

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° : RES-08



DOMAINE :SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Réseaux Électrique

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par:

TITOUM Said Tarek

GUELIEL Soufyane

Intitulé

**Amélioration des performances d'huile isolant de
transformateur par l'insertion d'une barrière isolante**

Soutenu devant le jury composé de:

| | | |
|-------------------|-------------------------------------|------------|
| Dr MABRAK Samir | Université Mohamed Boudiaf - M'sila | Président |
| Dr RAHALI Hilal | Université Mohamed Boudiaf - M'sila | Rapporteur |
| Dr AIB Abdelghani | Université Mohamed Boudiaf - M'sila | Examineur |

Année universitaire : 2019/ 2020



REMERCIEMENT

D'abord nous tenons à remercier dieu qui nous 'a donné la santé et la foi pour arrivera ce jour.

Nous remercions très vivement Monsieur Hilal RAHALI de nous avoir confié ce sujet, et de l'aide précieuse qu'ils nous ont toujours apportée, qu'ils trouvent ici l'expression de notre Sincère reconnaissance.

Nous exprimons notre respect au président du jury ainsi qu'aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Nous remercions nos parents, de nous avoir donné la vie, de nous avoir élevé, instruit, pour tout leurs sacrifices, Les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne serait suffire pour vous dire
MERCI.



Dédicace

*Je dédié ce travail A toute la famille, a mes très
chers parents qui m'ont encouragé durant les
moments les plus difficiles de ce long chemin,*

*A mes amis qui m'ont accompagné dans ma
carrière académique, notamment*

AyyoubZeghlache,

*je n'oublie pas mon père Gharbi Guellil que
dieu ait pitié de lui.*

T.saidtarek&G.soufiane

SOMMAIRE

REMERCIEMENT

DEDICACE

SOMMAIRE

LISTE DE FIGURE

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : HUILES MINERALES ISOLANTES POUR TRANSFORMATEURS

| | | |
|---------|---|----|
| I.1 | INTRODUCTION..... | 4 |
| I.2 | DIFFERENTES CATEGORIES D’HUILES ISOLANTES..... | 4 |
| I.2.1 | LES HUILES SYNTHETIQUES..... | 4 |
| I.2.2 | LES HUILES D’ORIGINE VEGETALE..... | 5 |
| I.2.3 | LES HUILES MINERALES..... | 5 |
| I.3 | PROPRIETES DES HUILES MINERALES ISOLANTES..... | 6 |
| I.3.1 | LES PROPRIETES ELECTRIQUES..... | 6 |
| I.3.1.1 | La permittivité ou la constante diélectrique..... | 6 |
| I.3.1.2 | La rigidité diélectrique..... | 7 |
| I.3.1.3 | Le facteur de dissipation diélectrique ($\text{tg } \delta$)..... | 7 |
| I.3.2 | LES PROPRIETES PHYSIQUES..... | 8 |
| I.3.2.1 | La viscosité..... | 8 |
| I.3.2.2 | Le point d’écoulement..... | 9 |
| I.3.2.3 | Le point de feu..... | 9 |
| I.3.2.4 | Le point d’éclair..... | 9 |
| I.3.2.5 | Capacité thermique..... | 10 |
| I.3.2.6 | Conductivité thermique..... | 10 |
| I.3.2.7 | Aspect et couleur..... | 10 |
| I.3.3 | LES PROPRIETES CHIMIQUES..... | 11 |
| I.3.3.1 | L’acidité totale..... | 11 |
| I.3.3.2 | Oxydation des huiles minérales isolantes..... | 11 |
| I.3.3.3 | La teneur en soufre..... | 11 |
| I.3.4 | STABILITE..... | 12 |
| I.3.4.1 | La stabilité thermique..... | 12 |
| I.3.4.2 | La stabilité à l’oxydation..... | 12 |
| I.3.5 | PROPRIETE AU FEU..... | 13 |
| I.3.5.1 | Le point de feu..... | 13 |
| I.3.5.2 | Le point d’éclair..... | 13 |
| I.3.6 | L’EFFET DES IMPURETES..... | 14 |
| I.3.6.1 | La teneur en eau..... | 15 |
| I.3.6.2 | La teneur en particules..... | 16 |

SOMMAIRE

| | | |
|--|---|----|
| I.4 | RAPPELS SUR LA REGENERATION DES HUILES MINERALES ISOLANTES USAGEES..... | 16 |
| I.5 | PRINCIPE GENERAL DE LA REGENERATION..... | 17 |
| I.6 | CONCLUSION | 18 |
| CHAPITRE II : CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES | | |
| II.1 | INTRODUCTION..... | 20 |
| II.2 | CLAQUAGE DES LIQUIDES ISOLANTS..... | 20 |
| II.2.1 | MECANISME ELECTRONIQUE..... | 21 |
| II.2.2 | MECANISME DE CLAQUAGE FAISANT INTERVENIR UNE PHASE GAZEUSE | 23 |
| II.2.3 | MECANISME DE CLAQUAGE PAR PONT..... | 24 |
| II.2.3.1 | Origine des particules | 24 |
| II.2.3.2 | Teneur des particules | 24 |
| II.2.3.3 | Rôle des particules dans le claquage..... | 25 |
| II.2.3.3.a | -Particules isolantes | 25 |
| II.2.3.3.b | -Particules conductrices | 25 |
| II.2.4 | LONGUES DECHARGES DANS LES LIQUIDES | 26 |
| II.3 | FACTEURS INFLUENTS SUR LA RIGIDITE DIELECTRIQUE DES LIQUIDES | 26 |
| II.3.1 | PARAMETRES ELECTRO GEOMETRIQUES | 26 |
| II.3.2 | PRESSION HYDROSTATIQUE | 27 |
| II.3.3 | TEMPERATURE..... | 27 |
| II.3.4 | TENSION..... | 27 |
| II.3.5 | HUMIDITE..... | 28 |
| II.4 | INFLUENCE D'UNE BARRIERE ISOLANTE DANS LES INTERVALLES D'AIR..... | 28 |
| II.4.1 | INFLUENCE DU TYPE DE TENSION | 29 |
| II.4.2 | INFLUENCE DE LA POLARITE DE L'ELECTRODE POINTE | 29 |
| II.4.3 | INFLUENCE DE LA POSITION DE LA BARRIERE | 29 |
| II.4.4 | INFLUENCE DE LA LARGEUR DE LA BARRIERE..... | 30 |
| II.4.5 | INFLUENCE DE L'EPAISSEUR ET DE LA PERMITTIVITE..... | 30 |
| II.4.6 | INFLUENCE DE LA BARRIERE TROUEE..... | 30 |
| II.4.7 | INFLUENCE DU MATERIAU DE LA BARRIERE..... | 31 |
| II.4.8 | FORMES DES DECHARGES OBSERVEES DANS LE SYSTEME POINTE-PLAN AVEC BARRIERE ISOLANTE | 31 |
| II.4.8.1 | Décharge directe..... | 32 |
| II.4.8.1.a | Cas ou la décharge perce la barrière | 32 |
| II.4.8.1.b | Cas ou la décharge contourne la barrière | 32 |
| II.4.8.2 | Décharge par étapes..... | 32 |
| II.5 | CONCLUSION | 34 |

SOMMAIRE

CHAPITRE III : INFLUENCE D'INSERTION D'UNE BARRIERE ISOLANTE D'ANS LES INTERVALLES D'HUILE

| | | |
|-----------|---|-----------|
| III.1 | INTRODUCTION | 36 |
| III.2 | CIRCUIT D'ESSAIS | 36 |
| III.2.1 | STATION D'ESSAI | 37 |
| III.2.2 | CELLULE D'ESSAIS | 38 |
| III.2.3 | LES PARAMETRES UTILISES..... | 39 |
| III.2.4 | PRESENTATION DE L'HUILE | 40 |
| III.3 | RESULTATS ET INTERPRETATIONS | 41 |
| III.3.1 | ESSAIS SANS BARRIERE | 41 |
| III.3.1.1 | Effet de la distance inter-électrodes | 41 |
| III.3.1.2 | Effet du rayon de courbure de la pointe | 42 |
| III.3.1.3 | Effet de l'insertion de la barrière | 43 |
| III.3.1.4 | Effet du diamètre de la barrière | 44 |
| III.3.1.5 | Effet de l'épaisseur de la barrière | 46 |
| III.3.1.6 | Effet de la position de la barrière..... | 47 |
| III.4 | CONCLUSION | 49 |
| | CONCLUSION GENERALE | 51 |

LISTE DE FIGURE

CHAPITRE II

| | |
|---|----|
| FIGURE II.1: VALEUR EFFICACE DE LA TENSION DE CLAQUAGE D'UNE HUILE MINERALE SOUS TENSION ALTERNATIVE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER-ELECTRODES, EN GEOMETRIE POINTE-PLAN ET SPHERE-PLAN..... | 27 |
| FIGURE II.2: TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DE LA TENEUR RELATIVE EN EAU, DANS L'HUILE MINERALE ET DANS UNE SOLUTION COMPOSEE DE L'HUILE MINERALE AVEC 20% D'ESTER LIQUIDE..... | 28 |
| FIGURE II.3 : DECHARGE DIRECTE ET PAR ETAPES (DECHARGE GLISSANTE) | 33 |

CHAPITRE III

| | |
|--|----|
| FIGURE III.1 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL | 36 |
| FIGURE III.2 : CELLULE D'ESSAIS | 39 |
| FIGURE III.3 : SCHEMA DE LA CELLULE D'ESSAIS | 39 |
| FIGURE III.4 : FORME DE LA BARRIERE UTILISEE..... | 40 |
| FIGURE III.7: VARIATION DE LA TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DE LA DISTANCE INTER ELECTRODES, POUR DIFFERENTS RAYON DE COURBURE DE LA POINTE | 42 |
| FIGURE III.8: VARIATION DE LA TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DU RAYON DE COURBURE DE LA POINTE, POUR DIFFERENTS DISTANCES INTER ELECTRODES | 43 |
| FIGURE III.9: VARIATION DE LA TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DE LA PRESENCE DE LA BARRIERE | 44 |
| FIGURE III.14: VARIATION DE LA TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE LA BARRIERE..... | 46 |
| FIGURE III.15: VARIATION DE LA TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE LA BARRIERE..... | 47 |
| FIGURE III.10: VARIATION DE LA TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DE LA POSITION DE LA BARRIERE..... | 48 |

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les transformateurs électriques jouent un rôle majeur dans la distribution et la transmission de l'électricité. Ils subissent régulièrement des défaillances techniques et peuvent exploser. Quand de telles avaries se produisent, la vie des personnes est mise en danger et les conséquences financières pour les sociétés d'électricité sont considérables.

Ces accidents sont favorisés par l'accroissement régulier de la consommation en électricité. En effet, la production augmente de 2% par ans dans le monde et de 5.8% en Algérie [1]. Cette évolution représente pour les anciens transformateurs une surcharge, d'autant plus que l'âge de la plupart d'entre-eux dépasse les 30 ans. Ceci provoque leur dégradation prématurée.

Les pertes humaines et financières engendrées par les explosions des transformateurs mettent l'accent sur la nécessité de trouver des méthodes préventives permettant de réduire ces pertes sans causer l'arrêt inutile des installations[2]. Ces méthodes doivent être assez efficaces pour permettre d'agir avant que l'accident ne survienne.

Les diélectriques liquides utilisés comme huiles isolantes sont l'un des éléments les plus importants dans un transformateur. Elle requiert une surveillance et un entretien régulier pour pouvoir garantir une bonne isolation et un bon refroidissement. La surveillance de l'état de l'huile d'un transformateur en service est un moyen de prévention efficace. Elle peut également renseigner sur l'état intérieur de la partie active.

Nous nous intéressons, dans notre travail, aux diélectriques liquides pour transformateurs et plus précisément aux huiles minérales, et à l'augmentation de la rigidité diélectrique des huiles utilisées dans les transformateurs sans influencer sur le gabarier de ces derniers. C'est la raison pour laquelle les études et recherches, portant sur les huiles isolantes et, plus globalement, sur les diélectriques liquides, constituent, jusqu'à nos jours, un sujet toujours d'actualité.

C'est dans cette optique, que nous avons tenté, à notre échelle et par les moyens qui ont été mis à notre disposition, d'effectuer une étude sur l'influence des barrières isolantes sur le comportement de l'huile minérale isolante d'application industrielle. Notre choix s'est porté sur une huile de transformateur, utilisée par la SONELGAZ (Société Algérienne de l'Electricité et du Gaz) et commercialement dénommée « Borak 22 ». Nous avons mené notre travail en prenant les résultats mentionnés par [2], utilisant un système pointe-barrière-plan auquel une contrainte alternative de fréquence industrielle (50Hz) est appliquée. Notre travail comprend trois chapitres.

Le premier chapitre présente des connaissances concernant **les Huiles minérales isolantes pour transformateurs**, les différentes Propriétés des huiles minérales isolantes.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le claquage des diélectriques liquides les différents mécanismes ainsi que les facteurs influant sur le claquage des liquides et une

INTRODUCTION GENERALE

synthèse des travaux sur l'influence des barrières isolantes dans les moyens intervalles d'air, ainsi que dans les liquides.

