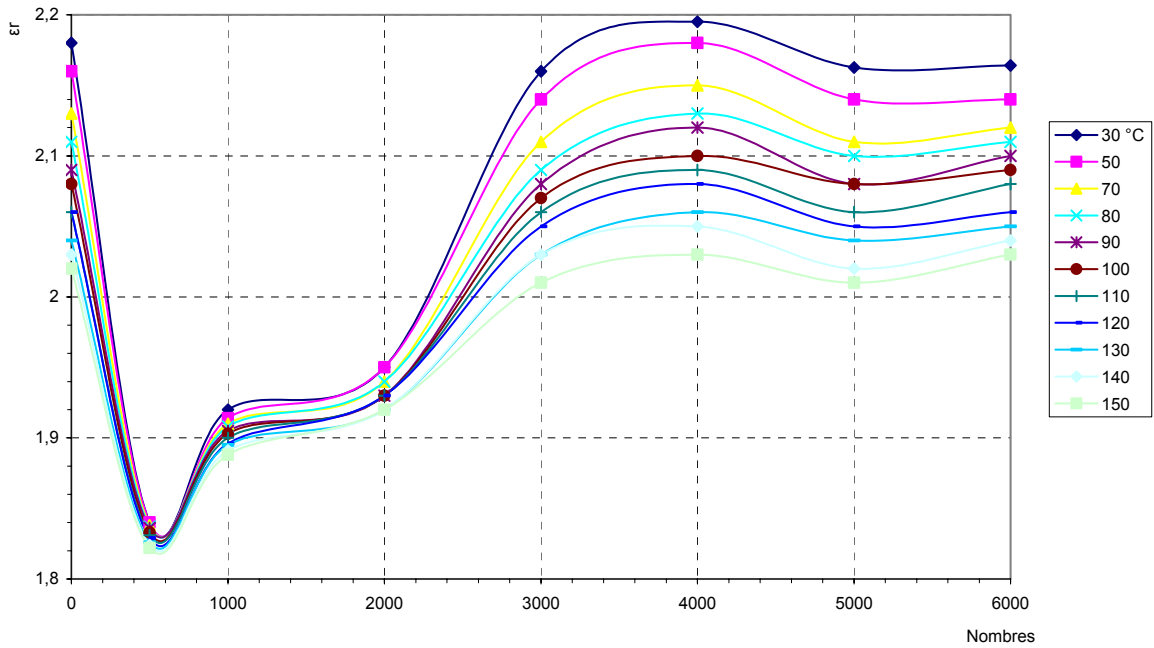


Figure III-10 : Variation de la permittivité relative en fonction de la température pour différents nombres de claquages.

III.2.4 Mesure de la conductivité  $\sigma$  :

La conductivité de l'isolant est une propriété très importante à contrôler pour interpréter son état ; elle peut être exprimée en fonction de la conductance G

Pour une huile on note [65] :

$$\sigma = \epsilon_0 \cdot G / C_0 \quad (III-2)$$

où  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide égal à  $8.8541 \times 10^{-12}$  F/m et  $C_0$  la capacité du vide.

Pour la plupart des liquides isolants, la dépendance de température et de la conductivité volumique peut être décrite avec une loi exponentielle, selon l'équation [65]:

$$\sigma_{T_1} = \sigma_{T_2} \text{Exp} \left( \frac{-E_c/k}{\left(\frac{1}{T_2}\right) - \left(\frac{1}{T_1}\right)} \right) \quad (III-3)$$

où  $\sigma_{T_1}$  et  $\sigma_{T_2}$  sont les valeurs de conductivité volumique aux températures  $T_1$  et  $T_2$  en Kelvin [K].

$E_c = 0,475$  eV, énergie d'activation en [eV] d'une huile de transformateur neuve ;

$k = 8.62 \times 10^{-5}$  eV/K, la constante de Boltzmann.

La mesure de la conductivité est obtenue à l'aide d'un conductimètre du type Micafil VZ220A (figure III-11) et du logiciel LCM-8716 CALCULATOR (figure III-12).

Après injection d'un échantillon d'huile dans le conductimètre, ce dernier nous affiche la température d'essais, la conductivité et la permittivité. Le logiciel nous permet d'obtenir la conductivité pour des températures comprises entre -10 et 120°C, en exploitant les relations (III-2, III-3) [65].



Figure III-11 : Conductimètre pour isolant liquide VZ220A[65].

