

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريش

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : Ghoul Adel

Maadadi Oussama

Sujet

Étude statistique des tensions de claquage dans les huiles végétales

Soutenu publiquement, le 30 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Slama Fateh	MCA	Univ-BBA	Président
Aouabed Fatiha	MCB	Univ-BBA	Examineur
Reffas Abderrahim	MCA	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la volonté et le courage d'achever ce modeste travail.

Nous exprimons notre sincère gratitude au Dr Reffas Abderrahim, notre professeur et mentor, pour sa supervision attentive, sa contribution précieuse et ses conseils avisés qui ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons également remercier tous les enseignants de l'Université Mohamed el Bachir el Ibrahimi pour leur enseignement.

Nos remerciements vont également à nos parents et à nos frères pour leur soutien inconditionnel tout au long de notre parcours éducatif.

Nous adressons nos remerciements chaleureux à tous nos camarades de classe pour leur soutien moral et matériel, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet.

MERCI

Résumé

Les propriétés physico-chimiques d'une huile isolante, comme la tension de claquage, jouent un rôle crucial dans la fiabilité et les performances des transformateurs de puissance. La tension de claquage d'une huile isolante mesure sa capacité à résister à une rupture diélectrique sous l'effet d'un champ électrique. Une huile présentant une haute tension de claquage est essentielle pour assurer une isolation efficace entre les composants haute tension du transformateur, réduisant ainsi les risques de courts-circuits et de pannes électriques. Une huile isolante bien choisie et entretenue permet de maintenir les performances diélectriques du transformateur sur une longue durée, même dans des conditions environnementales et de charge variables. Par conséquent, la compréhension et la gestion des propriétés physico-chimiques de l'huile isolante sont indispensables pour garantir une exploitation sûre et efficace des transformateurs de puissance dans les réseaux électriques modernes. Cette étude vise à réaliser une analyse statistique de la tension de claquage d'une huile végétale en la comparant à une huile minérale.

Mots clés : Transformateurs, tension de claquage, huiles végétales et minérales, Statistique.

Abstract

The physico-chemical properties of insulating oil, such as breakdown voltage, play a crucial role in the reliability and performance of power transformers. The breakdown voltage of an insulating oil measures its ability to resist dielectric breakdown under the effect of an electric field. An oil with a high breakdown voltage is essential to ensure effective insulation between the transformer's high-voltage components, thus reducing the risk of short-circuits and electrical failures. Properly selected and maintained insulating oil helps maintain the transformer's dielectric performance over the long term, even under varying environmental and load conditions. Consequently, understanding and managing the physico-chemical properties of insulating oil is essential to ensure the safe and efficient operation of power transformers in modern power grids. The aim of this study is to carry out a statistical analysis of the breakdown voltage of a vegetable oil, comparing it with a mineral oil.

Keywords: Transformers, breakdown voltage, mineral oils, vegetable oils, Statistics.

ملخص

تلعب الخصائص الفيزيائية والكيميائية للزيت العازل، مثل جهد الانهيار، دورًا حاسمًا في موثوقية وأداء محولات الطاقة. يقيس جهد انهيار الزيت العازل قدرته على مقاومة انهيار العازل تحت تأثير المجال الكهربائي. يعد الزيت ذو جهد الانهيار العالي ضروريًا لضمان العزل الفعال بين مكونات المحولات ذات الجهد العالي، وبالتالي تقليل مخاطر حدوث دوائر قصيرة وأعطال كهربائية. سيحافظ الزيت العازل الذي يتم اختياره وصيانته بشكل صحيح على الأداء العازل للمحول على مدى فترة طويلة من الزمن، حتى في ظل الظروف البيئية وظروف الحمل المتغيرة. لذلك، فإن فهم الخصائص الفيزيائية والكيميائية للزيت العازل وإدارتها أمر ضروري لضمان التشغيل الآمن والفعال لمحولات الطاقة في شبكات الكهرباء الحديثة. والهدف من هذه الدراسة هو إجراء تحليل إحصائي لجهد انهيار الزيت النباتي بالمقارنة مع الزيت المعدني.

الكلمات المفتاحية: المحولات، جهد الانهيار، الزيوت النباتية والمعدنية، الإحصاءات

Table des matières

Listes des symboles & abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre 1	3
1.1 Introduction	4
1.2 Les transformateurs	4
1.2.1 Définition et principe de fonctionnement.....	4
1.2.2 Caractéristiques principales d'un transformateur	5
1.2.3 Types de transformateurs	6
1.2.4 Utilisations des transformateurs :	8
1.3 Principaux types des isolants liquides	9
1.3.1 Les huiles minérales	9
1.3.2 Les huiles synthétiques.....	10
1.3.3 Les huiles végétales.....	11
1.4 Types d'huiles végétales utilisées dans les transformateurs	12
1.4.1 Huile de soja.....	12
1.4.2 Huile de colza.....	12
1.4.3 Huile de tournesol	13
1.4.4 Huile de ricin	13
1.4.5 Huile de jojoba	13
1.5 Propriétés, avantages et inconvénients des huiles isolantes	13
1.6 Propriétés des huiles végétales	14
1.6.1 Propriétés électriques	14
1.6.2 Propriétés thermiques	15
1.6.3 Propriétés environnementales	15

1.7	Les avantages et les inconvénients des huiles végétales	16
1.7.1	Les avantages	16
1.7.2	Les inconvénients	16
1.8	Conclusion	17
Chapitre 2		19
2.1	Introduction	20
2.2	Claquage	20
2.3	Mécanisme de claquage	20
2.3.1	Les principaux mécanismes de claquage des huiles	21
2.4	Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique	21
2.4.1	Humidité	21
2.4.2	L'huile contient une petite quantité de bulles	22
2.4.3	La teneur en carbone de l'huile	22
2.4.4	La température	22
2.4.5	Le champ électrique appliqué	22
2.4.6	Durée d'application de la tension	23
2.5	Conséquences du claquage des huiles	23
2.5.1	Dans les transformateurs électriques	23
2.6	Procédures de maintenance de la tension de claquage	24
2.7	Méthodes de mesure de la tension de claquage des huiles	25
2.7.1	Essai par électrodes plates	25
2.7.2	Essai à l'électrode à boule	25
2.8	Norme internationale CEI 156	26
2.8.1	Définition :	26
2.8.2	Domaine d'application	26
2.8.3	Références normatives	26
2.8.4	Appareillage électrique	27

2.8.5	Dispositif d'essai.....	27
2.8.6	Préparation des électrodes.....	29
2.8.7	Préparation du dispositif d'essai.....	29
2.8.8	Echantillonnage.....	29
2.8.9	Mode opératoire.....	30
2.8.10	Rapport.....	31
2.9	Conclusion.....	31
Chapitre 3.....		33
3.1	Introduction :.....	34
3.2	La distribution Normale.....	34
3.2.1	Equations de la distribution normale.....	35
3.2.2	Equation de répartition :.....	35
3.2.3	Domaine d'application.....	35
3.3	La distribution de Weibull.....	36
3.3.1	Domaine d'application.....	37
3.4	Technique Expérimentales.....	38
3.5	Histogramme de la tension de claquage :.....	40
3.5.1	Test d'hypothèse :.....	42
3.6	Analyse statistique de la tension de claquage par la distribution Normale et de Weibull.....	43
3.7	Conclusion.....	47

Listes des symboles & abréviations :

CEI : Commission électrotechnique internationale

ASTM : American Society for Testing and Materials (Société Américaine pour les Essais et les Matériaux)

MT : Moyenne Tension

BT : Basse Tension

HT : Haute tension

SF6 : L'hexafluorure de soufre

FR3 : Enviro temp TM FR3 TM de Cargill Industrial Specialties. une huile de transformateur à base d'huile végétale renouvelable

μ s : Micro second

ISO : l'Organisation Internationale de Normalisation

μ : la moyenne de la distribution

σ: l'écart type de la distribution

t: la variable mesurée, généralement le temps de panne ou la tension de claquage

F(t) : est la probabilité de défaillance à une tension ou un temps inférieur ou égal à t. Pour les tests avec de grands nombres d'échantillons, il s'agit approximativement de la proportion d'échantillons décomposés par le temps ou la tension, t.

α: est le paramètre d'échelle et est positif, et

β: est le paramètre de forme et est positif.

NY : Nynas est une société suédoise qui occupe une position de premier plan en Europe en matière d'huiles spéciales naphthéniques et de bitumes. La société propose une large gamme d'huiles pour transformateurs, d'huiles de base, d'huiles de process et de bitumes, destinés à une variété d'applications industrielles.

Liste des Figures :

Figure 1.1 : Schéma explicative sur le fonctionnement d'un transformateur.....	5
Figure 1.2 : Transformateur élévateur de tension.....	6
Figure 1.3 : Transformateurs abaisseur de tension du système d'alimentation AC.....	7
Figure 1.4 : Transformateur d'isolement triphasé.....	7
Figure 1.5 : Auto transformateur triphasé.....	8
Figure 1.6 : Analyse de l'huile de transformateur.....	11
Figure 1.7 : Point d'éclair et point de feu des huiles de transformateur.....	15
Figure 2.1 : Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur..	21
Figure 2.2 : Influence de la durée d'application sur la tension de claquage.....	22
Figure 2.3 : Exemple d'une cellule et d'électrodes sphériques appropriées.....	27
Figure 2.4 : Exemple d'une cellule et d'électrodes hémisphériques appropriées.....	27
Figure 3.1 : Cellule de test de 400 ml de type Baur Dieltest.....	38
Figure 3.2 : Distribution des tensions de claquage des huiles testées.....	39
Figure 3.3 : Histogramme des tensions de claquage des huiles étudiées.....	40
Figure 3.4 : Probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.....	43
Figure 3.5 : Probabilité de la distribution de Weibull la tension de claquage des huiles.....	44
Figure 3.6 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles.....	45
Figure 3.7 : Probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées.....	46

Liste des Tableaux :

Tableau 1.1 :Propriétés, avantages et inconvénients des huiles isolantes quelque type des transformateurs	14
Tableau 1.2 : Biodégradabilité des huiles de transformateur	16
Tableau 2.1 : des procédures de maintenance de la tension de claquage pour l'huile de transformateur.....	24
Tableau 3.1 : Les résultats de l'analyse statistique.....	41
Tableau 3.2 :Test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale.....	41
Tableau 3.3 :Test d'hypothèse de conformité à la distribution de Weibull.....	42

INTRODUCTION GENERALE

Les transformateurs électriques jouent un rôle crucial dans les réseaux électriques en ajustant la tension du secteur pour un fonctionnement efficace et sécurisé, nécessitant ainsi un système d'isolation performant. C'est ici que les huiles naturelles et minérales interviennent. Historiquement, les huiles minérales, dérivées du raffinage du pétrole, ont dominé ce domaine en offrant des propriétés diélectriques adéquates, une bonne capacité de refroidissement et une protection contre la corrosion. Cependant, elles posent des problèmes environnementaux en raison de leur inflammabilité, de leur toxicité et de leur biodégradabilité limitée. En réponse à ces défis, les huiles naturelles telles que les huiles végétales et les esters naturels sont devenues des alternatives prometteuses. Elles sont biodégradables, non toxiques et présentent un risque d'incendie moindre grâce à leurs points d'éclair plus élevés.

L'utilisation croissante des huiles naturelles dans les transformateurs électriques nécessite toutefois de surmonter plusieurs défis, notamment leur coût plus élevé par rapport aux huiles minérales et la nécessité d'évaluer leur stabilité à long terme de manière approfondie. Des recherches continuent d'être menées pour développer des huiles naturelles plus efficaces et économiques, impliquant l'exploration de nouvelles sources d'huiles, l'amélioration de leur composition chimique et le développement d'additifs adaptés. Ces efforts visent à faire des huiles naturelles une solution viable et largement adoptée pour l'isolation des transformateurs électriques, tout en répondant aux exigences environnementales et de sécurité.

Ce travail se concentre spécifiquement sur une étude statistique comparative de la tension de claquage entre une huile naturelle et une huile minérale naphthénique. Il est divisé en trois chapitres : le premier chapitre introduit les isolants liquides naturels et minéraux utilisés dans les transformateurs électriques, le deuxième chapitre explore le phénomène de la tension de claquage ainsi que les normes et méthodes de mesure associées, et enfin le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus, comparant les deux types d'huiles par distribution normale et de Weibull à l'aide du logiciel Origin 2024, concluant par une synthèse générale des conclusions tirées de cette étude.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

Les huiles végétales, issues d'ester d'acides gras d'origine végétale, sont couramment utilisées dans l'alimentation humaine mais trouvent également des applications dans les domaines industriel et cosmétique. Dans le domaine électrique, les huiles végétales jouent un rôle crucial en tant qu'isolant et fluide de refroidissement pour les transformateurs.

Les transformateurs, composants essentiels des systèmes électriques, permettent de modifier la tension et le courant d'un circuit. Les huiles végétales garantissent le bon fonctionnement des transformateurs en isolant les conducteurs électriques et en dissipant la chaleur.