Le troisième chapitre est réservé à la présentation des techniques expérimentales utilisées par [2] et des résultats obtenus relatifs aux variations des facteurs influant sur la tension de décharge disruptive de l'huile de transformateur. Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

"Huiles minérales isolantes pour transformateurs"

I.1 INTRODUCTION

Les diélectriques liquides sont caractérisés par des permittivités et pertes diélectriques très faibles ($\epsilon_r = 2 \sim 2.5$) [3], et une tension de claquage plusieurs fois supérieure à celle des gaz ; ils sont également utilisés comme réfrigérants.

Les liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc. Cependant, ils présentent certains inconvénients dont une combustion à des températures relativement basses, ils sont souvent utilisés en association avec d'autres matériaux en particulier solides comme le carton dans les transformateurs[4], le papier et/ou le polypropylène dans les câbles imprégnés et condensateurs de puissance.

I.2 Différentes catégories d'huiles isolantes

I.2.1 Les huiles synthétiques

Les huiles synthétiques sont utilisées chaque fois que les propriétés requises ne sont pas satisfaites par les huiles minérales. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu (transformateur) ou lorsque l'on recherche une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs) [5].

Il existe quatre types principaux huiles synthétiques :

Les hydrocarbures aromatiques : ces liquides peuvent être classés en deux groupes :

- Les alkybenzènes
- Les autres hydrocarbures aromatiques.

Les hydrocarbures aliphatiques tels les polyoléfines, qui sont des hydrocarbures insaturés à chaîne droite ou ramifiée, possédant une double liaison en bout de chaîne.

- Les esters issus de réaction d'acides organiques et d'alcools. Ces produits offrent d'excellentes propriétés lubrifiantes et des opérabilités aux températures extrêmes.

- Les silicones : ont été proposées comme liquides de remplacement des askarels pour transformateurs. Le produit le plus communément employé est le polydiméthylsiloxane.

Ils sont tous obtenus à partir des grands intermédiaires de la pétrochimie. Des produits perfluorés ont également été proposés dans le domaine des condensateurs et des transformateurs pour certaines applications très particulières. Le coût d'accès de ces produits est de cent fois celui des huiles minérales, d'où limitation de leurs utilisations.

Les polychlorobiphényles (ou polychlorodiphényles selon la nomenclature) sont également des liquides de synthèse et ont été utilisés largement pendant une trentaine d'années. Leur persistance dans l'environnement conduit à leur bannissement ; cependant, ils sont encore présents dans certains appareils âgés. Seuls des produits biodégradables sont maintenant acceptés [4].

I.2.2 Les huiles d'origine végétale

Utilisées depuis la nuit des temps, elles sont obtenues à partir de récolte de graines et de fruits. Elles sont traitées par pressage puis par des opérations de raffinage relativement complexes. Ce sont des esters d'acides gras et de glycérol appelés triglycérides.

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

I.2.3 Les huiles minérales

L'utilisation des huiles minérales dans les matériels électriques remonte pratiquement au début de leur production industrielle. Elles ont deux fonctions principales : l'isolation électrique et le transfert thermique.

Les huiles minérales isolantes sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, substances naturelles d'origine géologique, débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau, etc.). Les pétroles sont composés d'hydrocarbures saturés paraffiniques (alcanes) et naphthéniques (cycloalcanes), qui constituent la matrice liquide fondamentale, et d'hydrocarbures aromatiques (dont des aromatiques ramifiés par des chaînes alkylées). Ils contiennent également des hydrocarbures hétérocycliques à base de soufre, d'azote et d'oxygène, dont les teneurs ne dépassent pas 10 %. On les désigne sous le terme de bruts. Ils sont extraits dans toutes les régions du monde et plusieurs centaines de types différents ont été mis en évidence.

L'amélioration progressive des procédés de raffinage des bruts a abouti à l'obtention d'huiles minérales de plus en plus performantes. Ces améliorations, associées aux évolutions technologiques, ont permis de réduire progressivement les volumes d'huiles dans les appareils [4].

I.3 Propriétés des huiles minérales isolantes

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.

I.3.1 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.3.1.1 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 [6]. 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** (ϵ_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

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

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 [6].

I.3.1.2 La rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans décharge [5-7].

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.

I.3.1.3 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 [6].

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 $5 \cdot 10^{-3}$ [8].

I.3.2 Les propriétés physiques

I.3.2.1 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 :

$$\text{CST} = C t - B/t \quad (\text{I-2})$$

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.

I.3.2.2 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).

I.3.2.3 Le point de feu

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

I.3.2.4 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.

I.3.2.5 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 [6].

I.3.2.6 Conductivité thermique

La conductivité thermique (λ), 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) .

I.3.2.7 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 [6] .

I.3.3 Les propriétés chimiques

I.3.3.1 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 [8]. 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.

I.3.3.2 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.

I.3.3.3 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 [8], la coloration qu'elle prend permet de juger si les composés soufrés sont corrosifs ou non.

I.3.4 Stabilité

La stabilité d'une huile minérale aux effets conjugués de la température, du champ électrique et de l'oxygène dépend beaucoup de la composition de cette huile et de la présence ou non d'additifs, notamment antioxydants. Le vieillissement de l'huile et celui des matériaux solides avec lesquels elle est en contact (notamment la cellulose) conduit à la formation de produits polaires (carbonylés, carboxylés, ...) en général, solubles d'hydrogène et d'hydrocarbures légers (à 1, 2 ou 3 carbones), et de produits de masses moléculaires élevées, insolubles. La dégradation de la cellulose conduit de plus à la formation de CO, CO₂ et de dérivés furaniques.

Les conséquences de ces phénomènes de vieillissement de l'huile sont [9] :

- Une augmentation des pertes diélectriques.
- Une augmentation de la viscosité, d'où une diminution de la capacité à éliminer les calories.
- Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis de la cellulose et des parties métalliques.

I.3.4.1 La stabilité thermique

On entend, généralement, par stabilité thermique le comportement du produit à température élevée, en faisant abstraction de toute autre contrainte, telles que l'oxydation, l'hydrolyse, les décharges partielles, etc. Le comportement purement thermique (en l'absence d'oxygène) n'est d'un intérêt que pour les applications fermées, comme les condensateurs, les câbles ou les transformateurs scellés.

I.3.4.2 La stabilité à l'oxydation

On désigne par oxydation un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous. Il se forme tout d'abord

des produits de réaction solubles (composés carbonylés, carboxylés) puis, par polymérisation, des produits qui sont plus ou moins solubles ; les dépôts étant appelés boues d'oxydation.

La vitesse des réactions d'oxydation croit avec la température et la concentration en oxygène et par certains métaux (cuivre, fer).

Les conséquences de l'oxydation de l'huile pour les isolations sont [5,10,11]:

- 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 augmentent.
- Une augmentation des pertes dans les isolations imprégnées qui peuvent entraîner le claquage thermique.

L'apparition de l'acidité dans l'huile.

Les huiles minérales peuvent contenir des inhibiteurs naturels qui sont des hétérocycles soufrés et des hydrocarbures polyaromatiques.

I.3.5 Propriété au feu

Les huiles minérales ne sont pas des produits ininflammables. Elles présentent toutes un point d'éclair et un point de feu qui caractérisent l'inflammabilité d'une huile.

I.3.5.1 Le point de feu

C'est la température minimale pour laquelle la combustion des vapeurs d'un liquide sera entretenue.

I.3.5.2 Le point d'éclair

Cette propriété renseigne sur la présence de certains hydrocarbures gazeux dissous dans l'huile suite à un défaut électrique ou thermique. Elle correspond à la température pour laquelle l'huile émet un flash, c'est-à-dire, la température critique maximale à ne pas dépasser au risque de provoquer un incendie dans le transformateur.

Les huiles les plus fluides doivent présenter un point d'éclair supérieur à 95 °C, alors que les huiles de classe I doivent avoir un point d'éclair supérieur à 140 °C [9].

La combustion des huiles minérales libère une grande quantité d'énergie. La norme CEI 61100 [9] permet de classer les liquides isolants en fonction de leur point de feu et de leur pouvoir calorifique inférieur (CPI) (qui caractérise la quantité d'énergie produite par la combustion totale du produit) (voir Tableau I.1).

| Classement sur le point de feu | | Classement sur l'énergie de combustion | |
|--------------------------------|---------------------|--|-----------------------------------|
| Classe | Point de feu | Classe | PCI |
| O | ≤ 300 °C | 1 | ≥ 42 MJ / Kg |
| K | > 300 °C | 2 | $32 \leq \text{PCI} < 42$ MJ / Kg |
| L | Pas de point de feu | 3 | $\text{PCI} < 32$ MJ / Kg |

Tableau I.1 -Classification des liquides isolants vis-à-vis du feu (selon la norme CEI 61100) [9]

Les huiles minérales les plus courantes ont des points de feu compris entre 110 et 190 °C suivant leur type, et ont un pouvoir calorifique inférieur de l'ordre de 48 MJ/kg. Elles sont classées O1.

Des huiles minérales de masses moléculaires très élevées sont également employées pour les transformateurs devant résister au feu. Elles ont un point de feu supérieur à 300 °C et sont classées K1 [9].

I.3.6 L'effet des impuretés

Il y a beaucoup d'impuretés qui peuvent affecter les propriétés des huiles minérales, notamment les gaz dissous, l'eau, les contaminants polaires ionisables et les particules.

Dans les anciens appareils, l'huile peut également être contaminée par le polychlorobiphényle (PCB). Cette contamination n'affecte pas les propriétés de l'huile mais, si l'huile en contient plus de 50 ppm (0.005 %), elle est considérée comme un PCB pur et doit être détruite [9].

I.3.6.1 La teneur en eau

C'est l'ennemi numéro un des appareils électriques. Les huiles séchées peuvent avoir des teneurs en eau inférieures à 10 ppm [9]. Au contact d'une atmosphère humide, l'eau se dissout lentement dans l'huile, pouvant conduire à des teneurs élevées.

L'eau que renferme un liquide peut se trouver sous deux formes [9] :

- L'eau libre, en solution jusqu'à la concentration de saturation, concentration au-delà de laquelle se forment des gouttelettes.
- L'eau liée, fixée à certaines molécules du liquide par des liaisons chimiques.

L'eau libre est plus aisément extraite du liquide que l'eau liée, par un chauffage approprié sous un vide modéré. Selon l'application considérée, les problèmes dus à la présence d'eau sont tout à fait différents; par exemple, ils sont quasiment inexistantes pour les condensateurs, appareils scellés après imprégnation, dont l'isolation, n'est pas – ou très peu – en contact avec l'atmosphère ; au contraire, l'huile dans un transformateur est en contact avec divers matériaux cellulosiques très avides d'eau et susceptibles d'en former lors de leur dégradation. Ils cèdent cette eau à l'huile lorsque la température s'élève suivant des règles bien établies.

L'huile, par ailleurs, a tendance à s'oxyder au cours du temps et divers produits s'y dissolvent: acides organiques, composés saturés et insaturés ainsi que de l'eau ; d'autres produits apparaissent en suspension (boues) [12].

En présence d'eau libre, la conductivité de l'huile augmente fortement et sa rigidité électrique diminue. Il a été montré que la rigidité de l'huile varie peu avec la température, mais beaucoup avec la teneur en eau, et l'effet parfois observé de la température est du à la variation de l'humidité relative d'un échantillon avec la température.

On appelle humidité relative d'un liquide, le rapport entre la teneur en eau du produit et la solubilité. Pour une même teneur en eau, l'humidité relative varie avec la température : elle est plus faible à température élevée et plus grande à basse température.

L'un des problèmes rencontrés dans les appareils qui « respirent » à l'air est lié à la variation de la solubilité de l'eau avec la température. Lorsque l'appareil est chaud, l'eau peut se dissoudre en grande quantité. Lorsque l'appareil refroidit, la solubilité de l'eau

diminuant, de l'eau libre apparaît et se rassemble au fond de l'appareil. Cette situation peut conduire à des claquages [9].

La majorité des études de l'influence de l'eau sur la conduction des liquides impurs a été consacrée aux huiles de transformateur, en particulier dans le but de caractériser la présence d'eau qui produit un abaissement considérable de la rigidité diélectrique lorsque l'huile est polluée par des particules, des fibres cellulosiques ou des boues dues à sa dégradation.

I.3.6.2 La teneur en particules

L'influence des particules sur les propriétés des huiles minérales a été étudiée depuis les années 1960 [9], notamment sur l'allumage des décharges partielles et le claquage. Les particules métalliques sont, de ce point de vue, beaucoup plus nuisibles que les particules isolantes. Elles jouent un rôle prépondérant dans l'initiation du claquage des grands volumes d'huile.