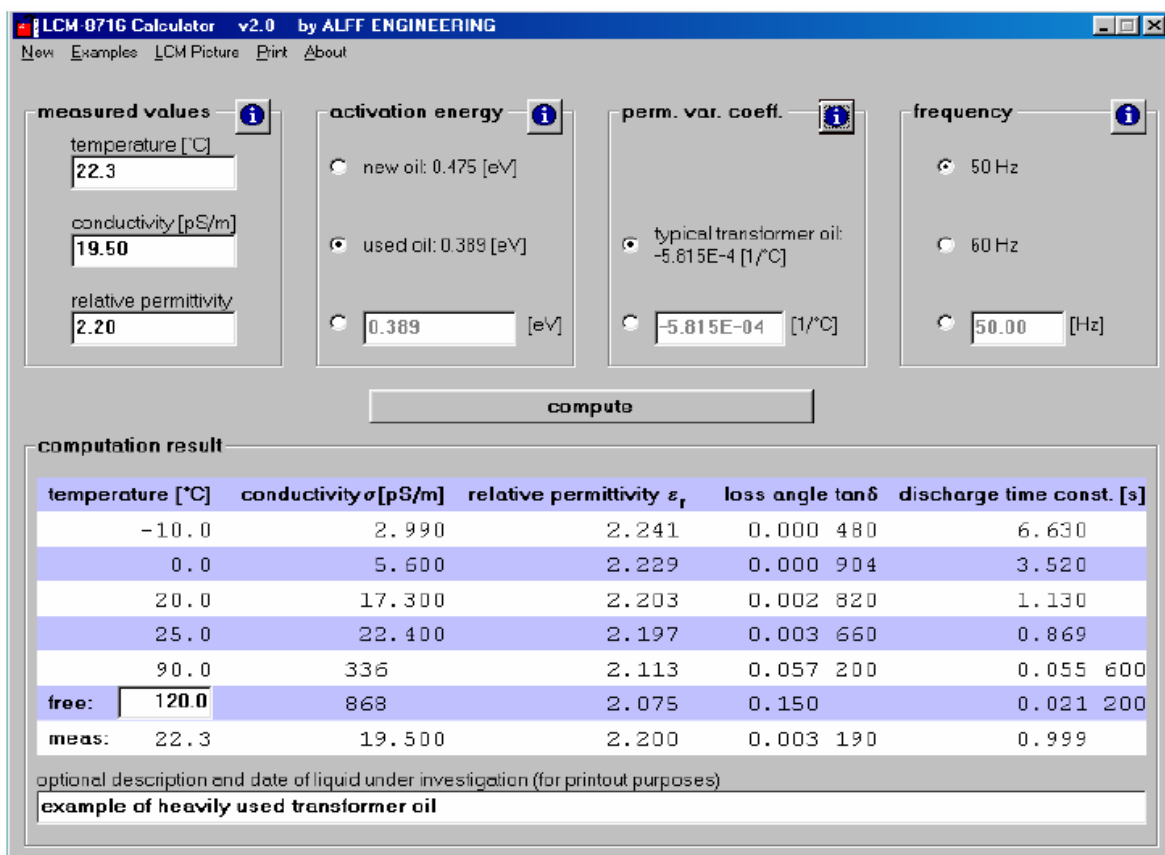


Figure III-12 : Exemple de calcul à l'aide du LCM-8716 CALCULATOR [65].

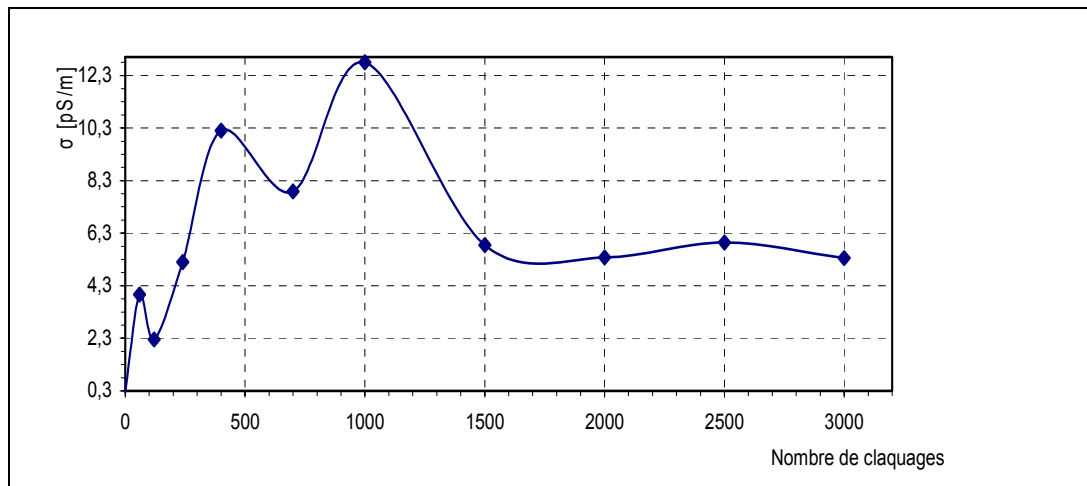


Nous donnons dans le tableau III-7 les valeurs de la conductivité de l'huile en fonction du nombre de claquages de 0 à 3000 claquages à la température 90°C et en figure III-13 sa variation.

La conductivité augmente en fonction du nombre de claquages jusqu'à atteindre 12,4 pS/m à 1000 claquages puis diminue pour atteindre la valeur 5,8 pS/m à 1500 claquages. Après, elle se stabilise aux alentours de la valeur 5,4 pS/m.

Nombre de claquages	00	60	120	240	400	700	1000	1500	2000	2500	3000
$\sigma$ [pS/m]	0,238	3,97	2,25	5,2	10,2	7,89	12,8	5,84	5,38	5,94	5,35

**Tableau III-7 :** Variation de la conductivité  $\sigma$ , en fonction du nombre de claquages à 90°C



**Figure III-13 :** Variation de la conductivité en fonction du nombre de claquages à 90°C.

Nous présentons dans le tableau III-8, la variation de la conductivité de l'huile, ayant subi une série de claquages, en fonction de la température de mesure.

	Nombre de claquages										
	Neuve	60	120	240	400	700	1000	1500	2000	500	3000
-10°C	0,001	0,012	0,007	0,016	0,032	0,025	0,040	0,018	0,017	0,019	0,017
0°C	0,002	0,027	0,015	0,035	0,069	0,053	0,086	0,039	0,036	0,040	0,036
20°C	0,006	0,106	0,060	0,139	0,272	0,211	0,340	0,156	0,140	0,158	0,120
21,5°C	0,007	0,130	0,070	0,170	0,350	0,280	0,342	0,160	0,144	0,180	0,143
25°C	0,009	0,145	0,082	0,190	0,372	0,289	0,469	0,214	0,197	0,217	0,196
90°C	0,238	3,97	2,25	5,2	10,2	7,89	12,8	5,84	5,38	5,94	5,35
120°C	0,758	12,700	7,160	16,500	32,400	25,100	40,800	18,600	17,100	18,900	17,000

**Tableau III-8 :** Variation de la conductivité  $\sigma$  en [pS/m] en fonction du nombre de claquages et de la température

Le graphe de la figure III-14 montre que la conductivité augmente en fonction de la température et ceci quel que soit le nombre de claquages. En effet, l'élévation de la température engendre une disponibilité d'énergie en plus d'une agitation plus importante des particules libres disponibles, ce qui favoriserait une plus grande ionisation.

