

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de  
l'enseignement Supérieur**

**et de la Recherche scientifique**

**UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA  
Faculté de Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude  
En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Département de Génie Electrique**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Réseaux Électriques**

**Thème**

**Amélioration de la rigidité diélectrique des  
intervalles d'huile du transformateur par  
l'insertion d'une barrière isolante sous haute  
tension 50 Hz**

**Présenté par : YOUNES HAMIDI & ABDERRAHMANE SEGHIERI**

**Soutenu devant le jury composé de :**

MABRAK Samir	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
RAHALI Hilal	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
AIB Abdelghani	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

**Année Universitaire 2021/2022**

## **Remerciements :**

*El Hamdoulil'Allah pour la santé, la volonté, le courage et la détermination qui nous ont accompagnés tout au long de la préparation et l'élaboration de ce travail et qui nous ont permis d'achever ce modeste travail*

*Je tiens tout d'abord à adresser toute ma gratitude à mon encadreur de recherche, Mr **RAHALI Hilal** Pour avoir orienté et enrichi mon travail. Je le remercie pour sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que son souci du détail, qui ont abouti à la réalisation de ce mémoire.*

*Je souhaite aussi adresser mes remerciements au, Corps professoral et administratif de l'université de M'sila qui a contribué à la réussite de mes études universitaires.*

*Je remercie profondément, Ma famille, mes amis ainsi que les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin au cours de la réalisation de ce mémoire.*

## Dédicace :

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices,  
leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs  
prières tout au long de mes études,*

*A mes chères*

*A mes chers frères*

*A toute ma famille pour leur encouragement  
durant les moments les plus difficiles de ce long  
chemin.*

**REMERCIEMENT**

**DEDICACE**

**SOMMAIRE :**

**INTRODUCTION GENERALE.....1**

**CHAPITRE I : Généralité sur les transformateurs**

**I.1 Introduction.....3**

**I.2 Généralités :.....3**

**I.2.1 Technologie des transformateurs.....3**

**I.2.1.1 Types de transformateurs .....4**

**I.2.1.2 Fonctionnement et durée de vie d'un transformateur .....5**

**I.2.1.1 L'isolation d'un transformateur.....6**

**I.2.1.3 Surveillance du transformateur.....6**

**I.3 Conclusion.....7**

**CHAPITRE II : CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES**

**II.1 Introduction.....8**

**II.2 Claquage des liquides isolants.....8**

**II.2.1 Mécanisme électronique.....8**

**II.2.2 Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse.....10**

**II.2.3 Mécanisme de claquage par pont.....10**

**II.2.3.1 Origine des particules.....10**

**II.2.3.2 Teneur des particules.....11**

**II.2.3.3 Rôle des particules dans le claquage.....11**

***II.2.3.3.a -Particules isolantes.....11***

<i>II.2.3.3.b -Particules conductrices</i> .....	12
<b>II.3 Facteurs influents sur la rigidité diélectrique des liquides</b> .....	12
<b>II.3.1 Paramètres électro géométriques</b> .....	12
<b>II.3.2 Pression hydrostatique</b> .....	13
<b>II.3.3 Température</b> .....	13
<b>II.3.4 Tension</b> .....	13
<b>II.3.5 Humidité</b> .....	13
<b>II.4 Influence d'une barrière isolante dans les intervalles d'air</b> .....	14
<b>II.4.1 Influence du type de tension</b> .....	14
<b>II.4.2 Influence de la polarité de l'électrode pointe</b> .....	14
<b>II.4.3 Influence de la position de la barrière</b> .....	15
<b>II.4.4 Influence de la largeur de la barrière</b> .....	15
<b>II.4.5 Influence de l'épaisseur et de la permittivité</b> .....	15
<b>II.4.6 Influence de la barrière trouée</b> .....	15
<b>II.4.7 Influence du matériau de la barrière</b> .....	16
<b>II.4.8 Formes des décharges observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante</b> .....	16
<b>II.4.8.1 Décharge directe</b> .....	16
<i>II.4.8.1.a Cas ou la décharge perfore la barrière</i> .....	17
<i>II.4.8.1.b Cas ou la décharge contourne la barrière</i> .....	17
<b>II.4.8.2 Décharge par étapes</b> .....	17
<b>II.5 Conclusion</b> .....	18
<b>CHAPITRE III : Les Huiles Isolantes</b>	
<b>III.1 Introduction</b> .....	19
<b>III.2 Catégories des huiles et liquides isolants</b> .....	19
<b>III.2.1 Classification selon l'origine des liquides</b> .....	19

III.2.1.1	Liquides de synthèse .....	19
III.2.1.2	Huiles végétales.....	20
III.2.1.3	Huiles minérales.....	20
III.2.2	Classification selon la composition chimique.....	21
III.2.2.1	Huiles minérales isolantes.....	21
III.2.2.2	Hydrocarbures de synthèse.....	21
III.2.2.3	Hydrocarbures halogénés.....	22
III.2.2.4	Esters organiques.....	22
III.2.2.5	Huiles silicones.....	22
III.3	Caractéristiques des huiles minérales isolantes.....	23
III.3.1	Les propriétés physiques .....	23
III.3.1.1	La viscosité.....	23
III.3.1.2	Point d'écoulement.....	24
III.3.1.3	Capacité et conductivité thermique.....	24
III.3.1.4	Le point de feu.....	25
III.3.1.5	Le point d'éclair.....	25
III.3.2	Les propriétés chimiques.....	26
III.3.2.1	L'oxydation des huiles minérales isolantes.....	26
III.3.2.2	La teneur en eau.....	27
III.3.2.3	La teneur en soufre.....	29
III.3.2.4	L'acidité totale.....	29

<b>III.3.3 Propriétés électriques.....</b>	<b>29</b>
<b>III.3.3. 1 Permittivité.....</b>	<b>30</b>
<b>III.3.3. 2 Le facteur de dissipation diélectrique (<math>\tan \delta</math>).....</b>	<b>30</b>
<b>III.3.3. 3 La résistivité et Conductivité .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3.3. 4 Décharges partielles.....</b>	<b>32</b>
<b>III.3.3. 5 Gassing.....</b>	<b>32</b>
<b>III.4 Conclusion.....</b>	<b>33</b>

## Chapitre IV : les résultats expérimentaux

<b>IV.1 Introduction.....</b>	<b>34</b>
<b>IV.2 Station d'essai.....</b>	<b>34</b>
<b>IV. 3 Cellule d'essais.....</b>	<b>35</b>
<b>IV.4 Les Paramètres utilisés.....</b>	<b>36</b>
<b>IV.5 Caractéristiques Borak 22.....</b>	<b>37</b>
<b>IV.5.1 PROPRIÉTÉS DE L'HUILE NEUVE.....</b>	<b>38</b>
<b>IV.5.1.1 Facteur de pertes diélectriques (<math>\tan d</math>) .....</b>	<b>38</b>
<b>IV.5.1.2 Permittivité relative <math>\epsilon_r</math>.....</b>	<b>39</b>
<b>IV.5.1.3 Résistivité <math>r</math>.....</b>	<b>39</b>
<b>IV.5.1.4 Rigidité diélectrique.....</b>	<b>40</b>
<b>IV.6 Résultats et interprétations.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.6.1 Essai sans barrière.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.6.1.1 Influence de la distante inter- électrodes sur la tension de claquage.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.6.1.2 Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe.....</b>	<b>42</b>
<b>IV.6.2 Essai Avec barrière.....</b>	<b>43</b>

IV.6.2.1 Influence du diamètre de la barrière sur la tension de claquage.....	43
IV.6.2.2 Influence du l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage .....	44
IV.6.2.3 Influence du la position de la barrière sur la tension de claquage.....	45
IV.6.3 Conclusion.....	46
CONCLUSION GENERALE.....	47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIES.....	48
Résumer.....	52
<b>LISTE DES FIGURES :</b>	
Figure (I.1) : Vue générale d'un transformateur de puissance avec ses différentes composantes.....	4
Figure (I.2.a) : Les transformateurs de type galette.....	5
Figure (I.2.b) : Le transformateur de type colonne.....	5
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.....	12
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.....	13
Figure II.3 : Décharge directe et par étapes (décharge glissante) .....	18
Figure (III .1) : Evolution de la teneur en eau à saturation en fonction de la température pour une huileminérale neuve et vieillie (i. e. acide) .....	27
Figure (III .2) : Variation du produit $\eta.t \delta$ en fonction de l'inverse de la température absolue pour quatre huiles différentes [BPK].....	31
Figure (III .3) : Variation de la résistivité des différentes huiles minérales (courant continu) .....	32
Figure IV.1 : Cellule d'essais.....	36
Figure IV.2 : Schéma de la cellule d'essais.....	36
Figure IV.3 : Forme de la barrière utilisée.....	37
Figure IV.4 : Appareil mesure pertes diélectrique DTLC de BAUR.....	38

<b>Figure IV.5</b> variations du facteur pertes diélectrique en fonction de la température.....	<b>38</b>
<b>Figure IV.5</b> Variation de la permittivité relative en fonction de la température.....	<b>39</b>
<b>Figure IV.6</b> Variation de la résistivité en fonction de la température.....	<b>39</b>
<b>Figure IV.7: Spintermètre, OTS 100 AF/2 (SKMK-Blida) .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure IV.8 :</b> Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour un rayon égal à 6 mm.....	<b>41</b>
<b>Figure IV.9 :</b> Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes, pour différents rayons de courbure de la pointe.....	<b>42</b>
<b>Figure IV.10 :</b> Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différents distances inter électrodes.....	<b>42</b>
<b>Figure IV.11:</b> Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière pour différentes positions de barrière (e=2mm, d=10cm) .....	<b>43</b>
<b>Figure IV.12 :</b> Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière pour différentes positions de barrière (e=2mm et d=6cm) .....	<b>44</b>
<b>Figure IV.13 :</b> Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière (D=10cm et d=12cm) .....	<b>44</b>
<b>Figure IV.14 :</b> Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière (e=2mm D=10cm) .....	<b>45</b>
<b>Figure IV.15 :</b> Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière (e=2mm et D=14cm) .....	<b>46</b>

### Introduction générale :

Les systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique reposent essentiellement sur les transformateurs de puissance qui constituent l'un des éléments les plus coûteux. Il est donc nécessaire qu'ils fonctionnent correctement durant de nombreuses années. La plupart des transformateurs de puissance à travers le monde sont remplis avec des liquides isolants.

Les huiles isolantes sont utilisées depuis longtemps dans l'industrie électrique : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise... Elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations cellulósiques et/ou comme produit de remplissage des matériels. Les volumes d'huiles employés varient de quelques litres pour les condensateurs, à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance.

Grâce à leurs bonnes propriétés thermiques, ces liquides permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique que le transfert de chaleur. L'huile minérale est le liquide le plus utilisé dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût malgré sa faible résistance au feu.

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.

Ce Mémoire porte sur l'étude physicochimique d'une huile diélectrique type Borak22, Notre travail concerne l'influence de l'insertion d'une barrière isolante dans un système pointe-plan. Elles ont traité la rigidité diélectrique et ont relevé que la trajectoire de la décharge électrique dépend étroitement des dimensions, de l'épaisseur et de la position de la barrière. En outre, il a été démontré que l'augmentation de la tension disruptive est strictement liée à l'allongement du canal de la décharge principale.

**Le premier chapitre** parle sur généralités sur les transformateurs et leurs fonctionnements dans l'industrie.

**Le deuxième chapitre** est consacré à la présentation des mécanismes de préclaquage et de claquage dans les isolants liquides. Les lois statistiques utilisées pour l'étude de la tension de claquage y sont également présentées.

**Le troisième chapitre** présente les différents types d'huiles isolantes minérales et leurs différentes propriétés et leurs rôles dans les matériels électriques pour assurer le bon fonctionnement des appareillages, en particulier celui des transformateurs de puissance.

**Le quatrième chapitre** est une étude expérimentale dans un système pointe-plan sur l'effet de barrière isolant sur la rigidité diélectrique d'huile, et étudie l'impact de différents paramètres (largeur, épaisseur, position de la barrière, distance inter électrodes et Rayon de courbure) sur la tension de claquage

# **CHAPITRE 01**

## **GENERALITE SUR LES TRANSFORMATEURS**

## I.1 Introduction

Un transformateur électrique (parfois abrégé en « transfo ») est une machine électrique permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. [MIK ,CHA]

On distingue les transformateurs statiques et les commutateurs. Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique que constitue la carcasse du transformateur. Ces deux circuits sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser une isolation galvanique entre les deux circuits. Dans une commutatrice, l'énergie est transmise de manière mécanique entre une génératrice et un moteur électrique.