Une huile neuve contient entre 0.0001 % et 0.001 % de particules de taille supérieure à 5 μm , ce qui représente entre 10^7 et 10^6 particules pour 100 ml d'huile [9]. Les très petites particules, de taille inférieure à 1 μm , n'ont été prises en considération que récemment, les méthodes de mesures n'étant pas disponibles jusque-là. Les huiles en service peuvent contenir beaucoup plus de particules, métalliques et cellulosiques, provenant des matériaux avec lesquelles l'huile est en contact.

I.4 Rappels sur la régénération des huiles minérales isolantes usagées.

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

I.5 Principe général de la régénération

Les opérations successives pour l'obtention d'un produit de haute qualité, constituent une nouvelle forme de raffinage de l'huile usagée. Ce cycle comprend habituellement les phases successives dans l'ordre suivant [13] :

- **La décantation** qui a pour but d'éliminer les corps solides, les grosses impuretés et l'eau libre.
- **La séparation des impuretés** en suspension dans l'huile. Cette opération représente à l'heure actuelle la phase la plus difficile de la régénération. En effet, les particules très fines qui sont en suspension dans l'huile, demeurent insensibles par rapport aux anciens procédés de précipitation des sédiments par rupture de la suspension colloïdale ou par électrolyte tel que le silicate de soude.
- **La déshydratation** qui a pour but d'éliminer l'eau par chauffage à une température de 150°C. On peut aussi utiliser un desséchant à savoir le CaCl₂
- **Le traitement à l'acide** conduit à la floculation des suspensions carbonées et la sulfonation des produits oxydés, mais sans qu'il en résulte une attaque sur l'huile même. Ce traitement s'opère sur l'huile chauffée à une température de l'ordre de 30°C à laquelle est ajoutée 4% en volume d'acide sulfurique H₂SO₄ à 90-92%. Ces produits sont mélangés soit au préalable, soit directement dans un bac de décantation à fond conique. Les boues acides sont précipitées au fond du bac et séparées de l'huile épurée. L'huile épurée fera l'objet de traitements ultérieurs. Ces traitements permettent la réduction des teneurs en métaux provenant des additifs et de l'usure mécanique à quelques PPM (parties par millions) dans l'huile régénérée.
- **La neutralisation** de l'huile intervient après le traitement à l'acide. En effet, l'huile épurée contient encore des acides de différentes sortes, en particulier sulfonique et petites particules d'acide sulfurique. La neutralisation a pour but de transformer les restes acides dans l'huile épurée en sels. A cet effet, la soude et le carbonate de chaux à 1% en poids sont généralement utilisés.
- **Le passage à la terre** est une opération qui se fait dans une cuve conique munie d'un agitateur. Elle précède directement le mélange de l'huile à la terre activée. Après neutralisation l'huile est malaxée avec 1 à 10% de terre activée durant 15 à 20

minutes, à une température variable entre 80 et 100°C. En fin l'huile mélangée est filtrée à travers des filtres presse. Ce traitement permet d'améliorer leurs qualités par décoloration et élimination des produits aisément oxydables.

I.6 Conclusion

Les différents travaux et études réalisés sur les diélectriques liquides, ont permis d'accumuler une quantité très importante d'informations. Cependant En résumé, l'huile minérale pour transformateur doit avoir les qualités suivantes [11,14] :

- Forte rigidité diélectrique.
- Stabilité thermique dans une large gamme de température.
- Faible tension superficielle et une faible viscosité, ce qui améliore les propriétés de diffusion dans le solide (imprégnation).
- Grande pureté, ce qui entraîne une homogénéité et une bonne reproductibilité de la rigidité diélectrique.
- Non polaire, ce qui conduit à une faible dissociation d'espèces et une faible contamination.
- Non toxique et biodégradable, donc conforme à la loi en vigueur sur la protection de l'environnement.
- Grand indice d'aromaticité, ce qui lui confère de bonnes propriétés de dégassing.

Chapitre II

"Claquage des diélectriques liquides"

II.1 Introduction

Les isolants liquides ont une grande importance dans la technique de haute tension, car ils jouent un double rôle : isolation et refroidissement. On doit leur intégration en tant que diélectrique en 1887 par G. Westinghouse. Les huiles hydrocarbures sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie des transformateurs de puissance [15].

Ils présentent une bonne rigidité diélectrique (plusieurs fois supérieure à celle des gaz), des permittivité et pertes diélectriques très faibles. Cependant, leur principal inconvénient est leur inflammabilité, sans compter d'autres problèmes liés à la santé publique dont fait l'objet les PCB (polychlorobiphényles) [16].

Les études sur le mécanisme de la conduction et du claquage dans les liquides se sont développées de façon considérable depuis quelques décennies, car ces processus ont une grande importance dans de nombreux domaines contemporains de la physique, de la chimie, de l'électrotechnique et de la radiobiologie. Ces études sont étroitement liées à d'autres domaines très importants, comme la physique des plasmas, les semi-conducteurs, la physique et la technique de la résistance des matériaux au claquage électrique, etc ... [17].

Le claquage des isolants liquides diffère fondamentalement de celui des gaz, et des solides. Dans les huiles techniquement pures, le claquage est dû essentiellement à la présence d'impuretés, au phénomène de vieillissement, ou encore à la charge d'espace [18].

II.2 Claquage des liquides isolants

Le claquage des diélectriques liquides diffère fondamentalement de celui des gaz et des solides et l'étude de leur rupture diélectrique est très complexe puisqu'elle fait appel à des lois fondamentales sur la matière.

Les connaissances acquises, surtout ces trois dernières décennies, n'ont pas permis d'établir une théorie unifiée capable d'expliquer le phénomène de claquage des milieux liquides dont les plus connus sont : le mécanisme de claquage électronique, basé sur un processus cumulatif d'ionisations et de collisions entre les électrons et les molécules du liquide, le mécanisme de claquage où la phase gazeuse joue le rôle de détonateur et le mécanisme de claquage dû à l'établissement d'un pont de particules entre les électrodes [3].

On distingue généralement le claquage électronique et le claquage thermique tout en notant que la distinction n'est pas forcément évidente car un claquage électronique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique et inversement. Un

claquage thermique, est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique [4].

Ces deux processus sont les principaux mécanismes qui peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides. Le troisième, peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures, en suspension dans le diélectrique liquide. Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui concernant les huiles de transformateur soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures [3].

II.2.1 Mécanisme électronique

Les premiers travaux proposaient d'adopter les résultats acquis dans les gaz, pour expliquer le claquage dans les diélectriques liquides. Ils supposèrent que des mécanismes d'ionisation de type ont basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications électroniques, intervenaient dans le claquage des diélectriques liquides [19].

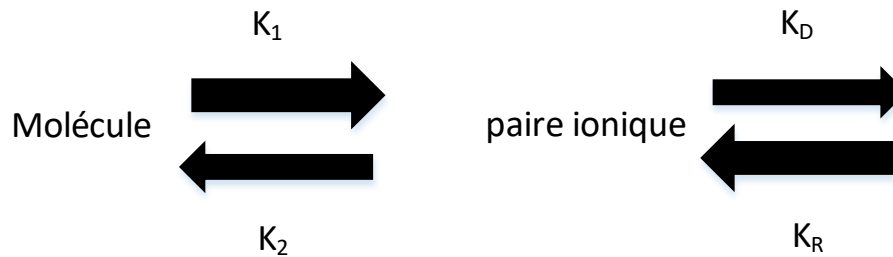
Le processus de multiplication électronique a été proposé à l'origine par Townsend, pour décrire les phénomènes d'amorçage dans les gaz. Ce processus est une conséquence de l'accélération d'un ou plusieurs électrons par le champ, sur une distance égale au libre parcours moyen. Le gain d'énergie acquis par ces charges permet l'ionisation à la suite de collisions, d'une ou plusieurs molécules [20].

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

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

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

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



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

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

L'application d'un champ électrique dans le liquide modifie les énergies d'interaction entre les ions dans le liquide. La théorie cinétique exacte du champ sur la dissociation des paires, est due à Onsager. Elle prévoit que K_D varie avec la valeur absolue du champ alors que K_R est indépendant du champ [20].

Des porteurs de charges peuvent être aussi créés aux électrodes, soit par décharge des ions du liquide sur les électrodes, soit par création de nouveaux ions. La décharge d'ions cause la formation dans le liquide, d'une charge d'espace de signe opposé (hétérogène) à l'électrode voisine, alors que l'injection s'accompagne d'une charge d'espace de même signe (homocharge). L'échange de charges à l'électrode peut donc être caractérisé par la mesure du champ électrique près des électrodes [21].

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

Plusieurs mécanismes de création d'ions peuvent être envisagés [21] :

- Injection d'électrons par la cathode et capture des électrons : les liquides ne sont pas suffisamment purs dans leurs conditions d'utilisation, pour que leur conduction soit électronique et les électrons soient immédiatement piégés par des composés accepteurs d'électrons (O₂,....) ;
- Ionisation du liquide ;
- Réaction électrochimique.

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

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

II.2.2 Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse

Dans le liquide ultra pur et en géométrie pointe-plan, sous tension continue, il a été observé qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan. Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation des bulles, soit de la cavitation [22]. Certains auteurs supposent que les cavités gazeuses existent à priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités [5].

II.2.3 Mécanisme de claquage par pont

Les grands volumes de liquides, utilisés dans l'industrie électrique, contiennent généralement des impuretés sous forme de particules en suspension : fibres, poussières, débris métalliques, gouttelettes d'eau, bulles de gaz,... Ces particules (isolantes ou conductrices) présentes dans le liquide, sont responsables d'une diminution significative de sa rigidité diélectrique. Sous l'action d'un champ électrique, les particules sont attirées vers les zones de champ intense pour former des ponts entre les électrodes, facilitant ainsi le claquage du liquide. Dans le cas des particules déformables (bulles de gaz, gouttelettes d'eau), le claquage peut intervenir suite à l'élongation de ces particules reliant ainsi les électrodes par un canal, après ionisation [15].

II.2.3.1 Origine des particules

Du point de vue de leur origine, les particules de faibles dimensions présentes dans les transformateurs peuvent être classées en trois catégories [5] :

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

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

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

II.2.3.2 Teneur des particules

D'après une analyse quantitative des particules recueillies en filtrant une huile de transformateur, 94% étaient combustibles (c'est à dire constituées de fibres de cellulose), le reste étant constitué de matériaux ou de poussières. Durant le service, la teneur en particules,

telles que les fibres de cellulose, de métal et de résine, doit vraisemblablement augmenter lentement par suite de vieillissement des métaux et de l'usure due à la circulation forcée de huile pour le refroidissement. En outre, en cas de situation anormale, comme l'échauffement local ou l'existence de décharges partielles, la teneur en particules de carbones tend à augmenter.

II.2.3.3 Rôle des particules dans le claquage

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

- Formes, dimensions, permittivité et conductivité des impuretés ;
- Concentration des impuretés entre les électrodes ;
- Intervalles et formes des électrodes ;

Valeurs des charges libres existant à la surface des particules.

II.2.3.3.a -Particules isolantes

Les particules isolantes, ayant la permittivité plus grande que celle du liquide, seraient attirées sous l'action du champ électrique vers les régions de champ intense et formeraient des ponts entre les électrodes. La rupture, dans ce cas, serait le résultat soit de l'échauffement produit par effet joule dans le pont qui est plus conducteur que le liquide, soit par la grande intensité locale du champ qui apparaît juste avant l'achèvement du pont [20].

II.2.3.3.b -Particules conductrices

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

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

II.2.4 Longues décharges dans les liquides

Dans un liquide, des intervalles de quelques centimètres sont considérés comme longs intervalles. Le mécanisme d'évolution des décharges pour de tels intervalles est similaire dans ses caractéristiques générales, à celui observé dans l'air pour des intervalles de l'ordre de quelques mètres. Ce mécanisme est appelé comme dans le gaz : mécanisme de streamer-leader [22].

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

- Une phase de génération ou peuvent se manifester simultanément ou successivement des phénomènes de diverses natures (électrique, optique, hydraulique,...), caractérisée par un temps t_g dit de génération, pendant lequel apparaît au voisinage d'une électrode, une perturbation revêtant la forme d'arborescence dénommée « streamer » dans la formulation anglaise.
- Une phase de propagation durant laquelle se développe la perturbation précédemment créée. Cette phase a été de loin la plus étudiée et est caractérisée par un temps t_p dit de propagation.

Les streamers sont caractérisés par leur indice de réfraction qui est différent de celui du liquide. Ils produisent des courants et émettent de la lumière, de même que leur propagation est accompagnée d'ondes de choc quelle que soit leur vitesse.

II.3 Facteurs influents sur la rigidité diélectrique des liquides

II.3.1 Paramètres électro géométriques

L'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la tension de claquage (Figure II.1) [21]. Par ailleurs la rigidité diélectrique du liquide diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes. En champ non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain niveau, une densité d'énergie sous forme d'impulsions est injectée à partir d'aspérités de la pointe. Le rayon de courbure de la pointe joue un rôle

important sur la nature et la durée des phénomènes prédisruptifs, plus ce rayon est faible, plus l'intensité du champ électrique obtenu est considérable.