1.2 Les transformateurs

1.2.1 Définition et principe de fonctionnement

1.2.1.1 Définition

Un transformateur est un dispositif électrique qui permet de transférer de l'énergie électrique d'un circuit à un autre par le biais d'un champ magnétique variable. Il est basé sur le principe de l'induction électromagnétique, découvert par Michael Faraday en 1831 [1].

1.2.1.2 Fonctionnement

- **Enroulements**

Le transformateur est constitué de deux bobines appelées enroulements, enroulées autour d'un circuit magnétique commun [1]. Ces enroulements ne sont pas reliés électriquement, mais ils sont couplés magnétiquement.

- **Champ magnétique**

Lorsqu'un courant alternatif est appliqué à l'enroulement primaire, il crée un champ magnétique variable dans le circuit magnétique [1]. Ce champ magnétique variable traverse l'enroulement secondaire et y induit une force électromotrice (f.e.m.).

- **Tension induite**

La valeur de cette f.e.m. dépend du rapport entre le nombre de tours de chaque enroulement. C'est ce qu'on appelle le rapport de transformation. Si le nombre de tours de l'enroulement secondaire est plus grand que celui de l'enroulement primaire, la tension induite

est plus élevée. Inversement, si le nombre de tours de l'enroulement secondaire est plus petit, la tension induite est plus faible [1].

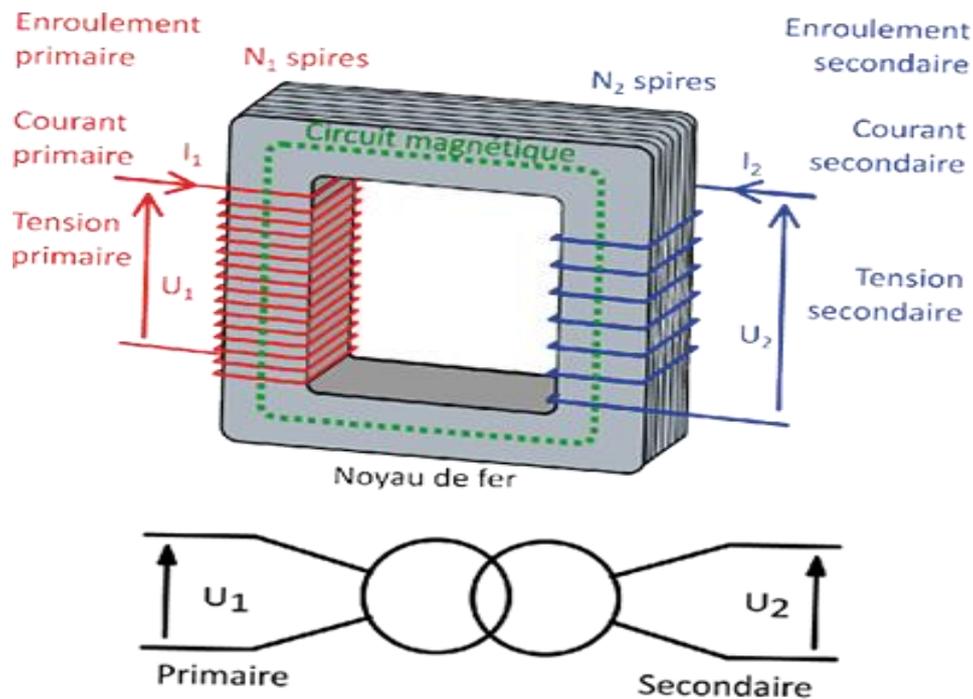


Figure 1.1 : Schéma explicatif sur le fonctionnement d'un transformateur

1.2.2 Caractéristiques principales d'un transformateur

Les principales caractéristiques d'un transformateur sont les suivantes :

1.2.2.1 Le rapport de transformation

Il est défini comme le rapport entre le nombre de tours de l'enroulement secondaire et le nombre de tours de l'enroulement primaire. Il détermine le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie [1].

1.2.2.2 La puissance nominale

Elle correspond à la puissance maximale que le transformateur peut supporter en fonctionnement continu [1].

1.2.2.3 La fréquence

Elle correspond à la fréquence du courant alternatif appliqué à l'enroulement primaire. Le transformateur ne fonctionne correctement qu'à la fréquence pour laquelle il a été conçu [1].

1.2.2.4 Le rendement

Il représente le rapport entre la puissance utile délivrée à la sortie du transformateur et la puissance absorbée à l'entrée [1].

1.2.3 Types de transformateurs

Il existe différents types de transformateurs, classés selon leur fonction principale :

1.2.3.1 Transformateurs éleveurs de tension

Ils permettent d'augmenter la tension du courant alternatif. Ils sont utilisés, par exemple, pour augmenter la tension du courant produit dans les centrales électriques avant de le distribuer sur de longues distances [1].



Figure1.2 : Transformateur éleveur de tension

1.2.3.2 Transformateurs abaisseurs de tension

Ils permettent de diminuer la tension du courant alternatif. Ils sont utilisés, par exemple, pour fournir la tension domestique (230 V en Europe) à partir de la tension haute tension du réseau électrique [1].



Figure1.3 : Transformateurs abaisseur de tension du système d'alimentation AC

1.2.3.3 Transformateurs d'isolement

Ils permettent d'une isolation galvanique entre deux circuits électriques. Cela signifie qu'il n'y a aucun contact électrique entre les deux circuits, ce qui permet d'éviter les courants de fuite et d'améliorer la sécurité [1].



Figure 1.4 : Transformateur d'isolement triphasé

1.2.3.4 Autotransformateurs

Ils ne comportent qu'un seul enroulement, avec des prises différentes. Ils permettent de modifier la tension sans isolation galvanique [1].

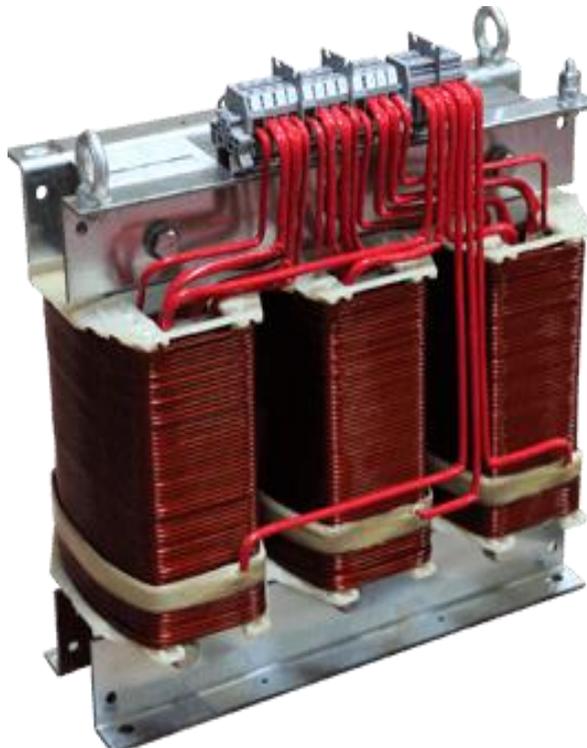


Figure 1.5 : Auto transformateur triphasé

1.2.4 Utilisations des transformateurs :

Les transformateurs sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment :

1.2.4.1 Transport d'électricité sur de longues distances

Augmentation de la tension à la sortie des centrales électriques et diminution de la tension pour la distribution aux habitations et aux entreprises [2].

1.2.4.2 Alimentation des appareils électroniques

Réduction de la tension du réseau électrique à un niveau adapté au fonctionnement des appareils électroniques [2].

1.2.4.3 Isolations des circuits électriques

Assurance de la sécurité des utilisateurs en isolant galvaniquement les circuits primaire et secondaire, et optimisation du transfert de puissance et minimisation des pertes en adaptant l'impédance d'un circuit à un autre [2].

1.2.4.4 Applications spécifiques

Fours à micro-ondes : alimentation du magnétron par des transformateurs à hautes tensions pour la production d'ondes micro-ondes, etc [2].

1.3 Principaux types des isolants liquides

De façon générale, il n'existe pas de liquides isolants pouvant remplir l'ensemble des propriétés requises pour une application donnée. Les caractéristiques électrique, chimique et physique d'un liquide diffèrent donc d'une application à une autre. Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois types : les huiles végétales, les huiles minérales et les liquides de synthèse. En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications. Dans ce qui suit, nous présentons les trois types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs [3].

1.3.1 Les huiles minérales

Les huiles minérales sont des huiles d'origine pétrolière, elles sont des mélanges complexes de centaines de composés organiques, composés principalement de carbone et d'hydrogène, avec des molécules ayant des structures différentes. Elles sont obtenues par raffinage de pétrole brut. Les propriétés physicochimiques d'une huile peuvent varier considérablement d'un lot à un autre, même chez le même fournisseur. La complexité de la

structure moléculaire et le nombre d'espèces chimiques rend difficile la détermination exacte de la composition chimique et la classification. Du fait, elles sont classées par la tendance de la structure dominante [3].

Les huiles minérales pour transformateur sont principalement composées de quatre familles d'hydrocarbures : les paraffines, les naphènes, les aromatiques et les alcènes. La paraffine a le défaut de geler rapidement et d'empêcher l'exploitation des transformateurs par grands froids. Si le taux de paraffine est en dessous de 50 %, on parle d'huile naphénique, s'il se trouve entre 50 et 56 % d'huile intermédiaire au-delà d'huile paraffinique [3].

Les aromatiques ont un effet sur le vieillissement de l'huile à double tranchant : à cause de l'effet qu'ils ont sur l'oxygène en présence de lumière ils dégradent l'huile, d'un autre côté leur production de phénols permet de détruire les radicaux libres sources de vieillissement. Ils stockent le dihydrogène émis par les décharges partielles. Ils sont donc peu présents dans les huiles utilisées dans les transformateurs très sujets au vieillissement, ils sont par contre laissés dans les condensateurs et les traversées isolées. Les alcènes accélèrent également la dégradation de l'huile et sont donc éliminés. Par ailleurs le soufre qui peut être présent dans l'huile doit être enlevé. Il est en effet fortement corrosif. Les furanes, à savoir le 2-Furfural, doivent également être absents. Pour limiter le vieillissement des additifs antioxydants sont ajoutés à l'huile, on parle alors d'huile inhibée, dans le cas contraire d'huile non inhibée. Ces additifs disparaissent avec le temps, il convient donc de les renouveler [3].

1.3.2 Les huiles synthétiques

Les huiles de synthèse sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population (transformateurs de distribution et de traction), améliorer la résistance aux décharges partielles, avoir une tendance négative au gazage (absorption de gaz). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés chimiques [4]. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs :

- Les hydrocarbures chlorés (halogénés) ;
- Les huiles silicones ;
- Les huiles esters de pentaérythritol encore appelées esters synthétiques ou esters organiques.

Les esters synthétiques, aussi appelés esters de pentaérythritol ou esters organiques, sont des alternatives aux huiles minérales qui peuvent passer les tests de biodégradabilité immédiate. Les esters de pentaérythritol sont les esters synthétiques les plus communément utilisés dans les transformateurs. Ils peuvent absorber beaucoup plus d'eau que les huiles minérales, sans que cela ait d'effet important sur leur rigidité diélectrique. Cette capacité à absorber l'eau peut permettre de préserver les papiers isolants des transformateurs et de ralentir leur vieillissement [4].

Les esters synthétiques ont une bonne rigidité diélectrique et un point de feu deux fois plus élevé que celui des huiles minérales. Ils sont également plus chers que les huiles minérales et n'ont été introduits qu'au début des années 80 [4].

1.3.3 Les huiles végétales

Les huiles végétales, aussi appelées esters naturels (par opposition aux esters synthétiques ou organiques), elles sont constituées essentiellement de triglycérides, qui sont synthétisés naturellement par l'estérification du glycérol (trialcool simple) avec trois acides gras [5,6].

Les esters naturels utilisés dans les transformateurs sont constitués de triglycérides obtenus à partir d'huile de soja, de colza ou de tournesol. Ils ont été utilisés depuis le début des années 90, particulièrement pour leur haute résistance au feu et leur biodégradabilité. Leurs caractéristiques techniques sont définies par des normes internationales CEI et ASTM [6].

