

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
LABORATOIRE DE HAUTE TENSION

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

THEME :

**Courant de préclaquage dans l'huile
de transformateur "Borak 22" dans le
système pointe-plan avec barrières
isolantes.**

Proposé et dirigé par :

Pr.A.BOUBAKER, ENSP

Mme F.GUERBAS, USTHB

Etudié par :

Sid Ali BENGHEZAL

Hani Boudjema HAMMADI

Promotion JUIN 2009

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الحواجز العازلة على التيار ما قبل الإنفصامي لمجالات زيوت المحولات (بوراك 22) تحت توتر متناوب ذو تردد صناعي 50 هرتز في نظام نتوء-مستوي.

قمنا بدراسة تأثير عدة عوامل منها: المسافة الفاصلة بين الأقطاب ، الوضعية النسبية للحاجز ، طبيعته و أبعاده .

قدمنا كذلك تغيرات الممانعة المكافئة و قارنا التيار ما قبل الإنفصامي في النظامين بدون و مع الحاجز.

الكلمات المفتاحية: زيت المحول ، نظام نتوء – مستوي ، الحواجز العازلة ، التيار ما قبل الانفصامي ، الممانعات.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des barrières isolantes sur le courant de préclaquage des intervalles d'huile de transformateur (Borak22) sous tension alternative à fréquence industrielle 50 Hz dans un système d'électrodes point-plan. Nous avons étudié l'influence de différents paramètres telles que la distance inter-électrodes, la position relative de la barrière, sa nature et ses dimensions. Nous présentons aussi les variations de l'impédance équivalente, et comparons le courant de préclaquage dans les systèmes avec et sans barrière.

Mots clés : huile de transformateur, intervalles pointe-plan, barrières isolantes, courant de préclaquage, impédance.

Abstract

The aim of our work is to study the influence of the insulating barriers on the predisruptive current of the transformer oil gaps (Borak22) under AC applied Voltage in a point-plane electrode system. We have studied the influence of different parameters such as the inter-electrode distance, the relative position of the barrier, its nature and dimensions. We present also the variations of the equivalent impedance, and compare the predisruptive current in the systems without and with barrier.

Key words: transformer oil, point-plane gaps, insulating barriers, predisruptive current, impedance.

Remerciements

Nous remercions Allah de nous avoir prêté vie, santé et volonté pour réaliser ce modeste travail ;

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, et à Madame F. GUERBAS, Chargée de Cours à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène, de nous avoir confié ce sujet et pour l'aide précieuse qu'ils nous ont toujours apportée jusqu'à l'achèvement de ce travail. Leurs insignes observations et suggestions ont été d'un grand apport pour son aboutissement. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur A. MEKHALDI, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, pour avoir accepté de juger ce travail et nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous remercions Monsieur M. TEGUAR, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger, d'avoir toujours été agréable avec nous et d'avoir bien voulu examiner notre Projet de Fin d'Études.

Nous tenons à remercier Monsieur O.TOUHAMI ,Professeur et Chef de département de Génie Electrique à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger, qui nous a toujours fourni les moyens afin que notre formation se déroule dans les meilleurs conditions.

C'est avec un énorme plaisir que nous formulons notre gratitude, et nos remerciements à Monsieur M. ZITOUNI, pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée et la patience dont il a fait preuve durant notre travail.

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

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, grands parents, ma petite et grande famille,

A mes sœurs ; Meriem, Fatima Zohra et Soumia,

Une dédicace chaleureuse à Aziza (a.g), exemple de patience et qualités humaines,

A tous mes enseignants, et toutes personne ayant participé à ma formation,

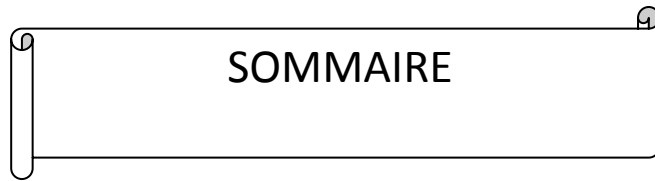
A tous ceux qui m'aiment et que j'aime,

Avec qui j'ai partagé vraiment les meilleurs moments d'aventure, de risque et de

bonheur, et que je ne pourrais jamais oublier....

A vous.

Sid Ali



SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I :

Huile minérale pour transformateur, propriétés

I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique.....	4
I.3 Généralités sur les transformateurs de puissance.....	5
I.3.1 Définition.....	5
I.3.2 Principaux éléments d'un transformateur.....	6
I.3.3 Défaillances et problèmes de transformateurs.....	6
I.3.4 Gestion de la vie d'un transformateur.....	7
I.4 Rôle des huiles isolantes.....	9
I.5 Les propriétés physico- chimiques.....	9
I.5.1 Viscosité.....	9
I.5.2 Le point d'écoulement.....	10
I.5.3 Point de feu et point d'éclair.....	10
I.5.4 Température d'auto- inflammation.....	10
I.5.5 Capacité thermique.....	11
I.5.6 Caractéristiques de combustion.....	11
I.5.7 Conductivité thermique.....	11
I.5.8 Acidité et couleur.....	11
I.5.9 Teneur en soufre.....	12
I.5.10 Stabilité de l'oxydation.....	12
I.6 Les propriétés électriques.....	12
I.6.1 Permittivité (constante diélectrique).....	13
I.6.2 Rigidité diélectrique.....	13
I.6.3 Facteur de dissipation diélectrique ($\text{tg } \delta$).....	13

I.6.4 Gassing.....	14
I.6.5 Electrification de l'huile.....	15
I.6.6 Formation de gaz dans un arc électrique.....	15
I.7 Classification des huiles isolantes.....	16
I.7.1 Selon la catégorie.....	16
I.7.2 Selon l'origine.....	19
I.7.2.1 Liquides de synthèse.....	19
I.7.2.2 Huiles végétales.....	20
I.7.2.3 Huiles minérales.....	20
I.8 Formulation des huiles minérales isolantes.....	21
I.8.1 Les huiles de base.....	21
I.8.1.1 La tendance paraffinique.....	21
I.8.1.2 La tendance naphthénique.....	22
I.8.1.3 La tendance aromatique.....	22
I.8.2 Les différents additifs.....	22
I.8.2.1 Les anti-oxydants.....	22
I.8.2.2 Les améliorants de l'indice de viscosité.....	23
I.9 Critères de choix d'un liquide diélectrique.....	23
I.10 Influence des différents facteurs sur les caractéristiques de l'huile.....	24
10.1 Effet des impuretés.....	24
I.10.1.1 Teneur en eau.....	24
I.10.1.2 Particules.....	25
I.10.2 Distance entre les électrodes.....	26
I.10.3 Température.....	26
I.10.4 Durée d'application de la tension.....	27
I.10.5 Nombre de claquages.....	27
I.10.6 Influence des écrans.....	27
I.11 Préclaquage et claquage des diélectriques liquides.....	28
I.11.1 Points communs au claquage des matériaux.....	29
I.11.2 Technique d'étude et test de caractérisation du claquage des liquides.....	29
I.11.3 Cellule de mesure pour liquides.....	30
I.11.4 Claquage des diélectriques liquides.....	31
I.11.4.1 Mécanisme de claquage par pont.....	32
I.11.4.2 Longues décharges dans les liquides.....	33

I.11.4.2.1 Mécanisme de streamers.....	33
I.11.4.2.2 Caractéristiques générales des streamers.....	34
I.12 Conclusion.....	34

CHAPITRE II :

Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d’intervalles d’huile en chocs de foudre et en tension continue

II.1 Introduction.....	36
II.2 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d’intervalles d’huile en chocs de foudre.....	36
II.2.1 Cas des interfaces perpendiculaires.....	36
II.2.1.1 Influence de la polarité.....	36
II.2.1.2 Influence de la distance inter-électrodes.....	37
II.2.1.3 Influence des dimensions de la barrière.....	38
II.2.1.3.1 Influence du rayon de la barrière.....	38
II.2.1.3.2 Influence de l’épaisseur de la barrière.....	39
II.2.1.4 Influence de la nature de la barrière.....	44
II.2.2 Cas des interfaces parallèles.....	46
II.2.2.1 Polarité positive.....	47
II.2.2.2 Polarité négative.....	48
II.3 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d’intervalles d’huile en tension continue.....	49
II.3.1 Système pointe-plan.....	49
II.3.2 Système Pointe – Pointe.....	50
II.4 Conclusion.....	50

CHAPITRE III :

Techniques expérimentales

III.1 Introduction.....	52
III.2 Techniques expérimentales.....	52
III.2.1 Station d’essai.....	53
III.2.2 Objet d’essai.....	55

III.2.3 Les Paramètres utilisés.....	57
III.2.4 Circuits de mesure.....	58

CHAPITRE IV :

Résultats et interprétions

IV.1 Résultats et interprétations.....	60
IV.1.1 Essais sans barrière.....	60
IV.1.1.1 Effet de la tension appliquée sur les courants de préclaquage.....	60
IV.1.1.2 Effet de la distance inter-électrodes sur les courants de préclaquage.....	61
IV.1.2 Essais avec barrière.....	62
IV.1.2.1 Effet de l'insertion de la barrière.....	62
IV.1.2.2 Effet de la position de la barrière.....	65
IV.1.2.3 Influence des dimensions de la barrière.....	68
IV.1.2.3.1 Effet du diamètre de la barrière.....	68
IV.1.2.3.2 Effet de l'épaisseur de la barrière.....	70
IV.1.2.4 Influence de la nature de la barrière.....	73
IV.1.3 Variations de l'impédance équivalente.....	75
IV.1.3.1 Système pointe-plan.....	75
IV.1.3.2 Système pointe-barrière-plan.....	76
IV.1.3.3 Effet de la barrière sur l'impédance équivalente.....	77
IV.2 Conclusion.....	79
Conclusion générale.....	80

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

Ces liquides et huiles entrent en contact avec différents matériaux et solides isolants, d'où la présence inévitable, dans le temps, de particules solides, d'eau, de gaz, une tendance à l'oxydation, la possibilité de génération et de transport de charges par frottement. Les volumes de liquides sont considérables (ils peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres cubes) et les intervalles de liquide libres sont quelquefois très grands.

Plusieurs points doivent être pris en considération avant l'utilisation des liquides isolants, entre autres :

- Prévoir leur aptitude à soutenir sans défaillance les contraintes normales de fonctionnement ;
- Tenir compte de leurs capacités à résister à diverses surtensions (ondes de foudre, surtension de manœuvres) ainsi qu'à des contraintes combinées continue et alternative, ou à la fréquence d'harmoniques d'amplitude importante ;
- S'assurer de leur tenue à long terme, donc apprécier leur « vieillissement » ;
- Pour les appareils de grande puissance, contrôler leur évolution au cours du temps et décider de la conduite à tenir [1] .

L'analyse des phénomènes de préclaquage est très utile pour une meilleure compréhension des mécanismes conduisant au claquage dans le système d'isolation soumis à de fortes surtensions.

L'étude du courant de préclaquage constitue une source d'informations appréciables et permet d'éviter les tests destructifs généralement coûteux.

C'est dans cette optique, que nous avons tenté, à notre échelle et par les moyens qui ont été mis à notre disposition d'apporter plus d'informations par une étude sur l'influence des barrières isolantes sur les courants de préclaquage de l'huile minérale isolante d'application industrielle. Notre choix s'est porté sur une huile de transformateur, utilisée par la SONELGAZ (Société Algérienne de l'Electricité et du Gaz) et commercialement dénommée « Borak 22 ». Nous avons mené notre travail en utilisant un système pointe-barrière-plan auquel une contrainte alternative de fréquence industrielle 50Hz est appliquée. Les essais de claquage ont été effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger.

Ce modeste travail met en valeur les recherches déjà effectuées [2-3] concernant la comparaison des courants de préclaquage correspondant à deux configurations différentes sous une même onde de choc : (i) système sans barrière, (ii) système avec une barrière isolante.

Notre travail comprend quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons essayé de justifier le choix des huiles minérales parmi d'autres liquides et huiles isolants, cela en rapportant les études et critères conduisant à ce résultat.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d'intervalles d'huile et aboutir à faire une comparaison des deux systèmes précédents en chocs de foudre et en tension continue.

Le troisième chapitre, décrit les étapes et les procédés concernant la partie expérimentale effectuée dans le laboratoire de haute de tension de l'école.

Ensuite, les résultats et interprétations des essais effectués sont exposés dans le quatrième chapitre.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE I

**Huile minérale pour transformateur,
propriétés**

I.1 Introduction

Les liquides isolants sont utilisés comme imprégnants d'isolants solides qui n'étaient pas imprégnés auparavant et qui s'oxydaient au contact direct avec l'air, d'où la nécessité d'imprégnants (les huiles isolantes dans notre cas) qui, par leurs caractéristiques ont vu le jour montrant une satisfaction par rapport à leur stabilité à l'oxydation, permettant leur utilisation pendant toute la durée de vie de matériels les plus contraints thermiquement.

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 silicone et certains types d'esters sont réservés à des applications particulières pour lesquelles le prix élevé peut être justifié [1].

I.2 Historique

Les isolants électriques furent à l'origine des produits naturels non imprégnés et qui s'oxydaient facilement en contact avec l'air.

Les transformateurs industriels, réalisés dès 1884, étaient de type sec. Il a fallu attendre 1891 pour que l'huile de pétrole soit utilisée à titre expérimental dans l'isolation de transformateurs triphasés. Devant la multiplication des réseaux de distribution d'énergie électrique et l'accroissement des puissances installées, les transformateurs dans l'air deviennent énormes. Pour réduire leur volume, l'emploi de l'huile minérale se généralisa dès 1905.

Des liquides isolants ont été employés au tout début du développement de la construction des équipements électriques haute tension. En général, les liquides sont associés à des isolants solides, et leur rôle principal est de remplacer l'air dans les cavités des solides pour améliorer la tenue aux décharges partielles et au claquage de l'isolation. Dans certains cas, notamment dans les transformateurs et quelques câbles de puissance, le liquide isolant est avant tout un fluide de transfert thermique qui sert à évacuer les calories produites au cœur de l'appareil.

Jusqu'à la fin des années 1960, les liquides isolants ne posaient pas de problème d'environnement ou de toxicité. La découverte d'une pollution mondiale par les polychlorobiphényles (PCB) a montré du doigt la famille des liquides isolants dans son ensemble, et elle est devenue la cible des médias. Dans les années 70 leur usage fut interdit de part leur toxicité et leur danger sur la santé publique.

Il en résulte une suspicion de plus en plus grande à leur égard, leur emploi est de plus en plus restreint et soumis à des réglementations par les autorités nationales. C'est cette phobie qui a entraîné des recherches pour essayer de trouver des substituts « verts », notamment à base d'huiles végétales [1-4].

I.3 Généralités sur les transformateurs de puissance

I.3.1 Définition

Le transformateur est un appareil électrique statique qui transforme un courant alternatif primaire en un courant secondaire de même fréquence ayant dans le cas général d'autres caractéristiques [5].

I.3.2 Principaux éléments d'un transformateur

Les parties principales d'un transformateur sont [6] :

- Le noyau ;
- L'enroulement ;
- La cuve remplis d'huile ;
- Les isolateurs de sorties.

Les transformateurs remplis d'huile sont les plus utilisés, leur partie active est placée dans une cuve remplie d'huile.

Le tuyau d'échappement protège la cuve contre les endommagements possibles en cas de court-circuit par suite de la formation de gaz dans la cuve et de l'accroissement brusque de la pression.

Le conservateur d'huile est un récipient en tôle installé au dessus du couvercle de la cuve et réuni à l'aide d'une tubulaire avec cette dernière. Le niveau d'huile dans le conservateur doit être tel que la cuve soit toujours remplie d'huile. Le relais Bucholz est situé entre le conservateur et la cuve. Il signale tout accident dans le transformateur de réseau en cas d'avarie [5].

I.3.3 Défaillances et problèmes de transformateurs

Lors de son fonctionnement, un transformateur est le siège de pertes d'énergie, dont la plus grande partie est localisée dans deux éléments principaux :

- Le circuit magnétique où elles sont causées par la variation du flux alternatif dans les tôles magnétiques.
- Les enroulements où elles sont dues en grande partie à l'effet Joule, mais aussi au courant de Foucault [7-8].

De plus, l'huile dans un transformateur finit toujours par s'altérer après une certaine durée de sa mise en service, conduisant à la modification de ses caractéristiques à un point où elle n'assure plus sa fonction et peut conduire à de sérieux incidents. La défaillance d'un transformateur peut se produire en raison des problèmes suivants :

- L'absorption de l'eau de l'air (humidité),
- Les impuretés dans l'huile (contamination),
- Le vieillissement.

Ces facteurs font que la rigidité diélectrique interne du transformateur diminue.