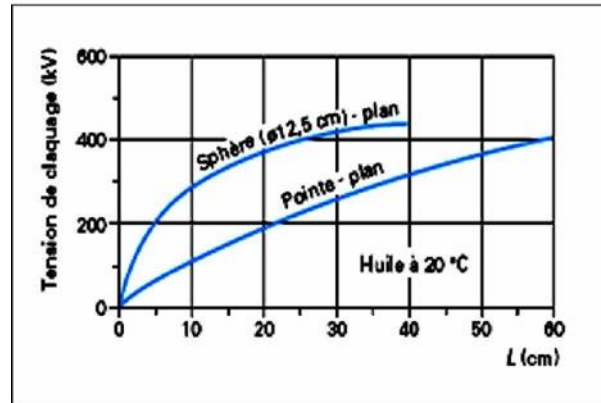


Figure II.1: Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan.

II.3.2 Pression hydrostatique

Il est connu depuis longtemps que la pression hydrostatique a un effet considérable sur la tension de claquage des diélectriques liquides ; celle-ci est d'autant plus élevée que la pression est accrue [20].

II.3.3 Température

L'augmentation de la température entraîne la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent [20].

II.3.4 Tension

Le temps de montée de la tension, sa polarité, sa durée et son amplitude affectent énormément la vitesse de propagation et la forme du streamer. Pour des niveaux de tension légèrement supérieurs à la tension seuil de génération, plusieurs auteurs confirment l'apparition de bulles gazeuses au voisinage de l'électrode pointe [20].

II.3.5 Humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier (Figure II.2). Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes, suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau-huile [23].

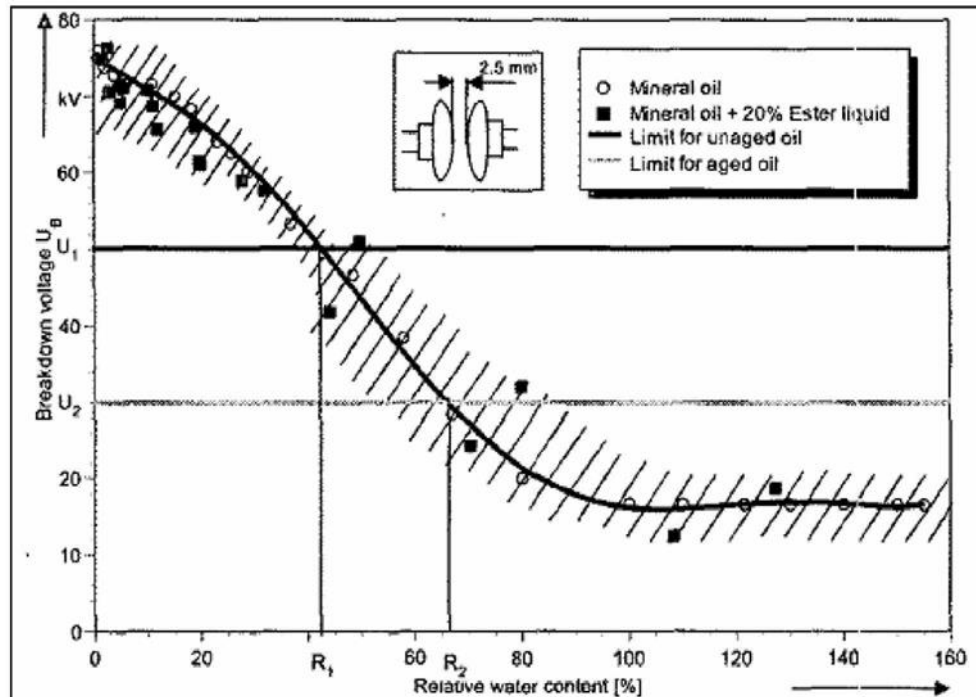


Figure II.2: Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau, dans l'huile minérale et dans une solution composée de l'huile minérale avec 20% d'ester liquide.

II.4 Influence d'une barrière isolante dans les intervalles d'air

L'air en tant que diélectrique, est largement rencontré comme unique isolation entre électrodes dans la technique de haute tension. Ces électrodes peuvent être soit les parties métalliques de différents appareillages sous tension, soit des conducteurs de lignes aériennes ou des bornes à haute tension dans les laboratoires d'essais.

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

pointe-plan est la plus défavorable en ce qui concerne la rupture diélectrique de l'air qui se manifeste dans ce cas aux plus faibles tensions quand la polarité de la pointe est positive.

La présence d'un écran isolant entre les deux électrodes transforme l'intervalle d'air initial en un système stratifié composé de deux diélectriques (air - barrière) et l'avantage fourni par l'utilisation des barrières est l'augmentation de la rigidité diélectrique du système [1].

II.4.1 Influence du type de tension

La rigidité diélectrique dépend de l'amplitude et de la forme de la tension appliquée aux électrodes.

Dans le cas des petits intervalles d'air (inférieurs à 1m), beaucoup de travaux de recherches ont été effectués aussi bien sous tension continue, que sous tension alternative ou de choc de foudre [1]. En ce qui concerne les longs intervalles d'air, les travaux ont été surtout effectués sous la contrainte de tension la plus défavorable, représentée par les chocs positifs de manœuvres à durée de front relativement longue [1,24].

II.4.2 Influence de la polarité de l'électrode pointe

Comme il a été déjà mentionné, l'influence de la barrière était particulièrement remarquée pour une polarité positive ou dans le cas de la pointe sous tension alternative.

Avec la polarité négative, la décharge est en étapes pour toutes les positions de la barrière, et aucune augmentation de la tension disruptive n'est obtenue. Les décharges apparaissent dans ce cas des deux cotés de la barrière isolante. L'étincelle a lieu quand les deux décharges de part et d'autre de l'écran se rencontrent, mais l'effet de la barrière est négligeable [1].

En définitif, l'amélioration n'a été obtenue que pour une polarité positive de la pointe, ou à 50 Hz.

II.4.3 Influence de la position de la barrière

La tension disruptive des petits intervalles d'air allant jusqu'à 40 cm varie essentiellement en fonction de la position de la barrière [25]. Cette tension passe par un maximum quand la barrière est près de la pointe.

Certain travaux [1,24, 25] ont montré que pour des intervalles d'air «d'» de 15 à 30 cm, le maximum de tension est obtenu en position où la barrière est colée avec la pointe ($a/d=0\%$; a : distance entre la pointe et la barrière, d : longueur de l'intervalle inter électrodes).

Ce résultat est valable dans le cas où la largeur des barrières n'excède pas 50 cm.

Pour les moyens intervalles d'air de 40 cm à 200 cm, l'introduction d'une barrière isolante à surfaces propres conduit à une augmentation considérable de la tension disruptive du système quand elle est située particulièrement à 20% de l'intervalle à partir de la pointe [1,24].

II.4.4 Influence de la largeur de la barrière

Quand la largeur de la barrière n'est pas suffisamment grande par rapport à la distance inter-électrodes, la rigidité diélectrique de l'arrangement (pointe-barrière- plan) dépend de la largeur du canal de décharge. Géométriquement, cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière-plan.

L'augmentation maximale de la tension disruptive, dans ce cas, est obtenue quand la barrière est pratiquement en contact avec l'électrode pointue [24].

Les types des décharges dépendent essentiellement de la distance entre électrodes et de la largeur de la barrière.

II.4.5 Influence de l'épaisseur et de la permittivité

Ces deux paramètres ont une influence sur la distribution des porteurs positifs et sur la chute de tension sur la surface de la barrière. Quand ces deux paramètres auront des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, mais l'influence de ces paramètres est beaucoup moins importante par comparaison à l'effet de la largeur et de la position de la barrière [1].

II.4.6 Influence de la barrière trouée

A.Boubakeur [24] a travaillé sur des barrières trouées en leur centre. Il a remarqué que la barrière a un rôle d'obstacle géométrique au développement direct de la décharge et que la

charge d'espace sur la barrière joue le rôle d'obstacle électrostatique en ce qui concerne la position des trous sur la barrière. En effet, la décharge ne tend pas à passer par un trou de faible diamètre ($d_j < 20\text{mm}$), probablement à cause de la forte concentration de la charge d'espace au centre de la barrière. Ainsi la décharge contourne la barrière au lieu de suivre le plus court chemin, passant par le trou.

II.4.7 Influence du matériau de la barrière

M. V. Sokolova [1] a effectué des mesures des courants de décharges pour des intervalles d'air avec différents matériaux de la barrière. L'analyse des oscillogrammes a montré que chaque impulsion de courant a une structure complexe avec un caractère irrégulier. Ceci reflète le processus de décharge, la décharge se fait sous forme de micro impulsions consécutives. Les deux matériaux utilisés ont la même épaisseur et la même permittivité, mais ils produisent des effets différents sur la rigidité diélectrique de l'intervalle.

D'autres auteurs [1] ont étudié l'influence de la nature de la barrière (verre et plexiglas) lorsque la barrière est fixée sur l'électrode mise à la terre d'un système plan-plan. La tension de claquage avec barrière en plexiglas est supérieure à celle avec barrière en verre, cette différence serait due au fait que le claquage se produisait par décharge superficielle, celle-ci se développe plus facilement sur l'isolant de plus grande permittivité ($\epsilon_r \text{ verre} > \epsilon_r \text{ plexiglas}$).

II.4.8 Formes des décharges observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante

L'évolution et la forme des décharges [24, 26] peuvent être classées en deux types différents :

- Décharge directe
- Décharge par étapes.

Cette différence est liée aux paramètres définissant la barrière, notamment sa largeur, son épaisseur, sa nature, la résistance superficielle de ses deux surfaces, sa position dans l'intervalle et la distance pointe-plan.

II.4.8.1 Décharge directe

L'amorçage se fait en une seule étape : de la pointe vers le plan et on distingue deux cas :

II.4.8.1.a Cas ou la décharge perce la barrière

Ce cas est rencontré surtout quand la barrière est très large, assez mince et située à une distance proche de la pointe (électrode près de laquelle le champ est très intense) [1,24].

Quand la barrière est perforée, la décharge se prolonge comme dans le système sans barrière.

II.4.8.1.b Cas ou la décharge contourne la barrière

Pour un système pointe positive-plan avec barrière, les streamers [24] partant de la pointe suivent le trajet : « pointe-bord de la barrière- plan ». Ceci est constaté quand l'écran n'est pas suffisamment large ou quand une importante concentration de charges électriques de signes positifs se trouve répartie sur la surface de la barrière.

Dans ce dernier cas, la décharge se voit déviée vers le bord de l'écran à cause de l'existence de forces électriques répulsives [24]. (Figure II.2.1-a)

La mise en évidence de cette forme de décharge a été observée grâce à l'utilisation de trous au milieu de la barrière. Jusqu'à certains diamètres, le trou n'a aucune influence sur le trajet de la décharge qui reste toujours le même: « pointe-bord de la barrière- plan ». Ainsi, il a été observé que l'existence d'une décharge directe pour des barrières relativement larges est liée surtout à la polarité de la pointe ainsi qu'à la présence de forces électrostatiques à la surface de séparation de deux milieux isolants (air-barrière) [1,24].

II.4.8.2 Décharge par étapes

Cette forme de décharge se rencontre quand la barrière est très large et n'est pas trouée. L'amorçage s'effectue en trois étapes quand la pointe est positive [24].

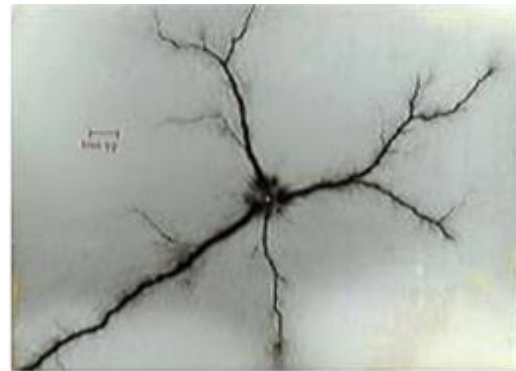
En premier lieu, on distingue l'effet couronne suivi de la décharge pointe-barrière qui constitue la première étape de l'amorçage.

Ensuite, pour un niveau de tension supérieur, on arrive à la seconde étape qui est le contournement de la barrière par les décharges glissantes (Figure II.3-b), et finalement, la troisième et dernière étape est atteinte quand la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan (figure II.3-c).