La figure III-15 de variation de la conductivité en fonction du nombre de claquages pour différentes températures est similaire à celle obtenue pour 90°C. Après augmentation, la conductivité présente des fluctuations, dépendant du nombre d'essais et de la température.

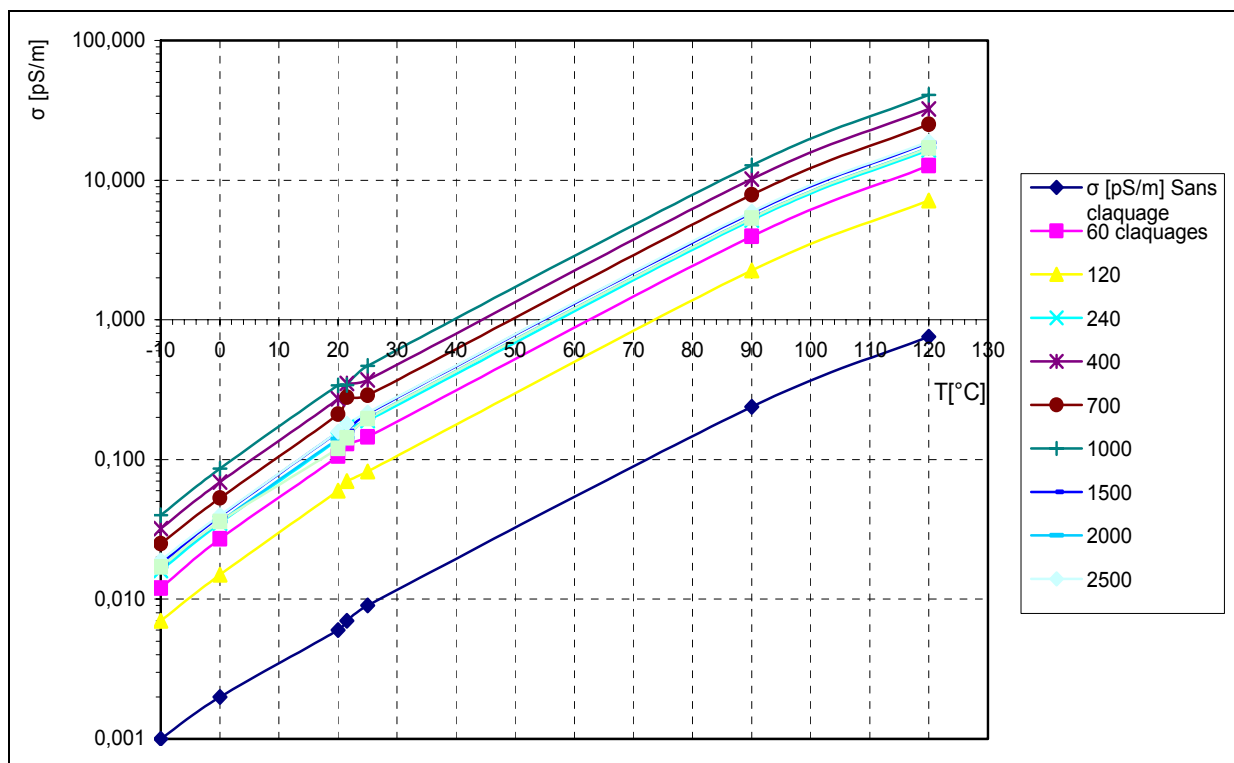


Figure III-14 : Variation de la conductivité en fonction de la température après différents nombres de claquages.

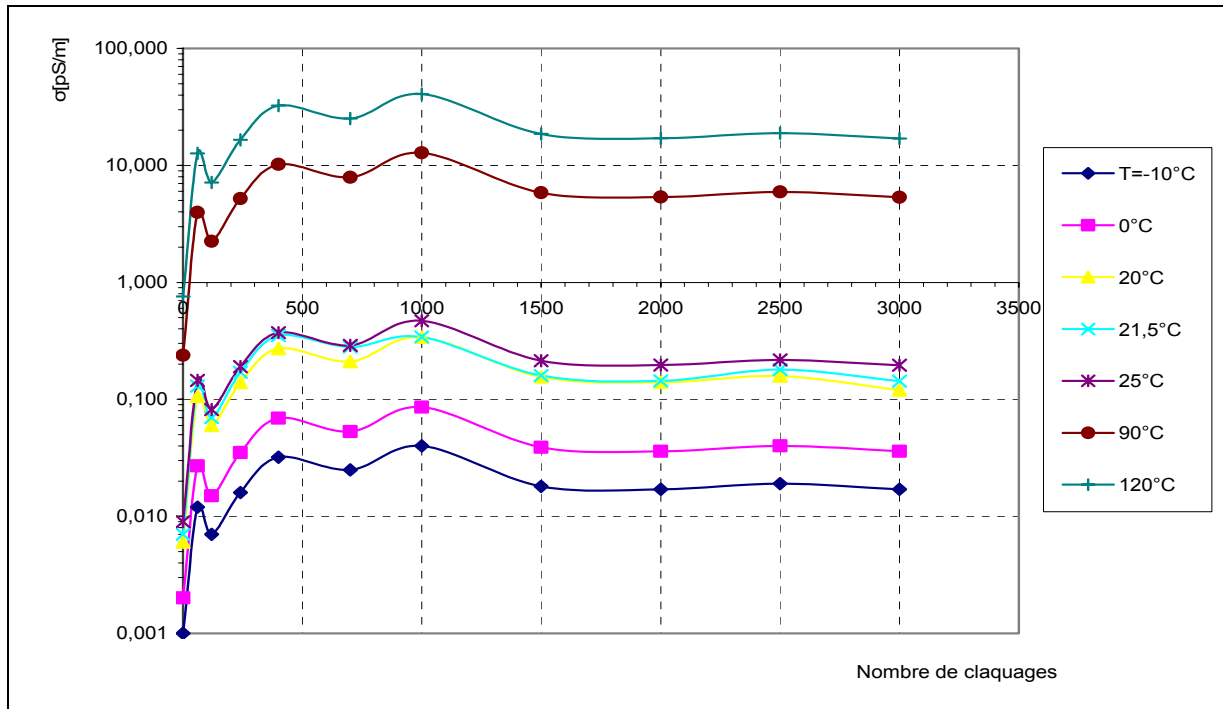


Figure III-15: Variation de la conductivité en fonction de la température après différents nombres de claquages.