Les matériaux insolubles constitués par des réactions chimiques peuvent se déposer sur le noyau, l'enroulement, la paroi et le fond du réservoir. Ce dépôt, s'il est formé, baissera la tension de claquage de l'huile, et réduira le refroidissement du transformateur et peut contribuer au claquage de l'huile [8].

De telles anomalies se manifestent habituellement par l'échauffement de l'huile ou du papier, par les décharges partielles ou l'arc électrique. Ces symptômes s'appellent les défauts dans le contexte de l'entretien électrique des équipements.

Les statistiques indiquent que le vieillissement de l'isolant, l'endommagement des enroulements et la contamination sont les sources principales pour les défaillances des transformateurs qui avaient été en service entre 15 et 25ans. Le coût et le temps de réparation et remplacement du transformateur de puissance sont considérables.

I.3.4 Gestion de la vie d'un transformateur

Les transformateurs de puissance sont des appareils extrêmement coûteux. Evaluer l'état d'un appareil à partir d'analyses effectuées sur l'huile qu'il contient est un très bon marché comparativement à ce que coûte l'interruption de la fourniture d'énergie électrique par suite d'un claquage de transformateur et le remplacement de ce dernier. La surveillance en service des gros transformateurs est donc systématique,

par contre, dans le cas des petits transformateurs de distribution, la surveillance ne se justifie pas.

L'analyse des gaz dissous, telle une analyse de sang, est couramment utilisée pour connaître l'état de dégradation d'une huile et celui de l'appareil qui la contient. Un des objectifs de cette analyse est de savoir quand un appareil doit être mis hors service [1].

Les teneurs en gaz, leur vitesse de production et leur répartition permettent d'avoir une idée du type de dégradation qui affecte l'isolation (Tableau I.1) : surchauffe de basse ou haute température, décharges partielles, décharges de fortes intensités [7-8] .

Notons, que la vie d'un transformateur dépend aussi de la vie de son isolation, donc de la rigidité mécanique et électrique des isolants utilisés.

La température d'un transformateur a un impact important sur la vie de l'isolation.

Défauts	Gaz détectés	Gaz clé
Arcs électriques	Formation de grandes quantités d'hydrogène et d'acétylène, avec de petites quantités de méthane et éthylène. Il peut y avoir également formation de CO et CO ₂ s'il y a de la cellulose à l'endroit du défaut	Acétylène
Décharges partielles (Corona)	Les décharges de faible énergie produisent de l'hydrogène et du méthane, avec de petites quantités d'éthane et d'éthylène. Des quantités comparables de CO et CO ₂ peuvent provenir de décharges dans la cellulose.	Hydrogène
Surchauffe de l'huile	Les produits de décomposition sont l'éthylène et le méthane, avec de petites quantités d'hydrogène et d'éthane. Des traces d'acétylène peuvent être produites si la surchauffe est sévère ou si un contact électrique intervient dans le défaut	Ethylène
Surchauffe de la cellulose	Formation de grandes quantités de CO et CO ₂ , Si le défaut a lieu dans une structure imprégnée, du méthane et de l'éthylène sont également formés	Monoxyde de carbone (CO)

Tableau I.1 : Formation de gaz dissous [1]

I.4 Rôle des huiles isolantes

Les huiles et liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolants solides et produits de remplissage de matériels électriques divers : transformateurs, condensateurs, câbles, disjoncteurs, etc. Ces appareils présentent des pertes d'énergie qui, aussi faibles soient-elles (1 à 10% de la puissance nominale), provoquent une élévation de la température. Celle-ci peut être limitée par l'emploi d'huile ou de liquide ou par refroidissement naturel (convection) ou forcé (circulation).

90 à 95% des liquides isolants sont représentés par les huiles minérales, dont l'importance commerciale s'explique par la facilité de les obtenir (à partir des coupes pétrolières) et par leur prix, le plus bas de tous les isolants. Cette masse d'huile ne représente cependant qu'une infime partie (2%) de l'ensemble des lubrifiants [9]

Les trois fonctions principales d'une huile isolante sont :

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

A côté des fonctions fondamentales, il y a lieu d'ajouter la fonction de résistance à l'incendie, dont le pouvoir d'extinction des arcs électriques, et le pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement [10].

I.5 Les propriétés physico- chimiques

Le choix d'une huile isolante repose sur un nombre important de propriétés.

I.5.1 Viscosité

La viscosité d'un fluide traduit l'ensemble des forces qu'opposent les molécules de ce fluide à une force tendant à les déplacer, autrement dit c'est la résistance au mouvement que manifeste tous les fluides.

La viscosité diminue avec la température, par contre elle augmente avec la pression. Pour une huile minérale, la viscosité a tendance de doubler quand la pression passe de la pression atmosphérique à 350 Bars.

Il existe deux types de viscosité : dynamique, qui visualise l'aspect microscopique et, cinématique exprimé en centistokes qui traduit l'aspect macroscopique.

L'indice de viscosité exprime la variation de la viscosité en fonction de la température. Les huiles de transformateur ont un indice très bas permettant une meilleure circulation, donc un refroidissement plus efficace [11].

I.5.2 Le point d'écoulement

Les matériels électriques étant utilisés à l'extérieur donc soumis à des températures très basses (jusqu'à -25°C en hiver) nécessite de connaître l'influence directe de la baisse de température sur les liquides utilisés qui se figent généralement à des températures pouvant aller de -60°C à -30°C correspondant aux huiles minérales.

Le point d'écoulement est défini comme étant la température la plus basse pour laquelle un liquide peut couler lorsqu'il est refroidi. Les huiles de point d'écoulement le plus bas sont généralement obtenues à partir des coupes naphthéniques.

I.5.3 Point de feu et point d'éclair

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

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

Ainsi, le point de feu et le point d'éclair servent à caractériser l'inflammabilité d'une huile[12].

I.5.4 Température d'auto- inflammation

La température d'auto – inflammation d'un liquide est la température minimale à laquelle se produit une combustion instantanée. Elle est supérieure à celle du point

d'éclair. Alors que le point de feu caractérise les limites thermiques de service, la température d'auto – inflammation nous renseigne sur le comportement du liquide dans un incendie.

I.5.5 Capacité thermique

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

La capacité thermique des huiles isolantes exprimée en Joule par kilogramme Kelvin croit avec la température et est généralement d'autant plus élevée que la masse volumique est plus faible [13].

I.5.6 Caractéristiques de combustion

Certains liquides, quoique dits peu inflammables, n'en brûlent pas moins et leur comportement dans les matériels pris dans un incendie pose problème et pour y remédier, les caractéristiques de combustion sont prises en considération tels que l'indice limite d'oxygène, la capacité thermique de combustion et le dégagement de fumée qui sont associés à la corrosivité des produits de combustion et à leur toxicité.

I.5.7 Conductivité thermique

Désignée par (λ), la conductivité thermique est mesurée en [W/m.K]. 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.

I.5.8 Acidité et couleur

L'acidité de l'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.

Quand l'huile est neuve, on ne remarque pas la présence ou pas d'acides minéraux mais plutôt celle des acides organiques.

Par contre, la couleur de l'huile s'accroît de claire (indice <0.5) à jaune (indice <2.5), brune (indice 5.5), pour devenir noire (indice 8). Ces changements de

couleur peuvent être entraînés par l'oxydation, mais aussi par la mise en solution de pigments de matériaux incompatibles.

La couleur et l'odeur, nous renseignent sur l'état général de l'huile, en effet, une mauvaise odeur renseigne sur la présence d'amorçage d'arcs électriques dans l'huile[14].

I.5.9 Teneur en soufre

Les composés organosoufrés présents dans les huiles minérales correspondent à la nécessité de maintenir des hydrocarbures aromatiques pour donner aux huiles une bonne stabilité à l'oxydation. Pour une huile mal raffiné, des traces d'hétérocycles oxygénés peuvent rester. Ce sont des composés généralement instables qui initient les réactions d'oxydation et sont responsables de l'acidité initiale de l'huile [15].

I.5.10 Stabilité de l'oxydation

L'ensemble des réactions entre l'oxygène dissous et les hydrocarbures est désigné par le phénomène d'oxydation. La vitesse de ces réactions croît avec la température mais aussi avec la concentration en oxygène.

Les conséquences de l'oxydation de l'huile isolante sont :

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

I.6 Les propriétés électriques

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

I.6.1 Permittivité (constante diélectrique)

La permittivité d'une huile minérale est une caractéristique électrique liée à la structure du liquide.

Elle est due surtout aux phénomènes de polarisation électronique et atomique. C'est une caractéristique intrinsèque de l'huile.

La permittivité d'une huile minérale est influencée par la température et la fréquence appliquée, elle traduit donc la charge électrique qu'elle contient[16].

I.6.2 Rigidité diélectrique

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

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

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

La rigidité diélectrique à 50Hz d'une huile minérale dépend peu du type (naphténique ou paraffinique) et du procédé de raffinage [17].

I.6.3 Facteur de dissipation diélectrique ($\text{tg } \delta$)

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

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

En plus il y a une relation entre le facteur de dissipation et l'acidité de l'huile. Une acidité élevée est accompagnée par une valeur élevée de $\text{tg } \delta$, mais notons que l'inverse n'est pas vérifié. Une valeur défavorable de $\text{tg } \delta$ peut être due à la dissolution des produits qui n'ont pas pour origine l'altération de l'huile.

Une huile neuve possède un facteur de dissipation diélectrique inférieur ou égal à $5 \cdot 10^{-3}$ [16].

I.6.4 Gassing

On appelle Gassing « G », la vitesse de variation du volume de gaz pendant 120 minutes d'application de la tension, il s'exprime en $[\text{mm}^3/\text{min}]$.

La tendance au Gassing des huiles minérales n'est pas systématiquement utilisée pour les caractériser. Il n'y a d'ailleurs pas d'accord général sur les valeurs acceptables. Cependant, la formation de gaz ne doit pas être trop importante car elle peut conduire à l'apparition de bulles qui sont extrêmement dangereuses pour les appareils électriques. En effet, les gaz ont une tenue diélectrique faible et leur apparition peut conduire au claquage complet de l'isolation.

Le Gassing sous hydrogène (norme CEI 600628, méthode A) des huiles minérales varie de +30 à -30 $\mu\text{L}/\text{min}$. La valeur du Gassing est fortement dépendante de la teneur en hydrocarbures aromatiques.

Les huiles productrices de gaz (en anglais gas-evolving) sont en général paraffiniques, alors que les huiles absorbeuses (gas-adsorbing) sont en général naphthéniques.

L'utilisation d'huiles productrices de gaz est possible si le design des appareils est tel que le risque d'avoir des décharges partielles est faible. Dans le cas contraire,

les huiles gas-adsorbant sont préférables. L'ajout de quelques pourcents d'un liquide fortement aromatique permet de rendre gas-adsorbant une huile qui ne l'est pas [18].

I.6.5 Electrification de l'huile

Le problème de l'électrification de l'huile dans les grands transformateurs de puissance est apparu au début des années 1980, suite au claquage d'un certain nombre d'appareils peu de temps après leur mise en service. Des études ont montré que ces claquages étaient dus à l'apparition de charges électrostatiques créées par la circulation très rapide de l'huile à travers les enroulements. La séparation des charges entre l'huile et les surfaces isolantes (papier des enroulements) et leur accumulation en des zones distinctes (en général, les charges positives au sommet de l'appareil, les charges négatives dans le bas) conduisent à l'apparition d'un champ électrostatique qui se superpose au champ électrique alternatif de l'appareil. Des décharges partielles ou des décharges rampantes peuvent alors survenir, voir un arc électrique conduisant au claquage du transformateur.

Les principaux paramètres qui influent sur la tendance à l'électrification d'une huile sont [1] :

- La vitesse de circulation de l'huile ;
- Le niveau du champ électrique alternatif ;
- Les propriétés de l'huile telles que la viscosité et la conductivité (qui varient avec la température) ;
- La structure de l'isolation solide et la géométrie des canaux d'huile, la rugosité du papier ;
- La teneur de l'huile en impuretés (eau, boues d'oxydation, particules) ;
- L'humidité du papier.

I.6.6 Formation de gaz dans un arc électrique

Dans les arcs électriques (températures très élevées $> 2000\text{ °C}$), tous les liquides sont décomposés. La nature des gaz formés et leurs proportions relatives

permettent de caractériser la sévérité de la contrainte [18]. La vitesse de formation des gaz serait de l'ordre de 20 à 100 mL/(s.kW) dissipé dans l'arc.

Une étude récente compare les huiles minérales aux esters et huiles silicones vis-à-vis de la formation de gaz dans les arcs électriques et les décharges partielles[19].

I.7 Classification des huiles isolantes

Les liquides et huiles isolants peuvent être classés selon la catégorie ou selon l'origine d'extraction.

I.7.1 Selon la catégorie

Le tableau I.2 présente, par catégorie, les types les plus courants d'huiles et de liquides isolants. On notera que ces liquides sont généralement des liquides organiques, composés de molécules des séries d'hydrocarbures les plus stables : aliphatiques (alcanes), alicycliques (cyclanes), aromatiques ou de leurs dérivés halogénés; ce sont rarement des composés à groupements fonctionnels. Cela correspond à la propriété évidente d'utilisation qui est la stabilité en service sous contraintes thermique et électrique, afin d'assurer aux matériels les durées de vies constatées de plus de 30 ans [20].

Différentes catégories de diélectriques liquides

N°	Catégorie	Type	Application	Caractéristiques particulières
I.	Huiles minérales	Naphténiques	Tous types : Transformateurs, condensateur, câbles, etc.	-Bas point d'écoulement sans additif. -Teneur en hydrocarbures aromatique > 12%
		Paraffiniques		- Indice de viscosité de 115 à 120(60 pour une huile naphténique)
		A masse moléculaire élevée	Transformateurs de distribution (remplacement des PCB)	-Point de feu > 300°C
II.	Hydrocarbures de synthèse	Polybutènes	câbles d'énergie	Pertes diélectriques très faibles $tg\delta < 0.0005$ à 50Hz et 90°C
		Alkylbenzènes	Traversées	-Rigidité électrique au choc de foudre élevée -Absorption gazeuse sous décharges partielles
		Alkylnaphtalènes	Condensateurs	
		Alkylbiphéniles	Condensateurs tout film	
III.	Hydrocarbures halogénés	Perchloréthylène	Transformateurs de distribution	-Résistant au feu -Appareils scellés et à points chauds limités par la température d'ébullition
		Trichlorobenzènes	Liquides d'attente en rétrofilling(post-remplissage)	-Solvant des PCB -Inflammabilité

		Polychlorobiphényles	transformateurs	-Inflammabilité
		polychlorophénylalcane		-Biodégradabilité
		Trichlorotrifluoroéthane		Transformateurs pour équipement électronique et rayon X
IV.	Esters organiques	Néocaprates de benzyle	Condensateur au papier	-Permittivité relative >5 à 20°C à 50Hz
		Dioctylphtalate	Remplacement des PCB	-Permettent en mélange d'accroître le point de feu des diélectriques liquides
		Esters phosphates	Organe de coupure immergé	
		Esters du pentaérythol	Transfo de traction et de distribution	-Point de feu > 300°C
V.	Silicones liquides	polydiméthylsiloxanes	Transfo de traction	-Point de feu > 300°C -Indice de viscosité élevé : 170
		polyméthylphénylsiloxane	Liquide expérimental	-Absorption gazeuse sous décharge partielle
VI.	Liquides divers	Ethers-oxydes (alkyldiphényle-éther, dotolyléther)	condensateurs	Permittivité relative, à 20°C, > à 3, adaptabilité
		Mélanges de liquides	condensateurs	-Adaptabilité
		Gaz liquéfiés (Argon)	Enroulement supraconducteur et cryogénique	-Réduction ou suppression de pertes Joule.

Tableau I.2 : Caractéristiques et applications de diverses catégories d'huiles diélectriques [1]

I.7.2 Selon l'origine

I.7.2.1 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 (transformateur) ou lorsque l'on recherche une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs) [9].

Il existe quatre types principaux de liquides de synthèse :

- Les hydrocarbures aromatiques : ces liquides peuvent être classés en deux groupes : les alkybenzènes 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 réaction d'acides organiques et d'alcools. Ces produits offrent d'excellentes propriétés lubrifiantes et des opérabilités aux températures extrêmes.
- Les silicones : ont été proposées comme liquides de remplacement des askarels pour transformateurs. Le produit le plus communément employé est le polydiméthylsiloxane.

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

Les polychlorobiphényles (ou polychlorodiphényles selon la nomenclature) sont également des liquides de synthèse et ont été utilisés largement pendant une trentaine d'années. Leur persistance dans l'environnement conduit à leur bannissement ; Cependant, ils sont encore présents dans certains appareils âgés. Seuls des produits biodégradables sont maintenant acceptés [9].