## I.2 Généralités

### I.2.1 Technologie des transformateurs

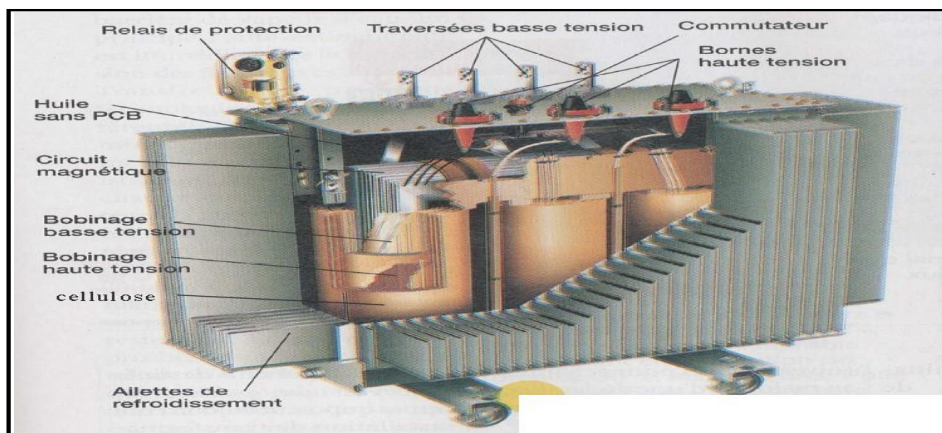
La première application du transformateur trouve son origine dans la nécessité de changement de tension dans les réseaux alternatifs. Sa fonction d'isolement des circuits s'est imposée par la suite pour des raisons évidentes de protection des biens et des personnes.

Les transformateurs de puissance sont tous de type immergé, c'est-à-dire remplis d'huile, afin [MIC]d'assurer une isolation électrique efficace, par imprégnation avec des isolants celluloseux (bois, papier Kraft, carton) qui sont en fait des polymères naturels, ou bien des polymères synthétiques ; et [PER]de réaliser une bonne évacuation de la chaleur générée par le circuit magnétique et les bobinages. Des propriétés électriques et physico-chimiques satisfaisantes, une bonne compatibilité avec les isolants solides et un faible coût, font de l'huile minérale (issue des hydrocarbures) le liquide isolant préférentiel utilisé dans les transformateurs de puissance. Elle est essentiellement employée en combinaison avec les isolants celluloseux qui sont aussi très bon marché.

**Les transformateurs sont équipés des accessoires standards suivants :**

- Traversées ;
- Conservateur d'huile avec jauge de niveau ;

- Vanne de remplissage et de vidange ;
- Vanne pour prélèvement de l'huile ;
- Bornes pour la mise à la terre ;
- Anneaux pour le levage du transformateur ;
- Plateaux d'appui pour les vérins (cuves à radiateurs) ;
- Plaque signalétique ;
- Dessiccateur ;
- Relais Buckholtz ;
- Indicateur de température maximum de l'huile.



**Figure (I.1) :** Vue générale d'un transformateur de puissance avec ses différentes composantes

### I.2.1.1 Types de transformateurs

Il existe deux types de transformateurs de puissance :

-Les transformateurs de type galette Figure (I.2.a), constitués d'enroulements en forme de galettes rectangulaires, séparés par des écrans isolants en fibre de cellulose. Autour de ces bobines à axe horizontal est placé le circuit magnétique, formé d'un empilage de tôles.

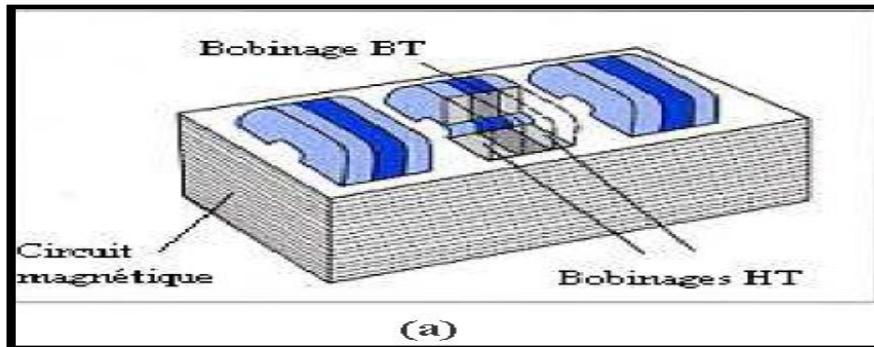


Figure (I.2.a) : Les transformateurs de type galette

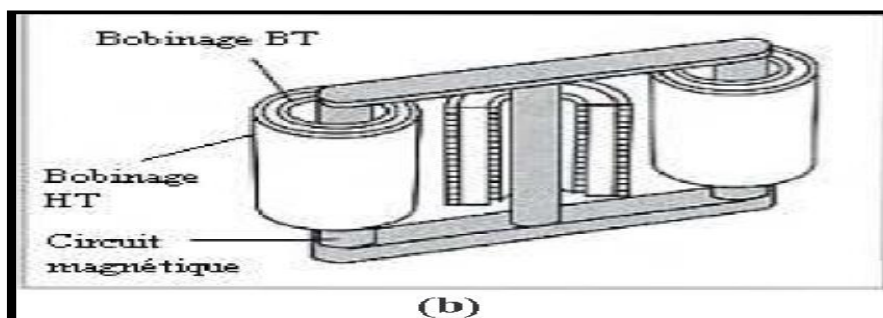


Figure (I.2.b) : Le transformateur de type colonne

-Les transformateurs de type colonne (figure. (I.2.b.)) constitués d'un circuit magnétique en colonnes verticales autour desquelles sont placés les bobinages cylindriques recouverts d'isolants en fibre de cellulose.

### I.2.1.2 Fonctionnement et durée de vie d'un transformateur :

On sait que la durée de vie d'un transformateur est de 30 à 40 ans environ. Le meilleur rendement d'un transformateur en service régulier et continu, fonctionnant dans un local convenablement ventilé, se situe entre 60 et 80% de sa charge nominale.

S'il fonctionne en sous régime irrégulier, il est exposé à :

- Des contraintes thermiques et électriques ;
- Un mauvais brassage et circulation de la masse du diélectrique A une hydratation condensation et dépôts (une chute de température favorise l'imprégnation en humidité des isolants papiers/cartons) et le passage de l'eau dissoute en eau libre).

S'il fonctionne en surcharge, il est exposé à :

- Un rendement inférieur ;
- À un échauffement anormal des isolants (isolation solide) ;

- À un vieillissement prématuré des composants cellulosesiques.

### I.2.1.1 L'isolation d'un transformateur :

Dans un transformateur, l'isolation est assurée par un complexe diélectrique solide (papiers ou cartons) et diélectrique liquide (huile isolante).

On appelle parties actives d'un transformateur, les enroulements et leurs isolations (papiers ou cartons). Dans la partie active d'un transformateur, entre les éléments portés à des potentiels électriques différents, l'isolement est assuré par des isolants sous deux états :

- **Liquide** : huile minérale, carbure d'hydrogène chloré (pyralène) ;
- **Solide** : organique (papier, résine synthétique, vernis) ;

### I.2.1.3 Surveillance du transformateur :

L'entretien des transformateurs répond aux normes en vigueur et notamment spécifiées dans les publications CEI 60.422 [NRM 1]. En plus de ces maintenances, un point crucial reste à résoudre et les questions suivantes se posent :

- Les transformateurs sont-ils actuellement en parfait état de fiabilité ?
- Ne sont-ils pas exposés à un risque de claquage ?
- Les huiles diélectriques des transformateurs ne sont-elles pas altérées ?

Le fonctionnement sans défaillance des transformateurs de puissance, de tension ou de courant, des disjoncteurs et sectionneurs dépend en grande partie des qualités diélectriques des huiles isolantes.

Les vibrations et desserrages, outre les conséquences multiples et dangereuses, favorisent l'absorption par l'huile de poussières de toutes sortes. La présence de l'humidité, là ou lorsque la teneur en eau dépasse un certain seuil (valeur de saturation), elle ne peut rester en solution, et de l'eau libre apparaît sous forme des gouttelettes d'eau ; l'eau libre provoque, invariablement, une diminution de la tension de claquage et de la résistivité et une augmentation du facteur de dissipation diélectrique.

Les conséquences directes des altérations d'un transformateur sont les suivantes :

- L'efficacité et le rendement du transformateur diminuent ;
- Les isolants se carbonisent et leurs capacités diélectriques régressent ;

- Les enroulements peuvent être mis en court-circuit ;
- La température du noyau accroît sans cesse.

Toutes ses conséquences conduisent dans la moindre surtension au claquage de l'appareil.

## Conclusion

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

Dans ce chapitre on a parlé sur les transformateurs leurs types, isolation, fonctionnements et comment surveiller et leur durée de vie.

Dans le chapitre qui suit nous avons présenté un aperçu général sur les catégories des diélectriques liquides et les divers paramètres influant directement ou indirectement sur l'état d'isolement d'un diélectrique

# **CHAPITRE 02**

## **CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES**

## II.1 Introduction :

Les diélectriques liquides sont caractérisés par des permittivités et pertes diélectriques très faibles ( $\epsilon_r = 2 \sim 2.5$ ) [SAZ 1], 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 [DKZ], le papier et/ou le polypropylène dans les câbles imprégnés et condensateurs de puissance

## 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.

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 [SAZ]

### II.2.1 Mécanisme électronique

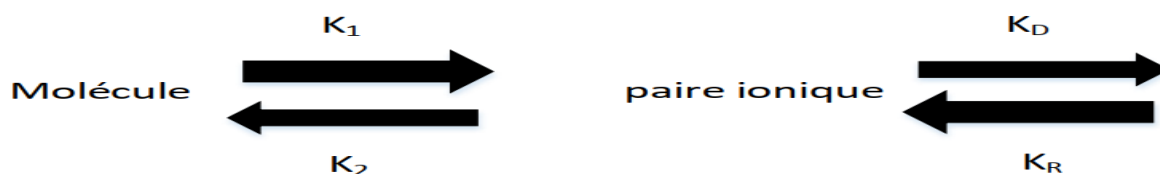
Les premiers travaux proposaient d'adopter les résultats acquis dans les gaz, pour expliquer le claquage dans les diélectriques liquides. Ils supposèrent que des mécanismes d'ionisation de type ont basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications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

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 [BMO].

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 [BMO].

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 [RTO] :

- Injection d'électrons par la cathode et capture des électrons
- Ionisation du liquide;
- Réaction électrochimique.

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

Dans le liquide ultra pur et en géométrie pointe-plan, sous tension continues, 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 [BBK]. Certains auteurs supposent que les cavités gazeuses existent à priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités [SEA].

## 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 [ZDJ].

### 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 [SEA]:

- 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 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 d'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 [BMO].

### 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 micro- décharge s'amorçant entre la particule et l'électrode déclencherait la rupture. La rupture diélectrique est en général précédée par des phénomènes impulsions appelés « pré-disruptifs » ou « préclaquage ».

## 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) [RTO].

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 pré disruptifs, plus ce rayon est faible, plus l'intensité du champ électrique obtenu est considérable.

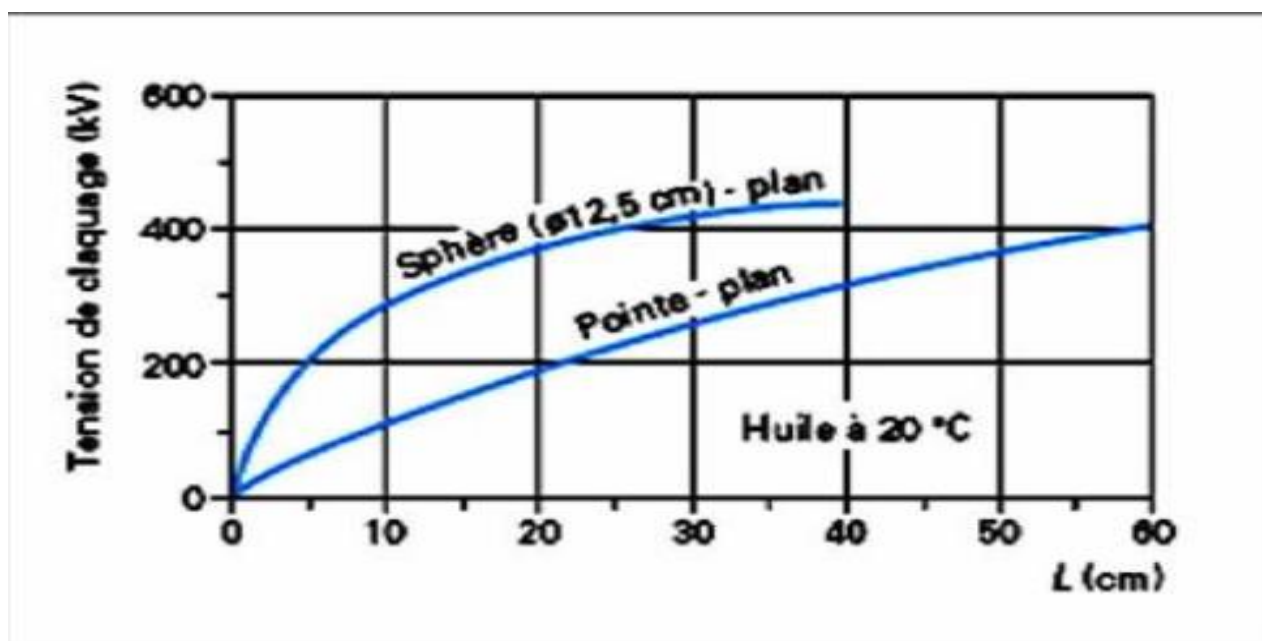


Figure II.1: Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan.