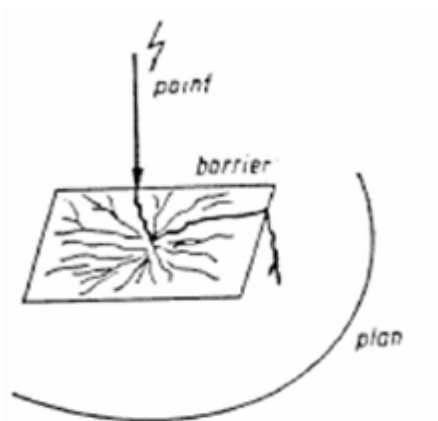
Pour une pointe négative, il existe quatre étapes [24], la décharge s'effectue de la pointe vers la barrière. Pour un niveau de tension supérieur, on a le contournement de la barrière par les décharges glissantes. D'autre part, à partir de l'électrode plane apparaît une décharge se dirigeant vers l'autre surface de la barrière et finalement le claquage s'effectue après la rencontre des deux décharges venant de part et d'autre de la barrière (figures II.3-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.3 : Décharge directe et par étapes (décharge glissante)

- (a): décharge directe à 50Hz (intervalle de 1m)
- (b): Décharge glissante sous tension de choc de foudre, photographie de contact
- (c): Décharge par étapes
- (d): Décharge par étapes dans le cas de la pointe sous tension de choc négatif

II.5 Conclusion

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

Chapitre III

*"Influence d'insertion
d'une barrière isolante
d'ans les intervalles
d'huile"*

III.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les techniques expérimentales réalisées au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger par [2], et les résultats obtenus concernant l'étude diélectrique de l'huile de transformateur sous tension alternative 50 Hz, en présence d'une barrière isolante[2]. Nous nous sommes intéressés d'étudier :

- l'influence de la distance inter-électrodes et du rayon de courbure de la pointe sur la tension de claquage du système sans barrière.
- l'influence de l'insertion, de la position, du diamètre, de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage du système avec barrière.

III.2 Circuit d'essais

Le circuit d'essais (Figure III.1) utilisé par [2] au laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique d'Alger comprend une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque HEAFELY, un modèle expérimental (objet d'essai), des circuits de mesures et de protection.

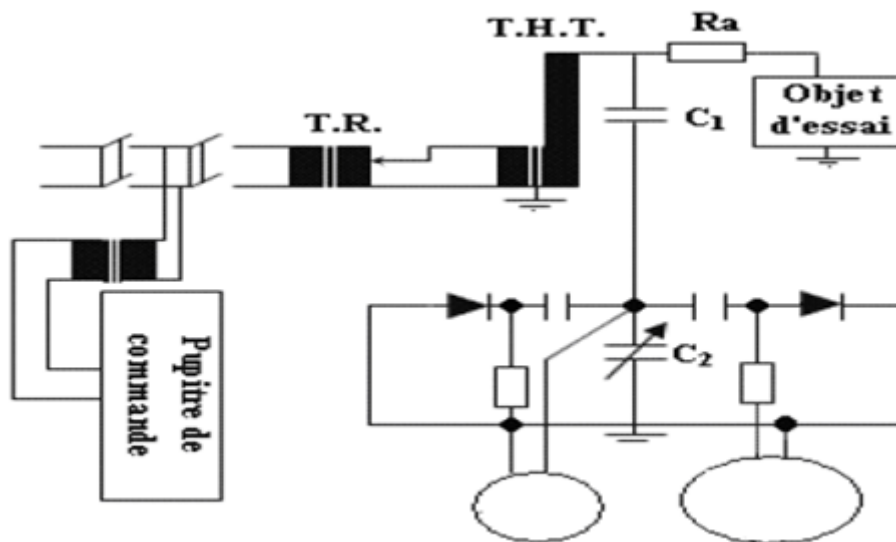


Figure III.1 : Dispositif expérimental

III.2.1 Station d'essai

Cette station d'essais comprend les organes suivants :

❖ Un transformateur de réglage

Il permet le réglage de la tension à la sortie du transformateur d'essai de zéro à la pleine tension indépendamment de la charge et d'une façon continue. Le réglage peut se faire, soit manuellement (à l'aide d'un volant), soit à l'aide d'un moteur dont le fonctionnement est commandé à partir du pupitre. Ses caractéristiques sont :

- Tension primaire nominale : $U_{1n} = 220 \text{ V}$ (50 Hz).
- Tension secondaire réglable de 0 à 500 V.
- Puissance apparente nominale : $S_n = 50 \text{ kVA}$.

❖ Un transformateur d'essais

Il délivre la tension appliquée à l'objet d'essai. Il est du type monophasé, ces caractéristiques sont les suivantes :

- Tension primaire $U_{1n} = 0.5 \text{ kV}$ (50Hz).
- Tension secondaire nominale : $U_n = 300 \text{ kV}$.
- Puissance apparente nominale : $S_n = 50 \text{ kVA}$.
- Tension de court-circuit : $U_{cc} = 5.46 \%$.
- Résistance d'amortissement : $R_a \approx 30 \text{ } \Omega/\text{kV}$ de tension d'essais, la résistance de l'enroulement B.T : $r_1 = 0.0365 \text{ } \Omega$, celle de l'enroulement H.T : $4893 \text{ } \Omega$.

❖ Un diviseur capacitif de tension

Il est alimenté par la tension secondaire du transformateur d'essai et délivre une tension réduite aux bornes des voltmètres installés sur le pupitre de commande. Le diviseur capacitif est formé d'une capacité H.T ($C_1 = 400 \text{ pF}$), en série avec une capacité C_2 variable permettant de réduire de 1/1000 la tension d'essai ($U_{lue} = U(C_2) = U(C_1)/1000$). Ce branchement permet d'obtenir les calibres de mesures : 75 kV, 150 kV et 300 kV.

La tension recueillie aux bornes de la capacité variable est mesurée à l'aide d'un voltmètre électrostatique donnant la valeur efficace de tension, et d'un galvanomètre échelonné en kVmax permettant la lecture de la valeur de crête de tension.

❖ Un pupitre de commande

Celui-ci est alimenté en 220 V indépendamment du régulateur de tension et du transformateur d'essai à travers un transformateur d'isolement. On y trouve les appareils de mesure permettant la lecture du courant au secondaire du transformateur de réglage, ainsi que des tensions de crête et efficace au secondaire du transformateur d'essai.

❖ Des appareils annexes de protection

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essai (la cage de Faraday). Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250 A. Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

III.2.2 Cellule d'essais

La cellule d'essais (Figure III.2) est une cuve de 50 cm de longueur, 50 cm de largeur, 70 cm de hauteur. Ses parois sont en plexiglas d'épaisseur 1.5 cm. La cellule contient 175 L d'huile de transformateur et un système d'électrode pointe-plan, monté horizontalement dans la cuve. Cette dernière est posée sur une table en bois à 80.6 cm du sol.

Le système d'électrodes est constitué d'une pointe et d'un plan. L'électrode pointe de forme conique est en laiton de différents rayons de courbure (1, 2, 3, 4, 5 et 6mm). Elle est montée sur une tige mobile en acier. L'électrode plane est un disque en acier de 35 cm de diamètre. La distance inter-électrodes est ajustable et peut varier de 0 cm à 13 cm.



Figure III.2 : Cellule d'essais

III.2.3 Les Paramètres utilisés

d : la distance inter électrodes.

a : la distance qui sépare la barrière de l'électrode pointe.

D : le diamètre de la barrière

a/d : la position relative de la barrière.

e : l'épaisseur de la barrière.

r_p : le rayon de courbure de l'électrode pointe.

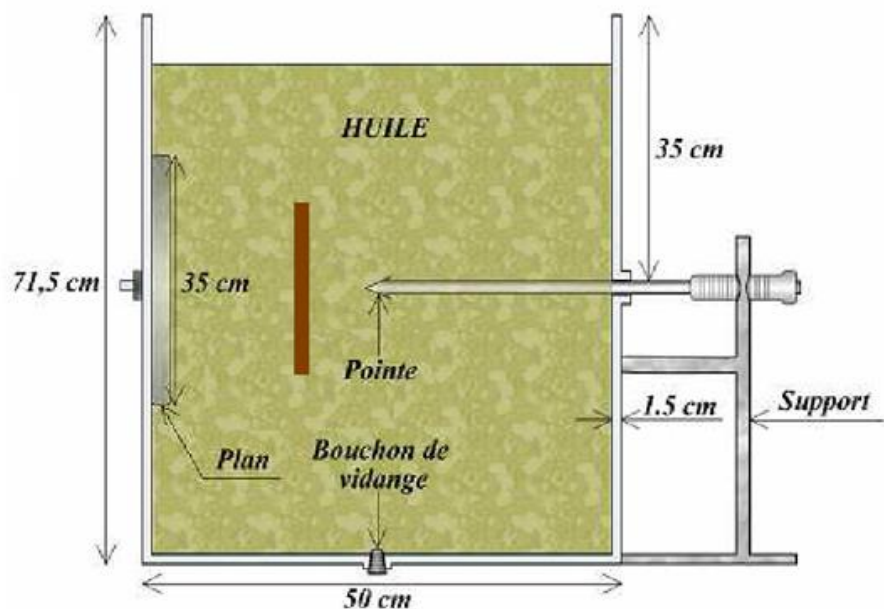


Figure III.3 : Schéma de la cellule d'essais

La barrière (Figure III.3) est un isolant solide en presspahn de forme circulaire, de différents diamètres (10 cm, 14 cm, 20cm). Elle est réalisée de telle sorte qu'elle soit maintenue verticalement et déplacée sur les parois du bac, pour obtenir les différentes positions de la barrière entre les deux électrodes.

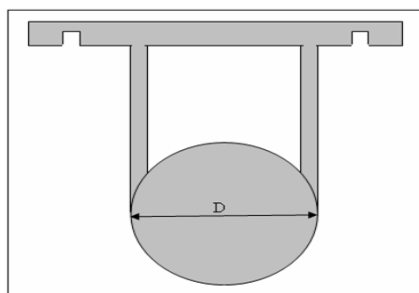


Figure III.4 : Forme de la barrière utilisée

III.2.4 Présentation de l'huile

L'huile minérale dénommée « Borak 22 » est de type naphthénique. Celle-ci obéit à des conditions de stockage rigoureuses dans des fûts étanches, en vu de sa protection de la dégradation et de l'humidité environnante.

En prend l'huile "BORAK22" :

| Propriétés électriques | Unité de mesure | Exigence de la norme Huile neuve | Norme | Valeur mesurée |
|--|--------------------|--------------------------------------|-------------|----------------|
| 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 |
| Propriétés physiques | | | | |
| Aspect | | Limpide et exempte de matière solide | CEI 296 | Limpide |
| Viscosité cinématique à 40°C | mm ² /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 |
| Propriétés chimiques | | | | |
| 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 BORAK22.

III.3 Résultats et interprétations

III.3.1 Etudes sans barrière

Les études de claquage effectués sont des essais préliminaires. Nous avons exploité ces résultats pour les comparer à ceux avec barrière pour voir l'influence des différents paramètres sur la tension de claquage du système avec barrière.

III.3.1.1 Effet de la distance inter-électrodes

La figure III.5 représente la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour un rayon égal à 6 mm.

Les études sont réalisées pour différentes distances inter électrodes (1, 2, 4, 6, 8, 10 et 12cm), avec une pointe ayant 6 mm comme rayon de courbure.

Nous concluons que l'augmentation de la distance inter-électrodes provoque un accroissement de la tension de claquage avec la fixation du rayon de courbure. (Figure III.5).

Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux trouvés par d'autres auteurs sous tension alternative [20-21] [27] et impulsionnelle en polarité positive [3].

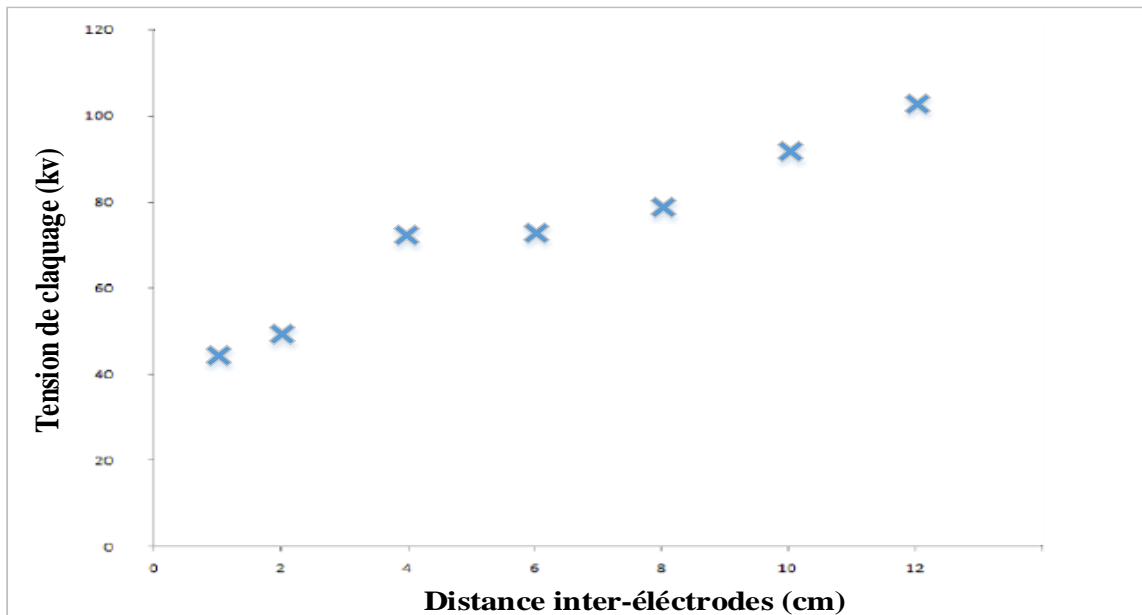


Figure III.5 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour un rayon égal à 6 mm

III.3.1.2 Effet du rayon de courbure de la pointe

Dans ce cas, nous avons étudié la variation de la tension de claquage en fonction des rayons de courbure de la pointe, pour différents distances inter électrodes (Figure III.6).