I.7.2.2 Huiles végétales

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

Elles sont généralement peu toxiques et biodégradables. Ces qualités sont dues notamment à une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Ces deux caractéristiques, qui sont favorables pour l'aspect écotoxicologique, représentent un inconvénient important pour les applications électrotechniques. Par ailleurs, leur rigidité diélectrique n'est pas très élevée. Pour ces raisons, les huiles végétales sont relativement peu utilisées (essentiellement dans certains types de condensateurs à courant continu), bien que leur emploi dans les transformateurs ait été proposé récemment [1].

I.7.2.3 Huiles minérales

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

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

L'amélioration progressive des procédés de raffinage des bruts a abouti à l'obtention d'huiles minérales de plus en plus performantes. Ces améliorations, associées aux évolutions technologiques, ont permis de réduire progressivement les volumes d'huiles dans les appareils [1-9].

I.8 Formulation des huiles minérales isolantes

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

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

I.8.1 Les huiles de base

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

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

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

Les huiles de base répondent à de grandes tendances chimiques de caractères spécifiques particuliers qui sont cités ci-dessous.

I.8.1.1 La tendance paraffinique

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

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

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

I.8.1.2 La tendance naphténiq

Les types de naphténes ayant seulement quelques cycles par molécule et une prépondérance d'atomes de carbone sous forme de longues chaînes paraffiniques possèdent probablement les propriétés qui sont les plus désirées dans les huiles de graissage. Les caractéristiques physiques et chimiques de ces hydrocarbures se traduisent en particulier par:

- Une densité relativement élevée pour une viscosité donnée;
- Des variations assez rapides de viscosité en fonction de la température;
- Une plus grande volatilité que les fonctions paraffiniques correspondantes de même viscosité;
- Un pouvoir solvant relativement élevé.

I.8.1.3 La tendance aromatique

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

I.8.2 Les différents additifs

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

I.8.2.1 Les antioxydants

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

- Huile non inhibée: c'est une huile isolante qui ne contient pas d'antioxydant, mais qui peut contenir d'autres additifs (Borak 22).

- Huile inhibée: c'est une huile isolante qui contient de 0,15 à 0,4% en masse d'un antioxydant, par exemple le 2.6 diterbutyl-paracrésol (DBPC) ou 2.6 diterbutyl-phenol (DBP), pour augmenter la stabilité de l'huile à l'oxydation [21].

I.8.2.2 Les améliorants de l'indice de viscosité

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

I.9 Critères de choix d'un liquide diélectrique

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

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

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

- Des caractéristiques physiques et chimiques que l'on désire conférer à l'huile finie comme la viscosité, la densité, la stabilité,.....
- De la nature chimique recherchée : paraffinique, naphténique ou mixte [10-22].

I.10 Influence des différents facteurs sur les caractéristiques de

l'huile

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

I.10.1 Effet des impuretés

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

Dans les appareils anciens, l'huile peut également être contaminée par des PCB. Cette contamination n'affecte pas les propriétés de l'huile mais, si l'huile en contient plus de 50 ppm (0,005%), elle est considérée comme un PCB pur et doit être détruite.

I.10.1.1 Teneur en eau

L'eau peut être présente à l'état dissous ou sous forme de gouttelettes plus ou moins fines. C'est l'ennemi numéro un des appareils électriques. Les huiles séchées peuvent avoir des teneurs en eau inférieures à 10 ppm. Au contact d'une atmosphère humide, l'eau se dissout lentement dans l'huile, pouvant conduire à des teneurs élevées [23].

En présence d'eau libre, la conductivité de l'huile augmente fortement et sa rigidité électrique diminue. Il a été montré que la rigidité de l'huile varie peu avec la température, mais beaucoup avec la teneur en eau (figure I.1). Plus la température augmente plus la solubilité de l'eau dans l'huile est importante.

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

L'un des problèmes rencontrés dans les appareils qui « respirent » à l'air est lié à la variation de la solubilité de l'eau avec la température. Lorsque l'appareil est chaud, l'eau peut se dissoudre en grande quantité. Lorsque l'appareil refroidit, la solubilité de l'eau diminuant, de l'eau libre apparaît et se rassemble au fond de l'appareil. Cette situation peut conduire à des claquages.

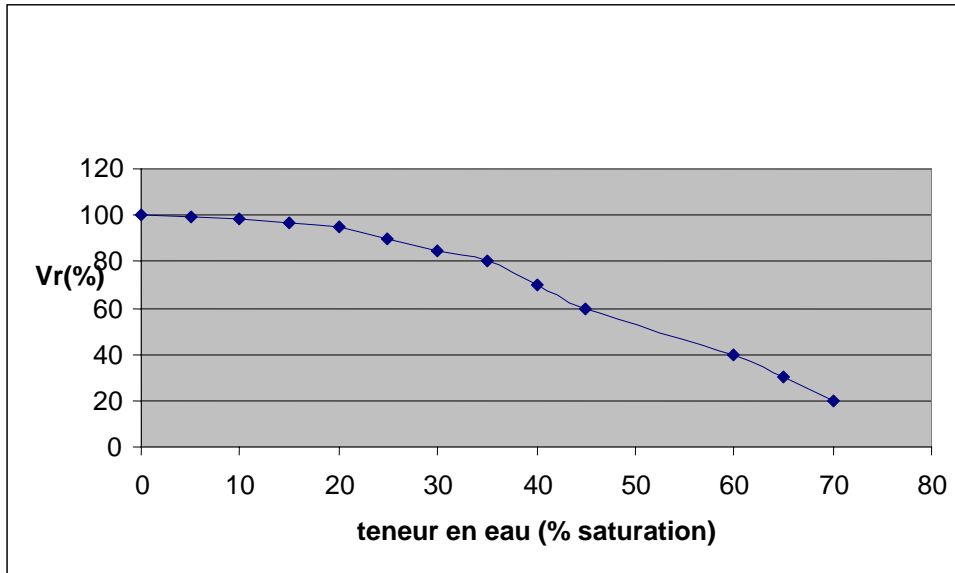


Figure I.1 : Influence de la teneur relative en eau sur la réduction (en %) de la rigidité diélectrique de l'huile minérale mesurée en tension alternative, entre électrodes planes et parallèles [1]

I.10.1.2 Particules

L'influence des particules sur les propriétés des huiles minérales a été étudiée depuis les années 1960, notamment sur l'initiation des décharges partielles et le claquage [21]. Les particules métalliques sont, de ce point de vue, beaucoup plus nuisibles que les particules isolantes. Elles jouent notamment un rôle prépondérant dans l'initiation du claquage des grands volumes d'huile.

Une huile neuve contient entre 0,0001% et 0,001% de particules de taille supérieure à 5 μm . Les très petites particules, de taille inférieure à 1 μm , n'ont été prises en considération que récemment, les méthodes de mesures n'étant pas disponibles jusque-là. Les huiles en service peuvent contenir beaucoup plus de particules, métalliques et cellulosiques, provenant des matériaux avec lesquelles

l'huile est en contact. Le tableau I.3 donne des exemples de comptage de particules [22].

Intervalle de comptage (μm)	N^(*) pour 100 mL d'huile avant traitement	N pour 100 mL d'huile après traitement
1 à 2	12 000 à 70 000	1 000 à 4 000
2 à 5	9 000 à 35 000	700 à 3 500
5 à 10	1 000 à 3 000	140 à 1 000
10 à 15	150 à 600	30 à 300
15 à 25	50 à 300	20 à 90
≥ 25	10 à 60	3 à 30
(*) : N est la moyenne arithmétique de cinq comptages sur un échantillon		

Tableau I.3 : Teneur en particules et distribution

I.10.2 Distance entre les électrodes

En augmentant la distance entre les électrodes, la tension de claquage augmente mais la rigidité diélectrique du liquide diminue. Dans le cas de champ électrique non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain seuil, l'effet couronne apparaît [20].

I.10.3 Température

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

I.10.4 Durée d'application de la tension

La figure I.2, représente la caractéristique $U_c(t)$, tension de claquage en fonction du temps, de l'huile de transformateur. Plus la durée d'application augmente, plus l'effet des différentes impuretés se fait ressentir et la tension de claquage diminue. Pour les temps inférieurs à $10\mu s$, le claquage a un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique [21].

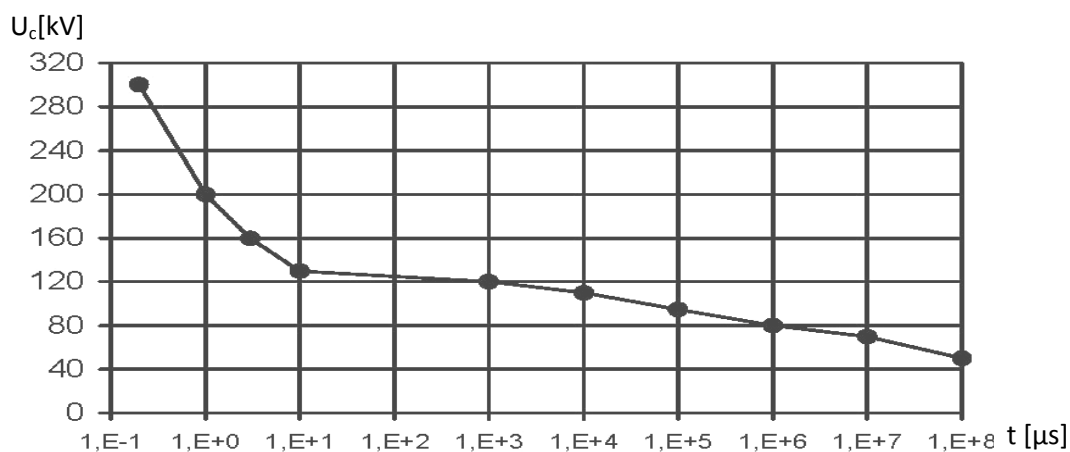


Figure I.2 : Durée d'application de la tension [21].

I.10.5 Nombre de claquages

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

Ceci peut être expliqué par l'élimination, des bulles de gaz et des gouttelettes d'eau suspendues, par les premiers claquages. Cependant des claquages répétés et nombreux détériorent le liquide [21].

I.10.6 Influence des écrans

Pour améliorer la rigidité diélectrique d'un système d'isolation, soit qu'on recouvre les électrodes avec une couche mince isolante, soit qu'on introduise une barrière isolante entre les électrodes. Il existe une position optimale de la barrière dans l'intervalle, pour laquelle la rigidité du système est la plus élevée. Dans le cas du système pointe – plan, l'augmentation est observée dans les cas de la pointe sous haute

tension de polarité positive ou alternative 50Hz, lorsque la barrière est située à proximité de la pointe [21].

I.11 Préclaquage et claquage des diélectriques liquides

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

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

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

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

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

- Une phase de propagation de la perturbation précédemment créée (streamers).

Cette séparation en deux phases pourrait, aux très courtes distances entre les électrodes, se révéler arbitraire, le même phénomène se développe au cours du temps (avalanches électroniques). En revanche, elle est tout à fait justifiée en ce qui concerne le mécanisme de Streamers [24].

I.11.1 Points communs au claquage des matériaux

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

- Le claquage est localisé : il n'affecte qu'une zone minime du milieu, la partie saine conservant souvent (même après une longue période sous tension) ses propriétés originelles [24].
- Les processus électroniques sont toujours impliqués dans la phase initiale : le claquage peut résulter d'un effet coopératif d'une très grande variété de phénomènes (thermique, mécanique, électro-hydro-dynamique, chimique, ...) plus ou moins inter-corrélés, et donnant naissance à un streamer, arborescence plus ou moins lumineuse, ramifiée et conductrice qui précède l'arc [24].
- Les effets d'échelle sont considérables : l'accroissement des volumes et surfaces soumis au champ électrique et des distances entre conducteurs entraîne une réduction très sensible de la rigidité diélectrique.
- Le temps d'application et la forme de l'onde de tension (continue, alternative ou impulsionnelle) jouent un rôle considérable, le claquage peut avoir lieu après des temps extrêmement brefs (inférieur à 01 ps) ou ne se manifester qu'après de très longues périodes (plusieurs années) ; des transformations du matériau ont alors pu se produire (vieillessement) [24].
- Les effets de polarité sont souvent très marqués, les tensions de claquage étant presque toujours plus basses lorsque l'électrode acérée est anode.

I.11.2 Technique d'étude et test de caractérisation du claquage des liquides

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

des différences de comportement. Dans certaines circonstances, le comportement d'une même substance sera étudié à l'état liquide et gazeux [25].

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

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

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

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

Par ailleurs, on s'efforce de détecter, sous tension alternative, la présence de décharges partielles et de les caractériser par leurs tensions d'apparition et d'extinction, leur amplitude, leur fréquence, etc. Ces décharges se manifestent quand du gaz subsiste ou est généré dans une isolation. Elles constituent un danger important, capable de conduire plus ou moins rapidement au claquage de l'isolation. Au liquide seul, on pratique le test de gassing qui permet d'évaluer l'aptitude que possède ce liquide à engendrer du gaz, puis à l'absorber, ou à en produire encore, sous l'action des décharges partielles en champ alternatif [26].

I.11.3 Cellule de mesure pour liquides

Les cellules utilisées pour les essais industriels réalisés sous tension alternative à 50Hz et celles qui sont élaborées pour des études fondamentales présentent plusieurs similarités de conception et de mise en œuvre (figure I.3). Les premières cellules (a), de réalisation simple, sont faites pour des mesures systématiques rapides des tensions de claquage ; la distance entre électrodes est fixe (quelques millimètres à quelques centimètres), les essais se font à pression atmosphérique et généralement à température ambiante ; les profils d'électrodes et leur écartement sont fixés par les normes [24]. Les secondes cellules (b), bien plus complexes, permettent la mesure

simultanée de diverses grandeurs (courant, émission lumineuse) et de faire varier plusieurs paramètres (distance entre électrodes, pression appliquée au liquide, température, rayon de courbure des électrodes).

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

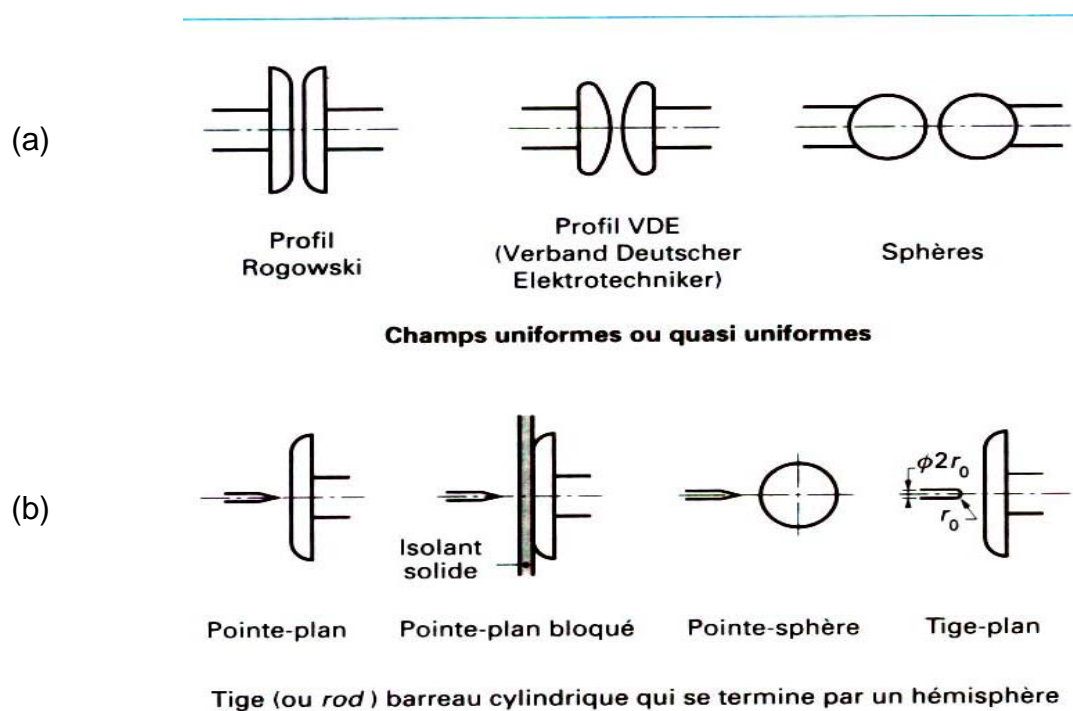


Figure I.3 : configuration des électrodes utilisées pour l'étude de claquage

I.11.4 Claquage des diélectriques liquides

Deux principaux mécanismes peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides: **mécanisme électronique** et **mécanisme avec phase gazeuse**. Ces deux mécanismes concernant les liquides ultra purs ne seront pas détaillés dans ce mémoire [21].