### 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 [BMO].

### II.3.3 Température

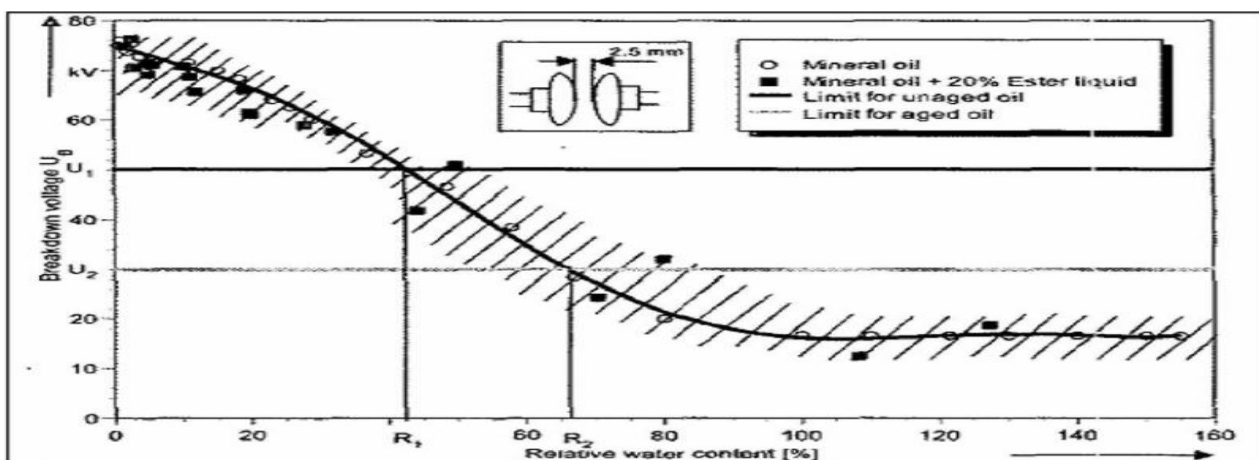
L'augmentation de la température entraîne la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent [BMO].

### 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 [BMO].

### 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 [RTO 1].



**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 [BBKI].

### 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 [BBKI]. 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 [BBKI, BBK 1].

### 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 côtés 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 [BBKI]. 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 [BBK 2]. Cette tension passe par un maximum quand la barrière est près de la pointe. Certains travaux [BBKI, BBK 1, BBK 2] 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 [BBKI, BBK1].

### 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 [BBK 1]. 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 [BBKI].

### II.4.6 Influence de la barrière trouée

A. Boubakeur [BBK 1] 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 ( $d < 20\text{mm}$ ), 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 [BBKI] 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 [BBKI] 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 [BBK 1, JJB] 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 perfore 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) [BBKI, BBK 1]. 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 [BBK 1] 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 [BBK 1]. (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) [BBKI, BBK 1].

### 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 [BBK 1]. En premier lieu, on distingue l'effet couronne suivi de la décharge pointe-barrière qui constitue la première étape de l'amorçage.

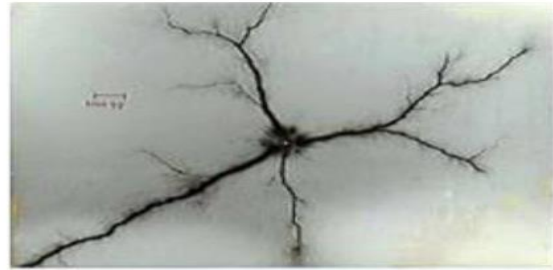
Ensuite, pour un niveau de tension supérieur, on arrive à la seconde étape qui est le contournement de la barrière par les décharges glissantes (Figure II.3-b), et finalement, la troisième et dernière étape est atteinte quand la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan (figure II.3-c).

Pour une pointe négative, il existe quatre étapes [BBK 1], 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

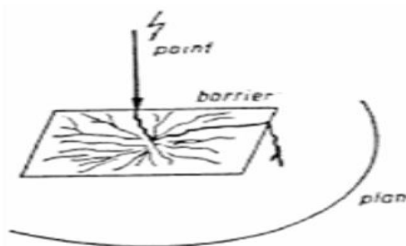
vers l'autre surface de la barrière et finalement le claquage s'effectue après la rencontre des deux décharges venant de part et d'autre de la barrière (figures II.3-d).



(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 03**

## **LES HUILES ISOLANTS**

### III.1 Introduction

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

### III.2 Catégories des huiles et liquides isolants

#### III.2.1 Classification selon l'origine des liquides

Il est difficile de choisir un système de classification des liquides isolants. Ils pourraient être classés en fonction de leurs propriétés isolantes, en fonction du type d'équipement dans lequel ils sont utilisés.

Nous avons choisi de les classer en fonction de leur origine :

- Les huiles minérales sont des produits « naturels » obtenus directement par raffinage de bruts pétroliers. Leur composition chimique est extrêmement compliquée (plusieurs milliers de molécules différentes) et peut varier dans de large proportion.
- Les huiles végétales sont également des produits « naturels ». Leur composition est plus simple (quelques dizaines de produits), mais elle peut également varier dans de larges proportions.
- Les liquides de synthèse ont, au contraire, une composition simple, bien définie. Leurs propriétés sont donc constantes [BER].

##### III.2.1.1 Liquides de synthèse

Les liquides de synthèse sont utilisés 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 (transformateurs) ou lorsque l'on recherche une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs) [BER 2]

Il existe quatre types principaux de liquides de synthèse :

- Les hydrocarbures aromatiques : ces liquides peuvent être classés en deux groupes les alkylbenzènes et 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 réactions d'acides organiques et d'alcools : Ces produits offrent d'excellentes propriétés lubrifiantes et des opérabilités aux températures extrêmes (esters de pentaérythritol) ;
- Les silicones : 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. Mais le coût d'accès de ces produits ( $\approx 100$  fois celui des huiles minérales) en limite l'utilisation.

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

### III.2.1.2 Huiles végétales

Elles sont en général 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 éco toxicologique, 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 [OME].

### III.2.1.3 Huiles minérales

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

La composition d'une huile minérale est généralement définie par sa teneur en carbone paraffinique (Cp), en carbone naphhténique (Cn) et en carbone aromatique (Ca) (voir figure I.3). Cp et Cn ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble). La présence d'aromatiques améliore la résistance à l'oxydation (plus faible formation de boues), les propriétés de Gassin et la rigidité en impulsion. Suivant le brut d'origine, on différencie les huiles naphhténiques des huiles paraffiniques.

(Tableau III.1) [BER].

Type d'hydrocarbure	Type de brute pétrolier		
	Paraffiniques	Mixtes	Naphténiques
Paraffiniques	60	40	20
Naphténiques	25	40	65
Aromatiques	15	20	15

Tableau (III .1) : Composition des bruts pétroliers en (%)

## III.2.2 Classification selon la composition chimique

### III.2.2.1 Huiles minérales isolantes

Les huiles minérales isolantes résultent de base lubrifiante choisie, provenant de distillats de pétrole sélectionnés soumis à un raffinage poussé. C'est des liquides dont les performances en service n'ont cessé de s'améliorer depuis maintenant plus d'un siècle. La première phase de leur développement a concerné l'amélioration de leur stabilité à l'oxydation qui, depuis 30 ans, a atteint un niveau satisfaisant, permettant leur utilisation pendant toute la durée de vie de matériels les plus contraints thermiquement. Depuis 25 ans, la deuxième phase de leur évolution, relative à leur stabilité sous contraintes électriques et ionisantes, s'est terminée avec succès, les constructeurs pouvant disposer d'huiles minérales stables sous décharges électriques [NAC].

### III.2.2. 2 Hydrocarbures de synthèse

Elaborés principalement par l'industrie pétrochimique, ces liquides appartiennent à deux groupes de liquides : les poly butènes et les hydrocarbures aromatiques. Ils ont révélé un comportement diélectrique meilleur que celui des huiles minérales dans la réalisation de liquides à haute viscosité pour câbles (poly butènes) et à fort pouvoir d'absorption gazeuse sous ionisation (alkylbenzènes). Ils peuvent être utilisés en mélange avec les huiles minérales pour améliorer une caractéristique particulière, par exemple la viscosité ou l'absorption gazeuse sous ionisation. C'est actuellement la catégorie qui renferme le plus de produits commerciaux

### III.2.2. 3 Hydrocarbures halogénés

Les huiles minérales et les hydrocarbures de synthèse sont inflammables et produisent, sous l'action d'arcs électriques de puissance, des gaz eux-mêmes inflammables et explosibles (hydrogène, méthane, etc.). La nécessité de réduire les risques d'incendie des matériels électriques est à l'origine de la synthèse des hydrocarbures halogénés, principalement des dérivés aromatiques chlorés et des poly chloroalcanes.

Les premiers hydrocarbures halogénés connus, et désignés sous le terme générique d'askar els, sont des polychlorobiphényles (PCB), obtenus à partir du bi phényle et pouvant être utilisés en mélange avec des chlorobenzènes. Ils n'ont pas de point de feu et sont ininflammables, pour autant que l'ininflammabilité d'un liquide résulte de l'ininflammabilité de ses vapeurs. Ces produits sont connus commercialement sous les noms de Pyralène, Arochlor, etc. Ces produits présentent une stabilité chimique éprouvée par des décennies d'utilisation. Non biodégradables et pouvant donner des produits toxiques à haute température, ils ont été interdits à la vente dès 1986 dans la CEE [NAC].

### III.2.2. 4 Esters organiques

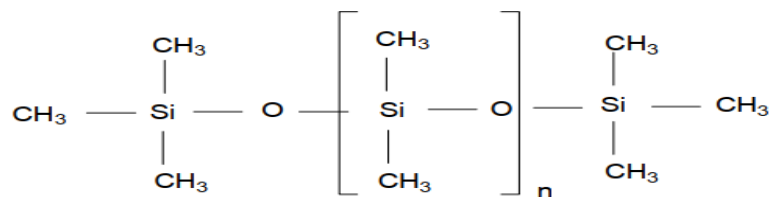
Il existe plusieurs types d'ester en électrotechnique. Les phtalates ont été utilisés dès le début de la remise en question des PCB, pour l'imprégnation de condensateurs basse et moyenne tension, actuellement seul le dioctylphtalate (DOP) est encore utilisé pour l'imprégnation de condensateurs basse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

### III.2.2. 5 Huiles silicones

Les silicones pour l'électrotechnique, polymères liquides du diméthylsiloxane, ou polydiméthylsiloxanes (PDMS), peuvent être considérées comme relevant de la chimie minérale. Les silicones liquides présentent simultanément de bons comportements à basse température (point d'écoulement  $-60^{\circ}\text{C}$ ) et à haute température (température d'utilisation  $150^{\circ}\text{C}$ ), appréciables dans certains matériels soumis à des variations thermiques importantes.

Ces huiles sont constituées d'une chaîne moléculaire linéaire, dont les éléments sont formés d'atomes de silicium et d'oxygène alternés. Les groupements organiques latéraux saturant les

valences libres de l'atome de silicium sont dans ce cas des groupements méthyle. La formule générale est la suivant



La valeur de l'indice (n) caractérise son degré de polycondensation, il est environ de 30 [BER 1].

### III.3 Caractéristiques des huiles minérales isolantes

Les liquides utilisés en électrotechnique le sont d'abord pour leurs propriétés isolantes. Les performances diélectriques des liquides seront caractérisées de plusieurs façons, notamment par la mesure de la conductivité et la tenue au claquage.

Le comportement des liquides au vieillissement (stabilité thermique, à l'oxydation et à l'hydrolyse) doit également être pris en compte. Lorsque le liquide est avant tout un fluide de transfert thermique, les propriétés prépondérantes seront principalement la viscosité et la capacité thermique.

Dans quelques cas particuliers, on s'intéressera spécialement au comportement du produit vis-à-vis du feu, les propriétés diélectriques étant secondaires [CAS].

Le choix d'une huile isolante repose sur un nombre important de propriétés telle que :

[NAC]

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

#### III.3.1 Les propriétés physiques

##### III.3.1. 1 La viscosité

La viscosité d'un fluide se définit comme la propriété qui caractérise sa résistance à l'écoulement. D'autre part, elle traduit les forces qu'opposent les molécules d'huile à une force tendant à les déplacer.

La viscosité d'une huile est une caractéristique importante lorsqu'il s'agit de lubrification ou de refroidissement. Plus la viscosité est faible, plus le meilleur refroidissement est abouti.

Le choix d'une huile dépend essentiellement de la valeur de la viscosité  $\eta$ , sa diminution avec la température, s'exprime à partir de nombreuses lois empiriques qui ont été proposées.

En général, on considère des relations du type [MOK] :

$$\lg \eta = A + [B / (T - T_0)] \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

Avec :

A et B : deux constantes caractéristiques du produit ; T : température (en K) ;

T<sub>0</sub> : température ambiante.

### III.3.1. 2 Point d'écoulement

Le point d'écoulement est également un paramètre important dans le choix d'un liquide destiné à évacuer les calories. Il est défini comme la température la plus basse à laquelle le fluide coule encore lorsqu'il est refroidi, sans agitation, dans des conditions normalisées. Le fait que le liquide atteigne une consistance qui l'amène à se figer est lié à la masse moléculaire, à la composition du liquide et au mélange de différentes molécules [VUA].

La connaissance de cette caractéristique est primordiale pour l'utilisation de transformateurs dans les pays froids. Les liquides isolants utilisés dans l'électrotechnique se figent généralement à des températures allant de -60°C pour (les poly butènes, huiles silicones) à -30°C pour (les huiles minérales). Cette caractéristique se détermine au moyen de la norme ISO 3016 [NRM 2].

### III.3.1. 3 Capacité et conductivité thermique

La capacité thermique massique croît avec la température et décroît avec la masse volumique,

Elle est exprimée en joules par kilogramme kelvin.