Nous observons que le rayon de courbure de la pointe affecte la tension de claquage. Il ressort de cette courbe (Figures III.7, 8), que l'influence du rayon de courbure est significatif et remarquable pour les petites distances inter électrodes (1 2 4 et 6cm), par contre cette influence est presque négligeable pour les grandes distances inter électrodes.

Nous concluons que l'augmentation du rayon de courbure de la pointe accroît l'uniformité du champ dans l'intervalle d'huile considéré.

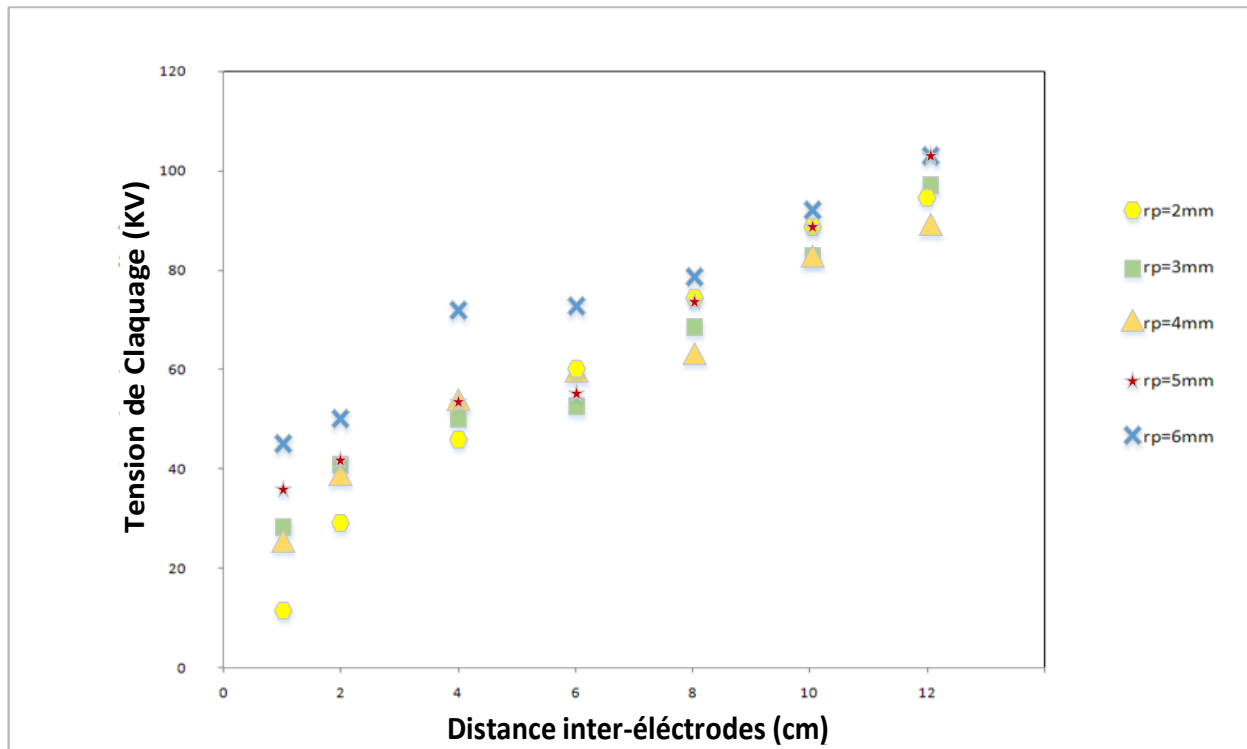


Figure III.7: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes, pour différents rayon de courbure de la pointe

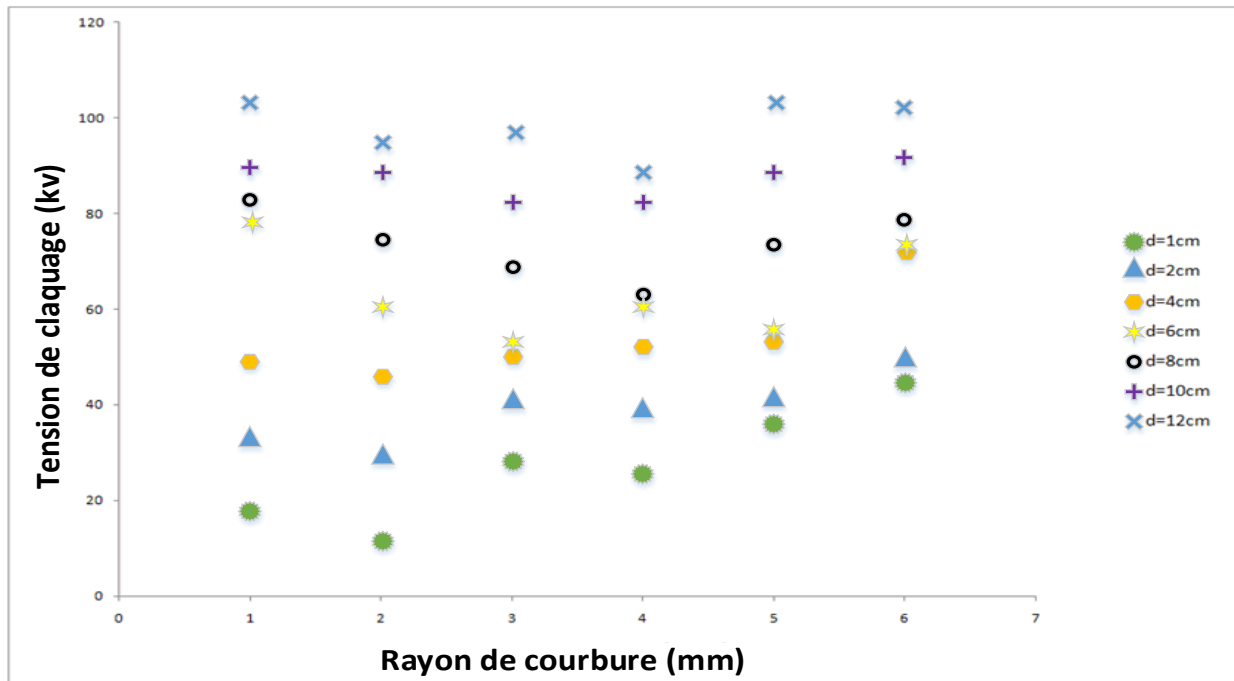


Figure III.8: Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différents distances inter électrodes

III.3.1.3 Effet de l'insertion de la barrière

Pour étudier l'effet de l'insertion de la barrière, nous avons procédé à une comparaison entre les tensions de claquage des deux systèmes (avec et sans barrière). Pour le système avec barrière, nous avons utilisé une barrière de presspahn ayant 20cm comme diamètre, et 2mm comme épaisseur. Cette barrière est maintenue perpendiculaire à l'axe portant l'électrode pointe, l'essai avec barrière a été effectué pour $a = 0.2 d$.

La figure III.9 représente la variation de la tension de claquage en fonction de la présence de la barrière (diamètre et épaisseur fixe)

La présence de la barrière nous donne un système plus rigide car il augmente d'une façon très importante la tension de claquage. Dans les différentes distances inter électrodes presque 50 kv pour la distance 10 cm et 15 kv pour la distance 4 cm parce que la barrière joue un rôle d'un obstacle géométrique et divise le système pointe-plan en deux sous-systèmes : l'un pointe-barrière et l'autre barrière-plan. Ce dernier est considéré comme un système plan-plan, qui est le système le plus rigide.

Nos résultats coïncident avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [3,24].

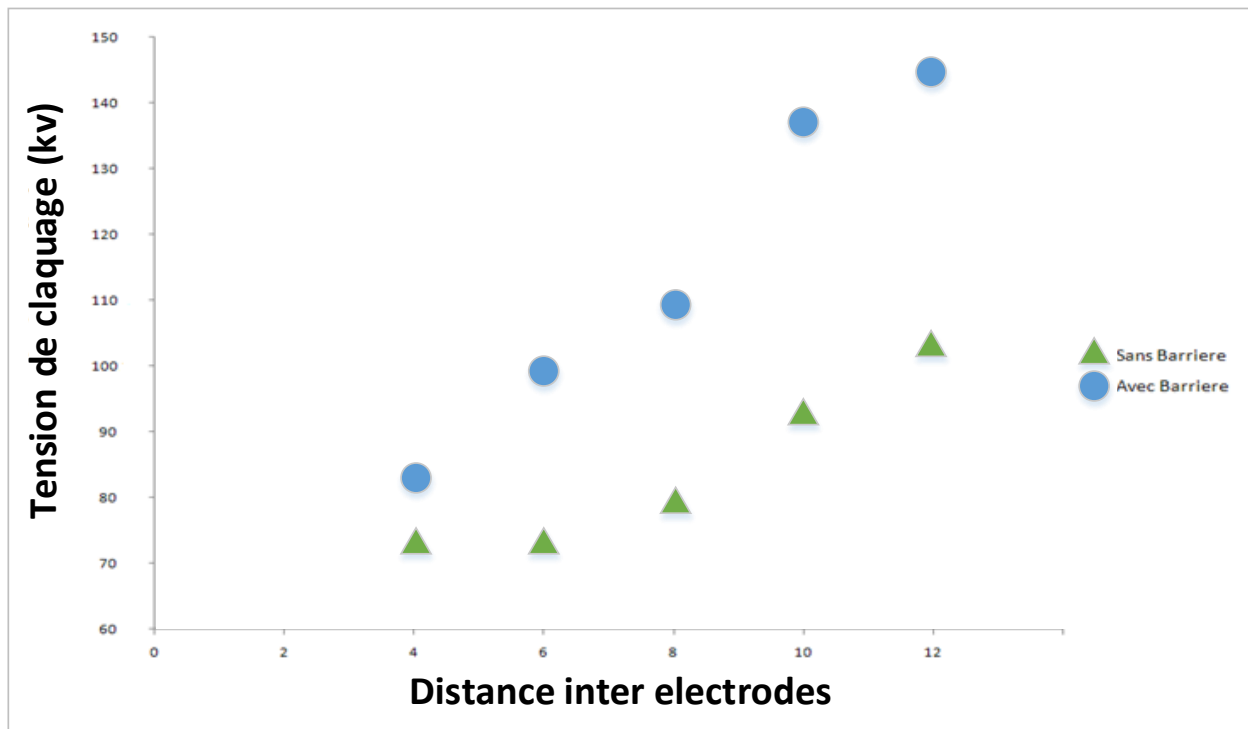


Figure III.9: Variation de la tension de claquage en fonction de la présence de la barrière
(Pour une barrière $D=20\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $a=0.2 d$)

III.3.1.4 Effet du diamètre de la barrière

Ces essais sont réalisés en utilisant des barrières ayant différents diamètres ($D=10, 14$ et 20cm), pour différents distances inter électrodes variant de 1 à 12cm.

Dans les figures III.12. 13 que représente la variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière pour différents positions de barrière. Nous observons que la tension de claquage augmente avec l'augmentation du rayon de la barrière a cause de l'augmentation de la longueur minimale de fuite de la décharge définie par la somme des distances pointe- bord de la barrière, épaisseur de la barrière et distance entre la barrière et le plan .

Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [8,20].