En plus de ces mécanismes, le claquage peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures, en suspension dans le diélectrique liquide. On parle dans ce cas de mécanisme de **claquage par pont**. Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui

concernant les huiles de transformateur. Ces dernières sont soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures.

I.11.4.1 Mécanisme de claquage par pont

Dans les isolants liquides utilisés en technique, peuvent apparaître, en suspension, des impuretés de différentes natures (bulles de gaz, gouttelettes d'eau, particules solides isolantes ou conductrices). La présence d'impuretés conduit au renforcement local du champ électrique. La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme:

-forme et dimensions des impuretés - intervalle et forme des électrodes - permittivité et conductivité des impuretés - concentration des impuretés entre les électrodes - valeur des charges libres existant à la surface des particules.

Le champ local E_{local} est généralement déterminé en attribuant aux impuretés des géométries simples (sphères, ellipsoïde).

L'élévation du champ peut conduire à des claquages partiels dans le liquide, dans le cas des impuretés solides conductrices. Dans le cas des impuretés solides isolantes, celles-ci se polarisent dans le champ électrique et tendent à se déplacer vers les zones où le champ est le plus intense ($\epsilon_{\text{impuretés solides}} > \epsilon_{\text{liquide}}$).

Pour qu'un pont de particules se forme entre les électrodes, il faut que le temps d'application de la tension soit relativement long. Ce pont nécessite en effet une grande concentration d'impuretés au voisinage des électrodes. Quand ce pont relie les électrodes, il s'établit un fort courant circulant à travers ce pont, qui est plus conducteur que le liquide. On aura ainsi, un échauffement local important, pouvant engendrer le claquage. Le claquage peut aussi avoir lieu durant la formation du pont (champ élevé en tête de pont).

Parmi les théories de claquage par pont, la plus connue est celle de Kok. Le critère établi par Kok, définit une valeur moyenne du champ électrique, au-dessus de laquelle la vitesse des particules se dirigeant vers le domaine de champ maximum devient supérieure à celle des particules repoussées vers l'extérieur (ce qui augmente la concentration des particules) [21].

I.11.4.2 Longues décharges dans les liquides

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

I.11.4.2.1 Mécanisme de streamers

Que le liquide soit soumis à un champ divergent ou à un champ uniforme, quelle que soit la forme de l'onde de tension (impulsionnelle, alternative, continue), les phénomènes prédisruptifs qui conduisent à l'établissement d'un arc électrique sont les **streamers** : ainsi ont été dénommées toutes sortes de figures lumineuses et ramifiées, qui prennent naissance en général au voisinage d'une électrode (phase de génération) puis se déplacent à grande ou très grande vitesse vers l'électrode opposée (phase de propagation) [24].

Selon la forme et la durée d'application de l'onde de tension, le streamer peut s'arrêter ou progresser jusqu'à l'électrode opposée. En règle générale, lorsqu'il atteint cette électrode ou en est très proche l'arc se produit. Ainsi, la tension de claquage d'un liquide est régie par le comportement des streamers. Elle est contrôlée, soit par la phase de génération, soit par la phase de propagation et l'on conçoit qu'elle dépend, pour un même liquide, du type de tension appliquée et de la géométrie des électrodes [24].

La phase de propagation des streamers sous tension impulsionnelle et en champ divergent a fait l'objet de nombreux travaux [26-27-28]. En particulier, une avancée importante a été réalisée au cours des années 80 : elle a permis une caractérisation détaillée des streamers. La phase de génération, bien plus difficile à étudier, est moins documentée [21].

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

I.11.4.2.2 Caractéristiques générales des streamers

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

Aussi, il a été observé une grande différence entre les streamers générés sous tension alternative et sous tension impulsionnelle à temps de montée bref : pour l'impulsionnelle, l'amplitude maximale peut être atteinte bien avant qu'un streamer se soit considérablement propagé et n'ait donné lieu au claquage. Dans ce régime, dit de surtension, le comportement des streamers peut changer largement selon la nature du liquide [24].

I.12 Conclusion

Il ressort de ce chapitre que le choix d'un liquide destiné à l'isolation électrique, n'est pas basé sur ses seules propriétés électriques, mais dépend aussi de sa tenue au vieillissement, sa capacité à évacuer la chaleur et de sa sécurité.

La tendance permanente à réduire l'encombrement des matériels conduit à accroître progressivement les champs de service des isolations, en leur conservant une grande fiabilité et en sauvegardant la qualité de l'environnement. Aussi, une grande attention doit-elle être consacrée au choix des matériaux, en particulier en ce qui concerne leur rigidité à court et à long terme.

Les isolations haute tension, pour la plupart, mettent nécessairement en œuvre des liquides sélectionnés pour contribuer à l'élimination des décharges partielles et pour faciliter l'évacuation de la chaleur tout en préservant leurs qualités isolantes : grande résistivité, faibles pertes diélectriques, rigidité élevée. Cette dernière dépend d'une multitude de facteurs et n'est pas une qualité intrinsèque du liquide lui-même. Certes, selon la formule chimique, des différences notables existent d'un liquide à l'autre, mais les conditions d'emploi interviennent considérablement : forme de la tension appliquée (alternative, continue, impulsionnelle), contraintes thermiques, variations de pression, configuration de l'isolation (employée sous champ uniforme ou sous champ divergent). Les effets d'échelle sont considérables : plus les intervalles et les volumes de liquide sont grands, donc davantage sujets aux contaminations (eau, particules), plus la rigidité est réduite.

L'huile minérale (avec de nombreuses variantes dans sa composition) possède de remarquables propriétés ; elle demeure donc le liquide le mieux adapté et le plus utilisé dans les isolations haute tension, en particulier dans les transformateurs de puissance. Mais reste toujours le risque de claquage de cette huile causant souvent des dégâts catastrophiques soit sur l'être humain ou sur le matériel, induisant au doute de ce choix ; jusqu'à l'arrivée de l'idée d'insertion de barrières isolantes afin de remédier à cela.

Et pour plus d'informations sur les mécanismes par lesquelles l'insertion d'une barrière isolante améliore la rigidité d'une structure divergente, plusieurs études et recherches ont été effectuées dans ce sens.

CHAPITRE II

Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en tension continue

II.1 Introduction

Il est connu depuis longtemps que l'insertion d'une barrière isolante dans un intervalle d'huile ou de gaz améliore significativement la rigidité diélectrique du système [28-29]. Cet effet bénéfique est largement utilisé lors du dimensionnement des structures isolantes industrielles (transformateurs de puissance en particulier).

Pour mieux comprendre l'influence des barrières isolantes et faire un choix judicieux, il est nécessaire d'analyser les phénomènes physiques impliqués dans les phases de préclaquage et de claquage de la structure isolante en fonction de la géométrie des électrodes, des dimensions et de la nature de la barrière, de la forme et de l'amplitude de la tension, etc. Dans ce cadre nous nous sommes intéressés aux résultats obtenus lors des recherches effectuées [3] concernant l'étude de l'influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en tension continue.

II.2 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre

Dans cette partie nous allons exposer les résultats concernant l'influence de la géométrie des électrodes, la nature et les dimensions de la barrière et de la polarité sur la rigidité diélectrique d'un système divergent pointe-plan. Nous présenterons par la suite les résultats d'une comparaison entre un système avec barrière et un autre sans barrière dont la distance inter-électrodes est égale à la somme des distances pointe-bord de la barrière, épaisseur de la barrière et distance barrière - plan. Enfin, nous examinerons aussi bien le cas des interfaces perpendiculaires que celui des interfaces parallèles aux lignes de champ électrique.

II.2.1 Cas des interfaces perpendiculaires

II.2.1.1 Influence de la polarité

Dans son travail A.Zouaghi a analysé l'influence de la polarité de la tension et l'efficacité de la barrière. Des études ont été d'abord effectuées en l'absence de la

barrière isolante ensuite en sa présence. Il ressort des résultats expérimentaux [3-31] qu'un système d'électrodes pointe-plan avec une distance inter-électrodes de 50 mm est moins rigide en polarité négative qu'en polarité positive. En polarité positive, la tension de claquage du système sans barrière est de 94 kV contre 161 kV en polarité négative. La présence d'une barrière isolante améliore la rigidité diélectrique de la structure quelle que soit la polarité. D'autre part, la tension de claquage de l'ensemble dépend largement de la position de la barrière dans l'intervalle inter-électrodes.

A la figures II.1 sont présentées les caractéristiques $U_{50}=f(a_1/a)$ en fonction de la polarité, pour une barrière en Bakélite ; a étant la distance inter-électrode et a_1 la distance entre la pointe et la barrière. Il a été observé que lorsque la barrière est placée au voisinage de la pointe, son efficacité qui est définie par le rapport de la tension de claquage en présence de la barrière à celle sans barrière, en polarité négative est de $\zeta=1,4$ contre $\zeta=1,7$ en polarité positive pour un rayon donné de la barrière; l'efficacité de la barrière varie avec son rayon et sa nature.

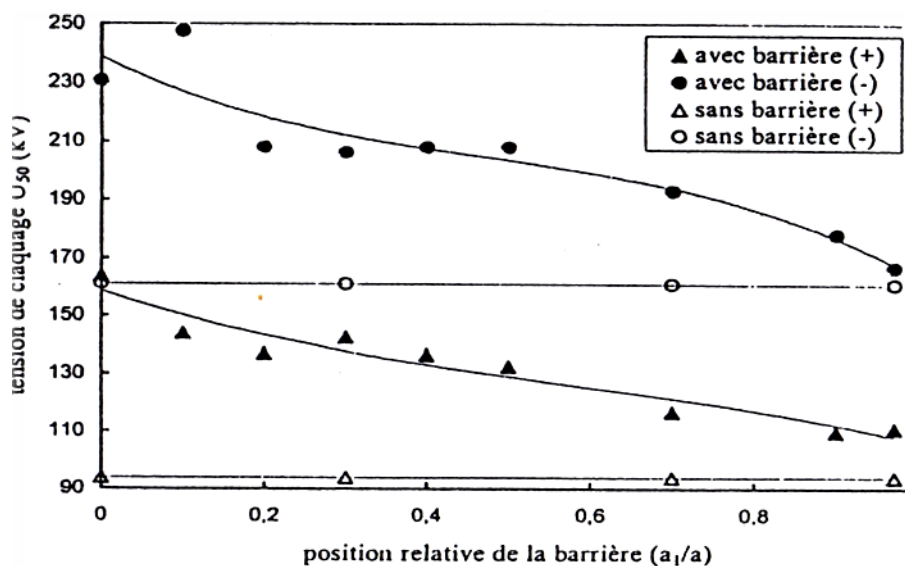


Figure II.1 : Tension du claquage U_{50} en fonction de la position de la barrière pour les deux polarités. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière en Bakélite de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=2$ mm; rayon de la pointe $=0.25$ mm.

II.2.1.2 Influence de la distance inter-électrodes

Pour une distance inter-électrodes de 100 mm, soit le double de celle considérée dans le cas précédent ($a=50$ mm), nous remarquons que dans les cas des grands

intervalles, l'influence de la barrière peut être négligée lorsque la barrière est placée au voisinage de l'électrode plane ($0,4a < a_1 < a$) quelles que soient la nature de la barrière et la polarité de la tension appliquée, Cependant, l'efficacité de la barrière est plus importante quand celle-ci est au voisinage de l'électrode acérée.

Il ressort de la figure II.2 que l'efficacité de la barrière diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes quelles que soient la nature de la barrière et la polarité de la tension.

La décroissance de l'efficacité de la barrière avec l'augmentation de la distance entre les électrodes est due à l'angle solide formé par la pointe et la surface de la barrière, En effet, l'angle solide détermine le degré d'uniformité du champ électrique appliqué.

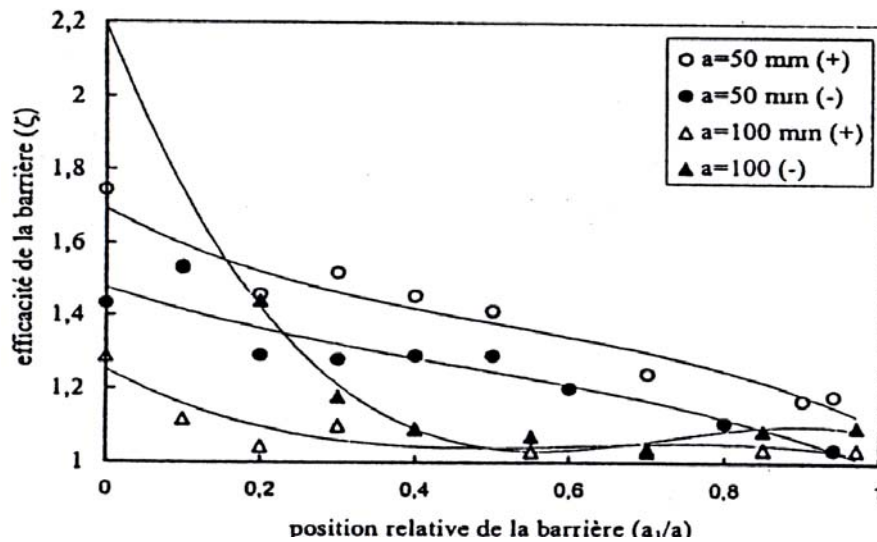


Figure II.2: Influence de la distance inter-électrodes sur l'efficacité de la barrière pour les deux polarités. Barrière en bakélite de diamètre $D=50\text{mm}$ et d'épaisseur $e=2\text{ mm}$; rayon de la pointe $=0,25\text{ mm}$ [3].

II.2.1.3 Influence des dimensions de la barrière

II.2.1.3.1 Influence du rayon de la barrière

Dans cet essai, la barrière de rayon 25 mm est remplacée par une autre de même épaisseur ($e=2\text{ mm}$) et de même nature (Bakélite) mais de rayon deux fois plus grand ($R_b=50\text{ mm}$). La distance inter-électrodes est maintenue constante $a=50\text{ mm}$

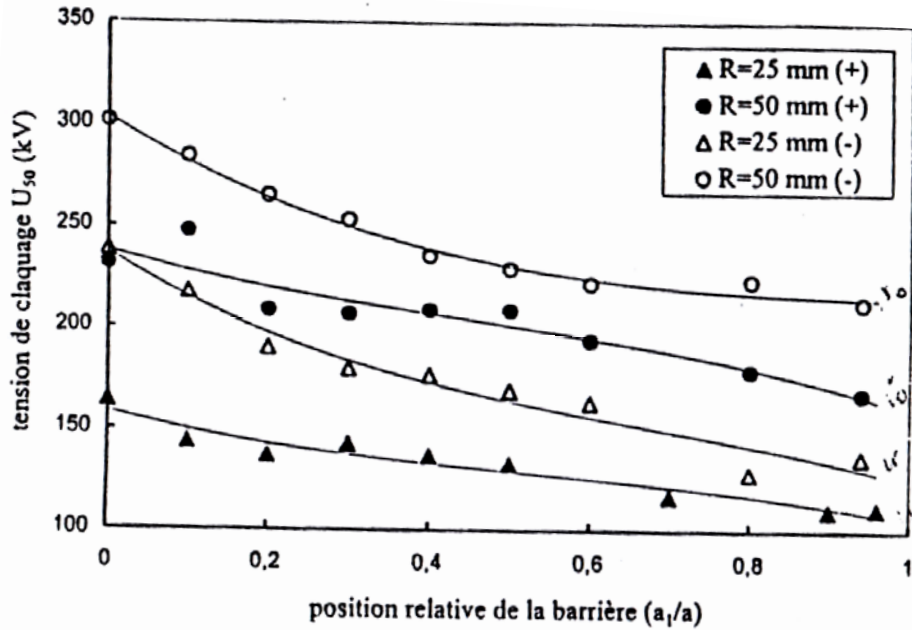


Figure II.3: Influence du rayon de la barrière sur la tension du claquage U_{50} pour les deux polarités. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière bakélite d'épaisseur $e=2$ mm; rayon de la pointe $=0,25$ mm[3].

La figure II.3 montre les caractéristiques $U_{50}=f(a_1/a)$ en fonction du rayon de la barrière et de la polarité de la tension appliquée.

Il ressort de ces courbes que l'augmentation du rayon de la barrière améliore significativement la rigidité du système (de 1,25 à 1,5 selon la polarité). Cela est certainement dû à l'augmentation de la longueur minimale de la décharge définie par la somme des distances pointe-bord de la barrière, épaisseur de la barrière et distance entre la barrière et le plan. Cette hypothèse est également valable pour la variation de la tension de claquage avec la position de la barrière. Lorsque la position relative de la barrière augmente, la longueur minimale de la décharge diminue ainsi que la tension de claquage.