### III.2.5 Mesure de l'indice d'acidité :

L'acidité est déterminée par neutralisation chimique dite titrage acido-basique. Pour ce faire, nous utilisons le système présenté dans la figure III-16 et composé d'un bêcher contenant l'huile à analyser et une burette 10 ml contenant une solution de KOH suivant la norme CEI 296 [5].

L'acidité est exprimée en mg de KOH par g d'huile, c'est à dire le nombre de mg d'une solution de Potasse alcoolique de normalité 0.1, nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile à essayer.

Elle se calcule par l'équation suivante :

$$IA = 0,1 M_1 V / M \quad (III-4)$$

Où :

IA : Indice d'Acidité [gKOH/g d'huile]

0,1: normalité de la solution KOH [g/l].

$M_1$  : masse moléculaire de la solution KOH (56,1 g/moles).

M : masse d'huile [g]

V : volume en [ml] de KOH, nécessaire pour avoir la neutralisation.



**Figure III-16:** *Système de neutralisation*

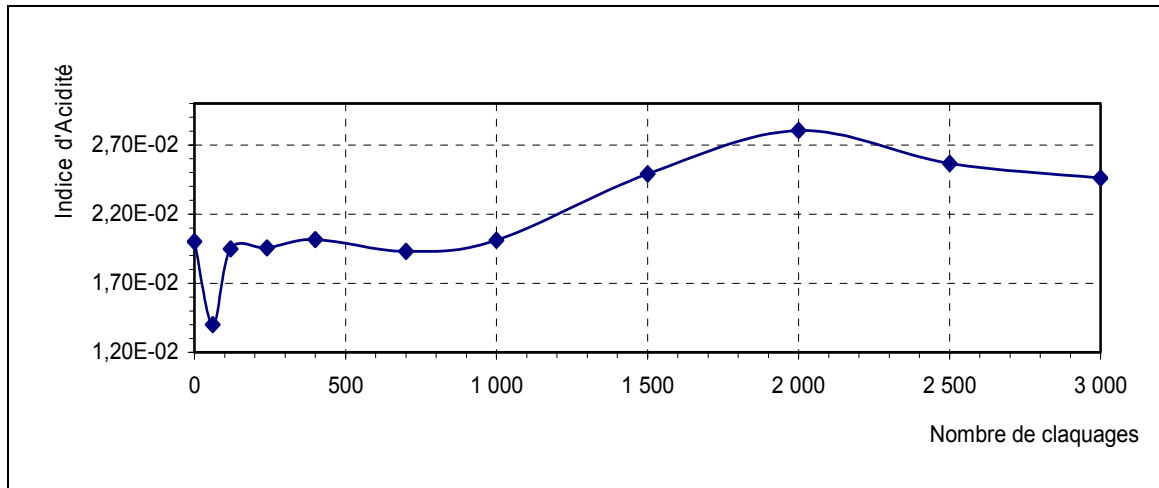
Le tableau III-9, nous donne les valeurs de l'indice d'acidité en fonction du nombre de claquages.

Le graphe de la figure III-17 représente l'influence du nombre de claquages sur l'acidité de l'huile isolante.

Nous observons une diminution de l'indice d'acidité jusqu'à la valeur  $1,4 \times 10^{-2}$  gKOH/g d'huile, puis une augmentation ( $2,8 \times 10^{-2}$  gKOH/g d'huile) qui peut être due au fait que le claquage favorise les réactions chimiques (vu la composition organique de l'huile), générant une certaine acidité dans l'huile. Néanmoins ; la valeur de l'indice d'acidité reste toujours inférieure à  $3 \cdot 10^{-2}$  gKOH/g d'huile, limite tolérée par la CEI 296 [5] et ceci quel que soit le nombre de claquages subi par l'huile.

Nombre de claquages	0	60	120	240	400	700	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
Indice d'acidité ( $10^{-2}$ )	2,00	1,40	1,95	1,96	2,02	1,93	2,01	2,49	2,81	2,57	2,46

**Tableau III-9:** *Variation de l'acidité en fonction du nombre de claquages*



**Figure III-17 :** Variation de l'acidité de l'huile en fonction du nombre de claquages.

### III.2.6 Mesure de la viscosité cinématique absolue à 40°C :

Nous utilisons un viscosimètre de marque TAMSON (figure III-18) pour mesurer la viscosité cinématique à 40°C selon le procédé présenté dans la norme (ISO 3104) [6].