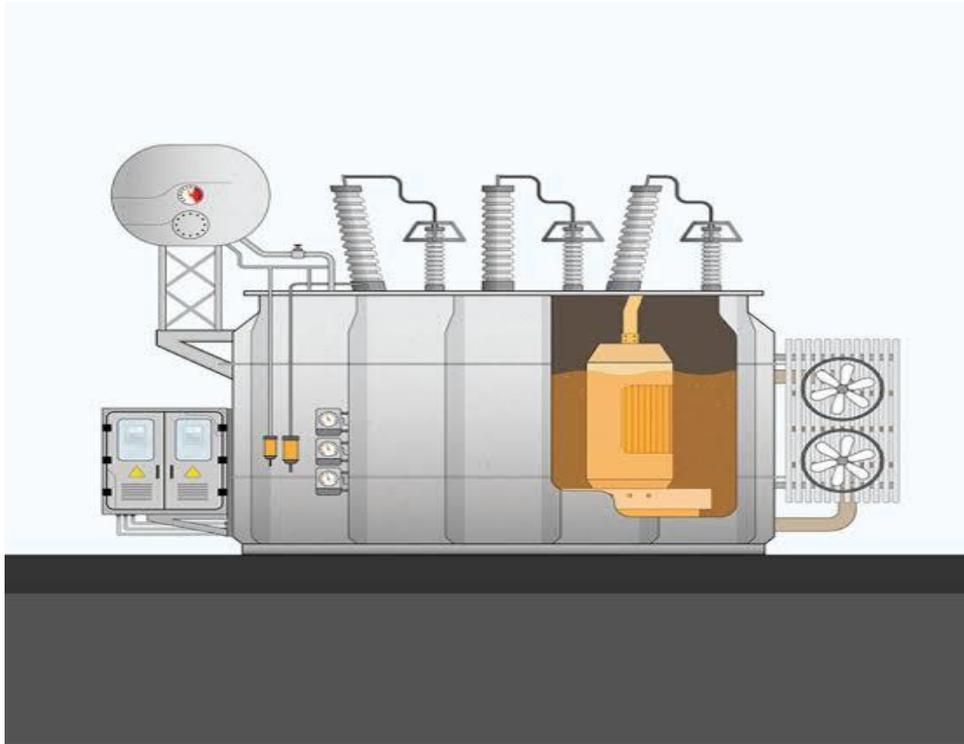


Figure1.6 : Analyse de l'huile de transformateur

1.4 Types d'huiles végétales utilisées dans les transformateurs

Les huiles végétales sont de plus en plus populaires comme fluides diélectriques dans les transformateurs en raison de leurs avantages environnementaux et de leurs performances améliorées. Voici quelques-uns des types d'huiles végétales les plus courants utilisés dans les transformateurs :

1.4.1 Huile de soja

L'huile de soja est l'huile végétale la plus couramment utilisée dans les transformateurs. Elle est peu coûteuse, biodégradable et présente de bonnes propriétés d'isolation électrique. Cependant, elle a un point d'éclair relativement bas, ce qui signifie qu'elle peut prendre feu plus facilement que d'autres huiles [7].

1.4.2 Huile de colza

L'huile de colza est une autre option populaire pour les transformateurs. Elle a un point d'éclair plus élevé que l'huile de soja et est également plus stable à l'oxydation. Cependant, elle est plus coûteuse que l'huile de soja [7].

1.4.3 Huile de tournesol

L'huile de tournesol est une bonne option pour les transformateurs qui fonctionnent dans des climats froids car elle a un point de congélation bas. Elle est également biodégradable et a de bonnes propriétés d'isolation électrique. Cependant, elle peut être plus sujette à la polymérisation que les autres huiles végétales, ce qui peut entraîner la formation de dépôts dans le transformateur [7].

1.4.4 Huile de ricin

L'huile de ricin a un point d'éclair très élevé et est très stable à l'oxydation. Elle est également biodégradable. Cependant, elle est très visqueuse, ce qui peut la rendre plus difficile à pomper et réduire l'efficacité du refroidissement du transformateur [7].

1.4.5 Huile de jojoba

L'huile de jojoba a un indice de viscosité très bas et un point d'éclair élevé. Elle est également très stable à l'oxydation et biodégradable. Cependant, elle est très coûteuse [7].

Le choix de l'huile végétale la plus appropriée pour un transformateur donné dépend de plusieurs facteurs, tels que le climat dans lequel le transformateur fonctionnera, la charge électrique à laquelle il sera soumis et le coût de l'huile [7].

1.5 Propriétés, avantages et inconvénients des huiles isolantes

Les huiles isolantes jouent un rôle crucial dans les transformateurs électriques en assurant l'isolation électrique et en dissipant la chaleur générée. Voici quelques avantages et inconvénients associés à leur utilisation :

Tableau 1.1 : Propriétés, avantages et inconvénients des huiles isolantes pour quelque type des transformateurs [8].

Types de transformateur	Liquide isolant	Propriétés clés	Avantages	Inconvénients
-------------------------	-----------------	-----------------	-----------	---------------

Transformateurs de distribution (MT/BT)	Huiles minérales	Bonnes propriétés isolantes, faible coût, longue durée de vie	Disponibilité large, bonne stabilité thermique	Risque d'incendie et d'explosion, impact environnemental
	Huiles synthétiques	Excellentes propriétés isolantes, biodégradables, ignifugées	Sécurité accrue, meilleur respect de l'environnement	Coût plus élevé, performance thermique légèrement inférieure aux huiles minérales
	Esters naturels	Propriétés isolantes biodégradables, bon comportement au feu	Haute sécurité, faible impact environnemental	Coût élevé, performance thermique moyenne
Transformateurs de puissance (HT)	Huiles minérales	Bonnes propriétés isolantes, faible coût, longue durée de vie	Disponibilité large, bonne stabilité thermique	Risque d'incendie et d'explosion, impact environnemental
	Huiles synthétiques	Excellentes propriétés isolantes, biodégradables, ignifugées	Sécurité accrue, meilleur respect de l'environnement	Coût plus élevé, performance thermique légèrement inférieure aux huiles minérales
	Gaz (SF6)	Excellentes propriétés isolantes, non inflammable, bonne capacité de refroidissement	Sécurité accrue, performance environnementale	Coût élevé, gaz à effet de serre, fuites potentielles
Transformateurs spéciaux (industriels, onduleurs)	Huiles synthétiques	Excellentes propriétés isolantes, biodégradables, ignifugées	Sécurité accrue, performance thermique élevée	Coût élevé
	Esters naturels	Propriétés isolantes biodégradables, bon comportement au feu	Haute sécurité, faible impact environnemental	Coût élevé, performance thermique moyenne
	Silicones	Excellentes propriétés isolantes, stabilité thermique élevée, non inflammables	Sécurité accrue, longue durée de vie	Coût élevé

1.6 Propriétés des huiles végétales

Les huiles végétales présentent des propriétés les rendant particulièrement adaptées à une utilisation dans les transformateurs :

1.6.1 Propriétés électriques

- **Rigidité diélectrique élevée**

Elles permettent de supporter des champs électriques intenses sans claquage, assurant ainsi une isolation efficace des enroulements [8].

- **Faible conductivité électrique**

Elles minimisent les courants de fuite et les pertes par décharge partielle, améliorant l'efficacité du transformateur [8].

- **Bonne biodégradabilité**

En cas de fuite, elles se dégradent naturellement dans l'environnement, réduisant ainsi l'impact environnemental [8].

1.6.2 Propriétés thermiques

- **Haute conductivité thermique**

Elles facilitent la dissipation de la chaleur produite par les enroulements et le noyau, maintenant une température de fonctionnement stable [8].

- **Point d'éclair élevé**

Elles résistent aux températures élevées sans s'enflammer, améliorant la sécurité du transformateur [8].

- **Basse viscosité à basse température**

Elles assurent une bonne circulation même dans les climats froids, garantissant un fonctionnement efficace [8].

1.6.3 Propriétés environnementales

- **Origine renouvelable**

Elles sont issues de ressources végétales durables, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles [8].

- **Faible toxicité**

Elles présentent un risque minimal pour la santé humaine et l'environnement en cas de fuite [8].

- **Biodégradabilité**

Elles se décomposent naturellement dans l'environnement, minimisant la pollution des sols et des eaux [8].

1.7 Les avantages et les inconvénients des huiles végétales

1.7.1 Les avantages

- Biodégradabilité ultime ;
- Point d'éclair élevé ;
- Humidité absolue de saturation ;
- La Permittivité relative des esters naturels proche à celle du carton ;
- Pas de boues lors de l'oxydation des huiles végétales.

Tableau 1.2 : Biodégradabilité des huiles de transformateur [8].

Huile	Biodégradabilité (%)
Huile végétale	60-95% (biodégradable en quelque semaines ou moins)
Huile minérale	<1% (non biodégradable, peut persister dans l'environnement pendant des siècles)
Huile silicone	0% (non biodégradable, peut s'accumuler dans l'environnement)

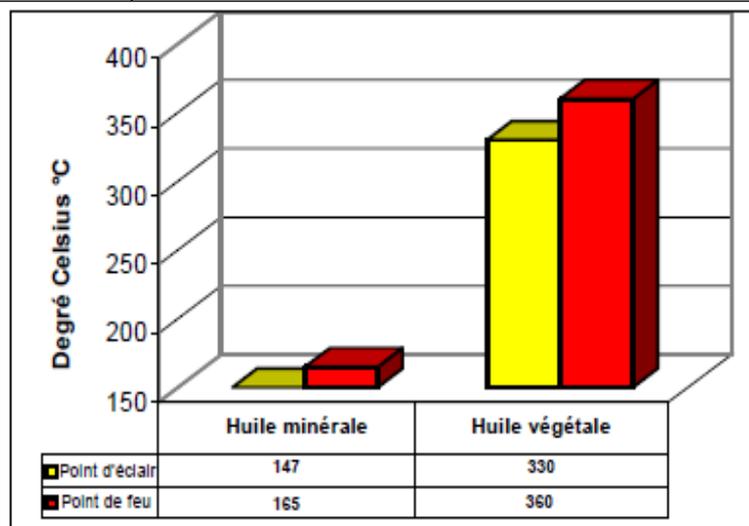


Figure1.7 : Point d'éclair et point de feu des huiles de transformateur [9]

1.7.2 Les inconvénients

Comparés aux huiles minérales, les huiles végétales pour transformateurs présentent plusieurs inconvénients :

- **Oxydation**

Les huiles végétales sont plus sensibles à l'oxydation que les huiles minérales, ce qui peut produire des acides gras et des boues.

Ces acides gras et boues peuvent endommager l'isolation du transformateur, obstruer les canaux de refroidissement et augmenter le risque de décharges partielles et de claquages [10].

- **Stabilité thermique inférieure**

Les huiles végétales ont une stabilité thermique inférieure à celle des huiles minérales, ce qui signifie qu'elles se dégradent plus rapidement à des températures élevées. Cela peut réduire la capacité du transformateur à gérer les pics de charge, nécessiter une maintenance plus fréquente et raccourcir la durée de vie du transformateur [11].

- **Propriétés diélectriques inférieures**

Les huiles végétales peuvent avoir des propriétés diélectriques inférieures à celles des huiles minérales, ce qui peut augmenter le risque de décharges partielles et de claquages dans le transformateur. Cela peut endommager l'isolation du transformateur, provoquer des courts-circuits et des pannes et réduire la durée de vie du transformateur [11].

- **Coût plus élevé**

Les huiles végétales sont généralement plus chères que les huiles minérales. Cela peut augmenter le coût d'achat du transformateur et augmenter les coûts d'exploitation et de maintenance [10.11].

- **Disponibilité limitée**

Les huiles végétales peuvent ne pas être aussi facilement disponibles que les huiles minérales dans certaines régions [11].

1.8 Conclusion

En conclusion, les huiles isolantes utilisées dans les transformateurs de puissance offrent des avantages significatifs tels qu'une excellente capacité d'isolation électrique, de bonnes propriétés de refroidissement et une compatibilité avec les composants électriques. Cependant, elles présentent également des inconvénients, notamment leur coût élevé, leur

impact environnemental potentiel, et les précautions nécessaires en matière de sécurité incendie et de maintenance.

Pour optimiser leur utilisation, il est crucial de mettre en œuvre des pratiques de maintenance rigoureuses et des mesures de gestion environnementale afin de prolonger leur durée de vie, de minimiser les risques associés et de maximiser la sécurité et la performance des transformateurs électriques.

Chapitre 2

Phénomène de claquage dans les huiles

2.1 Introduction

La connaissance de la tension de claquage des systèmes d'isolation est essentielle pour la conception des transformateurs électriques. Il a pris une grande importance car de nombreuses études approfondies ont été menées depuis plus de dix décennies. Cependant, la plupart des études sur le mécanisme de décharge et la prédiction de la tension de claquage de l'huile dans les transformateurs sont actuellement menées séparément car il n'existe pas de théorie physique unifiée sur la dégradation des liquides, peut-être en raison d'études insuffisantes sur la structure moléculaire des liquides, sans parler des facteurs secondaires affectant le mécanisme de claquage [12]. L'huile isolante utilisée dans les transformateurs électriques n'est toujours pas très pure et contient diverses impuretés, car elle est considérée comme l'un des facteurs affectant la tension de claquage de l'huile de transformateur en plus d'autres facteurs tels que l'humidité et la température.

Dans ce chapitre, nous visons une étude approfondie sur le claquage d'huile, son mécanisme, le facteur d'influence du claquage d'huile et les conséquences de claquage sur les transformateurs électriques et la recherche de solutions pour éviter le claquage et éviter les pertes.

2.2 Claquage

- **Définition**

Le claquage est un phénomène qui se produit lorsqu'un courant électrique traverse un isolant et c'est-à-dire lorsque la tension électrique dépasse la tension de claquage. Cela finit par faire de l'isolant un conducteur d'électricité. Lors de l'application de la tension électrique appropriée, ce phénomène peut être appliqué à différentes phases de la matière, qu'il s'agisse de corps solides, liquides ou gazeux, ainsi qu'au vide.

2.3 Mécanisme de claquage

Le claquage des huiles est un phénomène électrique qui survient dans les isolants liquides, comme les huiles minérales ou synthétiques utilisées dans les transformateurs électriques. Il se traduit par la formation d'un canal conducteur dans l'huile, permettant le passage d'un courant électrique et provoquant une défaillance de l'isolation.