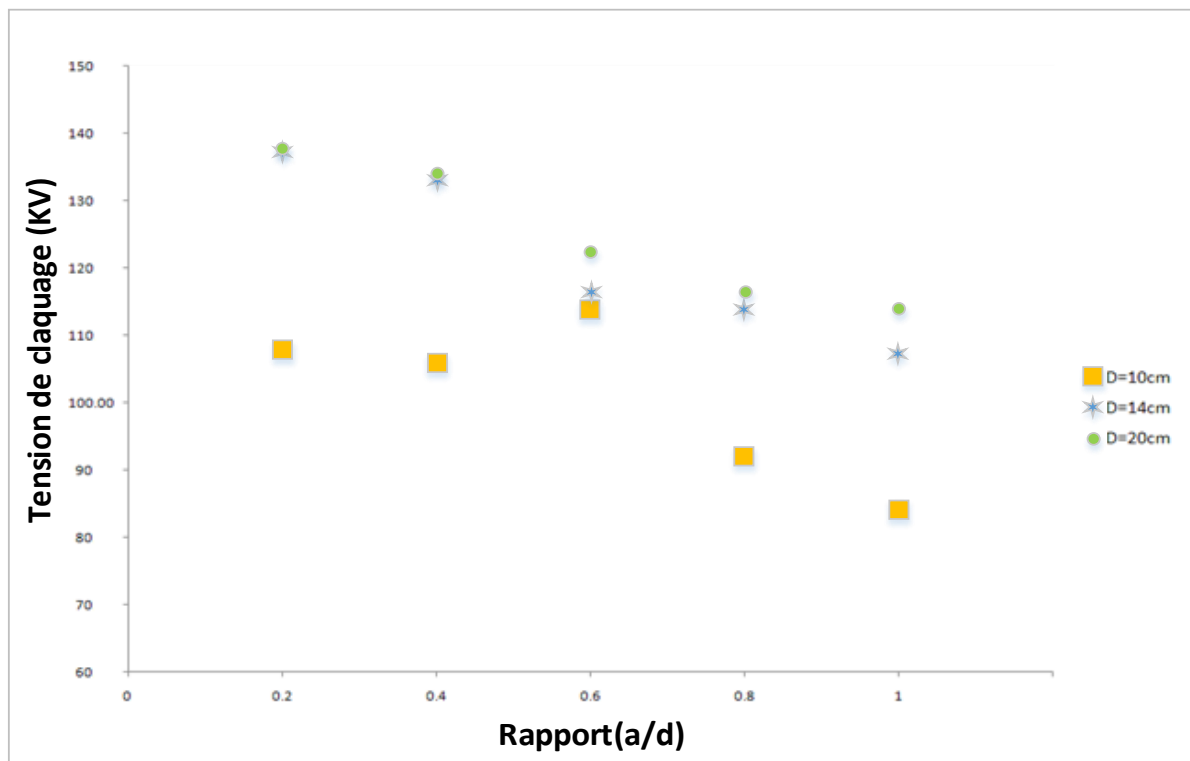


Figure III.12: Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière pour différents positions de barrière ($e=2\text{mm}$ $d=10\text{cm}$)

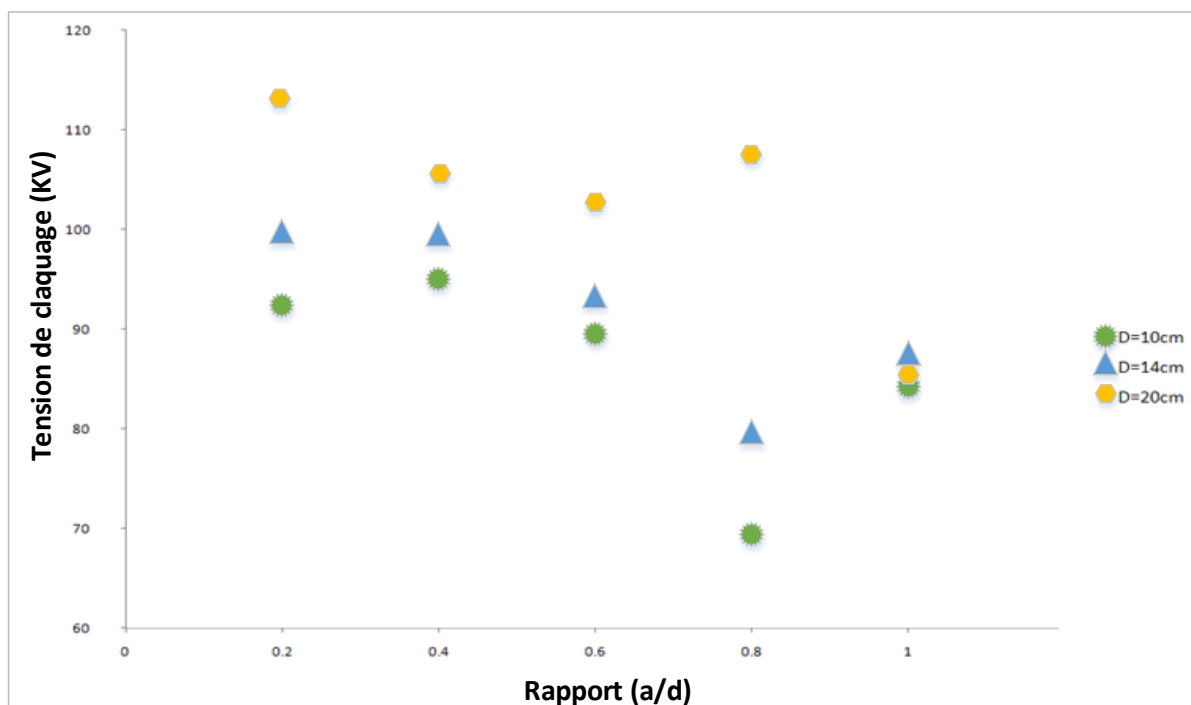


Figure III.13: Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière pour différents positions de barrière ($e=2\text{mm}$ et $d=6\text{cm}$)

III.3.1.5 Effet de l'épaisseur de la barrière

L'objectif de ces essais est d'analyser l'influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage des systèmes d'isolation. Le système d'électrodes est toujours le même et la distance inter électrodes est maintenue constante égale à 12cm. La barrière est en presspahn de diamètres différents 10 et 14cm.

La (Figures III.14, 15) représente Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière, nous concluons que l'épaisseur n'a pratiquement pas d'impact, aussi bien pour les grandes distances que pour les petites distances, pour les deux épaisseurs choisies 2 et 4mm. Ce résultat a été confirmé par d'autres chercheurs [28]. Par contre, d'autres chercheurs [9] ont trouvé que l'augmentation de l'épaisseur de la barrière entraîne une augmentation de la tension de claquage quelles que soient sa position entre les électrodes.

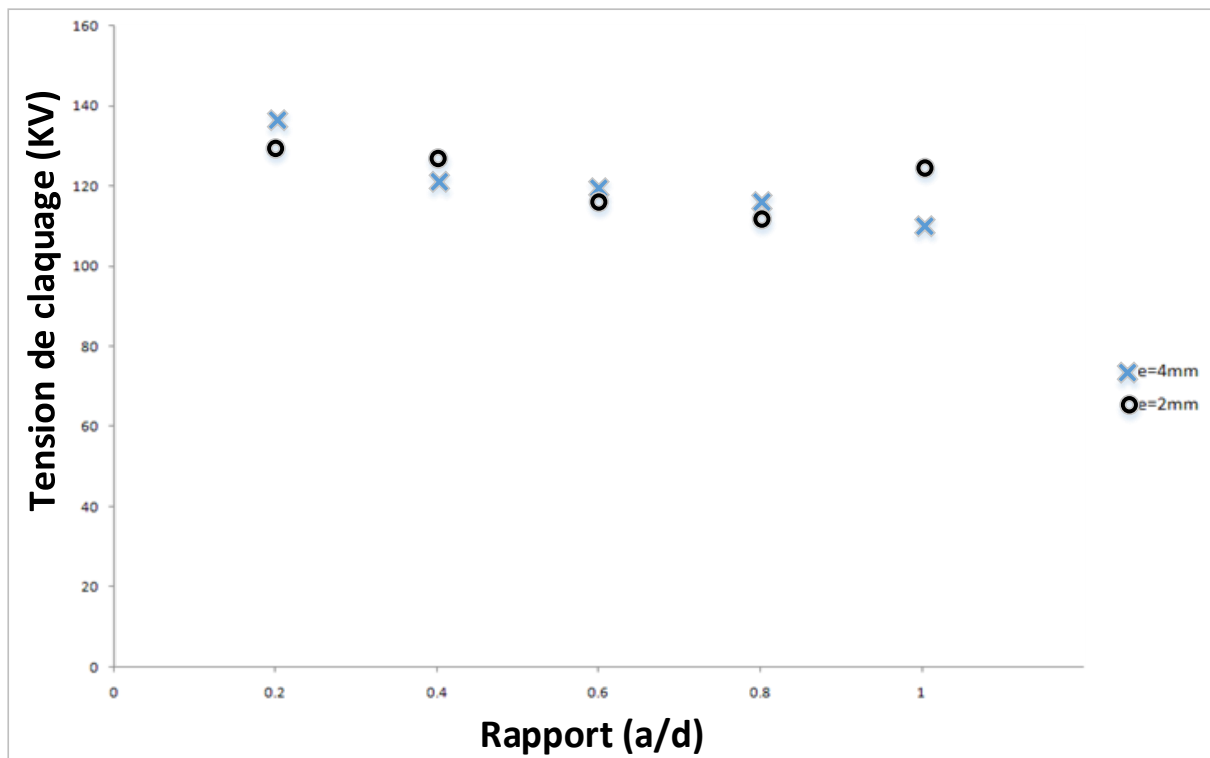


Figure III.14: Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière (D=10mm et d=12cm)

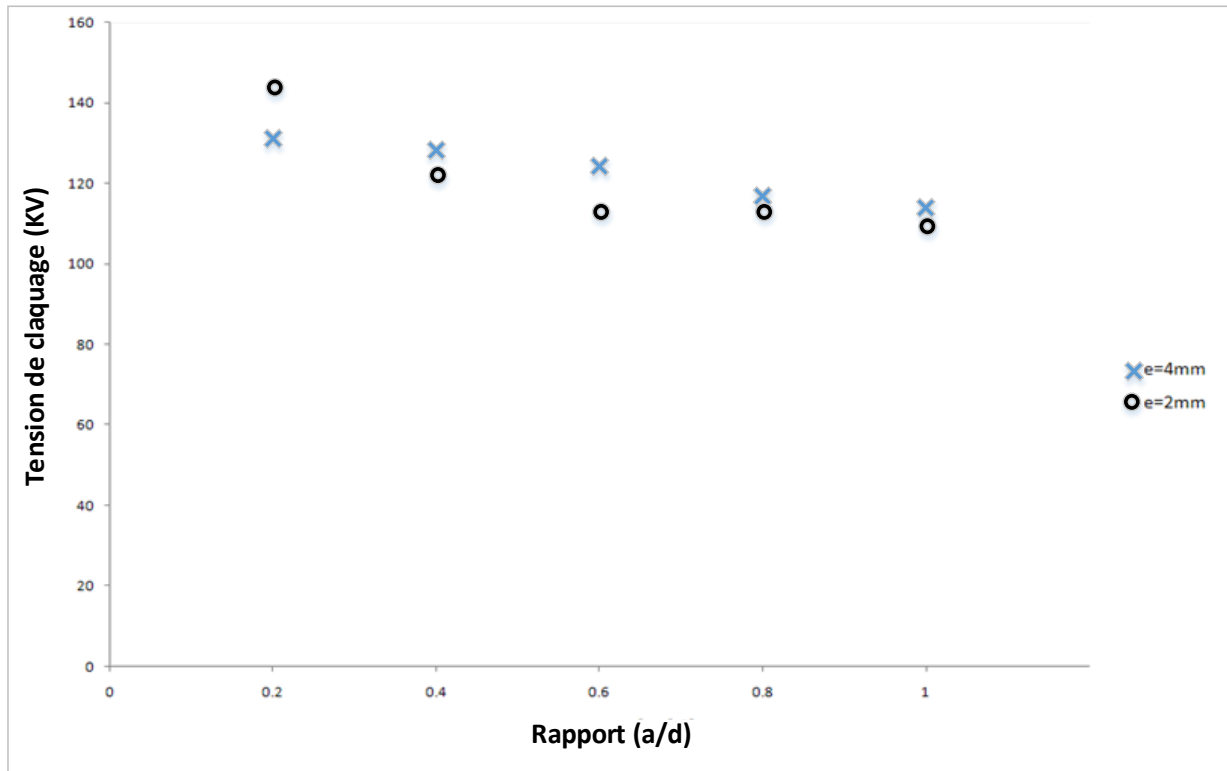


Figure III.15: Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière ($D=14\text{mm}$ et $d=12\text{cm}$)

III.3.1.6 Effet de la position de la barrière

Pour analyser l'influence de la position de la barrière sur la tension de claquage, nous avons utilisé deux barrières d'épaisseur égale à 2mm et de diamètre différents ($D=10$ et 14cm)

Les figures III.10 et III.11) montre la variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière

Il ressort des résultats obtenus, que l'influence de la barrière est très importante lorsqu'elle est proche de la pointe, ceci cause que l'insertion de la barrière conduit à uniformiser le champ entre la barrière et le plan. Cependant, lorsque la position relative de la barrière augmente (la barrière est proche de le plan) la longueur minimale de fuite de la décharge diminue ainsi que la tension de claquage.