Dans le cas des huiles minérales, elle peut être calculée par la relation : [BER]

$$C_p = (1684 - 3.39 T) / \nu \rho_{15} \quad [J / (kg.K)] \dots \dots \dots \text{(III.2)}$$

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

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

La conductivité thermique est inversement proportionnelle à la masse volumique et décroît avec la température. Elle est mesurée en Watt par mètre Kelvin, elle exprime le flux thermique s'écoulant en régime permanent sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent. La valeur moyenne est  $\lambda = 0.14 \text{ W}/(K. m)$

### III.3.1. 4 Le point de feu

C'est la température minimale pour laquelle la combustion des vapeurs d'un liquide sera entretenue. Le point de feu est déterminé par une méthode en coupe ouverte. Après avoir noté la température correspondant au point d'éclair, on poursuit la chauffe du liquide jusqu'à ce que la coupelle s'enflamme. La température correspondante est le point de feu du liquide. On considère en général que, pour que le risque d'inflammation devienne négligeable, il faut que la température du liquide reste inférieure au point d'éclair moins 25 à 30 °C [BER].

### III.3.1. 5 Le point d'éclair

Le chauffage progressif d'un liquide provoque le dégagement de vapeurs, qu'il s'agisse d'un produit pur ou d'un mélange. Dès que la concentration en vapeur au-dessus du liquide devient suffisante pour former un mélange inflammable dans l'air, le mélange brûle à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée point d'éclair du liquide [BER]

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.

La combustion des huiles minérales libère une grande quantité d'énergie. La norme CEI61100 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)  
[BER 3] (voir Tableau III -2).

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 [VAN].

Classement sur le point de feu		Classement sur l'énergie de combustion	
Classe	point de feu	Classe	PCI
O	< 300°C	1	>42MJ/Kg
K	>300°C	2	32 < PCI < 42MJ/Kg
L	Pas de point de feu	3	PCI < 32MJ/Kg

**Tableau (III -2) -Classification des liquides isolants vis-à-vis du feu (selon la norme CEI61100)**

### III.3.2 Les propriétés chimiques

#### III.3.2. 1 L'oxydation des huiles minérales isolantes

L'oxydation de l'huile minérale résulte principalement de l'action simultanée de l'oxygène moléculaire et de la température en présence de matériaux de construction des appareils (cuivre, fer, cellulose, etc.). L'action de l'humidité et du champ électrique et encore mal connue sur le phénomène d'oxydation.

L'oxydation constitue le facteur prédominant dans le vieillissement des isolants liquides, et plus particulièrement dans celui des huiles minérales. On désigne ainsi un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous [PRA].

Les huiles comme tous les produits naturels s'oxydent en donnant des produits de dégradation qui se caractérisent d'abord par une évolution de la couleur et de l'odeur, liée à la formation de composés acides légers, puis pour une apparition de dépôt de résidus agressifs, liée aux acides lourds, et accompagnée généralement d'une augmentation de la viscosité. Les conséquences de l'oxydation de l'huile pour les isolations sont :

- Une mauvaise évacuation de la chaleur par suite de l'accroissement de la viscosité et de la présence de dépôts ;
- Une détérioration des propriétés électriques de l'huile ; sa conductivité et sa tangente de l'angle de pertes augmente ;

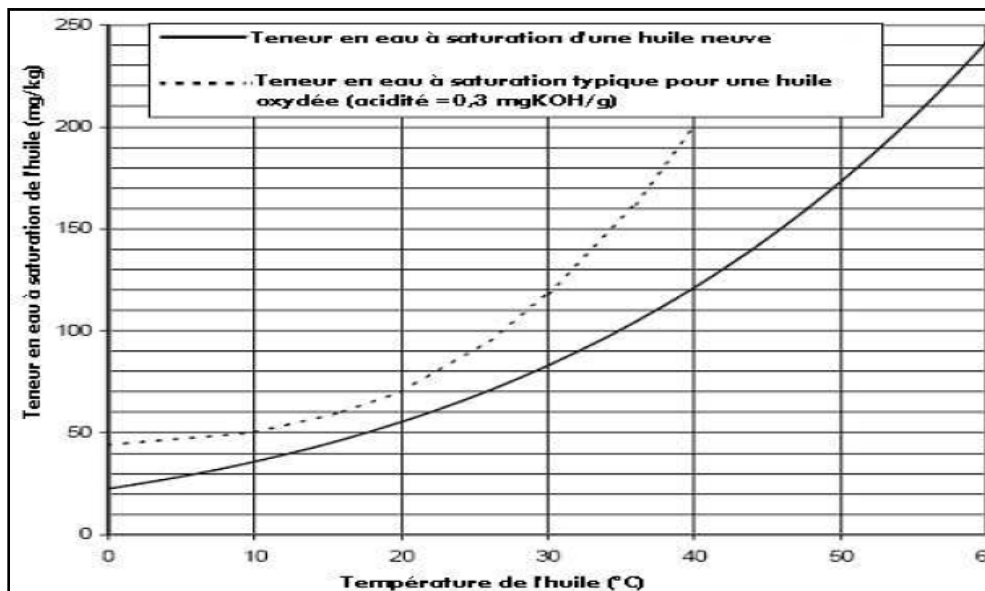
- Une augmentation des pertes dans les isolations imprégnées qui peuvent entraîner le claquage thermique ;
- L'apparition de l'acidité dans l'huile.

### III.3.2. 2 La teneur en eau

Au départ, lorsque l'huile est neuve et traitée, elle a une faible teneur en eau (<10ppm pour l'huile minérale). Cette teneur va augmenter au cours de la vie du transformateur suite à la pénétration d'humidité provenant de l'atmosphère mais aussi avec la dégradation du papier.

Cette mesure est un outil indispensable pour juger de l'état de vieillissement d'une huile d'un Transformateur, d'autant plus que l'humidité est un facteur qui diminue les propriétés diélectriques d'un isolant. L'essentiel de cette analyse consiste à ramener cette teneur en eau en pourcentage de saturation par rapport à la solubilité de l'eau pour connaître l'état de l'huile.

Il a été montré que dans une huile vieillie, les produits de dégradation augmentent la quantité d'eau qu'elle peut contenir (la saturation), par suite des blocages de molécules d'eau par liaison hydrogène avec des groupements carboxyles. Le comité de normalisation des spécifications CEI a d'ailleurs inclus cette remarque dans ses documents figure (III .1) [ NRM].



**Figure (III .1) :** Evolution de la teneur en eau à saturation en fonction de la température pour une huile minérale neuve et vieillie (i. e. acide)

L'eau peut être trouvée dans l'huile sous forme dissoute, sous forme dispersée (gouttelettes d'eau) ou en émulsion (apparition de deux phases non miscibles). La solubilité  $W_s$  de l'eau dans l'huile est donnée en mg/l ou ppm. Elle dépend de la température, l'état et le type de l'huile. La variation de la solubilité de l'eau dans l'huile est exprimée par :

$$W_s = W_{oil} e^{(-B/T)} \dots\dots\dots (III.3)$$

$W_s$  : est la solubilité de l'eau dans l'huile (mg/l ou ppm),  $T$  : est la température de l'huile (K),  
 $W_{oil}$  et  $B$  : sont des constantes propres au liquide.

Plus la température augmente et plus la solubilité de l'eau dans l'huile est importante. Cette variation de solubilité avec la température peut se révéler comme problématique. En effet, lorsque l'appareil est chaud, l'eau peut se dissoudre en plus grande quantité, et lorsque l'appareil refroidit, la solubilité de l'eau diminuant à nouveau peut laisser apparaître de l'eau libre. Ainsi, il convient toujours de déterminer la solubilité de l'huile à la même température que celle à laquelle l'huile a été prélevée.

Le comité de normalisation pour les fluides électrotechniques a établi un facteur de correction [NRM] qui permet de ramener la valeur de la teneur en eau d'une huile minérale prélevée à une certaine température ( $> 20^\circ\text{C}$ ) à la température de  $20^\circ\text{C}$  pour avoir un critère de comparaison:

$$f = (2.24)^{0,04.T_s} \dots\dots\dots (III.4)$$

Où

$f$  : est le facteur de correction,

$T_s$  : est la température d'échantillonnage de l'huile ( $^\circ\text{C}$ ).

Cependant, cette relation (équation III.4) est encore sujette à discussion pour des raisons notamment de non reproductibilité sur toutes les huiles minérales. Au contact d'une atmosphère humide, l'eau se dissout peu à peu dans l'huile. C'est pourquoi les transformateurs dits « respirant » sont toujours munis d'un dessiccateur pour assécher l'air. La teneur en eau d'une huile est souvent exprimée par un pourcentage de saturation à une température donnée, encore appelée humidité relative :

$$\text{Saturation en \%} = (\text{Teneur en eau} / W_s) * 100 \dots\dots\dots (III.5)$$

Pour une huile minérale isolante neuve, la solubilité de l'eau est donnée par la relation suivante :

[NRM]

$$\text{Log } W_s = 7.0895 - (1567/T) \dots \dots \dots \text{ (III.6)}$$

### III.3.2. 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 (norme NFT60-131 (CEI 296A)) ; la coloration qu'elle prend permet de juger si les composés soufrés sont corrosifs ou non [CRG].

### III.3.2. 4 L'acidité totale

L'acidité représente les dérivés d'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 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 [NAC, FRN]. 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.

### III.3.3 Propriétés électriques

Les propriétés électriques des liquides dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire, etc...) et de leur condition d'utilisation ou conditionnement. Par conditionnement, il faut comprendre l'élimination de tout ce qui ne constitue pas le liquide lui-même : résidus de synthèse, particules, gaz, molécules d'eau. Ces impuretés peuvent être plus ou moins éliminées par les opérations de traitement qui comprennent des phases de déshydratation et de dégazage sous vide et en température, ainsi que des opérations de filtration de l'ordre du µm [PER].

### III.3.3. 1 Permittivité

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

$$\epsilon_r = C_p / C_0 \dots \dots \dots \text{(III -7)}$$

Dans la pratique,  $\epsilon_r$  est obtenue en comparant le condensateur plein au condensateur dans l'air. L'erreur commise sur la détermination de  $\epsilon_r$  est faible, puisque la permittivité relative de l'air (à 25 °C et sous pression atmosphérique) vaut 1,0005. La permittivité absolue  $\epsilon$  est le produit de la permittivité relative  $\epsilon_r$  par la permittivité du vide ( $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m) :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \dots \dots \dots \text{(III -8)}$$

La permittivité est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule. Dans les chaînes hydrocarbonées, les dipôles sont de faible intensité :



La permittivité des hydrocarbures est faible et voisine de 2. La présence d'hétéroatomes (oxygène, chlore...), en créant des dipôles de forte intensité, confère aux molécules une permittivité élevée. La permittivité décroît avec la température et la fréquence du courant.

Cependant, pour les produits polaires et visqueux, on observe au-dessous d'une certaine température, une brusque chute de la permittivité due à l'immobilisation des dipôles [COQ].

### III.3.3. 2 Le facteur de dissipation diélectrique (tan $\delta$ )

Le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau isolant est la tangente d'angle de pertes qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui résulte lorsque le diélectrique se compose exclusivement du matériau isolant [BOU]. Sous tension alternative sinusoïdale de fréquence  $f$  et de pulsation  $\omega = 2\pi f$ , les pertes par conduction sont caractérisées par la tangente de l'angle de perte  $\delta$ , ou facteur de dissipation (le déphasage entre courant et tension étant  $(\pi/2 - \delta)$ ) tel que :

$$\tan \delta = \sigma / (\epsilon \epsilon_0 \omega) = 1 / (\epsilon \epsilon_0 \rho \omega) \dots \dots \dots \text{(I-9)}$$

où :

$\tan \delta$  est un nombre adimensionnel et  $\omega$  représente la pulsation du réseau.

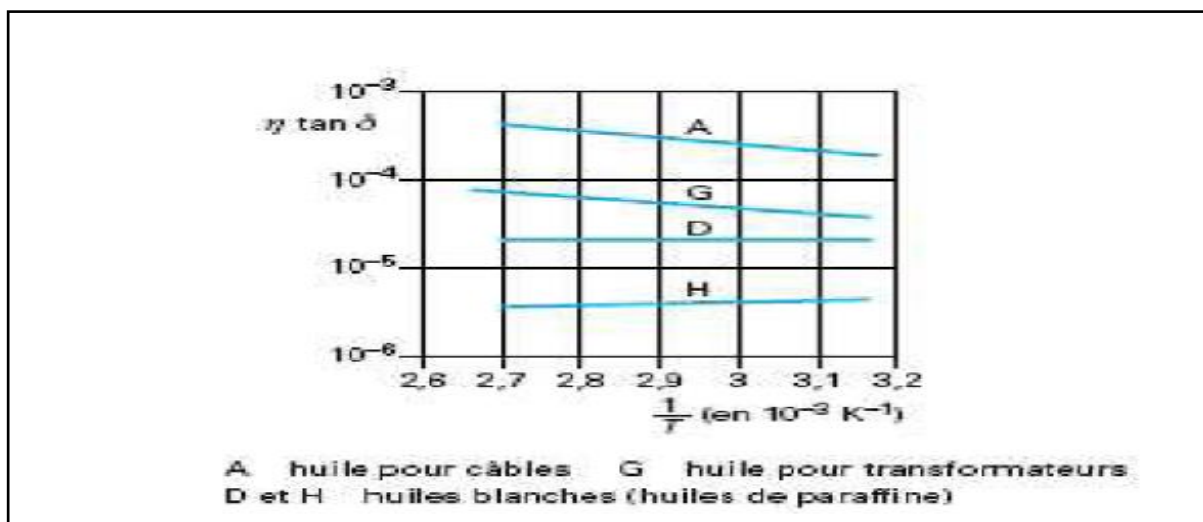
Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide.