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

2.3.1 Les principaux mécanismes de claquage des huiles

2.3.1.1 Claquage électronique

Ce type de claquage se produit lorsque le champ électrique appliqué à l'huile est suffisamment fort pour arracher des électrons aux molécules d'huile. Ces électrons libres accélèrent sous l'influence du champ électrique et peuvent heurter d'autres molécules, provoquant une ionisation en chaîne. L'augmentation rapide du nombre de charges libres entraîne une augmentation de la conductivité de l'huile, menant à sa rupture [13].

2.3.1.2 Claquage par cavitation

Ce type de claquage se produit lorsque des bulles de gaz se forment dans l'huile et s'agrandissent sous l'influence du champ électrique. Les bulles de gaz peuvent s'ioniser et créer des canaux conducteurs, menant au claquage. La formation de bulles de gaz est favorisée par la présence de gaz dissous dans l'huile, ainsi que par des variations de pression ou de température [14].

2.3.1.3 Claquage thermique

Ce type de claquage survient lorsque les pertes diélectriques dans l'huile génèrent une chaleur excessive. La chaleur peut dégrader l'huile et produire des gaz conducteurs, augmentant la conductivité électrique et provoquant le claquage. Les facteurs qui favorisent le claquage thermique incluent des champs électriques élevés, une mauvaise ventilation et la présence de contaminants [15].

2.4 Influence de différents paramètres sur la rigidité diélectrique

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

2.4.1 Humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier. Figure 2.1 ci-dessous illustre bien cet effet sur la rigidité diélectrique à 50Hz de l'huile de transformateur [16].

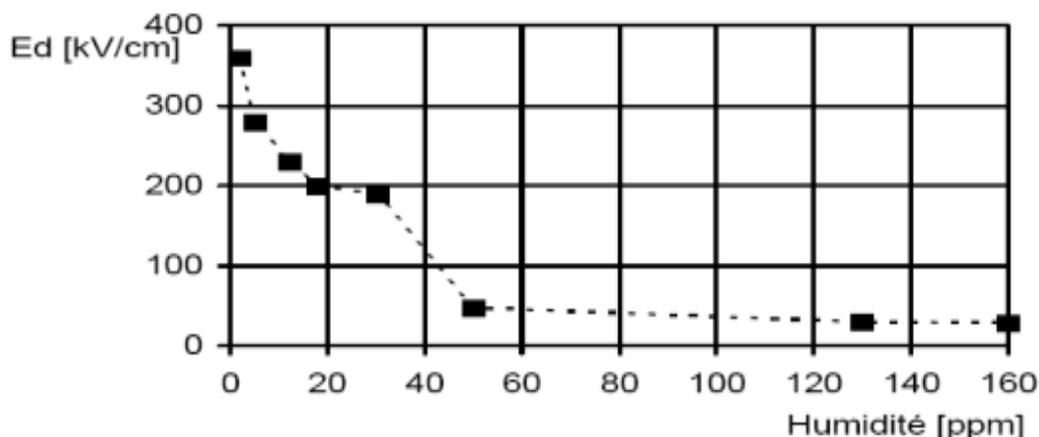


Figure 2.1 : Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur [16]

2.4.2 L'huile contient une petite quantité de bulles

Ce qui réduira également considérablement la tension de claquage. Parce qu'il y a des bulles dans l'huile, les bulles peuvent être libres à une tension inférieure, et sous l'action de la force du champ électrique, un "petit pont" conducteur se forme entre les électrodes, de sorte que l'huile est décomposée et la tension de claquage de l'huile est réduite [17,18].

2.4.3 La teneur en carbone de l'huile

Lorsque l'huile contient à la fois du carbone libre et de l'eau, la tension de claquage de l'huile diminue avec l'augmentation des particules de carbone [19].

2.4.4 La température

La rigidité diélectrique de la plupart des matériaux diélectriques diminue avec l'augmentation de la température. Ceci est dû à l'augmentation de l'agitation thermique des ions et des molécules du matériau, ce qui facilite leur ionisation et la formation de claquage électrique [20].

2.4.5 Le champ électrique appliqué

La rigidité diélectrique d'un matériau diélectrique diminue lorsque le champ électrique appliqué augmente. Ceci est parce que le champ électrique appliqué augmente l'énergie cinétique des ions et des molécules du matériau, ce qui les rend plus susceptibles de heurter et

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

d'ioniser d'autres ions et molécules, ce qui peut déclencher une avalanche de conduction et conduire au claquage [21].

2.4.6 Durée d'application de la tension

Si la durée d'application de tension diminue, la tension de claquage augmente. Figure 2.2 ci-dessous présente la caractéristique $U_c(t)$, tension de claquage en fonction du temps, de l'huile de transformateur.

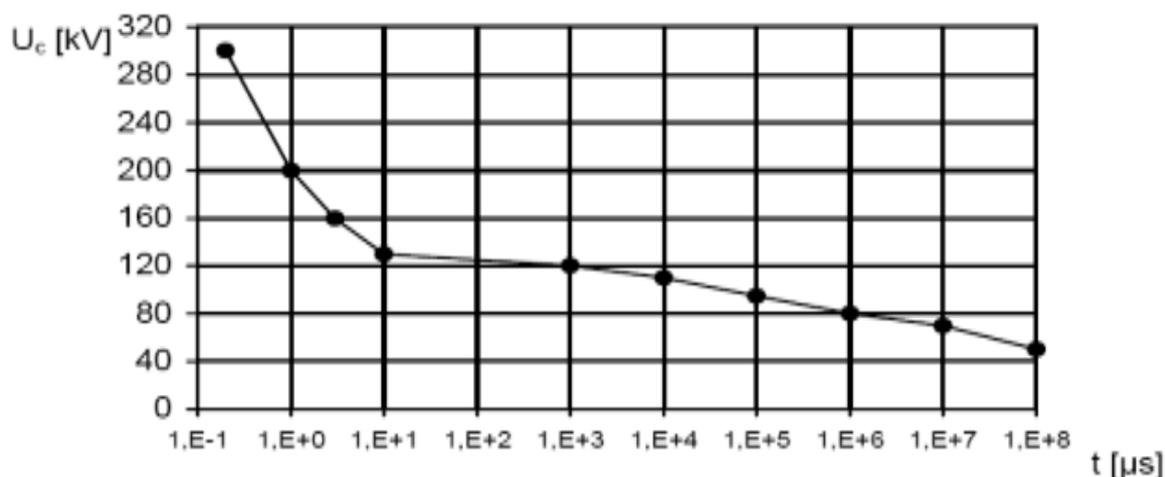


Figure 2.2 : Influence de la durée d'application sur la tension de claquage [16]

Plus la durée d'application augmente, plus l'effet des différentes impuretés ne 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 [16].

2.5 Conséquences du claquage des huiles

Le claquage des huiles, également connu sous le nom de décharge électrique dans l'huile, est un phénomène qui survient lorsque le champ électrique dans l'huile devient suffisamment fort pour ioniser les molécules d'huile et créer un canal conducteur. Cela peut entraîner une série de conséquences néfastes, notamment :

2.5.1 Dans les transformateurs électriques

- Défaillance du transformateur

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

Le claquage de l'huile peut provoquer des arcs électriques, endommageant gravement le transformateur et le rendant inutilisable [22].

- **Incendie et explosion**

Les arcs électriques générés par le claquage d'huile peuvent déclencher des incendies et des explosions, causant des dommages importants aux équipements et présentant un risque pour la sécurité des personnes [22].

- **Fuites d'huile**

Le claquage d'huile peut fragiliser le transformateur, provoquant des fuites d'huile contaminants pour l'environnement [22].

- **Interruptions de service**

La défaillance d'un transformateur due au claquage d'huile peut entraîner des interruptions de service, affectant les consommateurs d'électricité [22].

- **Dégradation de l'huile**

Le claquage d'huile altère sa composition chimique et réduit ses propriétés isolantes, la rendant impropre à une utilisation ultérieure [22].

- **Formation de dépôts**

Les produits de dégradation de l'huile suite au claquage peuvent se déposer sur les composants du transformateur, réduisant son efficacité et augmentant le risque de nouvelles défaillances [22].

- **Augmentation des coûts de maintenance**

Les dommages causés par le claquage d'huile entraînent des coûts de maintenance accrus pour réparer ou remplacer le transformateur affecté [22].

2.6 Procédures de maintenance de la tension de claquage

Les procédures de maintenance de la tension de claquage dans les transformateurs électriques comprennent sont résumés dans le tableau 2.1. Ces procédures sont cruciales pour assurer le bon fonctionnement et la longévité des transformateurs électriques en minimisant les risques de défaillance due à un claquage diélectrique.

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

Tableau 2.1 : des procédures de maintenance de la tension de claquage pour l'huile de transformateur [23.24]

Procédure	Objectif	Fréquence	Description
Analyses d'huile	Surveiller l'état de l'huile et détecter les signes de dégradation	Tous les 3 à 6 mois	Mesurer la tension de claquage, la viscosité, l'acidité, la teneur en eau et la teneur en gaz dissous.
Filtration de l'huile	Éliminer les contaminants de l'huile	Selon les résultats des analyses d'huile	Utiliser des filtres à papier ou des filtres à terre pour éliminer les particules solides, l'eau et les gaz dissous.
Traitement de l'huile	Améliorer les propriétés de l'huile et neutraliser les contaminants	Si nécessaire	Utiliser des agents désacidifiant, des agents dégazifiants et des additifs antioxydants.
Échange d'huile	Remplacer l'huile par une huile neuve	Tous les 10 à 15 ans	Effectuer une vidange et un rinçage complets du transformateur pour éliminer l'ancienne huile.
Maintenance des transformateurs	Maintenir les transformateurs en bon état de fonctionnement	Régulièrement	Inspecter les joints, les enroulements et les systèmes de refroidissement ; nettoyer les surfaces; effectuer les réparations nécessaires.

2.7 Méthodes de mesure de la tension de claquage des huiles

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la tension de claquage des huiles, mais les deux plus courantes sont :

2.7.1 Essai par électrodes plates

- Cette méthode est décrite dans la norme ASTM D1816 [25].
- Deux électrodes plates circulaires en acier inoxydable sont immergées dans une éprouvette d'huile [25].
- La tension entre les électrodes est augmentée graduellement jusqu'à ce qu'il y ait une rupture diélectrique, c'est-à-dire une décharge électrique soudaine à travers l'huile [25].
- La tension de claquage est enregistrée comme étant la tension à laquelle s'est produite la décharge [25].

2.7.2 Essai à l'électrode à boule

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

- Cette méthode est décrite dans la norme ASTM D6118 [26].
- Une électrode sphérique en acier inoxydable est immergée dans une éprouvette d'huile [26].
- La tension entre l'électrode et la terre est augmentée graduellement jusqu'à ce qu'il y ait une rupture diélectrique [26].
- La tension de claquage est enregistrée comme étant la tension à laquelle s'est produite la décharge [26].

2.8 Norme internationale CEI 156

2.8.1 Définition :

La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations [27].

2.8.2 Domaine d'application

La présente Norme internationale décrit la méthode de détermination de la tension de claquage diélectrique des isolants liquides à fréquence industrielle. Le liquide en essai, contenu dans un appareil spécifié, est soumis à un champ électrique alternatif croissant, obtenu par augmentation de la tension, à vitesse constante, jusqu'à l'obtention du claquage [27].

2.8.3 Références normatives

- **CEI 52 :**

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

1960, Recommandations pour la mesure des tensions au moyen d'éclateurs à sphères (une sphère à la terre) [27].

- **CEI60 :**
Techniques des essais à haute tension [27].
- **CEI475:**
1974, Méthode d'échantillonnage des diélectriques liquides [27].

2.8.4 Appareillage électrique

L'appareillage électrique se compose des éléments suivants:

- Régulateur de tension
- Transformateur élévateur
- Disjoncteur
- Système de limitation d'énergie

Deux ou plusieurs de ces éléments peuvent être intégrés dans un système d'équipement [27].

2.8.5 Dispositif d'essai

2.8.5.1 Cellule d'essai

Le volume de la cellule doit être compris entre 350 ml et 600 ml.

La cellule doit être réalisée dans un matériau isolant électrique, transparent, chimiquement inerte et résistant à l'isolant liquide ainsi qu'aux produits de nettoyage qui peuvent être utilisés [27].

La cellule doit être équipée d'un couvercle et construite de manière à permettre facilement le démontage des électrodes, afin de les nettoyer et de les maintenir en état [27].

Les figures 2.3 et 2.4 présentent des exemples de cellules appropriées.