II.2.1.3.2 Influence de l'épaisseur de la barrière

Il a été montré que la rigidité diélectrique de la structure dépend de la nature de la barrière et de la polarité et cela pour différentes épaisseurs. D'une manière générale, pour une barrière en Bakélite, l'augmentation de son épaisseur entraîne une

augmentation de la tension de claquage quelles que soient sa position entre les électrodes, la polarité de la tension appliquée et la distance inter électrodes (figures II.4,5,6,7,8,9,10 et 11). Pour une barrière en Polyéthylène, l'augmentation de son épaisseur implique, en polarité positive, une amélioration de la rigidité diélectrique du système; cependant, en polarité négative, toute augmentation de l'épaisseur de la barrière diminue la rigidité du système quelles que soient la position de la barrière dans l'intervalle et la distance inter-électrodes.

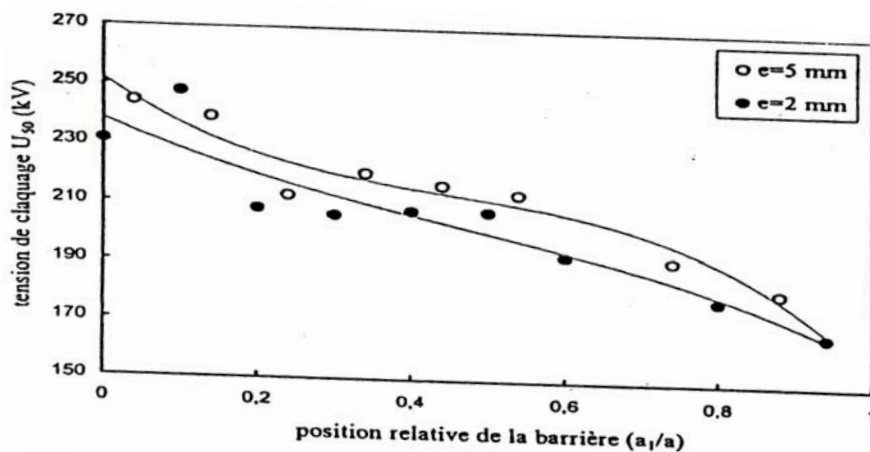


Figure II.4: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative. Distance inter-électrodes $a = 50$ mm; barrière en Bakélite de diamètre $D = 50$ mm; rayon de la pointe = 0,25mm.

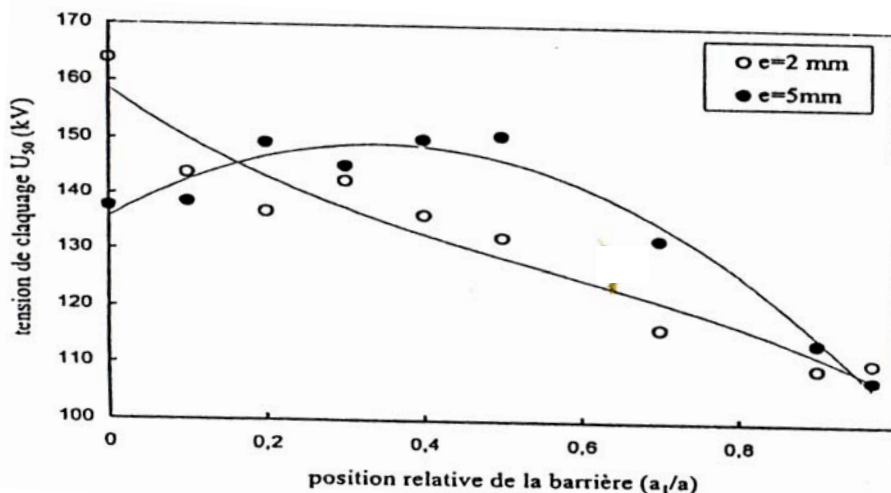


Figure II.5: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive. Distance inter-électrodes $a = 50$ mm; barrière en Bakélite de diamètre $D = 50$ mm; rayon de la pointe = 0,25mm.

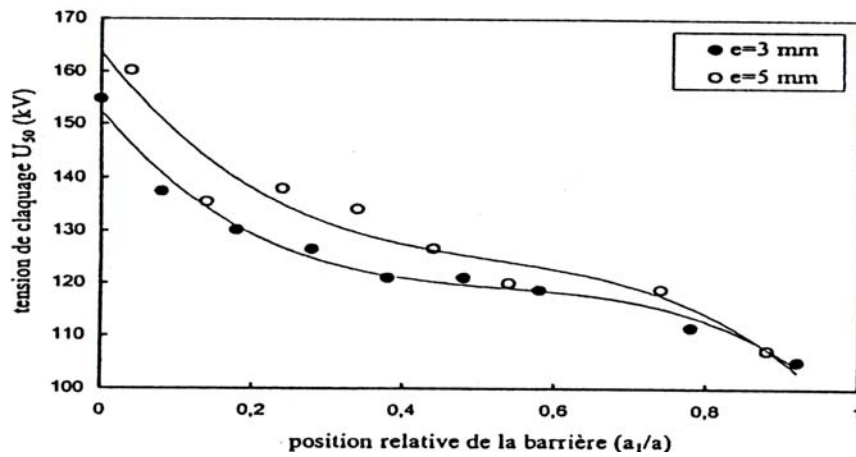


Figure II.6: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière en polyéthylène de diamètre $D=50$ mm; rayon de la pointe $=0,25$ mm.

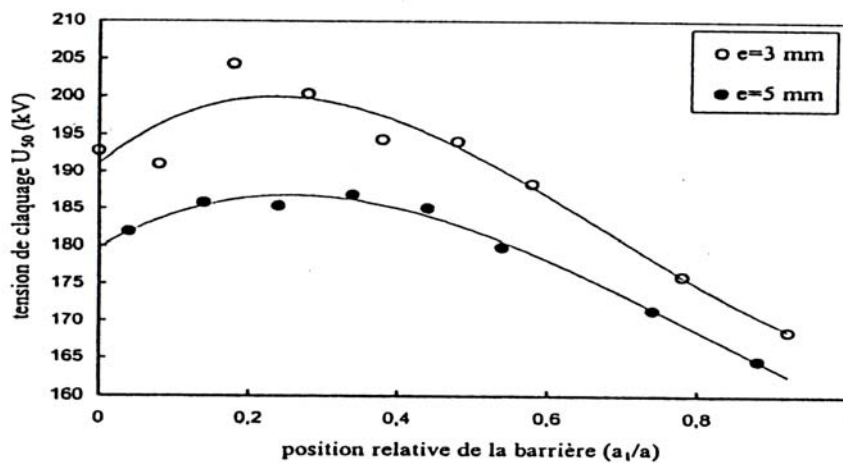


Figure II.7: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative, Distance inter-électrodes $a=50$ mm ; barrière en polyéthylène de diamètre $D=50$ mm; rayon de La pointe $=0,25$ mm.

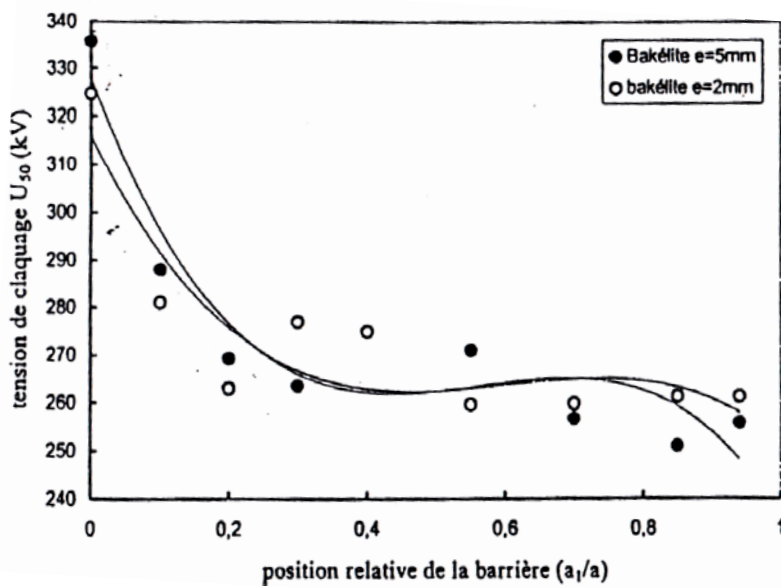


Figure II.8: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive. Distance inter-électrodes $a = 100$ mm; barrière en Bakélite de diamètre $D = 50$ mm; rayon de la pointe = 0,25mm.

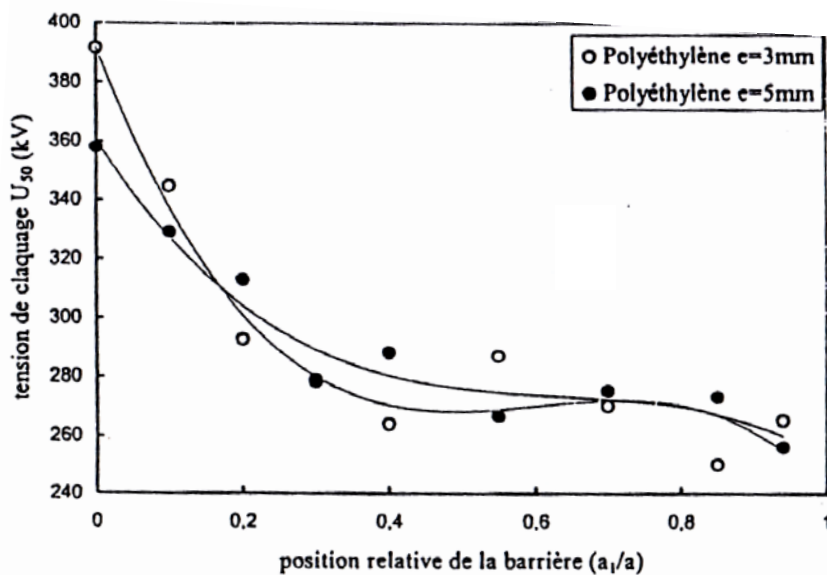


Figure II.9: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive. Distance inter-électrodes $a = 100$ mm; barrière en polyéthylène de diamètre $D = 50$ mm; rayon de la pointe = 0,25mm.

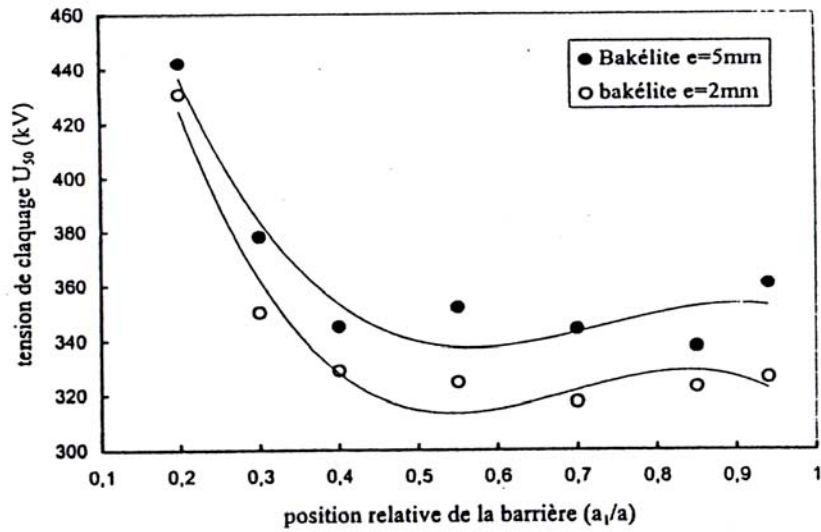


Figure II.10: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative. Distance inter-électrodes $a = 100$ mm; barrière en Bakélite de diamètre $D = 50$ mm: rayon de la pointe = 0,25mm.

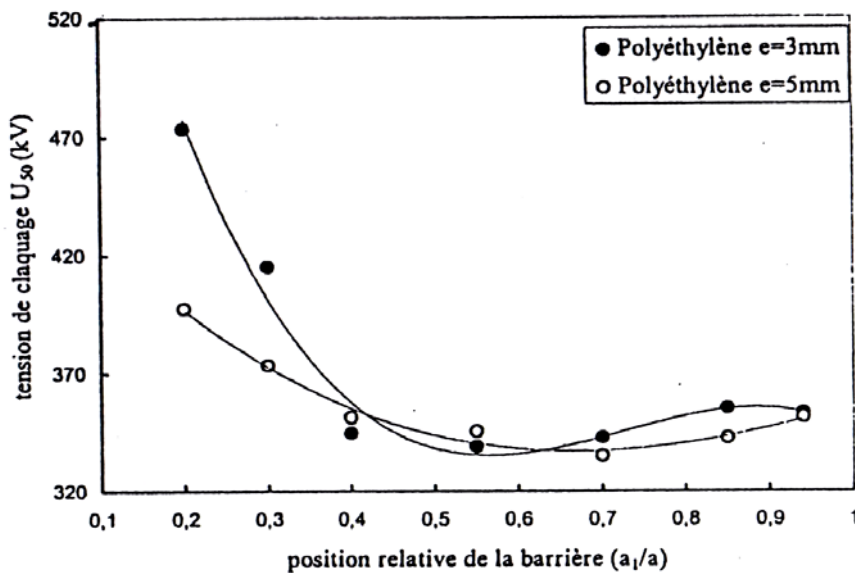


Figure II.11: Influence de l'épaisseur de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative. Distance inter-électrodes $a = 100$ mm; barrière en polyéthylène de diamètre $D = 50$ mm: rayon de la pointe = 0,25mm.

II.2.1.4 Influence de la nature de la barrière

L'efficacité de la barrière dépend également de sa nature. La figure II.12 montre qu'en polarité négative, une barrière en Bakélite est plus efficace qu'une barrière en Polyéthylène.

En polarité positive (figure II. 13), une barrière en Bakélite est plus efficace qu'une barrière en Polyéthylène. Il est intéressant de noter que lorsqu'on augmente la distance inter-électrodes ($a=100$ mm), une barrière en Polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en Bakélite (figures II. 14 et 15).

La différence entre une barrière en Bakélite et une autre en Polyéthylène réside, en plus des valeurs de leurs permittivités et des pertes diélectriques, dans la résistance mécanique aux chocs de chaque matériau.

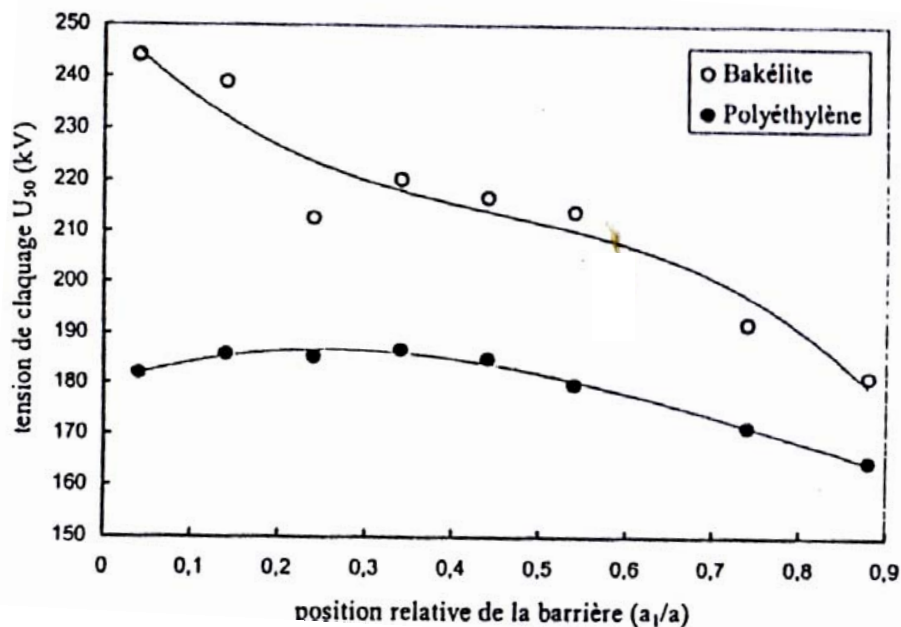


Figure II.12: Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=5$ mm; rayon de la pointe $=0.25$ mm.