La cause principale de ces pertes est, de toute évidence, la présence de courant qui traverse le liquide sous un champ électrique. Cette caractéristique est très sensible à la présence de produits de vieillissement de l'huile.

Il existe une relation entre le facteur de dissipation diélectrique et l'acidité de l'huile. Une acidité élevée est accompagnée par une valeur élevée de  $\tan \delta$ , mais l'inverse n'est pas vérifié.

Une valeur défavorable de  $(\tan \delta)$  peut être due à la dissolution dans l'huile des produits qui n'ont pas pour origine l'altération de l'huile [EIM].

De même que la résistivité,  $(\tan \delta)$  varie avec la température. Une des raisons de l'augmentation de  $\tan \delta$  avec la température est l'accroissement de la mobilité des charges dans le liquide dû à la diminution de la viscosité  $\eta$  [BER]. Une huile neuve possède un facteur de dissipation diélectrique inférieur ou égal à  $5.10 \text{ e } (-3)$  [NRM 3].



**Figure (III .2) :** Variation du produit  $\eta.t \delta$  en fonction de l'inverse de la température absolue pour quatre huiles différentes [BPK]

### III.3.3. 3 La résistivité et Conductivité

Tout liquides ; pour être isolant électrique, doit conduire le moins possible d'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité doit être la plus faible possible.

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide.

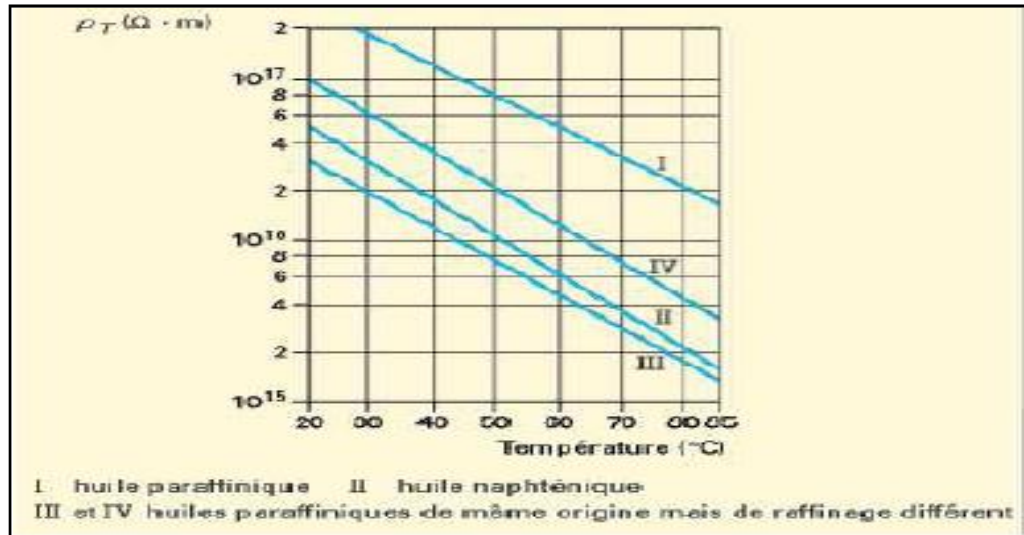


Figure (III .3) : Variation de la résistivité des différentes huiles minérales (courant continu) [PEY]

### III.3.3. 4 Décharges partielles

Sous l'effet du champ électrique et des inhomogénéités locales (gaz, humidité, particules), il peut apparaître des micro-décharges qui décomposent l'huile en générant des gaz. Les gaz formés par les décharges partielles dans l'huile contiennent de l'hydrogène en très grande proportion et de petites quantités d'hydrocarbures [VAN]. En effet la partie d'isolation la plus faible peut claquer sans que l'isolation entière ne subisse une rupture diélectrique.

A long terme, ces décharges peuvent devenir nocives si elles tendent à se fixer sur les isolants solides imprégnés et parviennent à un niveau suffisant pour les détériorer.

### III.3.3. 5 Gassing

On appelle gassing (en  $mm^3/mm$ ), la vitesse de variation du volume de gaz pendant 120 min d'application de la tension (10 kV à 80 $^{\circ}C$ ). Si le volume de gaz augmente, le produit aura un gassing positif alors que, s'il diminue, il aura un gassing négatif.

Pour les équipements électriques, l'emploi d'imprégnant absorbant les gaz est toujours préférable.

La tension, la température et le temps d'application de la tension ont une forte influence sur le comportement d'une huile en gassing.

### III.4 Conclusion

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

L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses bonnes propriétés physico-chimique et d'autre part pour son faible coût

En revanche, cette dernière a une faible résistance au feu et c'est pourquoi entre les années 1930 et le milieu des années 1970, des liquides ininflammables comme le polychlorobiphényle (PCB) ont été utilisés comme isolants dans les transformateurs. Cependant, ces derniers ont été reconnus comme dangereux pour les populations, les animaux et l'environnement, notamment par le fait qu'ils pouvaient dégager des dioxines lors d'une combustion incomplète. Depuis lors, les huiles minérales restent les seules à être utilisées dans l'isolation. Par ailleurs, de nouveaux liquides de synthèse à basse inflammabilité telles que les huiles silicone ou ester synthétique, ont été mis au point pour remplacer les PCB, mais leur utilisation reste limitée aux transformateurs de distribution ou de traction de par leur coût plus élevé

# **CHAPITRE 04**

## **LES RESULTATS EXPERIMENTAUX**

## IV.1 Introduction

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

## IV.2 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. Ces 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 :  $R_a = 30 / \text{kV}$  de tension d'essais, la résistance de
- ✚ L'enroulement B.T :  $r_1 = 0.0365 \Omega$ , celle de l'enroulement H.T :  $4893 \Omega$ .

### ❖ 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 ( $C1 = 400\text{pF}$ ), en série avec une capacité  $C2$  variable permettant de réduire de  $1/1000$  la tension d'essai ( $U_{\text{lue}} = U(C2) = U(C1) / 1000$ ). 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 kV max 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.

## IV. 3 Cellule d'essais

La cellule d'essais (Figure IV.1) 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 IV.1 : Cellule d'essais

#### IV.4 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.

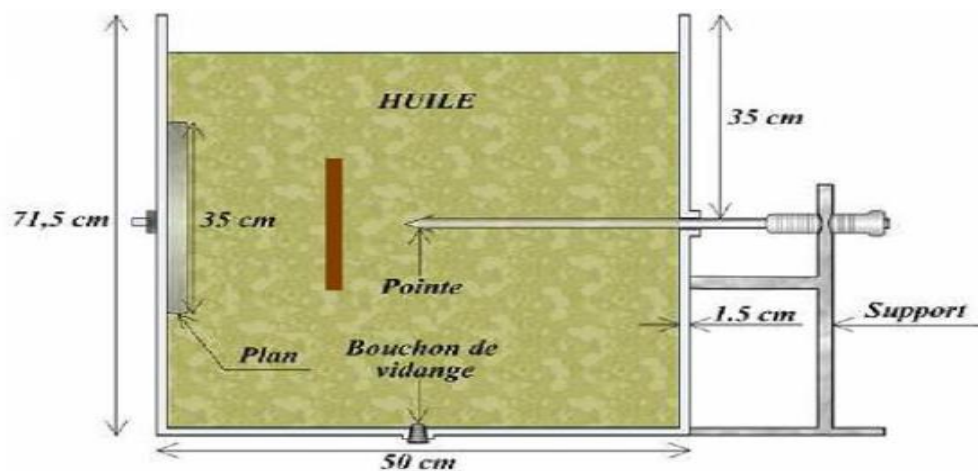


Figure IV.2 : Schéma de la cellule d'essais

La barrière (Figure IV.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.

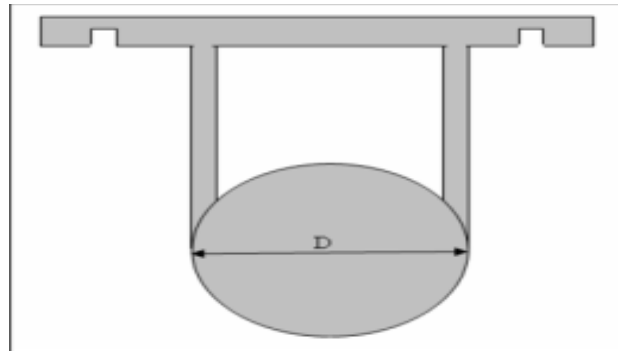


Figure IV.3 : Forme de la barrière utilisée

### IV.5 Caractéristiques Borak 22:

Propriétés électrique	Unité de mesure	Exigence de la norme huile neuve	Norme	Valeur Mesurée
Tension de claquage après repos	KV	>70	CEI 156	38.8-72
Facteur de dissipation diélectrique à 90°C tgδ		≤5.00 E-03	CEI 247	0.87 E-03
Propriétés physique				
Aspect		Limpide et exemple de matière solide	CEI 296	Limpide
Viscosité cinématique à 45°C	mm <sup>2</sup> /s	<11	ISO 3104	6.940
Point d'éclair	°C	>130	ISO 2719	137
Densité		<8.95 E-01	ISO 12185	8.57 E-01
Propriétés chimique				
Indice d'acidité	mg KOH/g	<3.00 E-2	CEI 296	(2-5.8)E-02
Teneur en Eau	ppm	<30	CEI 814	
Indice de couleur	ppm	<02	ASTM D 1500	<0.5
Indice de réfraction				1.474

### IV.5.1 PROPRIÉTÉS DE L'HUILE NEUVE

#### IV.5.1.1. Facteur de pertes diélectriques ( $\text{tg } \delta$ )



Figure IV.4 : Appareil mesure pertes diélectrique DTLC de BAUR

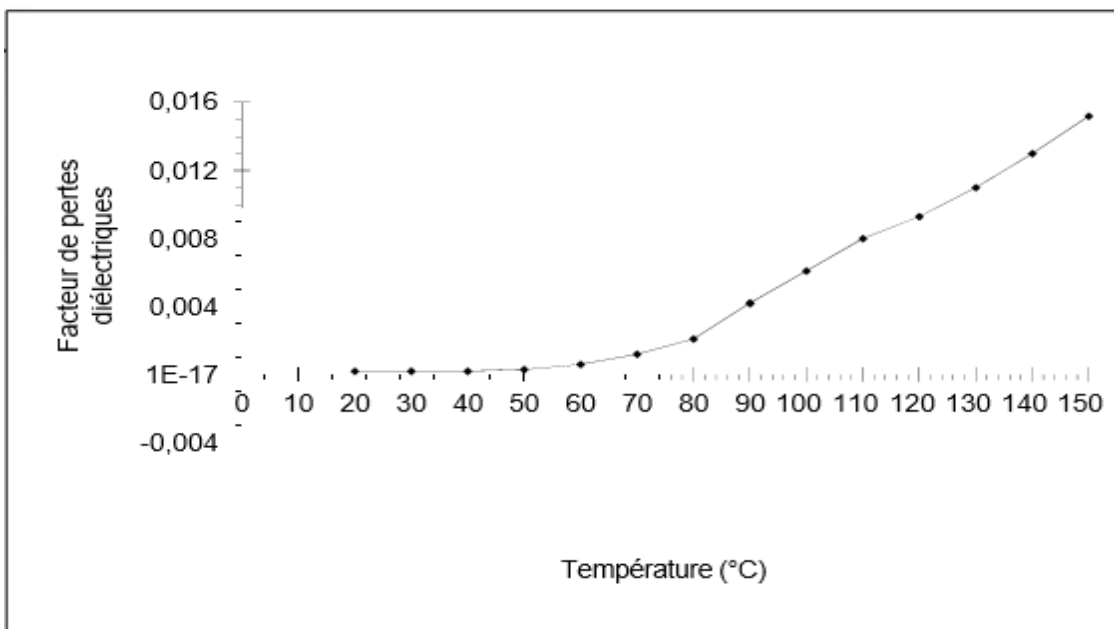


Figure IV.5 variations du facteur pertes diélectrique en fonction de la température