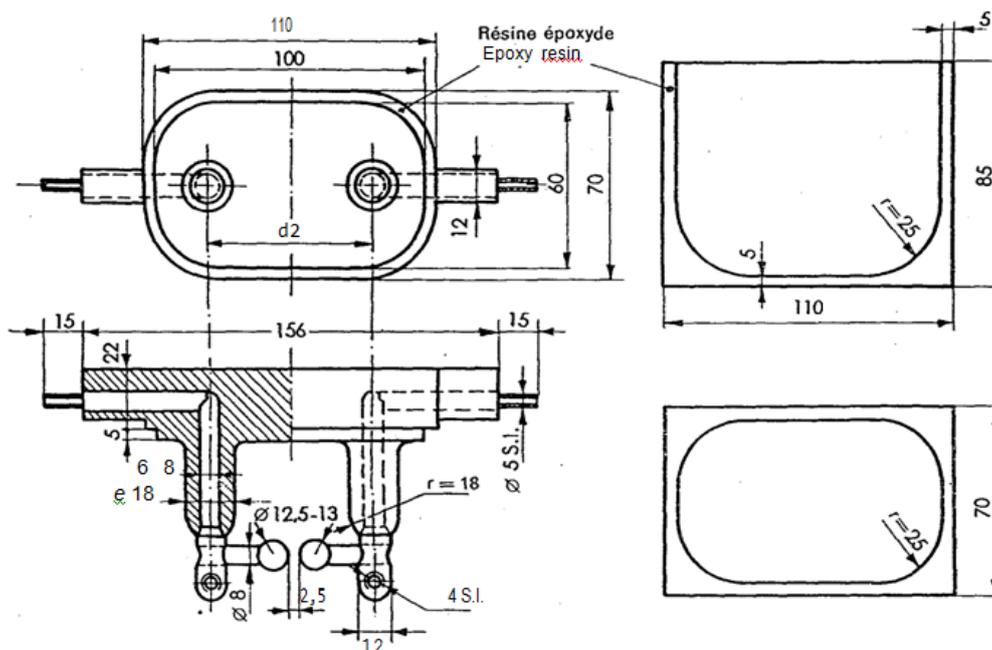


Figure 2.3 : Exemple d'une cellule et d'électrodes sphériques appropriées [27].

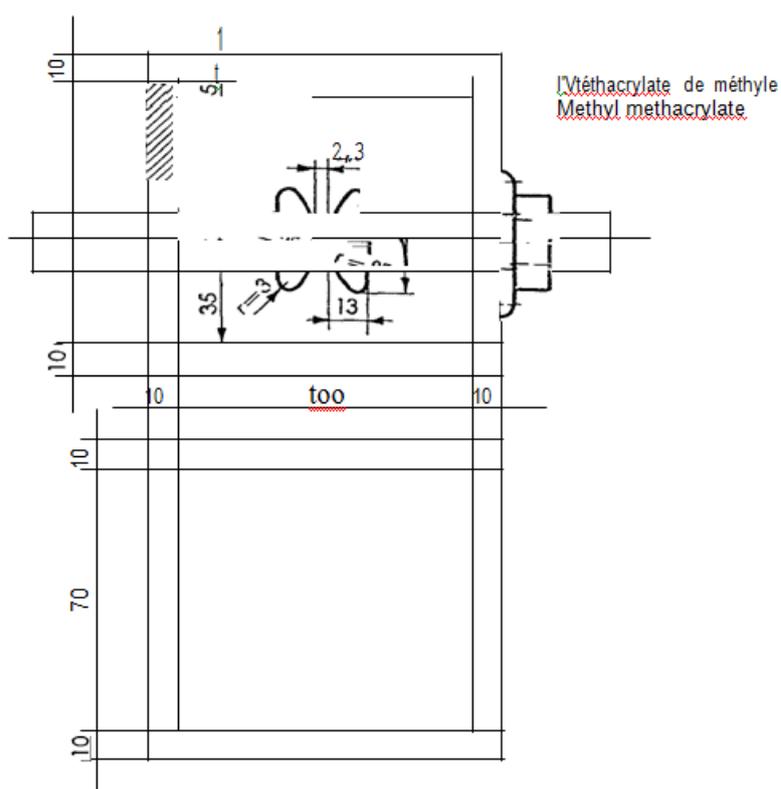


Figure 2.4. Exemple d'une cellule et d'électrodes hémisphériques appropriées [27].

2.8.5.2 Electrodes

Les électrodes doivent être soit en laiton, en bronze ou en acier inoxydable austénitique. Elles doivent être polies et de forme sphérique (diamètre 12,5 mm à 13,0 mm) comme le montre la figure 1, ou hémisphérique aux dimensions données dans la

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

figure 2. L'axe du système d'électrodes doit être horizontal et placé dans la cellule à 40 mm au moins en dessous de la surface du liquide en essai. Aucune partie de l'électrode ne doit être située à moins de 12 mm des parois de la cellule ou de l'agitateur. L'écartement entre les électrodes doit être de $2,50 \text{ mm} + 0,05 \text{ mm}$ [27].

2.8.6 Préparation des électrodes

Les électrodes neuves, les électrodes piquées ou les électrodes qui pendant une longue période n'auraient pas été stockées convenablement doivent être nettoyées de la manière suivante:

- Nettoyer toutes les surfaces avec un solvant volatil convenable qu'on laissera évaporer suffisamment;
- Polir avec de la poudre abrasive fine (par exemple du rouge à polir), ou avec de la toile ou du papier abrasif (par exemple toile à polir ultra -fine);
- Nettoyer, après polissage, à l'éther de pétrole (qualité pure pour analyse, plage d'ébullition $60^{\circ}\text{C} - 80^{\circ}\text{C}$) puis à l'acétone (qualité pure pour analyse),
- Monter les électrodes dans la cellule que l'on remplira de liquide isolant neuf et propre, de même type que celui qui sera ultérieurement essayé, et augmenter la tension jusqu'au claquage, 24 fois [27].

2.8.7 Préparation du dispositif d'essai

Il est recommandé de réserver une cellule d'essai distincte pour chaque type d'isolant liquide [27].

Ces cellules d'essai doivent être stockées dans un endroit sec avec leur couvercle et remplies de liquide isolant séché, correspondant au type pour lesquelles elles sont normalement destinées [27].

2.8.8 Echantillonnage

2.8.8.1 Récipient d'échantillonnage

Il convient que le volume de l'échantillon soit approximativement trois fois plus important que celui de la cellule d'essai [27].

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

Les récipients d'échantillonnage appropriés doivent être conformes à la CEI 475. Le récipient à employer de préférence est une bouteille en verre brun. Des bouteilles en verre transparent peuvent être utilisées mais elles doivent être conservées à l'abri de la lumière jusqu'au moment de l'essai. Il est possible d'employer des récipients en plastique inattaquables par le liquide à essayer, à condition de ne pas les réutiliser. Pour la fermeture des bouteilles, utiliser de préférence des bouchons à vis équipés de joints d'étanchéité en polyoléfine ou en polytétrafluoréthylène [27].

Les récipients et bouchons doivent être lavés avec un solvant approprié pour éliminer toutes les traces d'échantillons antérieurs. Ils doivent ensuite être rincés avec de l'acétone dont les traces seront éliminées par un jet d'air chaud [27].

Après nettoyage, les récipients seront immédiatement bouchés et conservés fermés jusqu'à l'utilisation [27].

2.8.8.2 Technique d'échantillonnage

L'échantillonnage des isolants liquides usagés ou neufs doit être effectué conformément aux modes opératoires décrits dans la CEI 475 [27].

Lors de l'échantillonnage, il convient de remplir les récipients à peu près complètement, en laissant un espace libre d'environ 3 % du volume du récipient [27].

La tension de claquage est très sensible à la moindre contamination de l'échantillon par l'eau et les particules. Une attention particulière est donc faite ici sur les précautions nécessaires pour éviter toute contamination, et sur la nécessité de disposer d'un personnel entraîné sous surveillance expérimentée [27].

2.8.9 Mode opératoire

2.8.9.1 Remplissage de la cellule

Immédiatement avant de commencer l'essai, vider la cellule d'essai et rincer les parois, les électrodes et autres parties internes de la cellule avec l'échantillon à essayer. Vider la cellule et la remplir lentement avec l'échantillon en évitant de former des bulles d'air [27].

Mesurer et noter la température du liquide [27].

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

Placer la cellule dans le dispositif d'essai et mettre en route l'agitateur, s'il y en a un [27].

2.8.9.2 Application de la tension :

La première application de la tension est effectuée environ 5 min après avoir achevé le remplissage en vérifiant qu'il n'y a pas de bulles d'air visibles entre les électrodes [27].

Augmenter régulièrement la tension appliquée aux électrodes, de zéro jusqu'au claquage, à la vitesse de $2,0 \text{ kV s}^{-1} + 0,2 \text{ kV s}^{-1}$. La tension de claquage est la tension maximale atteinte à l'ouverture du circuit, soit automatiquement (arc franc) ou manuellement (décharge audible ou visible détectée) [27].

2.8.9.3 Noter la valeur

Réaliser six claquages sur le même remplissage en respectant une pause d'au moins 2 min après chaque claquage et avant remise sous tension. Vérifier qu'il n'y a pas de bulles de gaz entre les électrodes. S'il y a un agitateur, le laisser fonctionner pendant tout l'essai [27].

Calculer, en kilovolts, la valeur moyenne des six tensions de claquage [27].

2.8.10 Rapport

Noter le résultat de l'essai comme étant la valeur moyenne, en kilovolts, des six tensions de claquage [27].

Le rapport doit également stipuler l'identification de l'échantillon, les valeurs individuelles des tensions de claquage, le type d'électrodes employées, la fréquence de la tension d'essai, la température du liquide et l'usage d'un agitateur, si c'est le cas [27].

2.9 Conclusion

En conclusion, le phénomène de claquage dans les huiles utilisées dans les transformateurs électriques est une préoccupation majeure en matière de sécurité et de fiabilité des systèmes électriques. La mesure précise de la tension de claquage selon les normes établies est cruciale pour évaluer et maintenir l'intégrité de l'isolation diélectrique. Connaître et respecter ces normes permet non seulement de détecter les variations précoces de

Chapitre 2 : Phénomène de claquage dans les huiles

la tension de claquage, indicatrices de problèmes potentiels comme la présence d'impuretés ou l'humidité, mais aussi de garantir une performance optimale des huiles isolantes. En assurant une gestion proactive de la maintenance basée sur ces mesures, les exploitants de transformateurs peuvent minimiser les risques de défaillance électrique et prolonger la durée de vie des équipements. Ainsi, la conformité aux normes de mesure de la tension de claquage joue un rôle essentiel dans la préservation de la sécurité des installations électriques et dans la réduction des coûts associés à la maintenance et aux réparations imprévues.

Chapitre 3

Etude statistique de la tension de claquage

3.1 Introduction :

La tension de claquage est un phénomène aléatoire. Il est nécessaire d'analyser la reproductibilité des mesures expérimentales sur un nombre suffisant de tests. Ainsi, en utilisant des techniques statistiques, on peut déterminer la valeur moyenne ou la tension minimale à partir de la dispersion des données de la tension de claquage. Lors de l'évaluation de la compatibilité des huiles à base d'esters naturels avec les conceptions des transformateurs existantes, il est essentiel non seulement de comparer les tensions de claquage moyennes des huiles, mais aussi de tenir compte du rôle de la dispersion ; il est souhaitable d'utiliser un liquide ayant une dispersion minimale dans sa tension de claquage. Dans ce chapitre, nous étudierons statiquement la tension de claquage dans les huiles végétales utilisant la distribution Normale et de Weibull et on discute de leurs applicabilités pour estimer la tension de claquage et la similarité des distributions dans les huiles utilisées [4].

L'utilisation des distributions Normales et de Weibull pour étudier les tensions de claquage présente plusieurs avantages :

- Elles permettent de modéliser la distribution des tensions de claquage d'une manière précise et fiable.
- Elles permettent d'estimer la probabilité qu'un matériau isolant tombe en panne à une tension donnée.
- Elles permettent de comparer les performances de différents matériaux isolants.

Pour ce travail le logiciel Origin 2024 a été utilisé pour le calcul statistique. Alors, nous présentons les différents éléments et les dispositifs expérimentaux utilisés dans nos essais ainsi que les caractéristiques des échantillons isolants liquides considérés. Puis, nous décrivons les résultats d'analyse statistique de la tension de claquage en tension alternative en utilisant les lois de distribution Normale et de Weibull.

3.2 La distribution Normale

La distribution normale, également connue sous le nom de distribution gaussienne, est une distribution de probabilité continue qui décrit la distribution de nombreuses variables aléatoires dans le monde réel. Elle est caractérisée par sa moyenne (μ) et son écart type (σ) [28].

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

3.2.1 Equations de la distribution normale

La densité de probabilité de la distribution normale est donnée par l'équation (1) :

$$f(x) = \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\right) * e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

Où:

- $f(x)$: est la densité de probabilité à la valeur x
- μ : est la moyenne de la distribution
- σ : est l'écart type de la distribution

3.2.2 Equation de répartition :

La fonction de répartition de la distribution normale, notée $F(x)$, représente la probabilité qu'une variable aléatoire X suive une loi normale soit inférieure ou égale à une valeur x . Elle s'exprime par l'équation (2) :

$$F(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) * \int_{-\infty}^x e^{-(t-\mu)^2/(2\sigma^2)} dt \quad (2)$$

Où:

- $F(x)$: est la fonction de répartition à la valeur x
- μ : est la moyenne de la distribution
- σ : est l'écart type de la distribution

3.2.3 Domaine d'application

Pour illustrer le concept, prenons un exemple. Supposons que nous analysons les rendements d'une action particulière sur une période donnée. En modélisant les rendements à l'aide d'une distribution normale, nous pouvons estimer la probabilité d'atteindre certains rendements et évaluer le risque encouru.