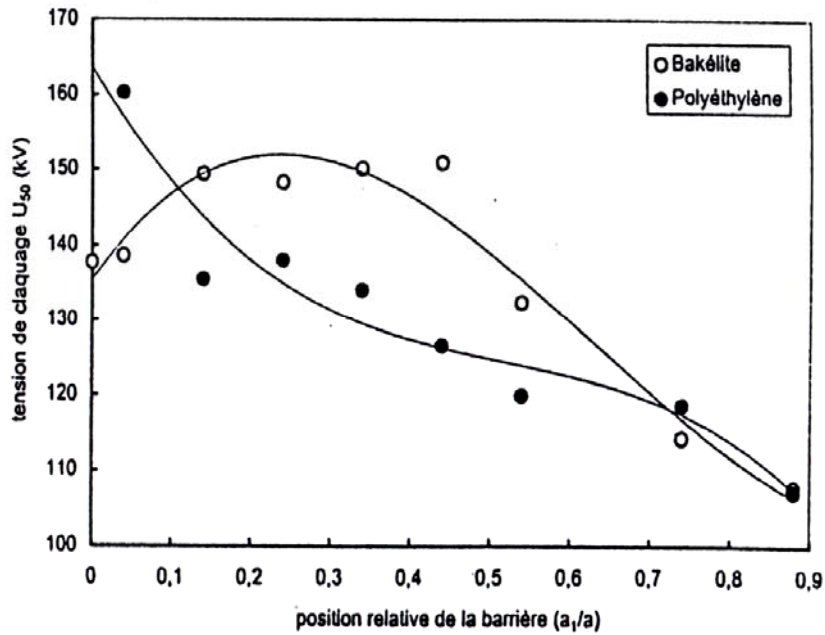


Figure II.13: Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive. Distance inter-électrodes $a=50$ mm; barrière de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=5$ mm; rayon de la pointe $=0.25$ mm

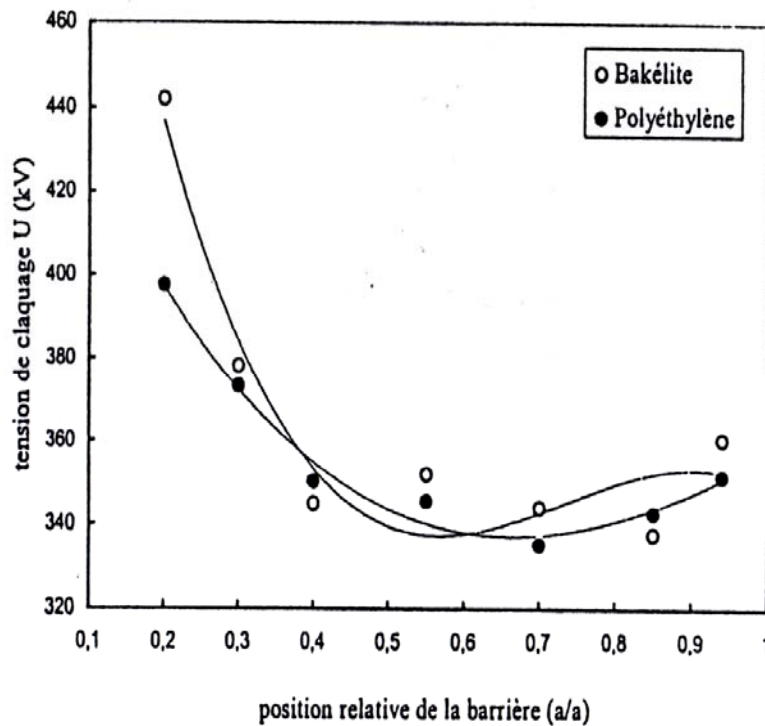


Figure II.14: Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité négative. Distance inter-électrodes $a=100$ mm; barrière de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=5$ mm; rayon de la pointe $=0.25$ mm

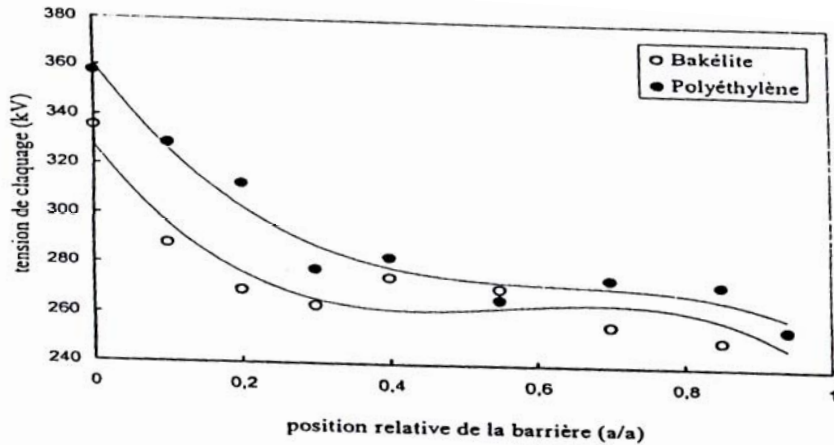


Figure II.15: Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage U_{50} en polarité positive. Distance inter-électrodes $a=100$ mm; barrière de diamètre $D=50$ mm et d'épaisseur $e=5$ mm; rayon de la pointe $=0.25$ mm.

II.2.2 Cas des interfaces parallèles

L'objectif est d'analyser l'influence des interfaces parallèles sur la rigidité diélectrique des systèmes d'isolation en fonction de la position de la barrière, de sa nature et de la polarité de la tension; le système d'électrodes n'étant pas changé, de même la distance inter-électrodes (70 mm) [3].

La barrière est une plaque rectangulaire en Bakélite de largeur 60 mm et d'épaisseur 2 mm. Elle est maintenue parallèle à l'axe des deux électrodes par deux fils isolants très fins (figure II.16). Pour chaque polarité de la tension, quatre positions de la barrière sont considérées: barrière sur l'axe des électrodes (au voisinage de la pointe et au voisinage du plan) et barrière distante de 10 mm de l'axe des électrodes (au voisinage de la pointe et au voisinage du plan).

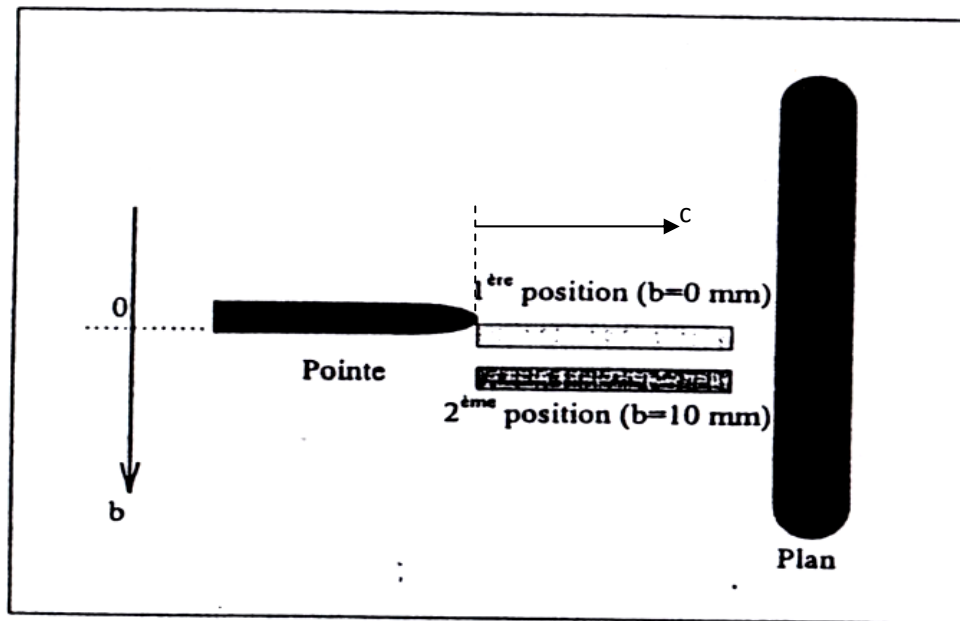


Figure II.16 : Positionnement de la barrière entre les électrodes

II.2.2.1 Polarité positive

L'analyse des résultats obtenus en polarité positive (tableau II.1) a montré que l'insertion, dans un système d'électrodes, d'une barrière parallèlement aux lignes du champ électrique, diminue significativement sa rigidité diélectrique. Cette influence dépend à la fois de la position de la barrière entre les électrodes (c) et de sa position par rapport à l'axe des électrodes (b). Cependant, on remarque que le temps de retard au claquage correspondant reste pratiquement constant dans toutes les configurations.

	Sans barrière		Barrière sur la pointe		Barrière sur le plan	
	U_{50} (kV)	t_r (μ s)	U_{50} (kV)	t_r (μ s)	U_{50} (kV)	t_r (μ s)
$b=0$ mm	172,97	32,85	133,65	34,77	152,90	32,91
$b=10$ mm	172,97	32,85	150,70	32,38	163,46	34,32

Tableau II.I : Tensions et temps de retard au claquage en présence d'une barrière parallèle aux lignes du champ électrique en une polarité positive.

La décroissance de la rigidité diélectrique du système confirme l'hypothèse du dépôt de charges sur la barrière à l'interface liquide-solide.

La présence de charges le long de l'interface semble faciliter le déplacement de la décharge dans le liquide à des tensions plus basses. Cependant, la constance du temps de retard au claquage, en polarité positive, montre que la vitesse moyenne de la propagation des décharges électriques est égale à celle dans le liquide seul.

II.2.2.2 Polarité négative

En polarité négative, le comportement du système, du point de vue tension de claquage, est semblable à celui présenté dans le paragraphe précédent. Quant au temps de retard au claquage, celui-ci présente une certaine dépendance de la position de la barrière (tableau II.2). Lorsque la barrière est placée au voisinage de la pointe, les décharges électriques semblent se propager avec des vitesses plus importantes que dans le cas du liquide seul. Cependant, pour les autres positions de la barrière, les décharges présentent une certaine difficulté à se propager. La variation de la vitesse de propagation, d'une position à l'autre de la barrière, est sans doute due au changement du mode de propagation qui est propre à chaque configuration.

	Sans barrière		Barrière sur la pointe		Barrière sur le plan	
	U_{50} (kV)	t_r (μ s)	U_{50} (kV)	t_r (μ s)	U_{50} (kV)	t_r (μ s)
b=0mm	88,266	42,45	183,15	33,72	209,55	48,91
b=10mm	266,88	45,42	244,33	59,54	253,00	50,29

Tableau II.2: Tensions de claquage et temps de claquage en présence d'une barrière parallèle aux lignes du champ électrique en une polarité négative.

II.3 Influence des barrières isolantes sur la rigidité diélectrique d'intervalles d'huile en tension continue

Dans cette partie nous nous intéressons aux résultats obtenus lors des essais concernant l'étude de l'influence de la nature ainsi que de la position d'une barrière isolante pour deux systèmes : pointe-plan et pointe-pointe, et cela en tension continue [3].

II.3.1 Système pointe-plan

La figure II.17 donne la caractéristique de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière et de sa nature. Il apparaît qu'une barrière en Polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en Bakélite. Cette efficacité est d'autant plus importante que la barrière est proche de la pointe. Ceci est dû au fait que l'insertion de la barrière conduit à uniformiser le champ électrique entre la barrière et le plan.

Plus la distance point-barrière est faible, plus la tension de claquage est élevée [30-31]. En effet, les décharges générées au niveau de la pointe se propagent jusqu'au bord de la barrière puis du bord de la barrière vers l'électrode plane (figure II.16). Ainsi, la barrière placée tout près de l'électrode pointe (ou au contact de l'électrode pointe) se comporte comme une électrode plane. Or, la rigidité diélectrique d'un système d'électrodes plan-plan est meilleure que celle d'un système divergent.

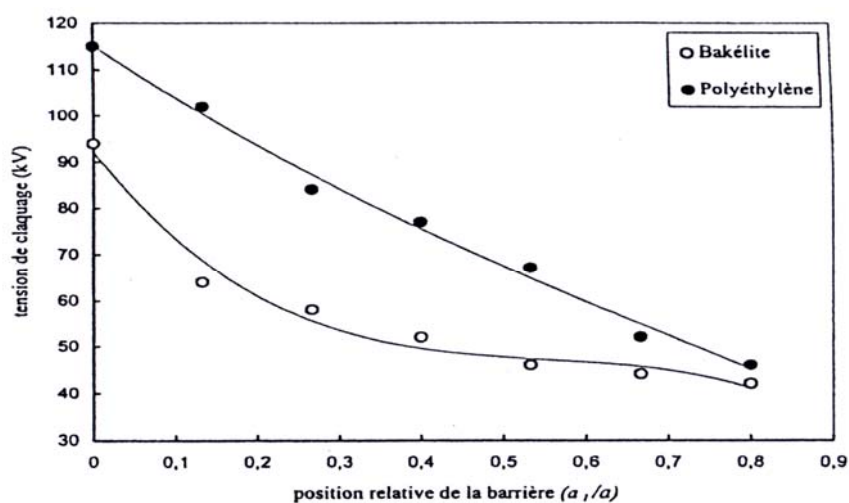


Figure II.17: Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage d'un système pointe-plan en polarité positive.

II.3.2 Système Pointe - Pointe

Contrairement au cas d'un système d'électrodes pointe-plan, dans une configuration pointe-pointe la caractéristique tension de claquage-position de la barrière passe par un minimum lorsque la barrière est placée à 50% de l'intervalle (figure II.18). L'efficacité de la barrière est meilleure lorsque celle-ci est en polyéthylène plutôt qu'en bakélite; elle augmente avec la diminution de sa constante diélectrique. La position optimale dans ce cas est obtenue lorsque la barrière est au voisinage de l'une des deux électrodes. La distance de décharge minimale (c'est-à-dire la somme des distances: première pointe-bord de la barrière, épaisseur de la barrière, bord de la barrière-deuxième pointe) varie comme la tension de claquage avec la position de la barrière.

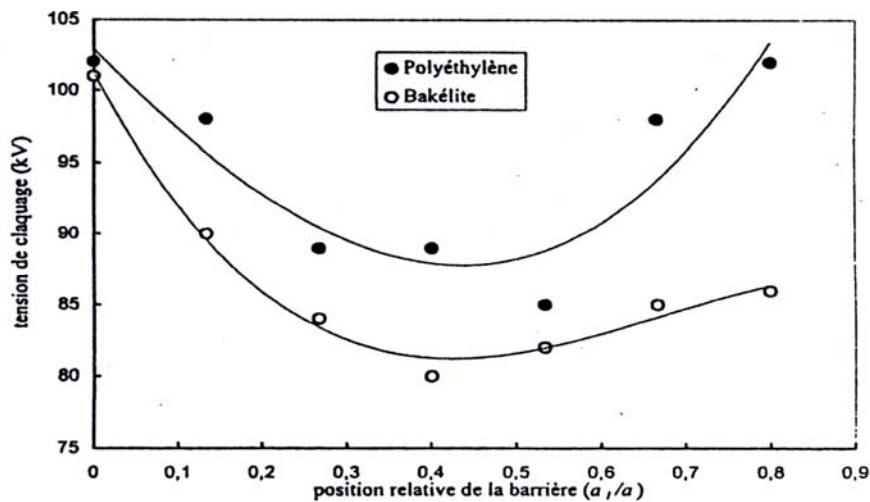


Figure II.18: Influence de la nature de la barrière sur la tension de claquage d'un système pointe-pointe en polarité positive.

II.4 Conclusion

Ces résultats ont permis d'apporter des éclaircissements sur les mécanismes par lesquels une barrière isolante améliore la rigidité d'une structure à champ divergent soit en chocs de foudre ou en tension continue.

En effet, l'efficacité de la barrière dépend principalement de sa position entre les électrodes, de sa nature et ses dimensions, de la polarité de la tension et de la distance inter-électrodes. Cependant, la caractéristique de la tension de claquage en fonction de la position relative de la barrière (a_1/a) a une allure décroissante; elle est à son maximum lorsque la barrière est placée au voisinage de l'électrode acérée. Cela est dû au fait que la barrière uniformise la distribution du champ électrique entre la barrière et le plan. D'autre part, la barrière joue le rôle d'obstacle géométrique à la décharge directe.

Les modèles électriques simples étudiés ont permis d'évaluer la position optimale de la barrière dans l'intervalle inter-électrode (cette position de la barrière, obtenue expérimentalement est similaire à celle obtenue dans l'air).

Afin d'apporter plus d'éclaircissement et d'informations sur les mécanismes précédant concernant l'amélioration de la rigidité diélectrique d'une structure divergente par insertion de barrière isolante, nous avons effectué des essais en tension alternative à 50Hz.

CHAPITRE III

Techniques expérimentales

III.1 Introduction

Le travail que nous présentons dans ce chapitre est le complément d'un travail déjà entamé au niveau de notre laboratoire de haute tension de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger.

Les travaux antérieurs [33-34] ont porté essentiellement sur l'étude du comportement de l'huile de transformateur dans un système pointe-plan et pointe-barrière-plan. Ainsi différents paramètres électro-géométriques ont été variés à savoir : la distance inter-électrodes, position de la barrière entre les électrodes, la nature, l'épaisseur et la largeur de la barrière.