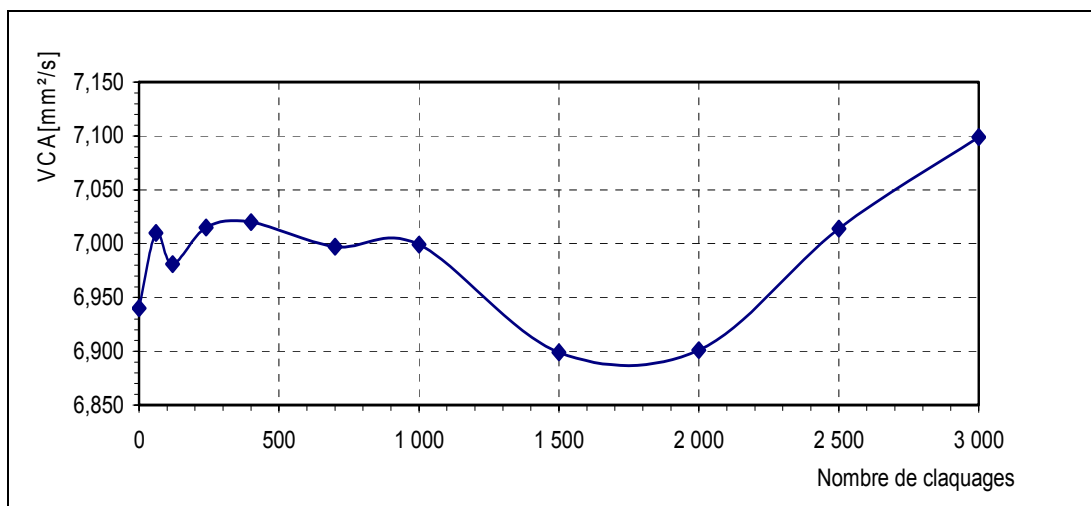
**Figure III-18 :** Viscosimètre

Dans le tableau III-10, nous représentons la variation de la viscosité cinématique à 40°C en fonction du nombre de claquages appliqués à un échantillon d'huile neuve pour transformateur.

Le graphe de la figure III-19 montre que la viscosité oscille autour de la valeur 7 mm<sup>2</sup>/s jusqu'à 1000 claquages puis diminue pour atteindre la valeur 6,89 mm<sup>2</sup>/s à 1500 claquages, ensuite augmente à 7,10 mm<sup>2</sup>/s pour 3000 claquages. La viscosité garde toujours une valeur admissible par la norme CEI 296 [5].

Nombre de claquages	0	60	120	240	400	700	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
Viscosité cinématique à 40°C [mm <sup>2</sup> /s]	6,940	7,010	6,981	7,015	7,020	6,997	6,999	6,899	6,901	7,014	7,099

**Tableau III-10 :** Variation de la viscosité cinématique absolue en fonction du nombre de claquages à 40 °C



**Figure III-19 :** Variation de la viscosité cinématique en fonction du nombre de claquages à 40°C.

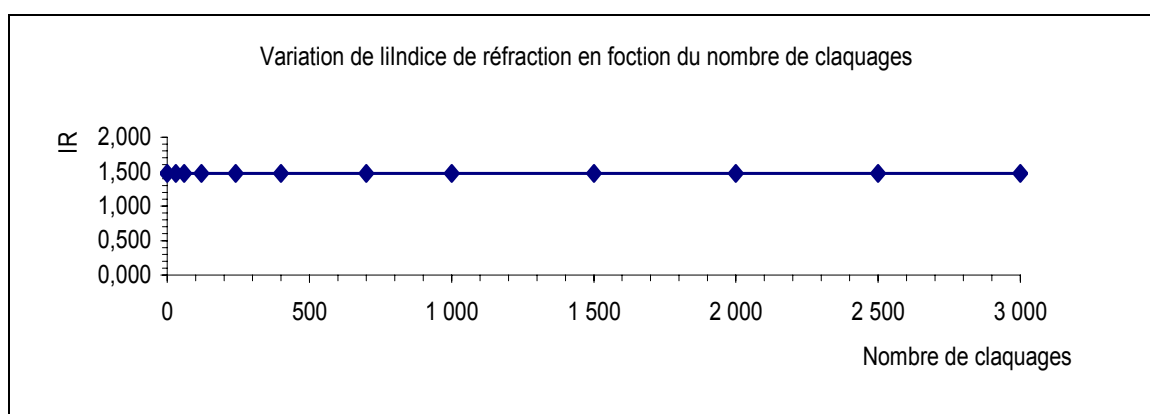
### III.2.7 Mesure de l'indice de réfraction :

L'indice de réfraction est un facteur qui représente la tendance paraffinique ou naphtéinique de l'huile. Pour le mesurer, nous utilisons un réfractomètre modèle CETI (figure III-20).



**Figure III-20:** Réfractomètre.

Jusqu'à 3000 claquages, l'indice de réfraction de l'huile utilisée reste constant et vaut 1,47 (figure III-21). Nous pouvons ainsi dire que le nombre de claquages n'influe nullement sur l'indice de réfraction de l'huile. Ce qui signifie qu'aucune modification de la structure chimique (tendance paraffinique ou naphénique) n'a lieu et ceci malgré l'application de 3000 claquages.



**Figure III-21 :** Variation de l'indice de réfraction en fonction du nombre de claquages.

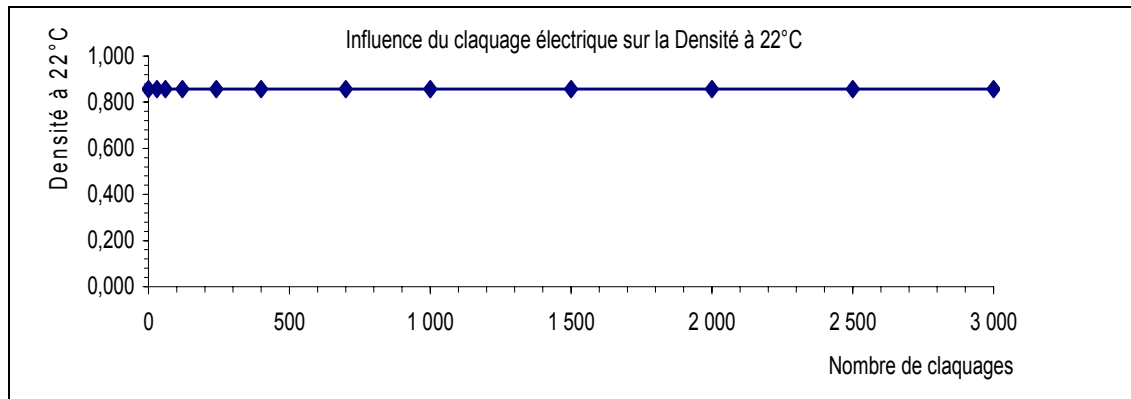
### III.2.8 Mesure de la densité de l'huile :

Nous mesurons la densité de l'huile à l'aide d'un densimètre de marque MBL (figure III-22).