Comprendre la distribution de probabilité, en particulier la distribution normale, est essentiel pour modéliser la distribution de probabilité de l'estimation des investissements. Il fournit des informations précieuses sur l'éventail des résultats possibles, leurs probabilités, et aide à prendre des décisions éclairées basées sur une analyse statistique [29].

Voici quelques exemples de domaines d'application de la distribution normale :

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

- Mesure de la taille et du poids: La taille et le poids des humains, des animaux et des objets fabriqués sont souvent approximativement distribués normalement.
- Notes et examens: Les notes obtenues aux examens et aux tests standardisés suivent souvent une distribution normale.
- Erreurs de mesure: Les erreurs de mesure, telles que les erreurs d'expérimentation scientifique ou les erreurs d'instrumentation, sont souvent distribuées normalement.
- Phénomènes financiers: Les rendements des actions, les prix des produits de base et d'autres variables financières peuvent être modélisés à l'aide d'une distribution normale [29].

3.3 La distribution de Weibull

L'expression de la fonction de densité cumulée pour la distribution de Weibull à deux paramètres est présentée dans équation (3) :

$$F(t; \alpha, \beta) = 1 - e^{\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\}} \quad (3)$$

Où :

t : est la variable mesurée, généralement le temps de panne ou la tension de claquage,

$F(t)$: est la probabilité de défaillance à une tension ou un temps inférieur ou égal à t . Pour les tests avec de grands nombres d'échantillons, il s'agit approximativement de la proportion d'échantillons décomposés par le temps ou la tension, t .

α : est le paramètre d'échelle et est positif, et

β : est le paramètre de forme et est positif.

La probabilité d'échec $F(t)$ est nulle à $t = 0$. La probabilité de défaillance augmente continuellement à mesure que t augmente. Comme le temps ou la tension augmente, la probabilité de défaillance se rapproche de la certitude, c'est-à-dire $F(\infty) = 1$.

Le paramètre d'échelle α représente le temps (ou la tension) pour lequel la probabilité de défaillance est de 0,632 (soit $1 - 1/e$ où e est la constante exponentielle). C'est analogue à la moyenne de la distribution normale (e.g. Cochran et Snedecor [30]). Les unités de α sont les

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

mêmes que t , c'est-à-dire la tension, la contrainte électrique, le temps, le nombre de cycles jusqu'à l'échec, etc.

Le paramètre de forme β est une mesure de la plage des temps de défaillance ou des tensions. Le plus grand β c'est-à-dire que plus petit est la plage de tensions ou de temps de claquage. C'est analogue à l'inverse de l'écart type du Distribution normale, Cochran et Snedecor [30].

La distribution de Weibull à deux paramètres de l'équation (1) est un cas particulier de la distribution de Weibull à trois paramètres qui a la fonction de distribution cumulative indiquée dans l'équation (4).

$$F(t) = 1 - e^{\left\{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right\}}; t \geq \gamma \quad (4)$$
$$0; t < \gamma$$

Le terme supplémentaire γ est appelé le paramètre de localisation. $F(t) = 0$ pour $T = \gamma$, c'est la probabilité d'échec pour $t < \gamma$ est zéro.

3.3.1 Domaine d'application

- **Ingénierie de fiabilité** : L'une des principales applications de la distribution de Weibull est en ingénierie de fiabilité. La distribution est utilisée pour modéliser le taux de défaillance d'un système ou d'un produit au fil du temps, et il joue un rôle crucial dans la détermination de la fiabilité d'un système ou d'un produit. La distribution de Weibull est couramment utilisée pour analyser et prédire la défaillance des composants électroniques, des systèmes mécaniques et des dispositifs médicaux [43].
- **Science des matériaux**: La distribution de Weibull est utilisée dans la science des matériaux pour modéliser la distribution des forces des matériaux. La distribution est utilisée pour déterminer la probabilité de défaillance d'un matériau en fonction de sa résistance, et elle est couramment utilisée dans la conception de matériaux pour différentes applications. Par exemple, la résistance d'un métal peut être modélisée à l'aide de la distribution de Weibull, et la distribution peut être utilisée pour déterminer la probabilité de rupture du métal sous différentes charges [43].

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

- **Test de vie:** La distribution de Weibull est utilisée dans les tests de vie pour déterminer la fiabilité d'un système ou d'un produit. Les tests de vie consistent à soumettre un système ou un produit à différentes conditions et à mesurer son taux de défaillance au fil du temps. La distribution de Weibull est utilisée pour modéliser le taux de défaillance du système ou du produit, et il est utilisé pour déterminer la fiabilité du système ou du produit dans différentes conditions [29].
- **Gestion des risques:** La distribution de Weibull est utilisée dans la gestion des risques pour déterminer la probabilité de défaillance d'un système ou d'un produit. La distribution est utilisée pour modéliser la distribution du temps de défaillance, et elle est utilisée pour déterminer la probabilité que le système ou le produit échoue dans différentes conditions. Par exemple, la distribution de Weibull peut être utilisée pour déterminer la probabilité de décomposition d'une voiture après un certain nombre de miles [29].

Voici quelques exemples de domaines d'application de la distribution de Weibull :

- **Fiabilité:** La distribution de Weibull est couramment utilisée pour modéliser la durée de vie des composants électroniques, des systèmes mécaniques et d'autres produits [29].
- **Analyse de survie:** La distribution de Weibull peut être utilisée pour modéliser le temps de survie des patients atteints d'une maladie ou d'autres événements de survie [29].
- **Phénomènes naturels:** La distribution de Weibull peut être utilisée pour modéliser la force du vent, la magnitude des tremblements de terre et d'autres phénomènes naturels [29].

3.4 Technique Expérimentales

Les tensions de claquage des liquides étudiés ont été mesurées dans une cellule de test de 400 ml de type Baur Dieltest dans des conditions similaires à celles de la norme CEI 60156. Les électrodes sont constituées de deux sphères en laiton ayant un diamètre de 12,5 mm, séparés par une distance de 2.50 ± 0.05 mm. Avant le test, la cellule de test et les électrodes ont été nettoyées avec de l'alcool, puis lavées avec de l'eau chaude à une température entre 70 et 80 ° C. La cellule d'essai et les électrodes ont ensuite été séchées dans un four à 50 ° C pendant 3 h pour éliminer l'eau avant l'essai suivant. Les échantillons d'huile

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

ont été versés lentement dans une cellule d'essai et laissés reposer à température ambiante afin de permettre aux bulles de gaz et autres produits de décomposition de se dissoudre dans le volume du liquide. Le temps de repos est de 15 minutes pour l'huile minérale et de 30 minutes pour les huiles végétales. La différence dans le temps de repos est due à la différence de la viscosité qui est plus élevée dans les huiles végétales par rapport à l'huile minérale [4].

On utilise une alimentation alternative à haute tension. En raison de la nature statistique de la tension de claquage, il est nécessaire d'obtenir suffisamment de valeurs mesurées pour analyser la reproductibilité des mesures expérimentales. Pour chaque essai, la même huile a été utilisée lors d'une série de claquage. Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante [4].

La tension alternative est fournie par un transformateur de type Hipotronics 200 kV – 50 Hz – 60 kVA avec diviseur de mesure associé. Une rampe de tension alternative 2 ± 0.2 kV/s est appliquée sans interruption, de zéro jusqu'au claquage. Afin d'obtenir suffisamment de points pour l'étude statistique, nous effectuons des séries de 41 mesures, la tension de claquage est exprimée en valeur maximale (crête). Le temps d'attente entre deux claquages est de 5 minutes pour l'huile minérale et de 10 minutes pour les huiles végétales [4].

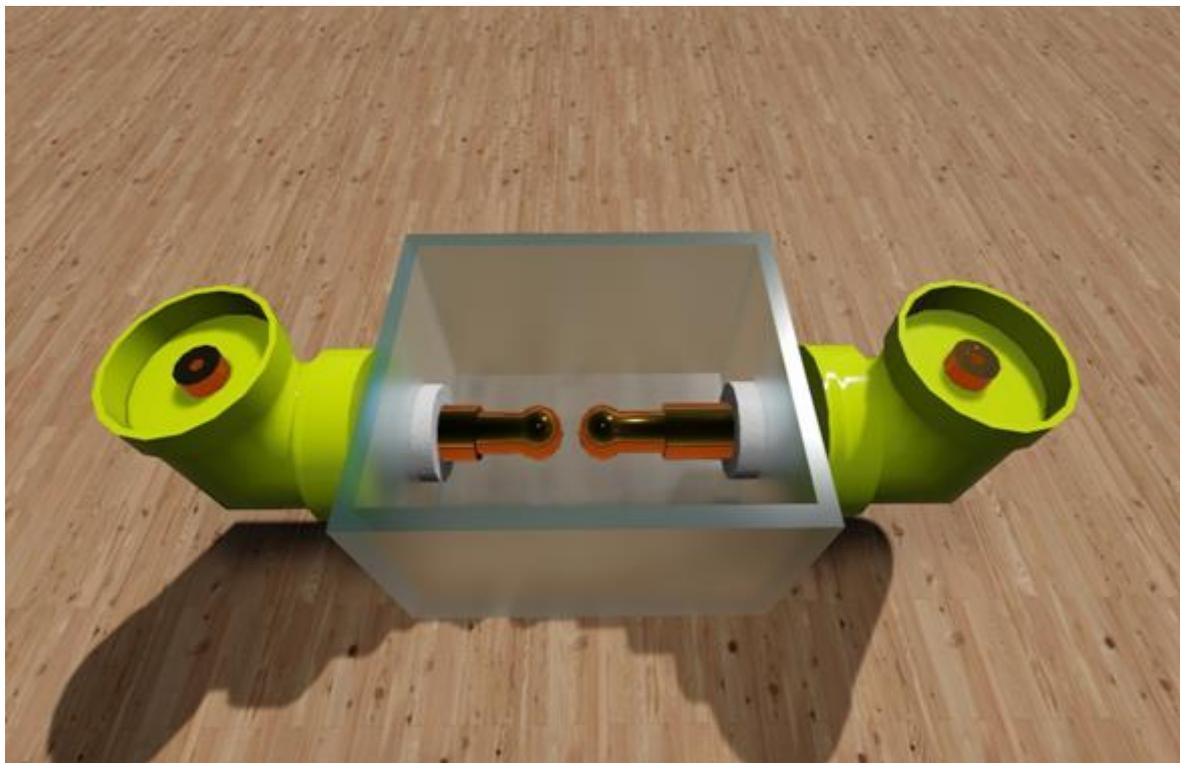


Figure 3.1 : Cellule de test de 400 ml de type Baur Dieltest

3.5 Histogramme de la tension de claquage :

Les résultats de la tension de claquage mesurés sont montrés sur fig 13. Nous avons observé que les valeurs de la tension de claquage augmentent légèrement pour l'huile minérale avec le nombre de claquages au début des tests, puis sont dispersées autour d'une valeur moyenne. Par contre pour l'huile végétale, les valeurs de la tension de claquage diminuent au début de tests, puis sont dispersées autour d'une valeur moyenne.

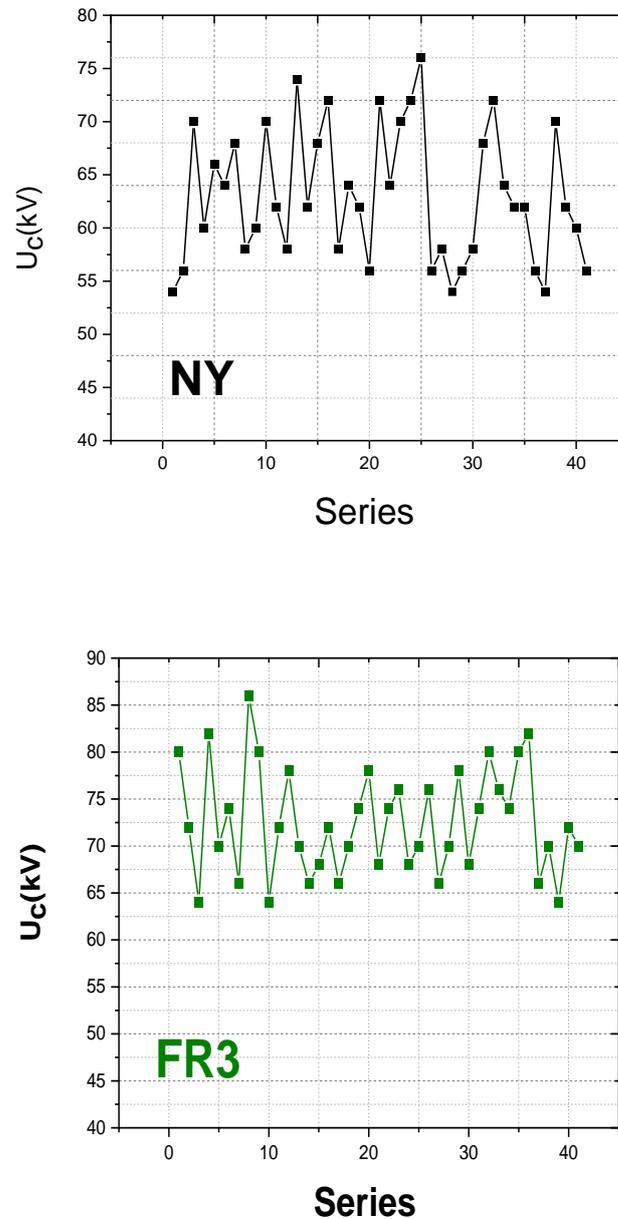


Figure 3.2 : Distribution des tensions de claquage des huiles testées

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

Lors de l'évaluation de la compatibilité d'une nouvelle huile avec les conceptions d'isolation existantes pour transformateurs, il est essentiel non seulement de comparer les tensions de claquage moyennes des huiles, mais aussi de tenir compte du rôle de la dispersion. Les concepteurs d'isolation estiment parfois la tension de claquage de l'huile minérale à partir de la dispersion des données, en supposant que les tensions de claquage de l'huile suivent une distribution paramétrique. Si la dispersion des tensions de claquage est différente, la marge de sécurité requise dans la conception de l'isolant du transformateur peut être différente. Par conséquent, il est important de tester si les tensions de claquage d'huile végétale se comportent d'une manière qui est statistiquement similaire à l'huile minérale [4].