Afin de mieux comprendre l'influence des barrières isolantes dans l'huile de transformateur et faire un choix judicieux, il est nécessaire d'analyser les phénomènes physiques impliqués dans la phase de préclaquage et de claquage selon la géométrie du système et la nature de la barrière.

Notre travail porte sur l'étude de l'influence de l'insertion de la barrière sur les courants de préclaquage ainsi que la rigidité diélectrique du système. Pour cela deux types de matériaux de la barrière seront étudiés et différents paramètres électro-géométriques seront pris en considération.

Les résultats expérimentaux concernant la tension appliquée, le courant de préclaquage avec et sans barrière, la comparaison entre les deux courants, l'impédance équivalente.

III.2 Techniques expérimentales

Le circuit d'essais (figure III.1) comprend une station d'essai à fréquence industrielle (50 Hz) de marque HEAFELY, un modèle expérimental (objet d'essai), des circuits de mesures et de protection.

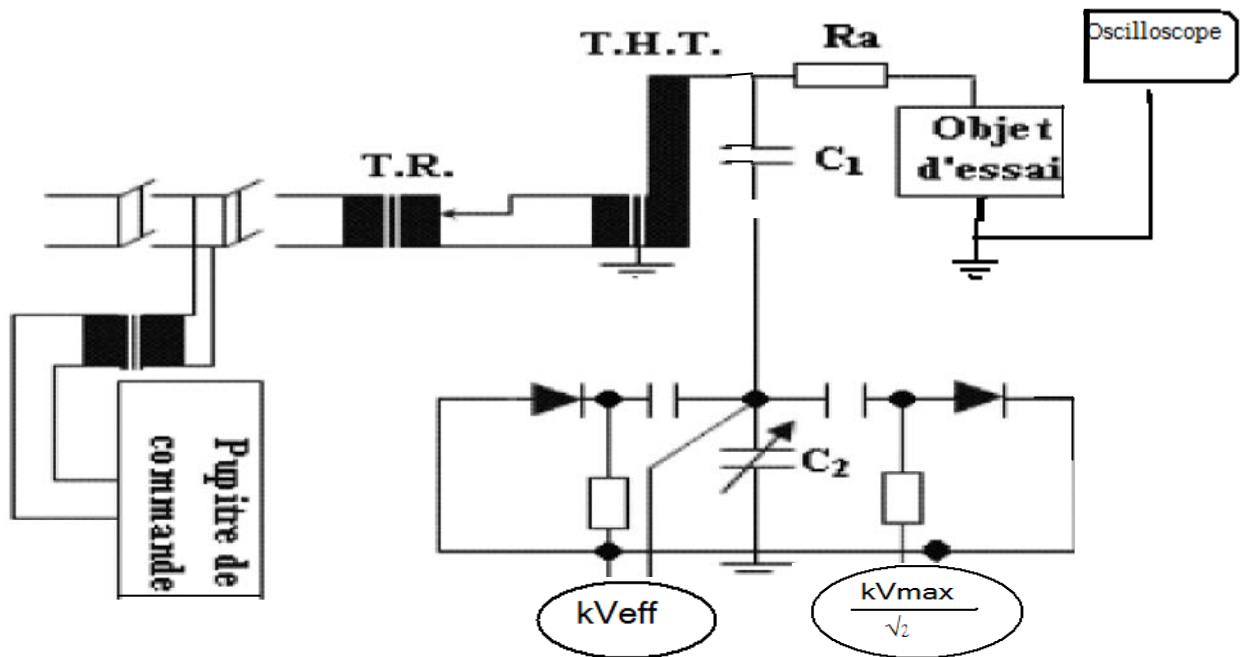


Figure III.1 : Dispositif expérimental

III.2.1 Station d'essai

Cette station d'essais comprend les organes suivants :

a- Un transformateur de réglage

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

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

b- 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 $U_{1n}=0.5$ kV (50Hz).
- Tension secondaire nominale : $U_{2n}=300$ kV.
- Puissance apparente nominale : $S_n=50$ kVA.
- Tension de court-circuit : $U_{cc}= 5.46$ %.
- Résistance d'amortissement : $R_a \cong 30$ Ω /kV de tension d'essais,
- Résistance de l'enroulement B.T : $r_1= 0.0365\Omega$, celle de l'enroulement H.T : 4893Ω .
- Courant de court-circuit : $I_{cc} = 3$ A
- Puissance de court-circuit : $S_{cc} = 916$ kVA

c- Un diviseur capacitif de tension

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

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

d- 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.

e- Des appareils annexes de protection

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

III.2.2 Objet d'essai

La cellule d'essais contenant la structure isolante liquide- solide (figures III.2 et 3) 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. Nous avons choisi le plexiglas du fait qu'il permet la visualisation des phénomènes de préclaquage et de claquage. La cellule contient 175 L d'huile de transformateur et un système d'électrodes 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 rayon de courbure 6mm. Elle est montée sur une tige mobile en acier permettant le réglage de la distance inter-électrodes. 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 12 cm.



Figure III.2 : Cellule d'essais

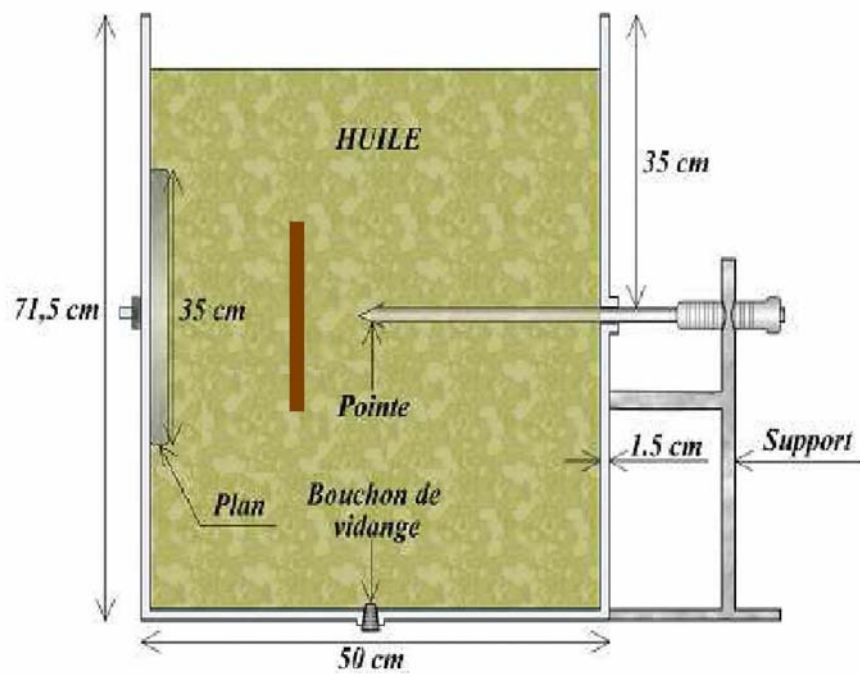


Figure III.3 : Schéma de la cellule d'essais

III.2.3 Les paramètres utilisés

d : la distance inter électrodes.

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

D : le diamètre de la barrière

a/d : la position relative de la barrière.

e : l'épaisseur de la barrière.

La structure isolante étudiée est constituée d'échantillons solides insérés entre les deux électrodes et baignant dans une huile minérale, dénommée « Borak 22 » de type naphénique. Celle-ci obéit à des conditions de stockage rigoureuses dans des fûts étanches, en vue de sa protection de la dégradation et de l'humidité environnante.

A fin de mener à terme notre étude, trois fûts ont été mis à notre disposition par l'entreprise de réparation des transformateurs électriques (SKMK SONELGAZ de Blida).

Les isolants solides utilisés sont des disques circulaires de diamètre variable de 10,14 et 20cm et d'épaisseur variant entre 2 et 4mm (figure III.4). Les matériaux utilisés sont la bakélite et le papier presspahn. Les caractéristiques de ces matériaux sont données dans le tableau III.1.

Matériau isolant	Permittivité relative	Rigidité diélectrique kV/mm
L'huile minérale	2,12	9,4
Bakélite	5	30
Presspahn	3	100

Tableau III.1 : propriétés diélectriques des matériaux utilisés

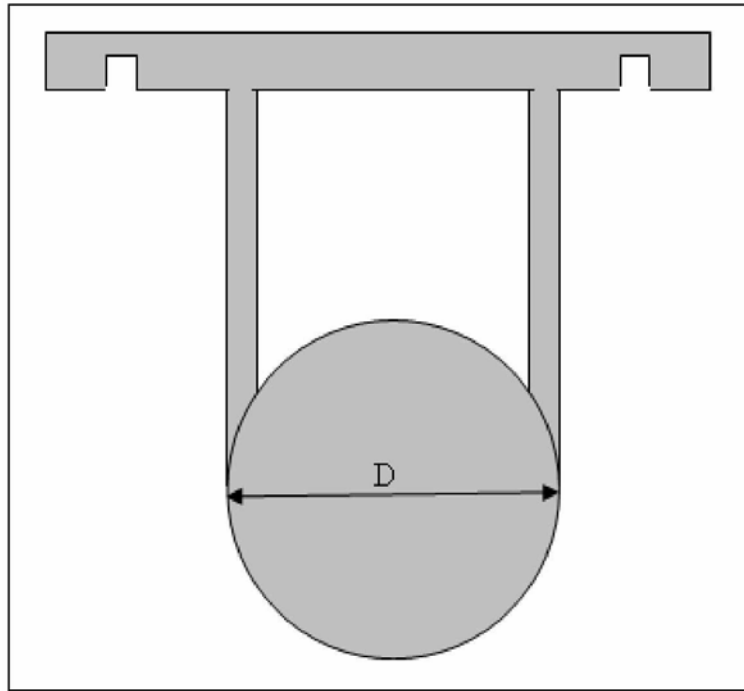


Figure III.4 : Forme de la barrière utilisée

III.2.4 Circuits de mesure

La mesure du courant de préclaquage a été effectuée à travers une résistance de $1k\Omega$ connectée en série avec l'objet d'essai grâce à un oscilloscope à mémoire (TECTRONIX TDS 3052 B) d'une fréquence d'échantillonnage de 500MHz.

Pour éviter l'influence du champ électrique, qui pourrait introduire des parasites dans le signal recueilli, la résistance a été introduite dans une boîte métallique en Aluminium mise à la terre, formant aussi un écran (le champ à l'intérieur de la boîte étant nul).

La mesure de la tension de claquage a été effectuée dans les travaux antérieurs [34] à l'aide d'un voltmètre électrostatique. Cette mesure permet de déterminer les paliers des tensions (inférieures à 50% de U_{claquage}) à appliquer pour l'enregistrement du courant de préclaquage.

Avant d'effectuer les mesures, les barrières isolantes sont bien nettoyées à l'alcool puis insérées entre les deux électrodes pour différentes positions et distances inter-électrodes. Durant les essais, nous avons observé que l'application de la tension sinusoïdale entre les électrodes conduit à un courant périodique (figure III.5). Pour

chaque mesure, nous nous sommes intéressés à la valeur efficace du courant, la valeur prise est la moyenne de six valeurs.

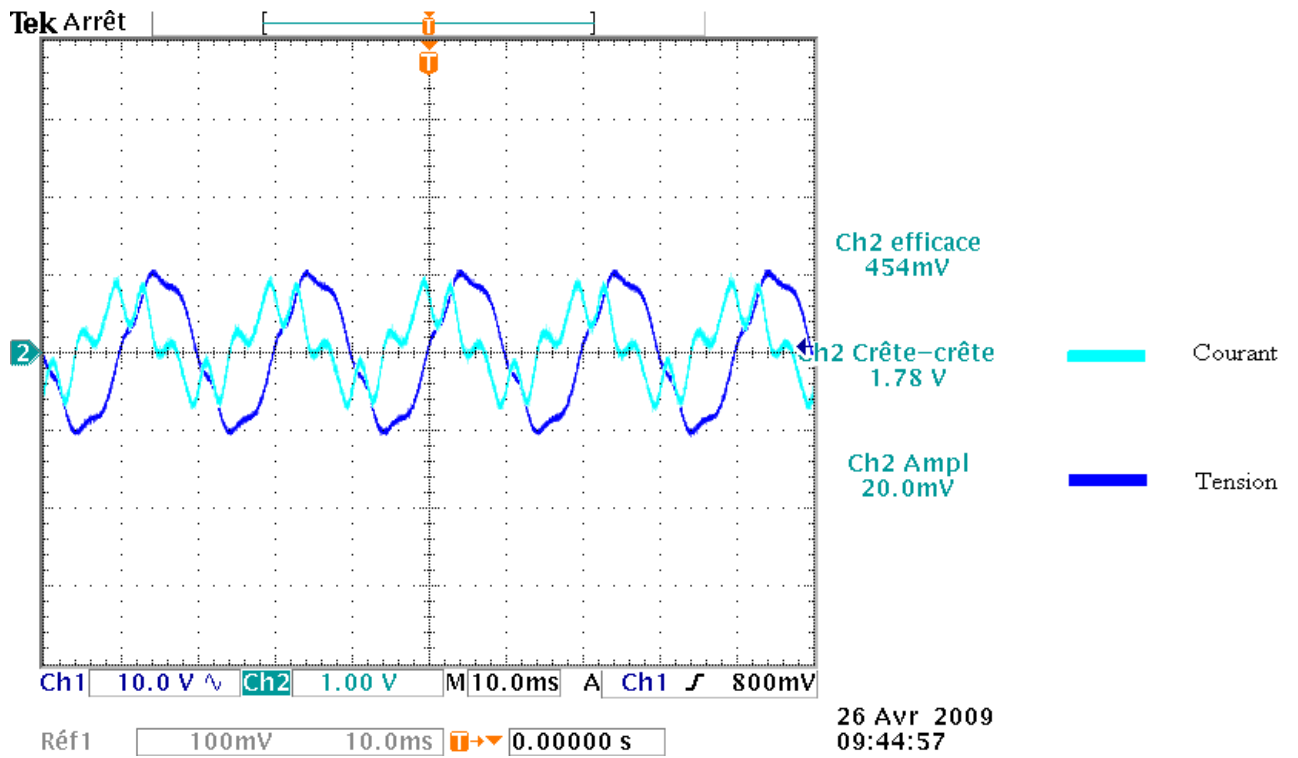


Figure III.5 : Image observée sur l'oscilloscope

CHAPITRE IV

Résultats et interprétions

IV.1 Résultats et interprétations

IV.1.1 Essais sans barrière

IV.1.1.1 Effet de la Tension appliquée sur les courants de préclaquage

Nous présentons à la figure IV.1 la variation de la valeur efficace du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes (4,6,8,10 et 12cm).

Il ressort des résultats obtenus, que le courant de préclaquage augmente avec l'augmentation de la tension appliquée entre les deux électrodes. Cette augmentation est presque linéaire et la pente est pratiquement constante.

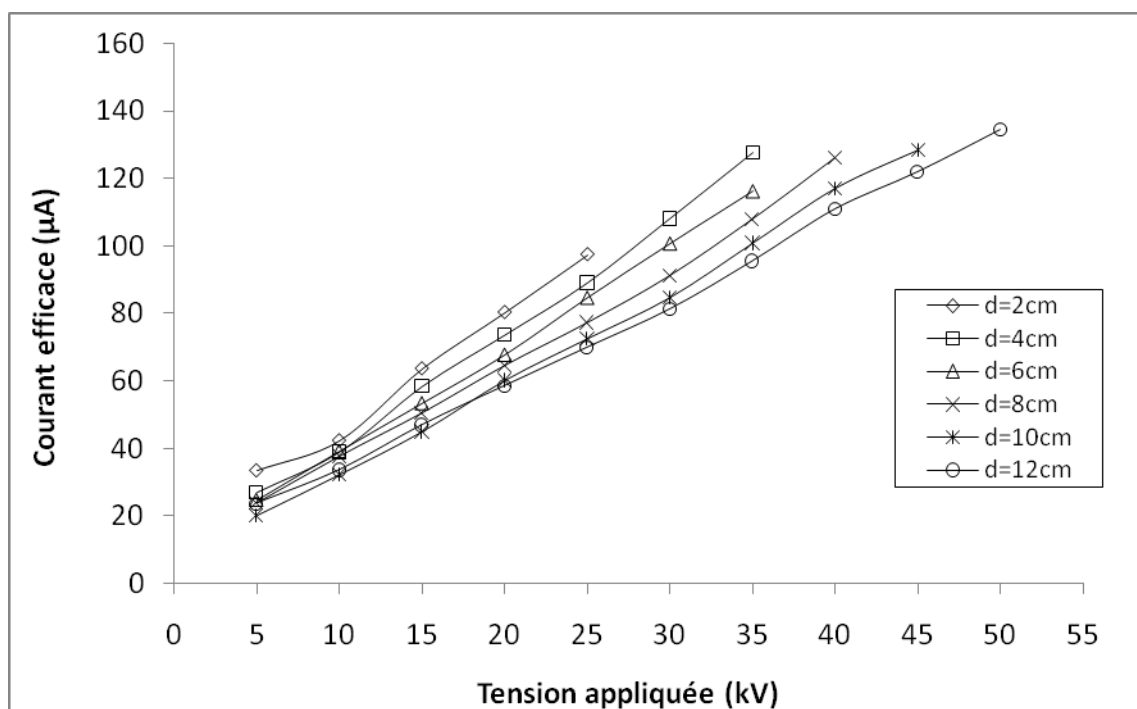


Figure IV.1 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes.