### IV.5.1.2 Permittivité relative $\epsilon_r$

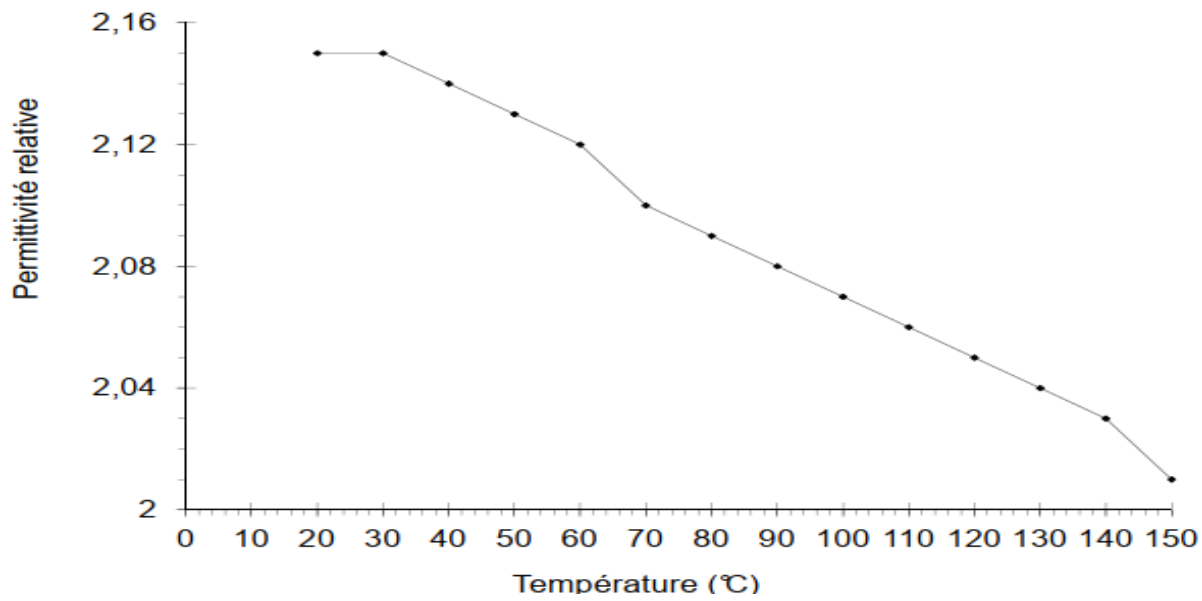


Figure IV.6 : Variation de la permittivité relative en fonction de la température

### IV.5.1.3 Résistivité $\rho$

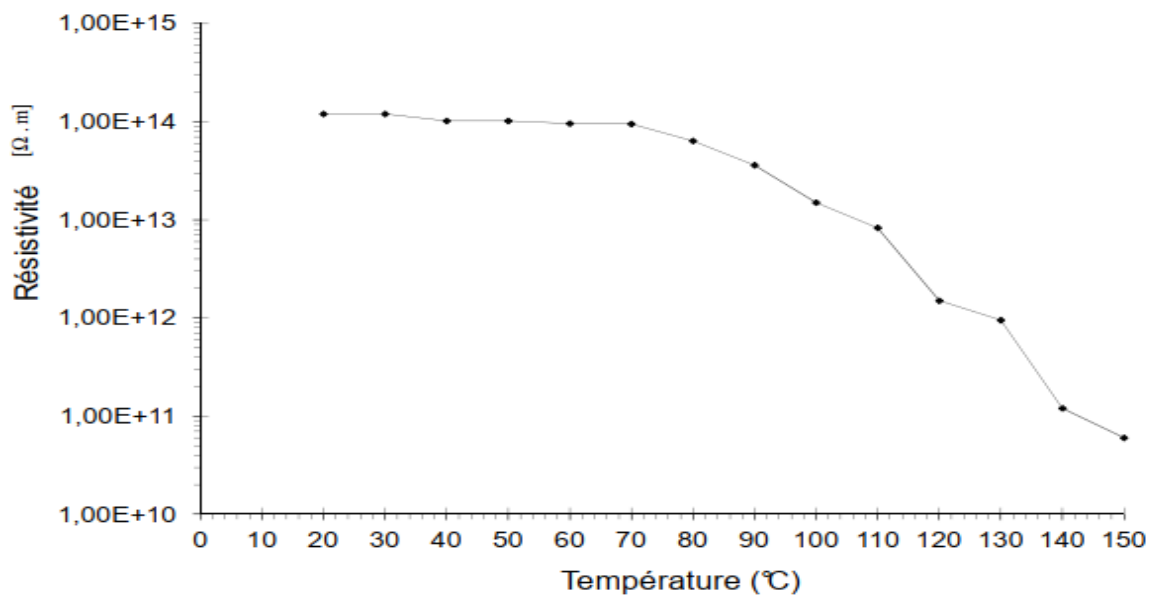


Figure IV.7 : Variation de la résistivité en fonction de la température

### IV.5.1.4 Rigidité diélectrique



*Vue d'ensemble*



*cellule*

**Figure IV.8: Spintermètre, OTS 100 AF/2 (SKMK-Blida)**

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

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

Cette valeur correspond au rapport tension – distance inter électrode, multiplié par le coefficient géométrique qui est de l'ordre de 1,12 [BBK1]



#### Acidité

L'indice d'acidité de l'huile neuve utilisée est compris entre 0,02 et 0,058 mg KOH/g d'huile.

L'indice de 0,058 est important, et reflète l'existence de composés organiques acides inhérents à la constitution chimique de l'huile, et à un mauvais Conditionnement de cette huile. [BBK1]

#### Teneur en eau

La mesure de la teneur en eau de l'huile neuve étudiée a donné une quantité d'eau de 30 p.p.m [BBK1]

#### Couleur

L'indice de couleur de l'huile neuve est compris entre 0,5 et 1.5 [BBK1]

#### Viscosité cinématique

La viscosité cinématique, mesurée à 40°C est comprise entre 6,94 et 12.54 mm<sup>2</sup>/s [BBK1]



## IV.6 Résultats et interprétations

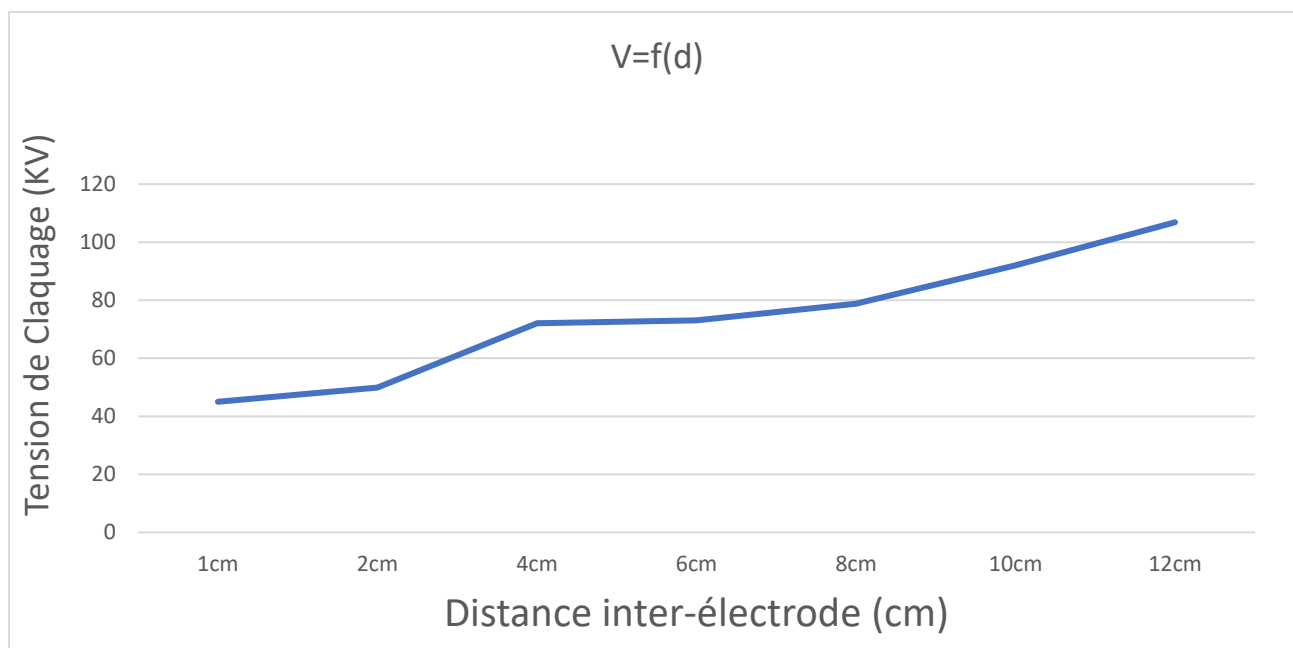
### IV.6.1 Essai sans barrière

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.

#### IV.6.1.1 Influence de la distante inter- électrodes sur la tension de claquage

La figure IV.9 représente la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour un rayon de courbure fixe  $r_p=6\text{mm}$ .

L'étude réalisée a pour différentes distances inter électrodes (1, 2, 4, 6, 8, 10 et 12cm), avec une pointe ayant 6 mm comme rayon de courbure.



**Figure IV.9 :** Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour un rayon égal à 6 mm

Nous observons qu'à Chaque fois la distance inter-électrodes augmente la tension de claquage augmente, La valeur maximale du champ est également affectée lorsque la distance inter-électrodes est variée Le champ électrique varie de manière proportionnelle avec la tension appliquée

### IV.6.1.2 Influence du rayon de courbure de l'électrode 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.11).

On remarque que le rayon de courbure de la pointe influe sur la tension de claquage, ces courbes (Figure IV.10,11) montrent que l'influence du rayon de courbure est importante et remarquable pour les petites distances inter électrodes (1, 2, 4 et 6 cm), d'autre part cette influence est très faible pour les grands 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.

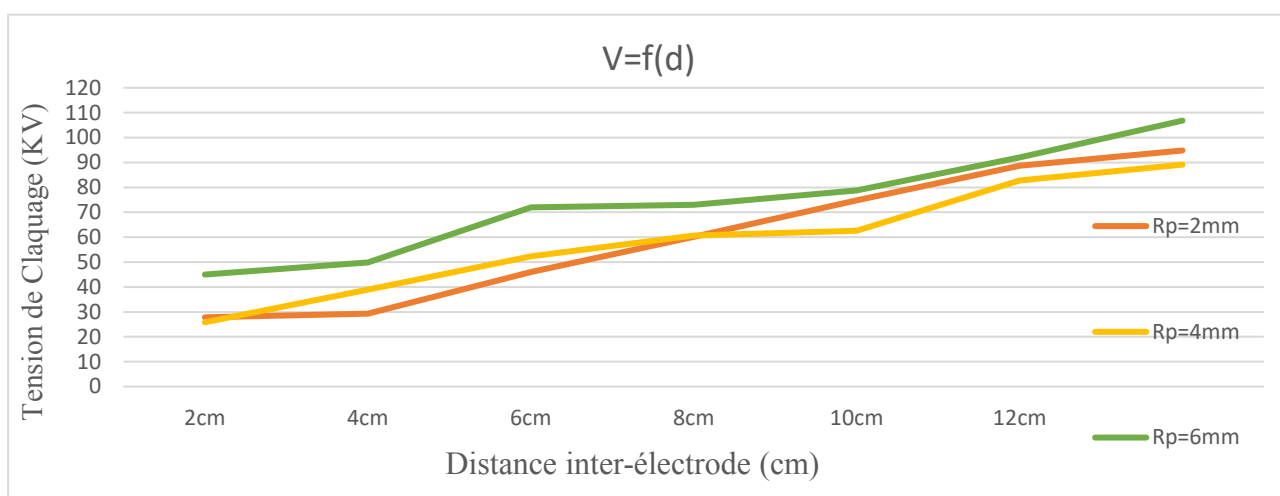


Figure IV.10 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes, pour différents rayons de courbure de la pointe

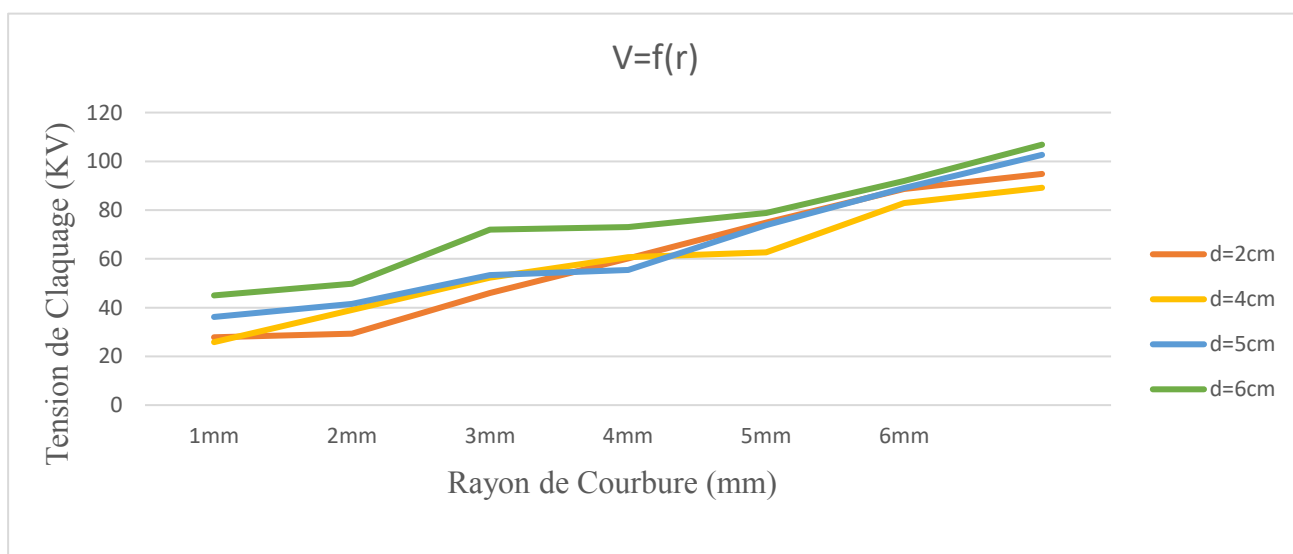


Figure IV.11 : Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différents distances inter électrodes