Les histogrammes de la tension de claquage sont présentés sur figure 14. Ils permettent de représenter la répartition de la tension de claquage avec un nombre différent de classes et ainsi de détecter certains problèmes. Lors de l'analyse des histogrammes, nous avons remarqué qu'il y avait au moins un intervalle de tensions où il n'y avait pas de claquage, ceci est dû vraisemblablement au nombre limité de séries de mesures. Nous avons remarqué aussi que les plus faibles tensions de claquage dans l'huile végétale (60 kV dans FR3) étaient plus élevées par rapport à l'huile minérale (50 kV). Cela est dû à la dépendance de la tension de claquage à l'humidité relative. Sachant que l'humidité relative compare la quantité d'eau présente dans l'huile à la quantité qu'il faudrait pour le saturer [4].

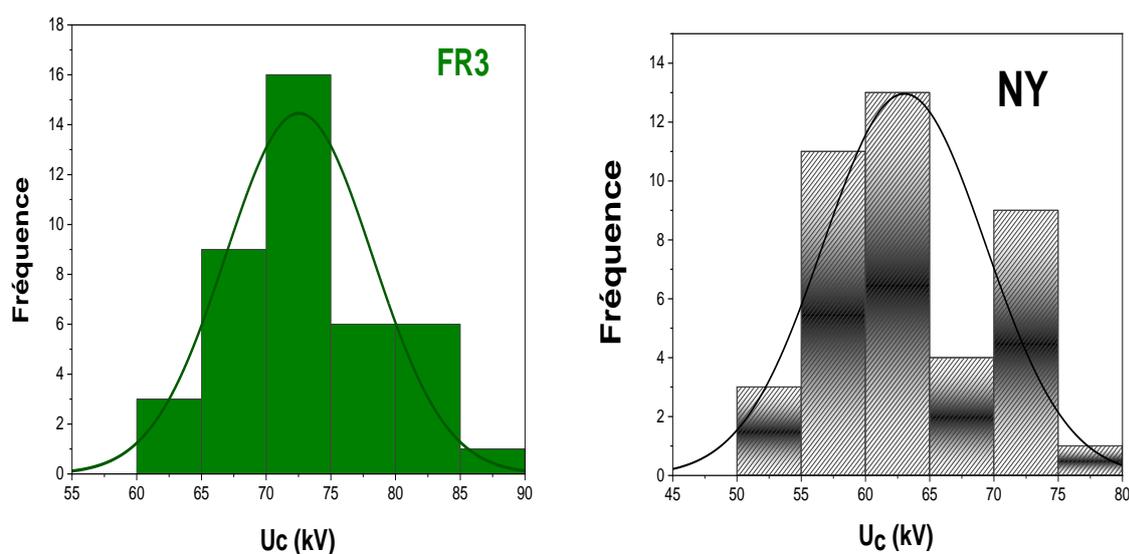


Figure 3.3 : Histogramme des tensions de claquage des huiles étudiées

Les résultats de l'analyse statistique des populations des échantillons sont présentés dans le tableau 4. Les résultats de l'écart type montrent que l'huile végétale présente une valeur

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

d'écart-type plus faible (5.65729 kV dans FR3) comparé à NY (6.31066 kV), ce qui signifie que la dispersion dans les résultats des tensions de claquage est plus faible dans l'huile végétale par rapport à l'huile minérale.

Tableau 3.1 : Les résultats de l'analyse statistique

HUILE	Moyenne de tension de claquage (kV)	Ecart type de tension de claquage (kV)	Kurtosis	Skewness	Minimum	Maximum	Médiane	Variance
NY	63.02439	6.31066	-1.07466	0.32925	54	76	62	39.82439
FR3	72.53659	5.65729	-0.64459	0.38856	64	86	72	32.00488

3.5.1 Test d'hypothèse :

A partir des histogrammes, il apparaît que les distributions de données suivent la distribution normale mais cela doit être vérifié. Pour appliquer la distribution statistique dans l'étude de probabilité de la tension de claquage, on fait d'abord les tests d'hypothèse sur les distributions choisies. Dans ce travail, ce sont des distributions Normale et de Weibull qu'on considère. Le niveau de signification du test α est de 5% ($\alpha = 0.05$).

Le test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale est d'abord effectué par le test Kolmogorov-Smirnov.

Les résultats de test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale sont résumés dans le Tableau 5. Si la valeur p-value est supérieure au niveau de signification $\alpha = 0.05$, l'échantillon est jugé normalement distribué. On peut remarquer que pour les deux huiles le test est accepté, donc les tensions de claquage suivent la distribution Normale.

Tableau 3.2 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution Normale

Huile	P- value	Conformité à la loi normale
NY	0.47507	accepté
FR3	0.39718	accepté

Le test d'hypothèse de conformité à la distribution Weibull a été effectué par le test Anderson-Darling [31]. Les résultats de test d'hypothèse de conformité à la distribution de

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

Weibull sont résumés dans le tableau 6. Il apparait que l'huile minérale est rejetée par contre à l'huile végétale qui est acceptée.

Tableau 3.3 : Test d'hypothèse de conformité à la distribution de Weibull

Huile	P- value	Conformité à la loi de Weibull
NY	0.02216	Rejeté
FR3	0.13542	accepté

3.6 Analyse statistique de la tension de claquage par la distribution Normale et de Weibull

La probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées par la distribution Normale est présentée sur Figure 15. Les données de la tension de claquage augmentent légèrement au début des tests pour les deux huiles. Puis sont dispersées autour d'une valeur moyenne suivant la ligne de référence, précisément pour les tensions inférieures à $U_{10\%}$ qu'elles sont probabilités faibles.

Dans la distribution normale, les valeurs de skewness = 0 et kurtosis = 3, tout changement dans ces valeurs indique la déviation par rapport à la normale. Le coefficient d'asymétrie calculé dans les deux huiles n'égale pas 0, cela signifie que la distribution de la tension de claquage est plus asymétrique parce que le coefficient d'asymétrie de deux huiles est positif ; cela signifie que la distribution est asymétrique à gauche de leur valeur moyenne [4].

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

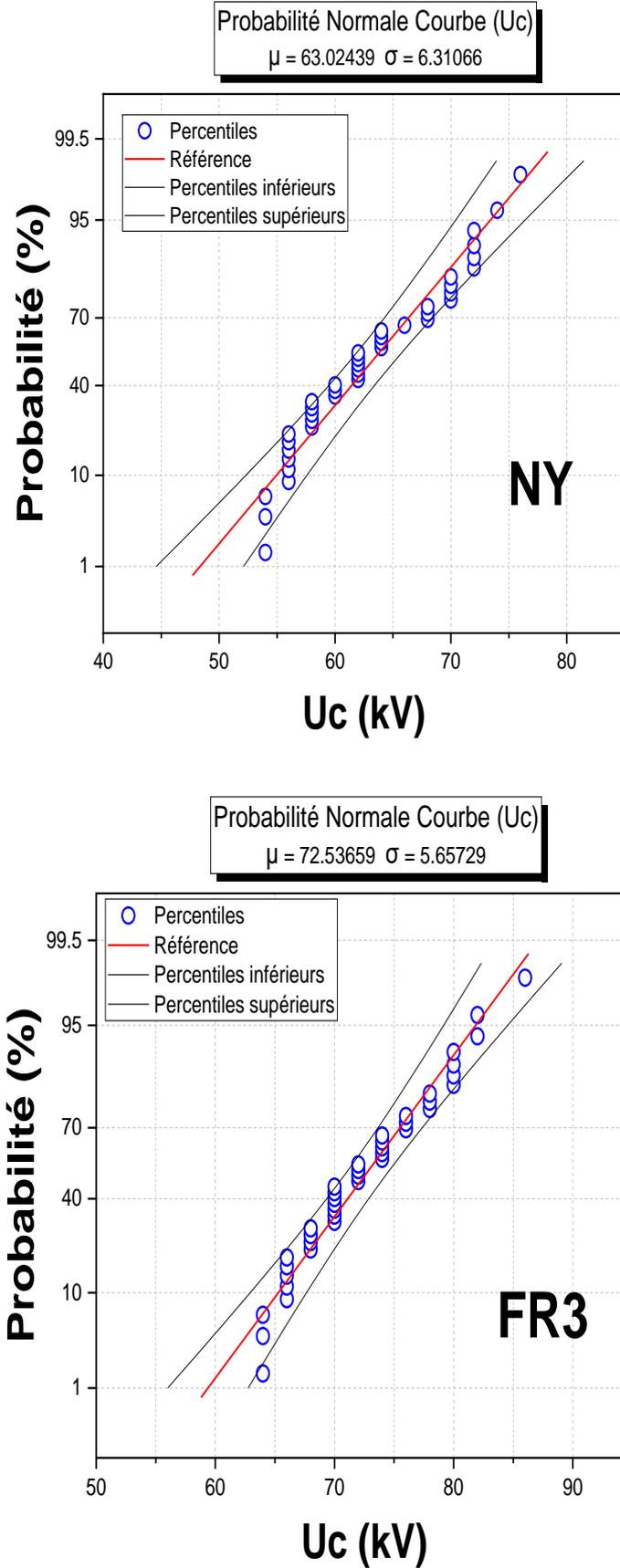


Figure 3.4 : Probabilité de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

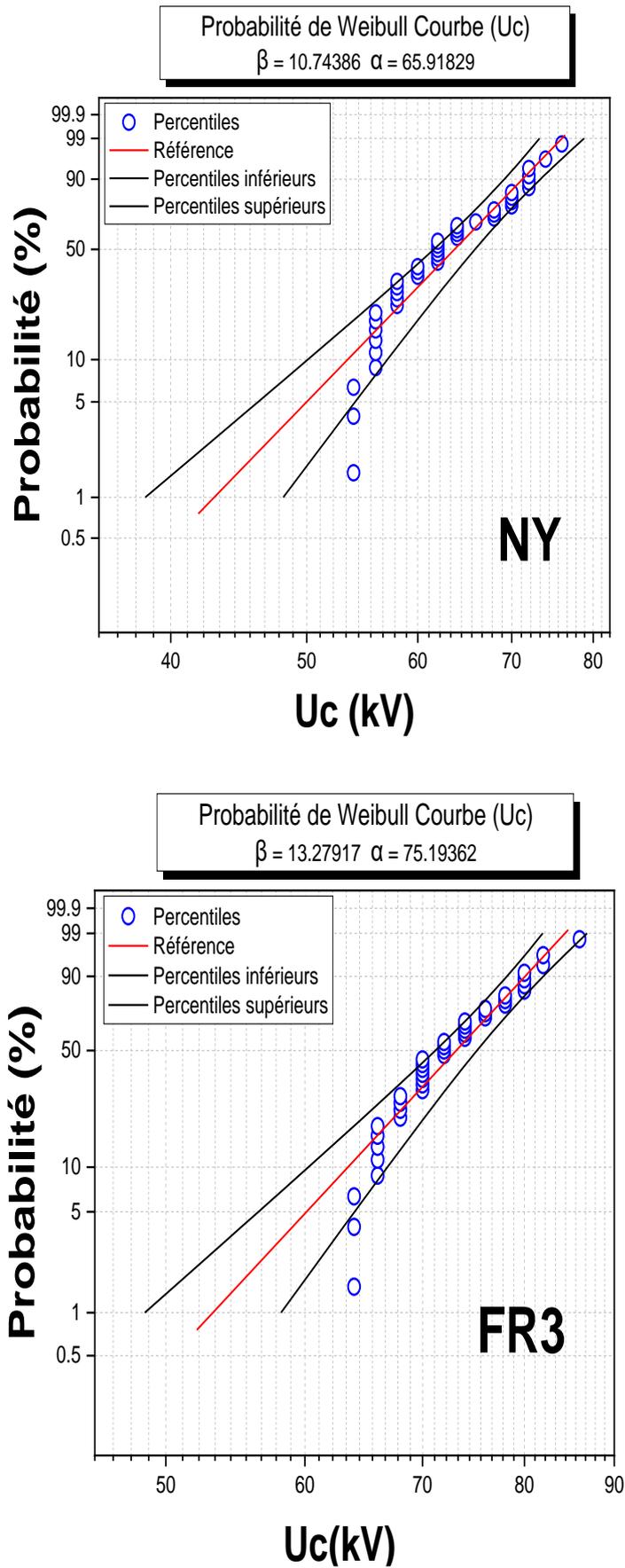


Figure 3.5 : Probabilité de la distribution de Weibull la tension de claquage des huiles

Chapitre 3 : Etude statistique de la tension de claquage

D'autre part, le coefficient d'aplatissement (kurtosis) est négatif dans les deux huiles, indiquant que les distributions sont platkurtiques (plates) et que la queue au début compte moins de points (queue légère) que dans une distribution Normale, et qu'il n'y a pas d'une queue à la fin.