**Figure III-22:** Densimètre MBL

Comme pour l'indice de réfraction, nous n'avons observé aucune influence du nombre de claquages ( $N \leq 3000$ ) sur la densité qui reste constante et égale à 0,86 (figure III-23).



**Figure III-23:** Variation de la densité en fonction du nombre de claquages.

### III.2.9 Point d'éclair :

Le point d'éclair est mesuré à l'aide de l'appareil Autoflash (figure III-24).



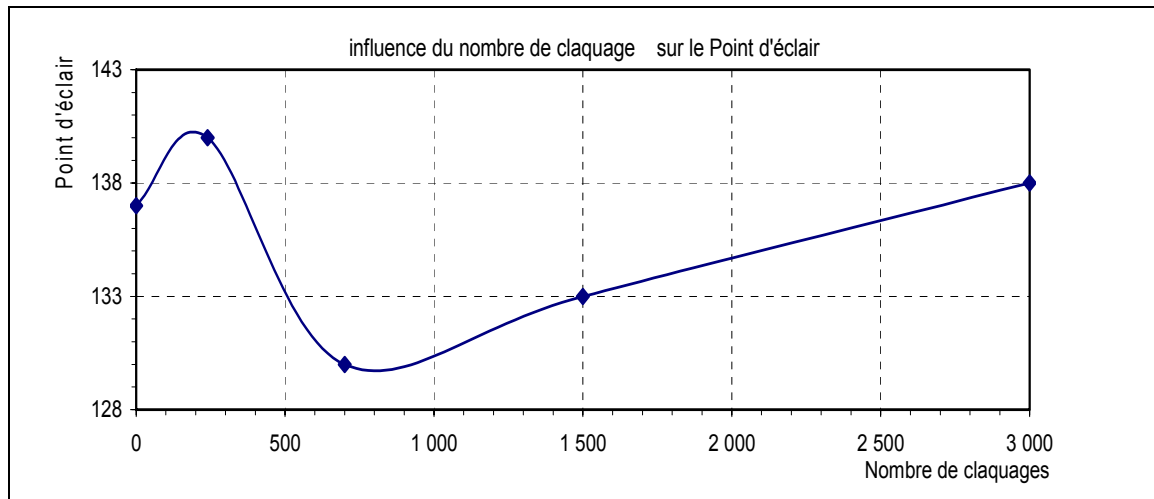
**Figure III-24:** Autoflash.

Le graphe de la figure III-25 représente la variation du point d'éclair en fonction du nombre de claquages.

Le point d'éclair est parmi les paramètres qui sont très peu influencés par le claquage de l'huile. Ce paramètre dépend, essentiellement, des caractéristiques des produits organiques et le claquage ne change pas les caractéristiques de l'huile toute seule. Par contre, la réaction entre l'huile et d'autres produits dans le transformateur peut changer son point d'éclair (Carton ; cuivre ; ...).

Dans notre cas et pour un nombre de claquages inférieur ou égale à 3000, nous observons que le point d'éclair augmente pour atteindre la valeur 141, puis diminue jusqu'à la valeur 130 à 700 claquages. Pour en finir à la valeur 138 pour 3000 claquages (figure III-25).





**Figure III-25:** Variation du point d'éclair en fonction du nombre de claquages.

### III.2.10 Indice de couleur :

A l'aide d'un colorimètre (figure III-26), nous mesurons l'indice de couleur pour différents nombres de claquages. Les résultats ont montré que l'huile ne change pas de couleur pour un nombre inférieur ou égal à 3000 claquages et que l'huile garde la couleur initiale avec un indice de couleur inférieur à 0,5.



**Figure III-26:** Colorimètre

### Conclusion :

La plupart des paramètres de l'huile sont influencés par l'effet combiné du nombre de claquages et de la température ; tels que, la tension de claquage, le facteur de dissipation diélectrique, la permittivité relative, la conductivité, la viscosité et l'acidité. L'augmentation de la température et du nombre de claquages n'altère les caractéristiques de l'huile que si cette dernière a subi un nombre de claquages important (plus de 5000 claquages). De ce fait, nous estimons que la Borak 22 est une huile intéressante aussi bien pour les transformateurs de grande puissance que pour les disjoncteurs haute tension.

CONCLUSION  
GENERALE

---

**CONCLUSION GENERALE :**

L'huile Borak 22 étudiée dans le travail, est un isolant qui conserve de bonnes caractéristiques physico-électriques malgré le nombre élevé de claquages qu'elle a subie.

L'augmentation du nombre de claquages électriques, jusqu'au 6000 claquages, sur un échantillon d'huile minérale neuve à la température ambiante ne dégrade pas l'état de l'huile. Tous les paramètres physiques, chimiques et électriques gardent des valeurs admissibles aux recommandations la norme qui régit une huile neuve (CEI 296) [5].

La combinaison entre le nombre de claquages électriques et l'augmentation de la température du fonctionnement dégrade considérablement les caractéristiques de l'huile. Au-delà d'une certaine valeur, la température semble être le facteur le plus critique que le nombre de claquage, dans la dégradation de l'huile isolante. Toutefois, aux premiers claquages, ces deux facteurs améliorent la rigidité de l'huile grâce à leur élimination de l'humidité contenue dans cette dernière.

Le facteur de dissipation diélectrique  $tg\delta$  est très faiblement affecté par le claquage de l'huile. En effet, pour une température de l'huile inférieure ou égale à 70°C, il reste bon quel que soit le nombre de claquages subi par l'huile (jusqu'à 6000 claquages). Pour des températures plus élevées,  $tg\delta$  augmente dépassant la limite admise par la norme ( $5 \times 10^{-3}$ ) ;

La permittivité relative diminue en fonction du nombre de claquages et de la température grâce à l'élimination de l'humidité. Cette diminution améliore l'état isolant de l'huile en réduisant la possibilité de formation de particules chargées.