## IV.6.2 Essai Avec barrière

### IV.6.2.1 Influence du diamètre de la barrière sur la tension de claquage

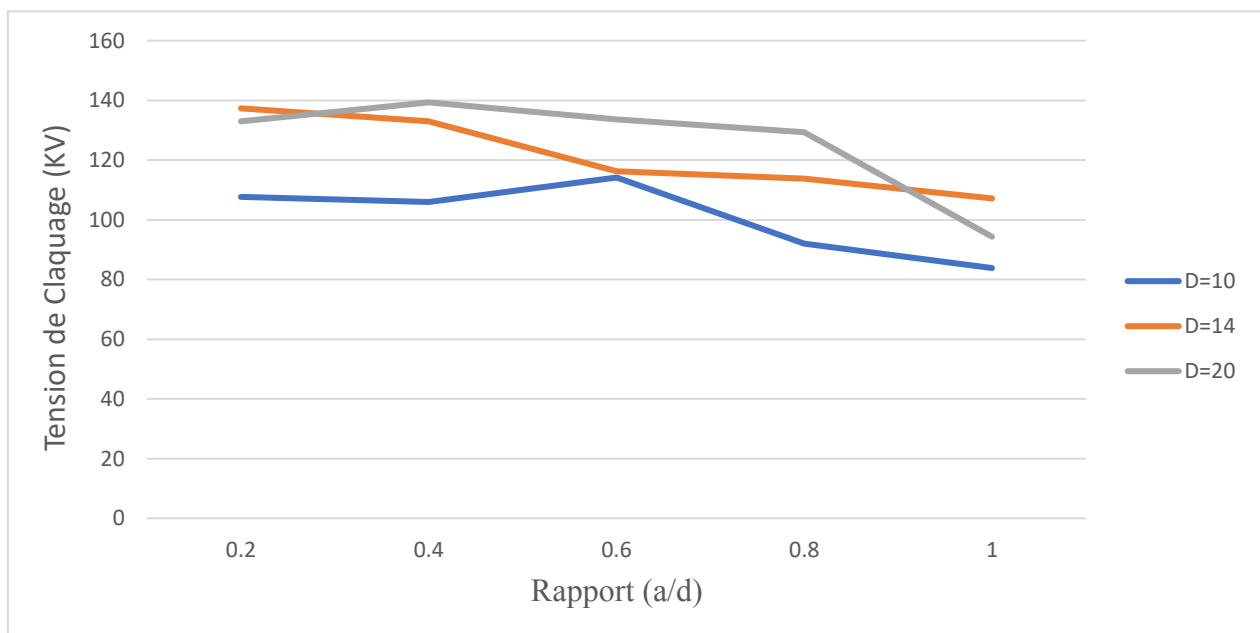
Ces essais sont réalisés en utilisant des barrières ayant différents diamètres ( $D=10, 14$  et  $20\text{cm}$ ), pour les distances inter électrodes variant de  $1$  à  $12\text{cm}$ .

Dans Figure IV.12 et IV.13 représente la variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière a différentes positions de la barrière.

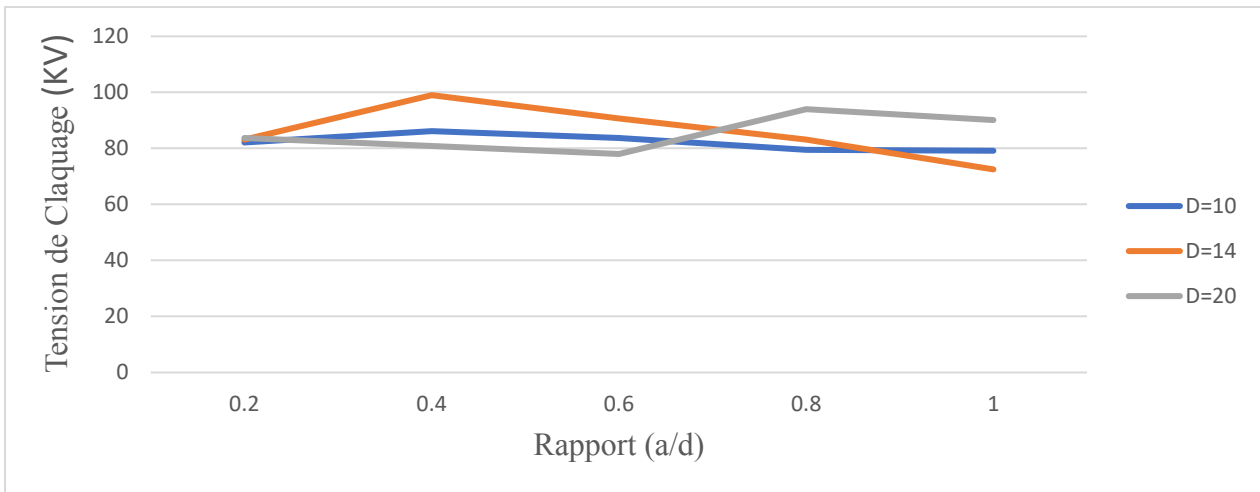
On remarque que l'augmentation de la tension de claquage est accompagnée de l'augmentation du diamètre de la barrière à cause de l'augmentation de la longueur minimale de fuite de la décharge.

Il ressort des résultats de cette étude que plus la largeur de la barrière augmente, plus le champ électrique nécessaire a engendré un arc électrique contourne cette barrière augmente.

Dans l'intervalle  $[0-0.6]$  on remarque que la tension de claquage à  $D=20\text{cm}$  plus grande que l'autre diamètres et on point  $a/d=0.6$  la tension de claquage à  $D=10\text{cm}$  presque égale à  $D=14\text{cm}$ .



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



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

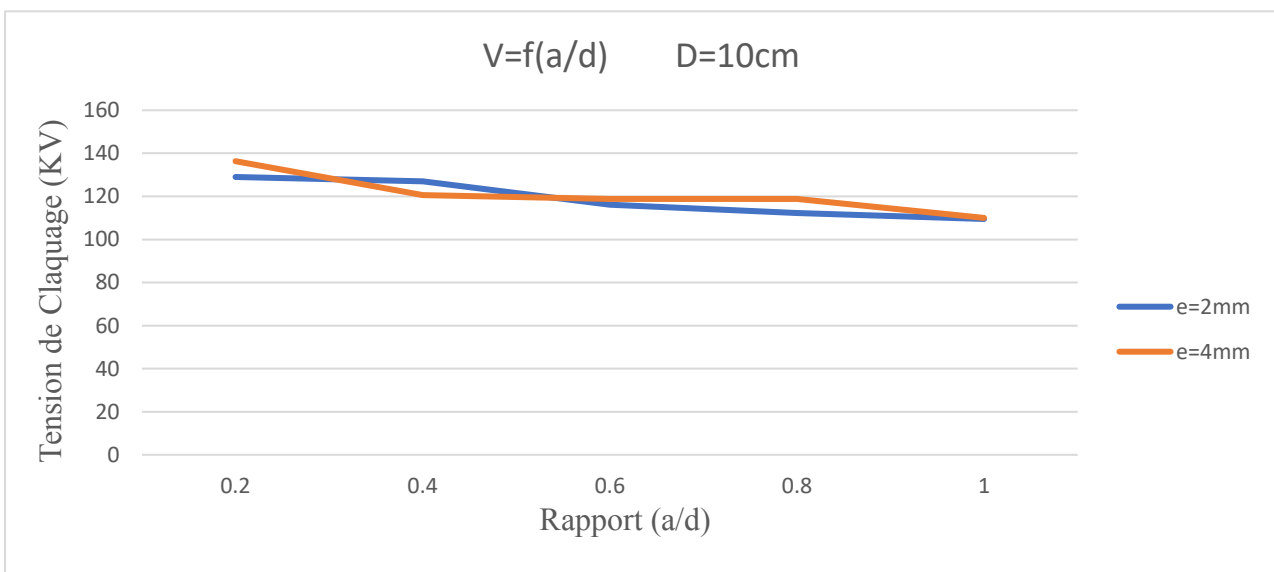
### IV.6.2.2 Influence du l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage

La figure IV.14 représente la variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière.

On remarque que l'épaisseur ça fait un léger effet sur la tension de claquage pour les deux épaisseurs choisies 2 et 4mm.

Ce paramètre a une influence sur la distribution des porteurs positifs et sur la chute de tension sur la surface de la barrière. Quand l'épaisseur aura des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, mais l'influence de l'épaisseur est beaucoup moins importante par comparaison à l'effet de la largeur et de la position de la barrière.

On remarque que dans l'intervalle [0-0.6] l'épaisseur aura plus efficace que l'épaisseur dans [0.6-1].



**Figure IV.14 :** Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière ( $D=10\text{cm}$  et  $d=12\text{cm}$ )

### IV.6.2.3 Influence du la position de la barrière sur la tension de claquage

L'objectif de ces essais est d'analyser l'influence de la position de la barrière sur la tension de claquage des systèmes d'isolation, nous avons utilisé une barrière d'épaisseur égale à 2 mm avec deux diamètre différents (D=10 et 20cm).

Les figures IV.15 et IV.16) représentent la variation de la tension de claquage en fonction de la position la barrière à partir des résultats obtenus, on peut constater que pour différentes largeurs (diamètres) de barrière, la valeur maximale de la tension de claquage est obtenue lorsque la barrière est proche de l'électrode pointe.

De cet optimum, elle diminue jusqu'à atteindre la valeur de la tension disruptive sans barrière. Lorsque la barrière touche l'électrode plan son influence reste faible et la tension de claquage est proche de celle sans barrière ou des fois moindres. La diminution de la tension de rupture lors de l'éloignement de la barrière de la pointe peut être attribuée à la réduction de la longueur totale de la décharge et à la faible influence de la charge d'espace dans l'intervalle pointe-barrière.

On remarque que dans le point  $a/d=0.2$  la tension de claquage de distance  $d=12\text{cm}$  et plus grande  $V=129\text{v}$ , dans l'intervalle  $[0-0.4]$  on observe que les résultats plus similaires pour chacune des distance  $d=10$  et  $d=8\text{cm}$  pour  $D=10\text{cm}$ .

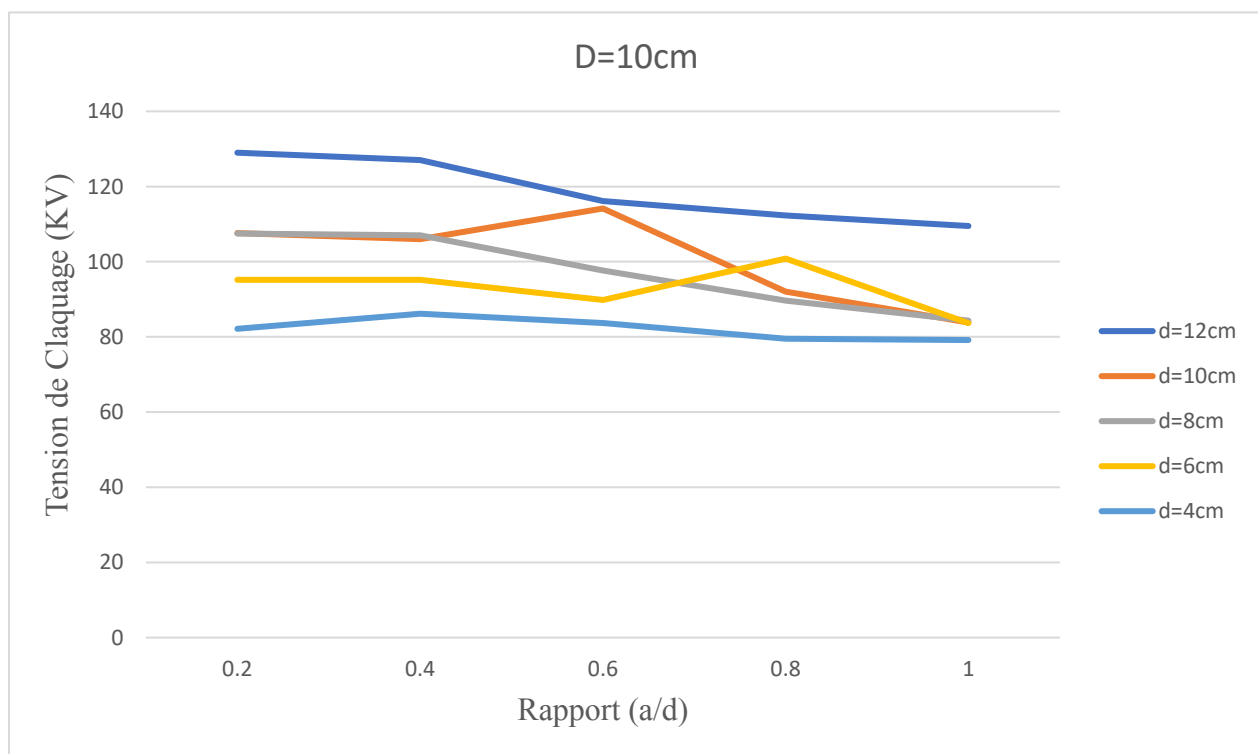
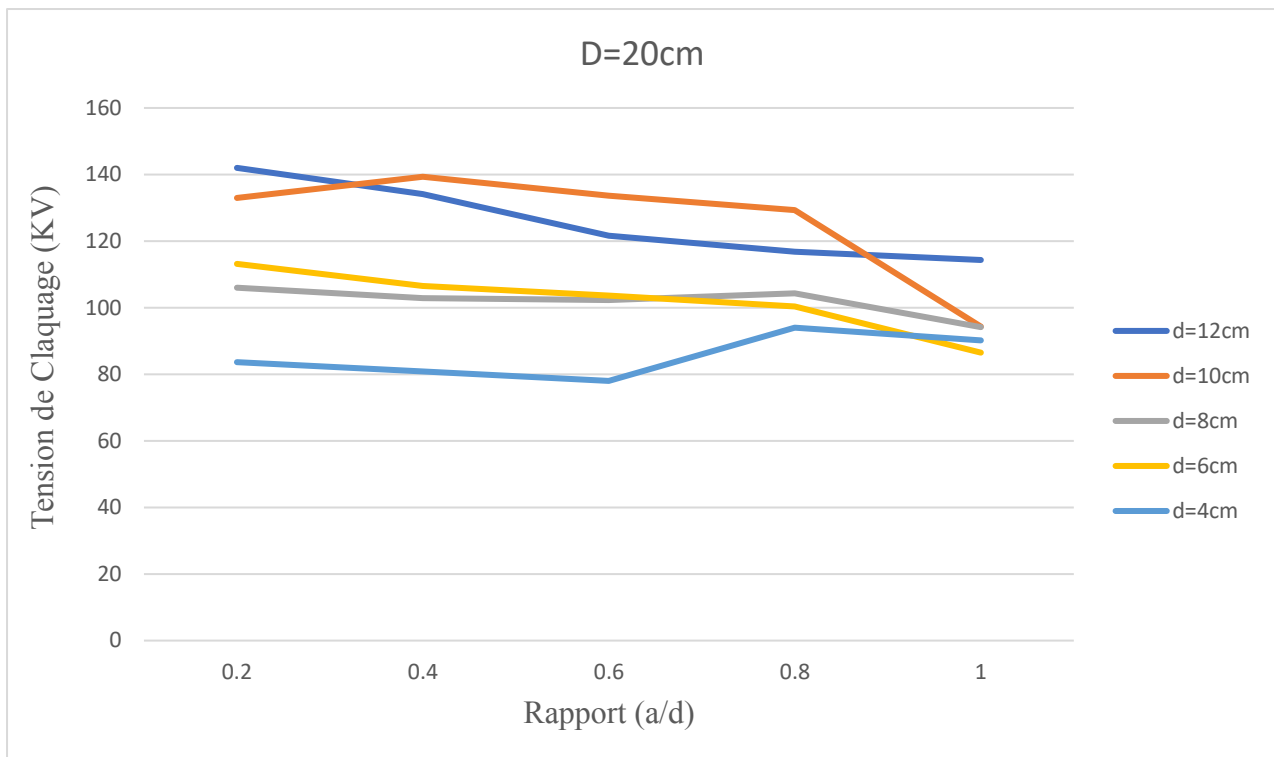