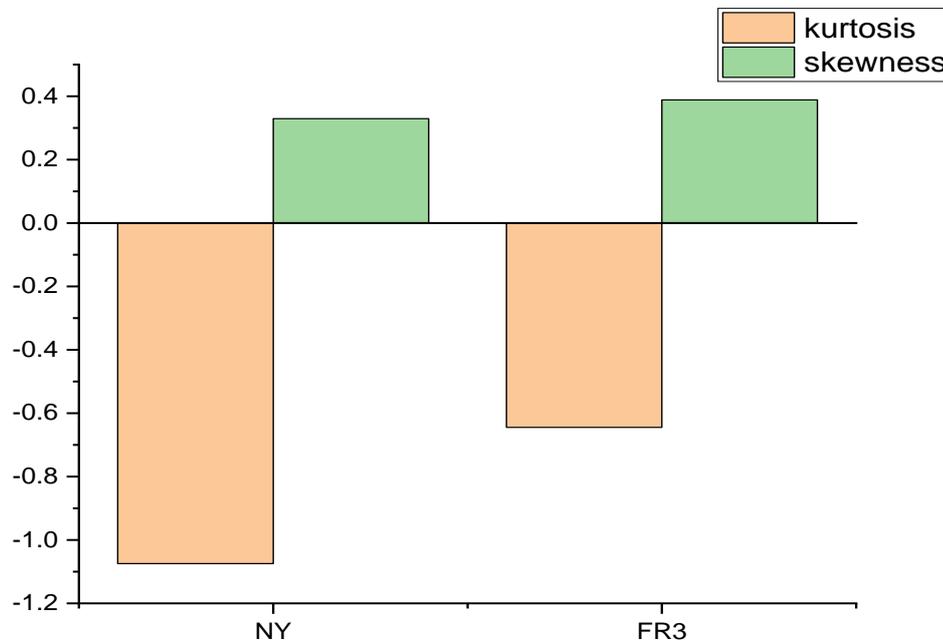


Figure 3.6 : Coefficients d'asymétrie et d'aplatissement de la distribution Normale de la tension de claquage des huiles

La conformité de la tension de claquage à la distribution statistique permet d'estimer la probabilité de la tension de claquage, c'est-à-dire une probabilité de α (%) = $P(U \leq U_i)$ ou bien $U_{\alpha\%}$ de ne pas claquer en dessous de la tension U_i . Les concepteurs d'isolation dans les équipements haute tension utilisent généralement des tensions de claquage avec des probabilités de 1% et 50% pour évaluer les niveaux de risque et déterminer le facteur de sécurité. La valeur de la tension de claquage avec des probabilités de 1%, 10%, 50% et 95% a été calculée en supposant que les données sont distribuées normalement [4]. Les résultats obtenus sont donnés dans Figure 18. Les pourcentages $U_{1\%}$, $U_{10\%}$, $U_{50\%}$ et $U_{95\%}$ dans les huiles végétales sont supérieurs à ceux dans l'huile minérale.

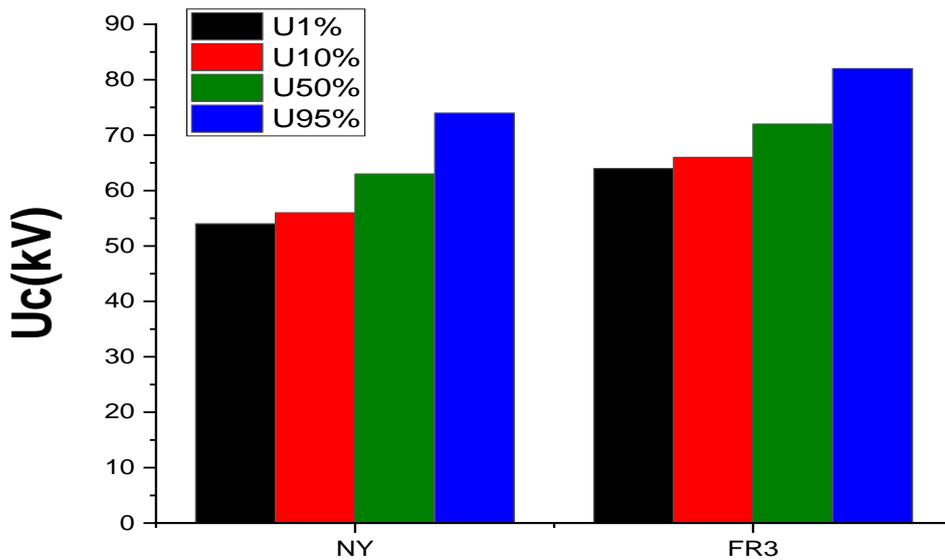


Figure 3.7 : Probabilité de la tension de claquage des huiles étudiées

3.7 Conclusion

La distribution Normale et de Weibull sont des distributions très applicables dans plusieurs domaines, précisément dans les domaines statistiques. Selon les deux distributions et à partir des histogrammes, on peut conclure que les plus faibles tensions de claquage dans l'huile végétale sont plus élevées par rapport à l'huile minérale.

Les résultats de l'analyse statistique montrent que les tensions suivent la distribution Normale pour les deux huiles. Les résultats aussi montrent que les tensions de claquage mesurées $U_{1\%}$, $U_{10\%}$, $U_{50\%}$ et $U_{95\%}$ sont élevées dans FR3 (huile végétale) que dans NY (huile minérale) pour les niveaux de risque 1%, 10%, 50% et 95%. L'huile végétale présente une valeur d'écart-type plus faible en comparaison à l'huile minérale, ce qui signifie que la dispersion dans les résultats des tensions de claquage est plus faible dans l'huile végétale par rapport à l'huile minérale. Donc l'huile végétale peut être aussi efficace que l'huile minérale en agissant comme isolant dans un transformateur.

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, l'étude comparative de la tension de claquage entre les huiles minérales et végétales utilisées dans les transformateurs révèle des avantages significatifs pour les huiles végétales. Les résultats montrent que les huiles végétales présentent généralement une meilleure performance en termes de tension de claquage par rapport aux huiles minérales. Cette supériorité est attribuée à plusieurs facteurs, notamment la composition chimique des huiles végétales qui favorise une meilleure stabilité diélectrique et une réduction de la probabilité de défaillance électrique. De plus, les huiles végétales sont souvent biodégradables, non toxiques et présentent des points d'éclair plus élevés, réduisant ainsi les risques d'incendie et améliorant la sécurité globale des équipements électriques.

L'adoption croissante des huiles végétales dans les transformateurs électriques reflète une tendance vers des solutions plus durables et respectueuses de l'environnement, tout en assurant des performances élevées et une fiabilité opérationnelle. Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les huiles végétales peuvent présenter des défis tels que des coûts initiaux plus élevés et une stabilité à long terme qui nécessite une évaluation continue et des améliorations technologiques. En définitive, choisir entre huiles minérales et végétales pour les applications de transformateurs électriques devrait tenir compte non seulement des performances en tension de claquage, mais aussi des considérations économiques, environnementales et de durabilité à long terme.

À l'avenir, les perspectives pour les recherches avancées sur les huiles végétales sont prometteuses et multi facettes. L'une des principales orientations consistera à perfectionner les propriétés diélectriques des huiles végétales afin d'optimiser leur performance dans les transformateurs électriques. Cela inclut l'exploration de nouvelles méthodes de modification chimique et de formulation pour améliorer la tension de claquage et la stabilité à long terme des huiles. Parallèlement, il sera essentiel de mener des études approfondies sur la durabilité et la fiabilité des huiles végétales, en évaluant leur résistance au vieillissement et leur comportement dans diverses conditions opérationnelles. Une autre perspective cruciale concerne l'accentuation sur la compatibilité environnementale des huiles végétales, en examinant leur biodégradabilité, leur impact écologique global et leur capacité à réduire les risques d'incendie.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRFIQUES

- [1] IEEE Std C57.12.00-2018, "IEEE Standard Definitions for Transformers, Regulators, and Reactors," IEEE, 2018.
- [2] "Transformateur électrique : définition, fonctionnement et sécurité" Electricité de France, 2023.
- [3] Viet Hung Dang "Etude des phénomènes de pré-claquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques : caractérisation des décharges aux interfaces", thèse de doctorat, école centrale de Lyon, 2011.
- [4] A. Reffas, "Etude des Décharges Electriques dans les Huiles Isolantes Végétales", Thèse de Doctorat 3ème cycle en Electrotechnique, USTHB, Mars 2018.
- [5] I. Fofana, "50 Years in the Development of Insulating Liquids", IEEE Electr. Insul. Mag, Vol. 29, No. 5, pp. 13–25, 2013.
- [6] "Oxidation stability of Envirotemp FR3 fluid as measured by power factor valued oxidation," Dielectric Fluids Engineering Report CP0502, Cooper Power Systems, Jan. 20, 2005.
- [7] T.V. Oommen, "Vegetable oils for Liquid-Filled Transformers", IEEE Electr. Insula. Mag., Vol. 18, No. 1, pp. 6-11,2002.
- [8] [Comité Européen de Normalisation], "Huile minérale pour transformateurs et commutateurs à haute tension - Spécifications et méthodes d'essai", Norme CEI EN 60296, Bruxelles, 2018.
- [9] C. P. Mcshane, "Natural and Synthetic Ester Dielectric Fluids : Their Relative Environmental, Fire Safety, and Electrical Performance," 1976.
- [10] Kemerid, "Huile de décoffrage biodégradable végétale", KEMDEMOLD VG, 2014.
- [11] La Fédération EPL, "De l'huile verte pour les transformateurs", Développement économique, 2016.
- [12] Yu. V. Torshin," Prediction of Breakdown Voltage of Transformer Oil from Predischarge Phenomena" IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.10, No 6, 2003, pp.933-941
- [13] Streamer Breakdown Characteristics of Transformer Oil under DC Stress" par IEEE (Volume: 12, Issue: 5, Sep 1977)

REFERENCES BIBLIOGRFIQUES

- [14] "Bubble Formation and Breakdown in Transformer Oil under AC Electric Fields" par IEEE (Volume: 25, Issue: 5, Oct 2018)
- [15] "Investigation on Thermal Breakdown of Transformer Oil under Impulse Voltage" par IEEE (Volume: 33, Issue: 2, Apr 2018)
- [16] Vieillissement de l'huile de transformateur Pr A.Boubakeur - E N Polytechnique ARELEC - 23 Novembre 2011
- [17] "Dielectric Materials and Properties" by Martin C. Hawley, 2004
- [18] "Electronic Properties of Materials" by R.F. Egerton, 2006
- [19] "Introduction to Dielectric Materials and Devices" by Samarjit Ghosh, 2018
- [20] "High-Voltage Engineering and Insulation Coordination" by R.L. Watson, 2009
- [21] "Electrical Insulation for High-Voltage Systems" by Erik O. Schweitzer, 2005
- [22] "IEEE Std C57.010-2019 - IEEE Standard for Liquid-Immersed Power Transformers"
- [23] IEEE Std 6213-1992: Guide pour la maintenance de l'huile des transformateurs sur site.
- [24] " Maintenance of Transformer Insulation Oil" par Doble Engineering Company
- [25] Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils by the Electrode Gap Method.
- [26] Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils Using a Sphere-to-Plane Electrode at High Direct Voltage
- [27] NORME INTERNATIONALECEI 156 Deuxième édition1995-07
- [28] Donald J. Dessart, "Cours de probabilités et de statistique dans l'enseignement général du second degré ", Etude sur l'enseignement des mathématiques, Editions UNESCO, 1994.
- [29] "Distribution normale comment utiliser la distribution normale pour modéliser la distribution de probabilité de l'estimation des investissements, Distribution de Weibull applications et estimation des paramètres", Faster Capital, 2015.
- [30] Cochran, W.G. and Snedecor, G.W. *Statistical Methods*, Iowa State, 1976, 6th ed.

REFERENCES BIBLIOGRFIQUES

- [31] T. W. Anderson and D.A. Darling, “Asymptotic theory of certain “goodnessoffit” criteria based on stochastic processes”, *Annals of Mathematical Statistics* 23, pp. 193–212, 1952.