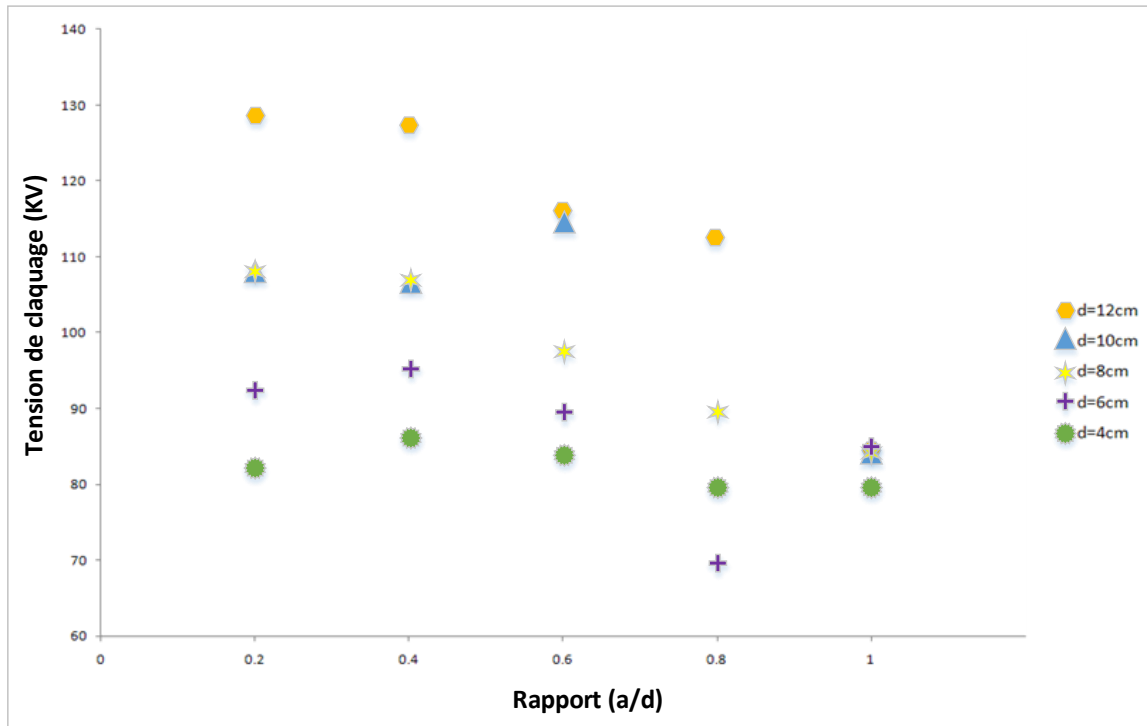


Figure III.10: Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière (e=2mm D=10cm)

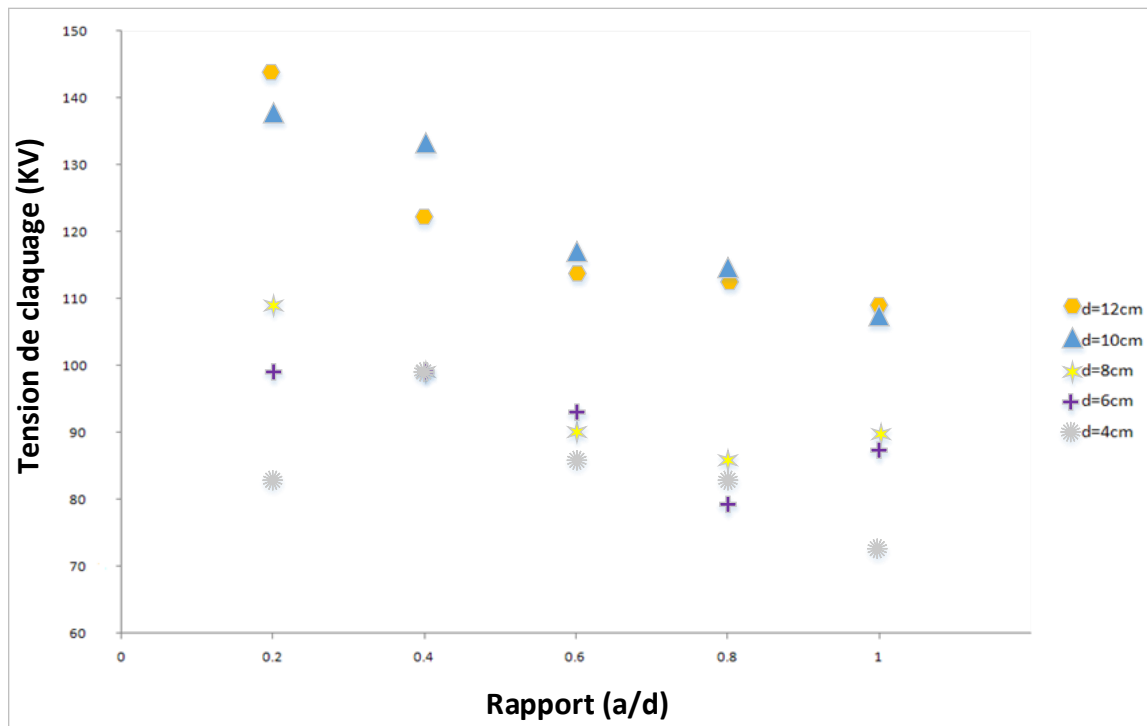


Figure III.11: Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière (e=2mm et D=14cm)

III.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'apporter une contribution qualitative à l'influence de certains paramètres électro-géométriques sur la tension de claquage de l'huile de transformateur dans une configuration pointe-plan sous tension alternative 50 Hz, en présence d'une barrière isolante.

Les études effectués ont permis, de visualiser l'influence de la distance inter- électrodes et le rayon de courbure de la pointe sur la tension de claquage. Ainsi, l'augmentation de la distance inter-électrodes engendre un accroissement de la tension de claquage, par contre l'influence du rayon de courbure n'est remarquable que pour les petites distance inter électrodes, c'est à dire là où le rayon de courbure a une valeur considérable par rapport à la distance inter électrodes, cependant, cette influence est pratiquement négligeable pour les grandes distances inter électrodes.

L'insertion d'une barrière isolante entre les deux électrodes conduit à augmenter la tension de claquage, cette augmentation est considérable lorsque la barrière est placé dans sa position optimale: au voisinage de la pointe. L'augmentation de diamètre engendre une augmentation de la tenue diélectrique, au contre, l'épaisseur de la barrière n'a pas d'influence sur la tension de claquage.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La recherche bibliographique répartie sur les deux premiers chapitres, nous a permis d'acquérir des connaissances sur les huiles isolantes en général, et d'approfondir la compréhension des mécanismes conduisant aux claquages des diélectriques liquides, ainsi que sur l'influence des barrières isolantes sur la tension de décharge disruptive dans les différents milieux (air et liquide).

Notre étude est en premier lieu, une contribution à la compréhension du comportement diélectrique d'une huile minérale en géométrie pointe-plan sous tension alternative (50Hz), en présence d'une barrière isolante callée entre l'électrode pointe et le plan.

Il ressort des différents résultats recueillis, les principales conclusions suivantes :

1- Dans les intervalles d'huile « pointe – plan », pour une tension alternative à fréquence industrielle, la barrière isolante à surface propre joue en premier lieu le rôle d'obstacle géométrique provoquant l'allongement de la décharge disruptive et en conséquence l'augmentation de la tension disruptive. Le trajet suivi par la décharge correspond à la distance entre la pointe, le bord de la barrière et le plan. L'efficacité de la barrière dépend principalement de sa position entre les électrodes, et de la distance inter électrodes. Cependant, la caractéristique de la tension de calquage en fonction de la position relative de la barrière (a/d) a une allure décroissante, elle a un maximum lorsque la barrière est placée au voisinage de l'électrode pointe. Cela est dû au fait que la barrière uniformise la distribution du champ électrique entre la barrière et le plan. D'autre part, la barrière joue le rôle d'obstacle géométrique à la décharge directe. En effet, nous avons observé expérimentalement qu'en présence d'une barrière isolante, la décharge se propage de la pointe vers le bord de la barrière, et ensuite vers l'électrode plane.

2- L'efficacité de la barrière dépend aussi de ses dimensions (diamètre et épaisseur), les résultats présentés dans le chapitre III montrent que plus le diamètre de la barrière est grand, plus le système d'isolation est rigide. Cependant nous avons trouvé que l'épaisseur n'a pratiquement pas d'influence.

REFERENCE

BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] **B. Boubekki**, « Mesure du champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre », Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2006.
- [2] **H. Rahali et F. Kadri**, «influence des barrières isolantes sur la tension de décharge disruptive des intervalles d'huile sous tension alternative » projet de fin d'étude pour obtention du titre d'ingénieur d'état en électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Alger, 2008
- [3] **S.Abdi, S.Zelmat**, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », Projet de Fin d'Etude, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juin 1998
- [4] **D.Khelil et S.Zoutat**, «étude des phénomènes de décharge électrique dans la Borak 22 sous tension alternative», Projet de Fin d'Études, École nationale polytechnique d'Alger, 2006
- [5] **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
- [6] **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.
- [7] **S.Bouazabia**, «Mécanismes de décharges dans les diélectriques liquides, cours de graduation», Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, 2001.
- [8] **Norme Internationale CEI 296**,«Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion», deuxième édition, 1982
- [9] **N.Berger**, « Liquides isolants en électrotechnique : présentation générale » Technique de l'Ingénieur, D2470, 2002.
- [10] **S.Bouazabia**, « Liquides diélectriques », cours de graduation, Ecole Nationale Polytechnique et Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, 2001.
- [11] **D.Ouakli, H.Brouri**, « Propriétés diélectriques de l'huile de transformateur au présence de gaz dissous », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, 1997.
- [12] **R.Tobazéon**, « Conduction électrique dans les liquides », Technique de l'ingénieur, D2430, 1996.
- [13] **S. E. Chitour**, « Raffinage du pétrole », Tome 01, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, OPU 1983.
- [14] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechniques: concepts et théories», Edition Eyrolles, Paris, 1986.
- [15] **Z.Djemai**, « Détermination de la dimension fractale des décharges électriques radiales sur les surfaces isolantes », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 1998.

- [16] **IgnocAdamczeski**, « Les phénomènes d'ionisation et de conduction dans les diélectriques liquides », Edition Masson et Cie, Paris 1968.
- [17] **A. Bérroual**, « Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension », Thèse d'Etat es Sciences Physiques. INPG, Grenoble, 1987.
- [18] **A. Zouaghi**, « Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [19] **S. Bouazabia**, « Claquage dans les diélectriques liquides : Génération et propagation des décharges dans les diélectriques liquides », Cours poste graduation, Département de l'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Alger, 2006.
- [20] **B. Moula**, « Comportement de l'huile de transformateur (Borak 22) sous tension alternative 50 Hz», Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2007.
- [21] **R. Tobazéon**, «Préclaquage et claquage des diélectriques liquides », Technique de l'Ingénieur, D2450, 1997.
- [22] **A. Boubakeur**, « Claquage des diélectriques liquides », cours quatrième année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.
- [23] **R. Tobazéon**, « Conduction électrique dans les liquides », Technique de l'Ingénieur, D2430, 2003.
- [24] **A. Boubakeur**, « Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan », Thèse de Doctorat, ENP. Varsovie, Pologne 1979.
- [25] **A. Boubakeur**, «Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe –plan». RozprawyElectrotechniczne (Académie Polonaise des Sciences), Vol.27, N°3, Varsovie, Pologne, 1981, pp 729-744.
- [26] **J. L. Jakubowski, A. Boubakeur**, «Rigidité diélectrique des moyens intervalles d'air dans les systèmes isolants pointe-plan avec barrière». Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, 10 séries des sciences, volume 28, N°9-10, 1980, pp.141-146.
- [27] **N. Berger**, « Liquides isolants en électrotechnique : présentation générale » Technique de l'Ingénieur, D2470, 2002.
- [28] **F.V.Topalis et I.A.Stathopulos**, « Barrier effect in small and medium air gaps », The International symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 1991.

Résumé

Notre travail porte sur l'étude de l'influence de la barrière isolante a l'intervalle de l'huile sous tension alternative à fréquence industriel 50 Hz, dans un système d'électrodes pointe-plan. L'huile utilisée dénommé Borak 22 a été étudiée pour différent paramètres tels que, l'influence d'insertion d'une barrièreisolante, effet de la distance inter-électrodes, effet du rayon de courbure de la pointe, effet de diamètre de la barrière. Les résultats de cette étude concernant l'évolution de la tension de claquage.

Mots clés : huiles minérales, pointe-plan, distance inter-électrodes, barrière isolante, tension de claquage.

Abstract

This work is devoted to study the influence of the insulating barrier at the oil intervals under ac voltage at industry frequency (50Hz), in a point-plane arrangement. The used oil named Borak 22 is examined for different parameters such as barrier-free study, the distance between electrodes and electrode curvature radius, barrier diameter effect. The study results concerning the evolution of the breakdown voltage.

Key words: mineral oils, point-to-plan system, inter-electrode distance, insulating barrier, breakdown voltage.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الحاجز العازل على مجال الزيت تحت توتر متناوب ذو تردد صناعي 50 هرتز، في نظام نتوء- مستوي ، تسمى الزيت المستعملة بوراك 22 الذي دُرست لإعدادات مختلفة المتمثلة في، تأثير إضافة حاجز عازل، تأثير المسافة بين الأقطاب، تأثير نصف قطر انحناء القطب الحاد، تأثير أبعاد الحاجز. نتائج هذه الدراسة تخص تطور جهد الانهيار.

كلمات مفتاحية: زيوت معدنية، نتوء- مستوي، المسافة بين الأقطاب، حاجز عازل، جهد الانهيار.