Figure IV.15 : Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière (e=2mm D=10cm)



**Figure IV.16 :** Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière (e=2mm et D=14cm)

### IV.6.3 Conclusion

Selon les différents résultats rapportés dans la littérature, l'insertion d'une barrière entre un électrode pointue (pointe, conique...) et une électrode plane immerger dans un fluide, améliore la rigidité diélectrique de l'huile. La barrière agit comme un obstacle géométrique sur le chemin du développement de la décharge. En effet, les charges injectées à l'électrode pointue s'accumulent sur la surface de la barrière faire en sorte que la barrière se comporte comme un plan de potentiel flottant électrode. Par conséquent, le champ électrique entre la barrière et l'électrode plans devient uniforme. Ainsi l'isolation système sera divisé en deux parties :

- 1- l'espace entre les électrodes pointue et la barrière (électrodes divergentes système)
- 2- entre la barrière et l'électrode plan.

Une telle configuration entraîne également une augmentation de la longueur du chemin de décharge, et donc une augmentation du diélectrique résistance de l'entrefer. Augmenter la rigidité diélectrique de l'isolant système en présence de barrière résulte de l'impact de ce dernier sur le canal d'évacuation. Le diélectrique solide les barrières immergées dans l'huile exercent des forces polarisantes sur rejets (streamers) proportionnellement à la différence de permittivité électrique à l'interface. On suppose que le la force agissant sur la charge de décharge résulte de l'Influence de la charge miroir sur l'interface barrière-huile, et est donc proportionnel à la différence entre l'huile et le matériau barrière

## CONCLUSION GENERALE

Une nouvelle approche de modélisation a été développée pour déterminer l'effet de l'insertion de la barrière isolante sur la propagation et la forme de la décharge électrique ainsi que le calcul de son efficacité dans un système pointe plan

Le modèle de calcul de l'efficacité est basé sur le fait que la barrière isolante joue le rôle de barrière géométrique et que la décharge électrique est régie par le champ électrique. Cette efficacité est un facteur très important pour les industriels. En effet, la prédétermination de cette efficacité permet d'éviter les essais expérimentaux.

En plus de cette prédétermination, ce modèle de calcul d'efficacité peut être utilisé pour une optimisation : partant de la distance inter-électrodes et en exploitant le modèle, nous pouvons déduire, moyennant une méthode d'optimisation, la largeur, l'épaisseur, la position de la barrière qui donneraient au système la possibilité d'être le plus rigide. Ce qui fera l'objet d'un futur travail.

Le modèle développé reproduit de manière satisfaisante les formes de décharges enregistrées lors des essais expérimentaux. En plus des décharges ordinaires, le modèle reproduit les formes particulières telles que les décharges à plusieurs canaux. Le modèle établi justifie correctement l'influence des dimensions et la nature de la barrière :

- L'augmentation de la largeur de la barrière augmente la rigidité du système.
- L'épaisseur de la barrière a très peu d'effet sur l'efficacité.
- L'efficacité varie en fonction de la position de la barrière dans l'intervalle inter-électrodes d'un système pointe –plan. Elle augmente jusqu'à un maximum (pour  $a/d= 0.2$ , dans le cas étudié) puis diminue.
- dans certains cas, l'efficacité peut atteindre des valeurs inférieures à 1. Ce dernier cas signifie que la présence de la barrière réduit la rigidité du système initial. Il est souvent obtenu pour des barrières placées sur le plan.

### References:

- [PER] **C. Perrier**, "Etude des huiles et des mélanges à base d'huiles minérales pour transformateurs de puissance- recherche d'un mélange optimal", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Avril 2005,
- [MIC] **MICHELE LAMBAR** : Documentation sur les analyses des huiles minérales
- [NRM 1] **Norme CEI 60 422 (Draft Ed. 3)** : Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques, 2004
- [BBKI] **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
- [SAZ] **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
- [SEA] **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
- [ZDJ] **Z.Djemai**, « Détermination de la dimension fractale des décharges électriques radiales sur les surfaces isolantes », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 1998.
- [BZB] **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
- [BMO] **B. Moula**, « Comportement de l'huile de transformateur (Borak 22) sous tension alternative 50 Hz», Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2007.
- [RTO] **R. Tobazéon**, «Préclaquage et claquage des diélectriques liquides », Technique de l'Ingénieur,D2450, 1997
- [BBK] **A. Boubakeur**, « Claquage des diélectriques liquides », cours quatrième année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004
- [RTO 1] **R. Tobazéon**, « Conduction électrique dans les liquides », Technique de l'Ingénieur, D2430,2003
- [BBK 1] **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

- [BBK 2] **A. Boubakeur**, « Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe – plan ». Rozprawy Electrotechniczne (Académie Polonaise des Sciences), Vol.27, N°3, Varsovie, Pologne, 1981, pp 729-744
- [JJB] **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
- [BER] **N. Berger**, "Liquides isolants en électrotechnique, Présentation générale", Techniques de l'Ingénieur, D 2 470, 2002.
- [CAS] **CASPER (W.)** : Transformateurs de puissance. Un regard rétrospectif et les perspectives des possibilités de développement futur. Revu. Brown Boveri (CH) 7 p. 421-31 (1976).
- [NAC] **A. Nacer**, Caractérisation diélectrique des matériaux – application à l'huile minérale de transformateur, Thèse de doctorat d'état, USTHB, 2009.
- [NRM] **Norme CEI 60 422 (Draft Ed. 3)** : Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques, 2004.
- [FRN] **R. Fournié, R. Coelho**, Diélectriques- Bases théoriques, Techniques de l'ingénieur, D2300, 2000.
- [BER 1] **BERGER (N.), RANDOUX (M.), OTTMANN (G.) et VUARCHEX (P.)** : Revue des isolants liquides. ELECTRA (F) no 171 p. 32-57 (avril 1997).
- [BER 2] **BERGER (N.) et JAY (P.)** : « Les liquides diélectriques de synthèse utilisés dans les transfo -ormateurs et les condensateurs». SEE Journées d'études Isolants électriques p. 91-5 (mars 1985).
- [LEA] **LEARDINI (H.)** : «Propriétés des Askarels et recommandations pour leur emploi dans les appareillages électriques». ELECTRA (F) no 33 p. 11-31 (mars 1974).
- [OME] **OOMMEN (T.V.) et CLAIRBORNE (C.C)** : «Fluide d'isolation biodégradable obtenu à partir d'huiles végétales à haute teneur oléique». CIGRE Rapport 15-302 (1998).
- [DOL] **B. Dolata, H. Borsi, E. Gockenbach**, New synthetic ester fluid for the insulation of liquid immersed transformers, Conference record on the 2006 IEEE international symposium on electrical insulation, Toronto, 11-14 June 2006, pp. 534-537.
- [MOK] **L.Mokhnache** : « Application des réseaux de neurones dans le diagnostic et la prédiction des isolation de haute tension», Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale polytechnique d'Alger, janvier 2004.
- [VUA] **P.J.VUARCHEX** : «huiles et liquides isolants ». Technique de l'ingénieur. Volume DAB, Traité D230, Juin 1995.

- [NRM 2] **Norme ISO 3016** « Produits pétrolier d'écoulement », Août 1994
- [BER 3] **N.Berger** : « Liquides isolants en électrotechnique et Caractéristiques des produits », Technique de l'ingénieur, D2471, 2002.
- [VAN] **W. H. Vandeschueren** : « Liquides diélectriques », Techniques de l'Ingénieur, D227, 1974
- [PRA] **V. PRABHSHANKAR, D. J. BADKAS**: « mechanism of oxidation of transformers oil», J. of inst of petr, vol 47, n° 450, juin 1961, pp 201-211
- [CRG] **Document CREDEG** : « les huiles isolantes de transformateur », juin 1999, Alger.
- [COQ] **COQUILLON (J.)** : « Le phénomène de dispersion anormale chez les diphényles chlorés», RGE (F) 58 no 4 p. 30-4 (1958).
- [BOU] **S.Boudraa** : « Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Thèse de Magister, Département d'Electrotechnique, Université de Batna, 2005.
- [EIM] Electrical insulating materials: International issues, Marcelo M. Hirschler editor, Library of congress cataloging-in – publication data, ASTM, STP 1376, March 2000.
- [NRM 3] **Norme internationale CEI 296** : « Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion », deuxième édition, 1982.
- [BPK] **B. P. KANG**, «Thermal dependency of viscosity, power factor and ion content of electrical insulating oil », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (USA) 9, September 1965.
- [PEY] **L. PEYRAQUE** : «Etude des phénomènes d'électrisation statique dans les transformateurs de puissance à débit d'huile force », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France, 1995.
- [NYN] **NYNAS**: Guide des huiles isolantes
- [MIK] **Mikhail Kostenko et Ludvik Piotrovski**, Machines électriques, t. I, Machines à courant continu, transformateurs, Éditions de Moscou (MIR), 1969, 3e édition, 1979, 766 p., « Deuxième partie –Transformateurs », chap. XII à XXII, p. 370-577.
- [CHA] **Charles Harel**, Machines électriques et essais de Machines, Société française des électriciens École supérieure d'électricité, Paris, 1960, chap. « Transformateurs », p. 118-180.

- [RKD]           **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
- [SAZ 1]       **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
- [DKZ]           **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
- [BBK1]       **A. Boubakeur**, « Vieillissement thermique de l'huile de transformateur Borak22 », conférence sur le vieillissement des transformateurs, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 23 novembre 2011

Résumer :

Notre travail parle sur l'amélioration de la rigidité diélectrique des intervalles d'huile du transformateur par l'insertion de barrière isolante sous tension alternative 50 Hz dans un système d'électrodes pointe-plan. Cette étude fait dans une huile appeler Borak 22, il est étudiée l'influence des différents paramètres tels que, l'influence d'insertion d'une barrière-isolante, 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.

يتحدث عن تحسين صيغ لقوة لعازلتي تالمح الت عن طويق إدخال حاجز عازلتحت ال جهد لهن اوب 50 وتزفي نظام ذوقيطين حد -مسطح. أحي ت هذه لدراس فيزي بي سي م ي لهر اق 22، ودر سن ا ت أنش ير ال ع و ا لم خ ت ل ف م ث ل ت أنش ير إدخال حاجز عازل، و أنش ير ال م س ا ف ق ب ن ل ل ق ب ط ي ن ال ك و ب ي ا و ي ن و ت أنش ير ن ص ف و ق ط ر ل ح ا ج ن ت ا ئ ج هذه لدراس نقتعل ق ت ط و ر ج ه د ال ا ن ه ي ا ر.

Our work speaks about the improvement of the dielectric strength of the oil intervals of the transformer by the insertion of an insulating barrier under alternating voltage 50 Hz, in a system of point-plane electrodes. This study is done in an oil called Borak 22, it is studied the influence of the different parameters such as, the influence of insertion of an insulating barrier, effect of the inter-electrode distance, effect of the radius of curvature of the peak, barrier diameter effect. The results of this study concerning the evolution of the breakdown voltage.