Pour une température fixe, la conductivité augmente en fonction du nombre de claquages puis diminue en présentant des fluctuations pour se stabiliser autour d'une valeur stable plus élevée que celle d'une huile neuve. Lorsque la température augmente, ce paramètre augmente quel que soit le nombre de claquages. L'augmentation de la température crée une agitation plus importante des particules libres disponibles, ce qui favoriserait une plus grande ionisation ;

D'autres paramètres sont très peu influencés par le claquage électrique tel que l'acidité qui présente une valeur inférieure à  $3.10^{-2}$  gKOH/g d'huile, limite tolérée par la CEI 296, pour un nombre de claquages allant jusqu'à 3000 claquages.

La viscosité cinématique, l'indice de réfraction, la densité, le point d'éclair et la couleur de l'huile restent inchangés quel que soit le nombre de claquages appliqués à l'huile.

La température semble être un facteur plus dégradant que le nombre de claquages. Pour cela, il serait intéressant lors du fonctionnement d'un transformateur d'éviter les surcharges afin d'éviter cette dégradation.

Pour faire fonctionner un transformateur contenant de l'huile comme refroidissant et isolant dans les meilleures conditions et pour une durée de vie optimale, il est primordial d'éviter son utilisation en surcharge et de le faire fonctionner dans sa fourchette nominale donnée par le constructeur. Ceci évite l'augmentation de la température et par conséquent donne une plus longue utilisation du transformateur.

Nos essais ont été réalisés avec des échantillons d'huile neuve pure, ce qui ne peut se présenter dans l'industrie où la présence d'autres matériaux (papier Press-Pahn, émail etc. ...) est notée. Nous espérons, dans un proche avenir, réaliser des essais pour un nombre de claquages plus important avec une distance entre électrodes plus longue et introduire dans la cellule d'essais du papier isolant, du fil en cuivre isolant et des chutes de la tôle d'un circuit magnétique. Ce qui permettra de simuler une huile dans les conditions réelles de fonctionnement.

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :**

- [1] Noëlle BERGER ; Liquides isolants en électrotechnique – Présentation générale, Technique de l'ingénieur D2470, 2002.
- [2] R. Katan, A. Denat, O. Lesaint ; Generation, growth and collapse of vapor bubbles in hydrocarbon liquids under a high divergent electric field. J Appl Phys, 66, 1989, pp 4062-4066.
- [3] Recommandation CEI 250 ; Méthodes recommandées pour la détermination de la permittivité et du facteur de dissipation des isolants électriques aux fréquences industrielles, audibles et radioélectriques, édition 1969.
- [4] Recommandation CEI 156 ; Isolants liquides : détermination de la tension de décharge disruptive à fréquence industrielle, méthodes d'essai, édition 1995.
- [5] Norme Internationale CEI 296 ; Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion, deuxième édition, 1982.
- [6] Recommandation ISO 3104 ; Produits pétroliers-liquides opaques et transparents, Détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique, 2<sup>ème</sup> édition, 1994.
- [7] Recommandation ISO 2049 ; Produits pétroliers – détermination de la couleur (échelle ASTM) 2<sup>ème</sup> édition, 1996.
- [8] Norme ISO R 760 ; Mesure de la teneur en eau, édition 1984.
- [9] NF C 27 221 ; Mesure de la rigidité diélectrique, édition 1974.
- [10] NF C 27 101 ; Spécification des huiles minérales, édition 1982.
- [11] Norme Française NF T 60-103 ; Produits pétroliers ; Point d'éclair en vas clos, des lubrifiants et des huiles combustibles, édition 1968
- [12] Norme Française NF T 60-100 Huiles et Graisses industrielles ; Mesure de la viscosité Absolue cinématique, édition 1966
- [13] Norme Internationale CEI 247 ; Liquides isolants - Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique ( $\tan\delta$ ) et de la résistivité en courant continu, troisième édition 2004.

- 
- [14] NYNAS ; Guide des Huiles isolantes
- [15] S.Bouazabia ; Mécanismes de décharges dans les diélectriques liquides, cours de graduation, Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, 2001.
- [16] P.J.Vuarchex ; Caractéristiques des diélectriques liquides, Technique de l'Ingénieur, K714, 1988.
- [17] A. Boubakeur ; Claquage des diélectriques liquides, séminaire, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.
- [18] M. Krins, H. Borsi, E. Gockenbach; Influence of Ageing on the Dielectric Properties of Carbonized Transformer Oil.
- [19] N.Aouchar, C.Bekhaled ; Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur, Projet de fin d'études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.
- [20] S.E.Abdi ; Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur, Mémoire de Magister, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2002.
- [21] A.A.Zaky, R.Hawley ; Conduction and breakdown in mineral oil, pp 79, 1973, Peter Peregrinus Ltd, London .
- [22] B.Fallou, R. Fournié et Co ; Analyse des gaz dissous dans l'huile en tant que moyen de surveillance des transformateurs et détection des défauts naissants, CIGRE 1970, Volume I, Gr 12-02
- [23] SEFELEC ; Notes d'informations techniques, Les tests diélectriques ; étude des facteurs d'influence sur les essais de rigidité, édition 2002.
- [24] R.Tobazeon ; Liquide diélectrique : préclaquage et claquage, Technique de l'Ingénieur, D2470, 1986.
- [25] SEFELEC ; Notes d'informations techniques. Les tests diélectriques, les essais de rigidité et de l'isolement, édition 2004.
- [26] K.C. Kao ; Deformation of gaz bubbles and liquid drops in an electrically stressed insulating liquid, Nature, 208, 1965, pp : 279-280.
- [27] Z.Krasucki; Breakdown of commercial liquid and liquid solid dielectrics, in high voltage technology (Alston), p129, Oxford university press, 1968.
- [28] R. PAPOULAR; Phénomènes électriques dans les gaz, Dunod, 1963.
- [29] T. J. GALLAGHER ; Simple Dielectric Liquids Mobility, Conduction, and Breakdown, Oxford Science Research Papers, Clarendon Press – Oxford, 1975.
- [30] B. R. VARLOW; Polymers Physical Properties, Methods of experimental physics vol. 16 part C.
- [31] I. ADAMCZEWSKI; Les phénomènes d'ionisation et de conduction dans les diélectriques liquides, Masson & Cie, 1968.

- 
- [32] R.TOBAZEON ; Préclaquage et claquage des liquides diélectriques, Technique de l'ingénieur, D2450, 1997.
- [33] W.G.Chadband ; On variations in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicone fluids, J.phys, D.Appl phys, 13, 1980, pp 1299-1307.
- [34] F. Bitam ; Etude des mécanismes de préclaquage dans les diélectriques liquides sous tension alternative, Thèse de Magister, Département de l'Electrotechnique, Université de M. Mammeri, Tizi-Ouzou, Juillet 1996.
- [35] A.Etsouri, I.Birane ; Etude des caractéristiques de l'huile de transformateur sous l'influence de vieillissement thermique, Projet de fin d'étude, 2005.
- [36] A.Hamimi, A.Boubakeur, M.Lebid ; Influence de la température sur certaines propriétés de l'huile de transformateur utilisée par la SONELGAZ, Tizi Ouzou, mai 1997.
- [37] D.Khelil, S.Zoutat ; Etude des phénomènes de décharge électrique dans la BORAK 22 sous tension alternative, Projet de fin d'études, Département Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2006.
- [38] J.C.Devins, S.J.Rzad, R.J.Schwabe ; Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids, J.appl.phys, 52, 1981, pp 4531-4545.
- [39] F.Guerbas ; Etude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition en streamer , Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Mai 1994.
- [40] S. Bouazabia ; Etude des phénomènes de génération des streamers dans les diélectriques liquides, Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 2006.
- [41] A.Hamimi ; Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans une huile de transformateur sous champ alternatif divergent, Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1997.
- [42] E.O.Forster, P.P.Wong ; The dynamics of electrical breakdown in liquid hydrocarbons. V : Light emissions processes, conf. Rec off the 1980 IEEE intern symp on elec insul, Boston, 9-11 juin 1980, pp222-224.
- [43] O.Lezaint, R.Tobazeon; Streamer generation and propagation in transformer oil under AC divergent field conditions, IEEE, Nr 6,1988, pp 941-954.
- [44] P.Rain, C.Boisdon, O.Lesaint, R.Tobazeon; Behavior of streamers under divergent AC fields in transformer oil at large gaps, IEEE, EI 26,Nr 4, 1991, pp 715-725.
- [45] O.Lesaint, A.Saker, P.Gournay, R.Tobazeon, J.Aubin, M.Mailhot; Streamer propagation and breakdown under AC in very large oil gaps, IEEE, 1997.
- [46] P.Rain, O.Lesaint; Prebreakdown phenomena in mineral oil under step and AC voltage in large-gap divergent fields, IEEE, EI 4, 1994, pp 692-700.
- [47] D.Lindjell, L.Lundgaard, G.Berg; Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps, IEEE, Nr 3, 1994,pp 447-458



- 
- [48] G.Massala, A.Saker, O.Lesaint; Study of streamer propagation in mineral oil in overvolted gaps under impulse voltage, IEEE pub N°95 CH 35842, 1995, pp 592-595.
- [49] F.M.J.Mc Cluskey, O.Lesaint, A.Denat; Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids under positive impulse voltage, IEEE, Nr 3, 1994, pp 377-382.
- [50] Y.V.Torshin; On the existence of leader discharges in mineral oil, IEEE, Nr 1, 1995, pp 167-179.
- [51] R.E.Hebner; Measurement of electrical breakdown in liquids, 1987, pp 519-537, Plenum press, New York and London.
- [52] O.Lesaint; Propagation of positive discharges positives in long liquid gaps, IEEE, pub N° 96 CH 35981, 1996, pp 161-166.
- [53] B.L.Goodlet, F.S.Edwards, F.R.Perry; Dielectric phenomena at high voltages, J.IEE, 69, 1931, pp 695-738.
- [54] Y.Kamata, Y.Kako; Flashover characteristics of extremely long gaps in transformer oil lander non-uniform field conditions, IEEE, EI 15, Nr 1, 1980, pp 18-26.
- [55] N.G.Trinh, C.Vincent, J.Regis; Statistical dielectric degradation of large-volume oil-insulation, IEEE, 1982, pp 3712-3721
- [56] I.Oshima, S.Motegi, M.Honda, T.Yanari, Y.Ebizawa; HVDC breakdown of transformer oil and the effect of space charge on it, IEEE, Nr7, 1983, pp 2208-2215.
- [57] K.N.Mathes, T.O.Rouse; Influence of aromatic compounds in oil on Pirelli gassing and impulse surge breakdown, Ann Rep CEIDP NAS-NRS, pp 129-140.
- [58] C.Hosticka; Dependence of uniform/non-uniform field transformer oil breakdown on oil composition, EI 14, Nr 1, 1979, pp 43-50.
- [59] J.Perret; Study of the dielectric breakdown of insulating mineral oils under impulse voltages, IEEE, Nr 4, 1981, pp 339-345.
- [60] T.V.Comen, E.M.Petrie; Particle contamination levels in oil filled large power transformers, IEEE, Pas-102, 1983, pp 1459-1465.
- [61] K.Miners; Particles and moisture effect on dielectric strength of transformer oil using VDE electrodes, IEEE, RAS-101, 1982, pp 751-756.
- [62] General Electric; Study of determine the potential use of silicone fluids in transformers, 1978, USA.
- [63] K.H.Weber, H.S.Hondicott; Area effect and its extremal basis for he electric breakdown of transformer oil, AIEE, 1971, pp 371-381.
- [64] W.R.Wilson; A fundamental factor controlling the unit dielectrics strength of oil, AIEE, 1953, pp 68-74
- [65] Conductivity meters for liquids VZ220A Micafil, Manual