IV.1.1.2 Effet de la distance inter-électrodes sur les courants de préclaquage

Il ressort de la figure IV.2 que l'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne la diminution du courant de préclaquage.

En effet, cette diminution révèle l'influence du champ électrique sur le courant de préclaquage.

Nous remarquons que pour un niveau de tension donné, le courant diminue jusqu'à se stabiliser pour les grandes distances inter-électrodes. Cette diminution est plus visible pour les tensions élevées.

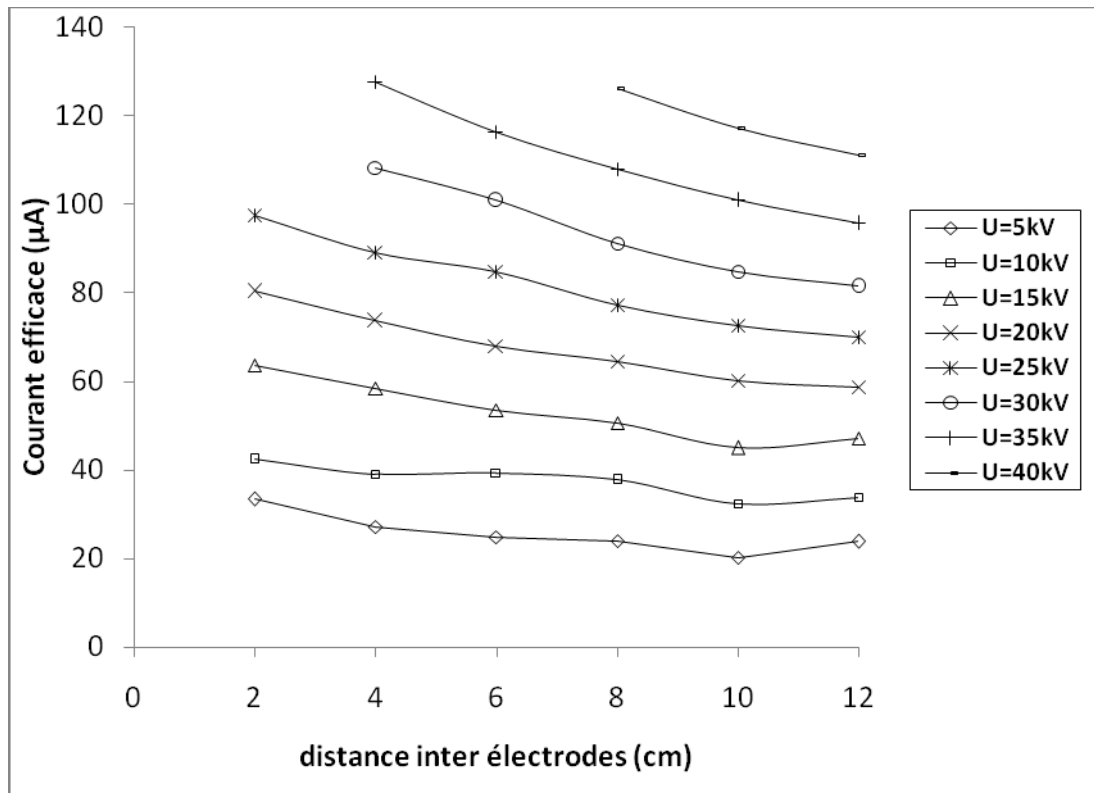


Figure IV.2 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension.

IV.1.2 Essais avec barrière

IV.1.2.1 Effet de l'insertion de la barrière

Pour étudier l'effet de l'insertion de la barrière, nous avons procédé par une comparaison entre les courants de préclaquage des deux systèmes (avec et sans barrière).

Pour chaque essai la barrière est maintenue perpendiculairement à l'axe portant l'électrode pointe.

Nous présentons aux figures IV.3,4,5 et 6 l'efficacité de la barrière isolante en fonction de la distance inter-électrodes.

Nous définissons l'efficacité de la barrière comme étant le rapport du courant de préclaquage dans le système avec barrière sur le même courant dans le système sans barrière.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que l'insertion de la barrière modifie significativement le courant de préclaquage.

En effet, nous remarquons que quelles que soient la nature, les dimensions, la position de la barrière et la tension appliquée, le courant de préclaquage augmente malgré la variation de ses paramètres. Cette augmentation est de l'ordre de 4 à 5 fois.

Ceci est dû, d'une part, au fait que la barrière présente un obstacle géométrique aux lignes de champ, et d'autre part, le champ électrique entre le plan et la barrière devient uniforme.

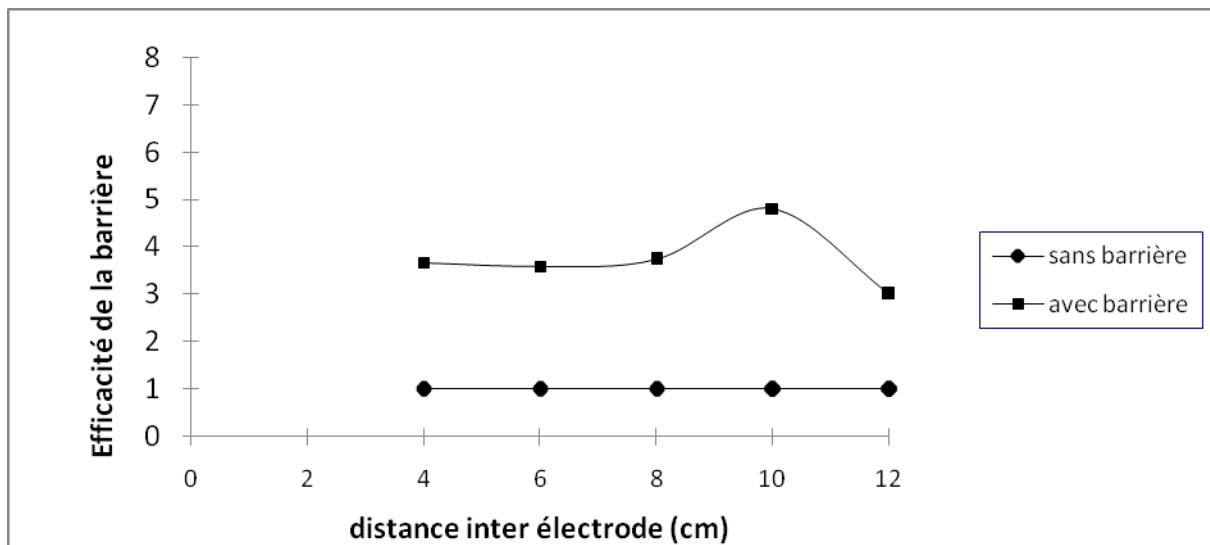


Figure IV.3 : Efficacité de la barrière en fonction de distance inter-électrodes
 (Barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a=0.2d$, $U=5\text{kV}$)

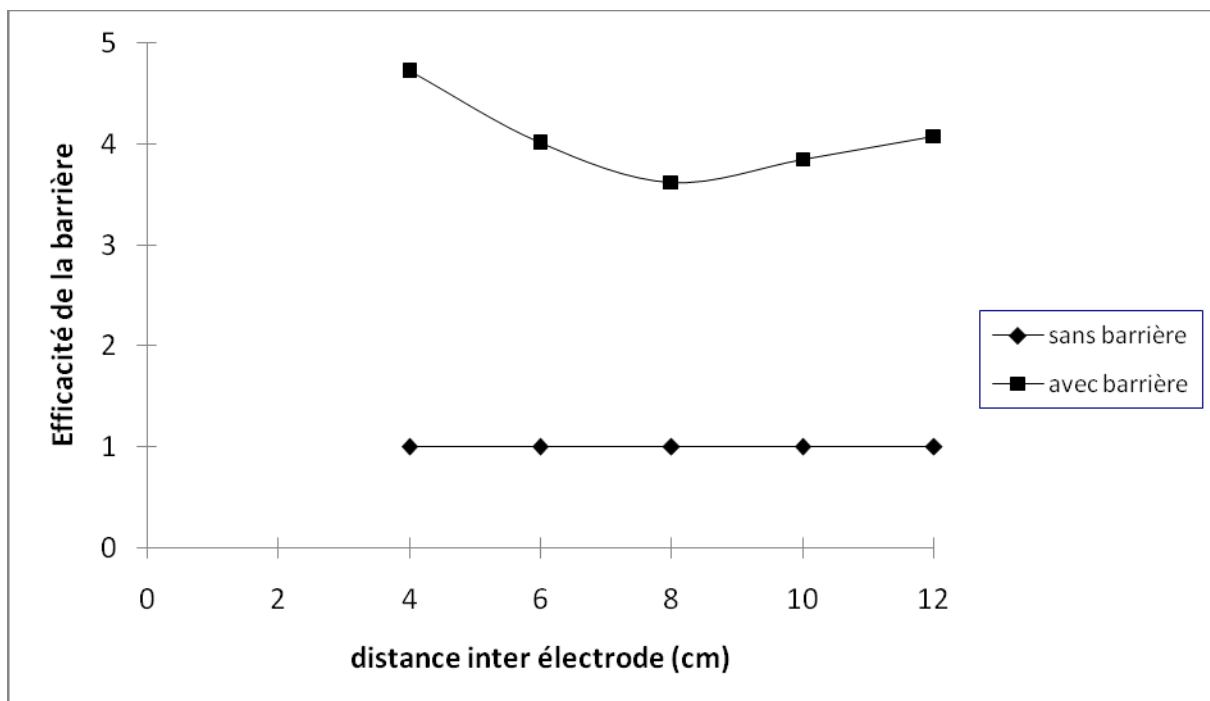


Figure IV.4 : Efficacité de la barrière en fonction de la distance inter-électrodes
 (Barrière en presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $a=0.8d$, $U=35\text{kV}$)

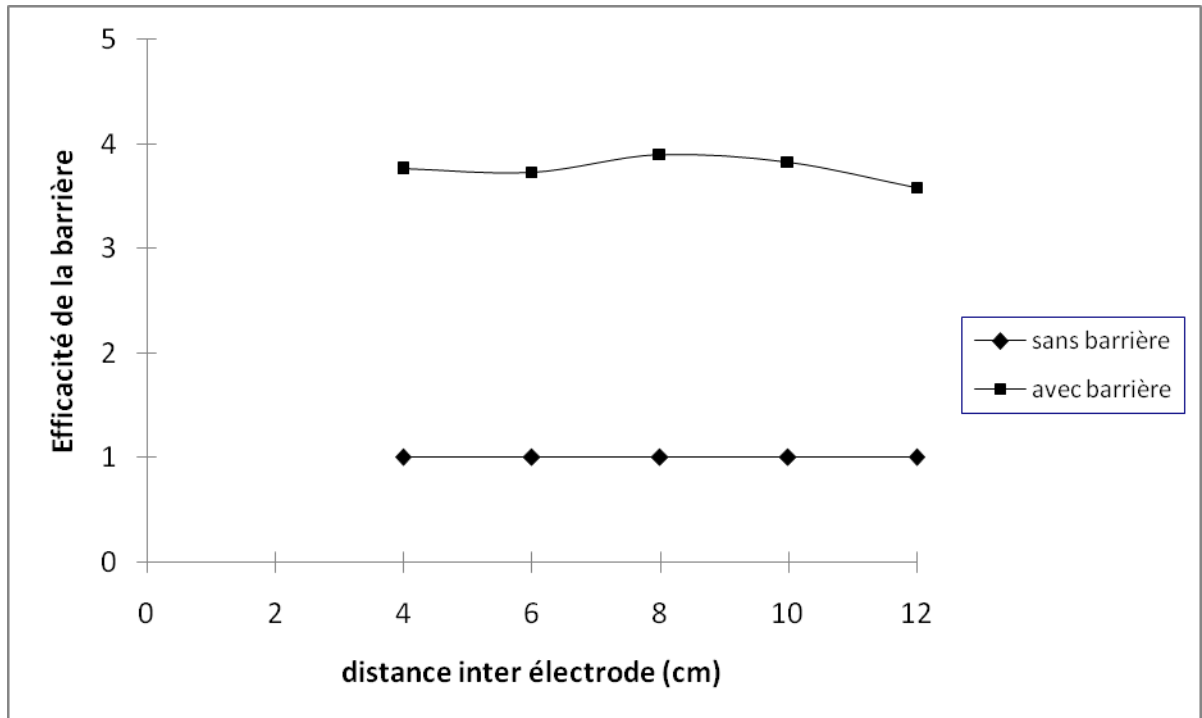


Figure IV.5 : Efficacité de la barrière en fonction de la distance inter-électrodes (Barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a=1d$, $U=20\text{kV}$)

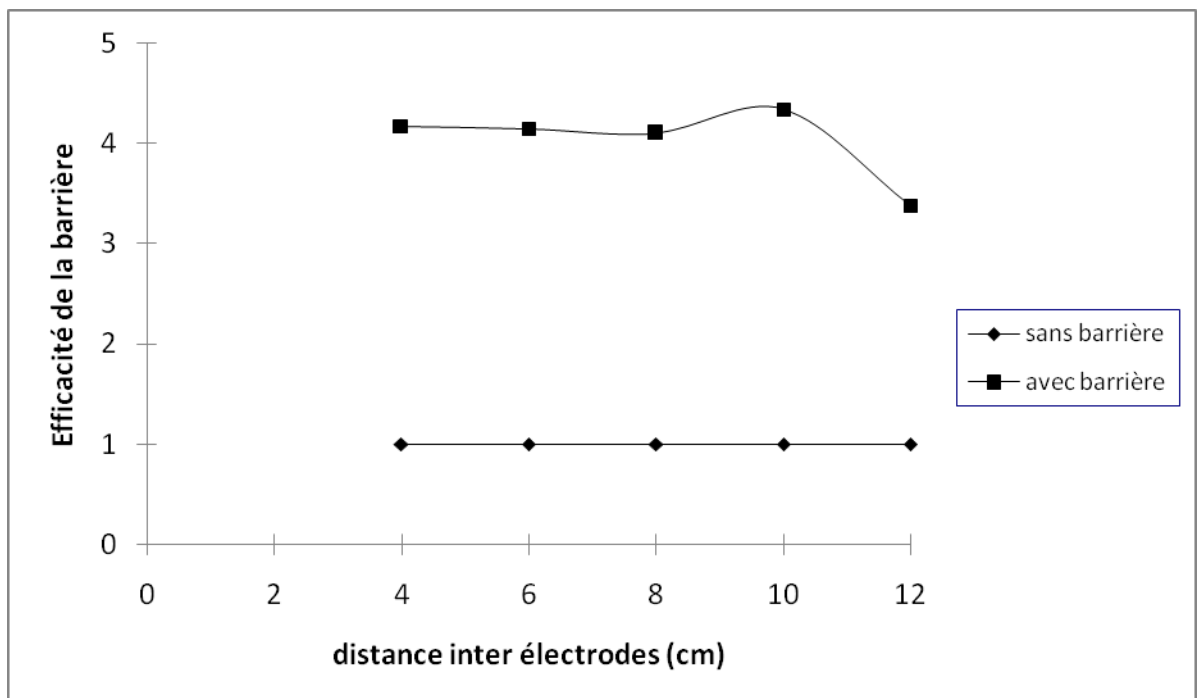


Figure IV.6 : Efficacité de la barrière en fonction de la distance inter-électrodes (Barrière en presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $a=0d$, $U=15\text{kV}$)

IV.1.2.2 Effet de la position de la barrière

Pour analyser l'influence de la position de la barrière sur le courant de préclaquage, nous avons tracé la caractéristique $I=f(a/d)$ pour différents niveaux de tension.

Il ressort des résultats obtenus (figures IV.7,8,9 et 10) que la position n'a aucun effet sur le courant de préclaquage.

Nous confirmons ce résultat aussi par la caractéristique $I=f(U)$ pour différentes positions de la barrière (figures IV.11 et 12).

Ceci se justifie par le fait qu'il n'y a pas eu lieu de décharges entre les électrodes, puisque les niveaux de tension sont relativement modérés ($< 50\%$ de la tension de claquage).

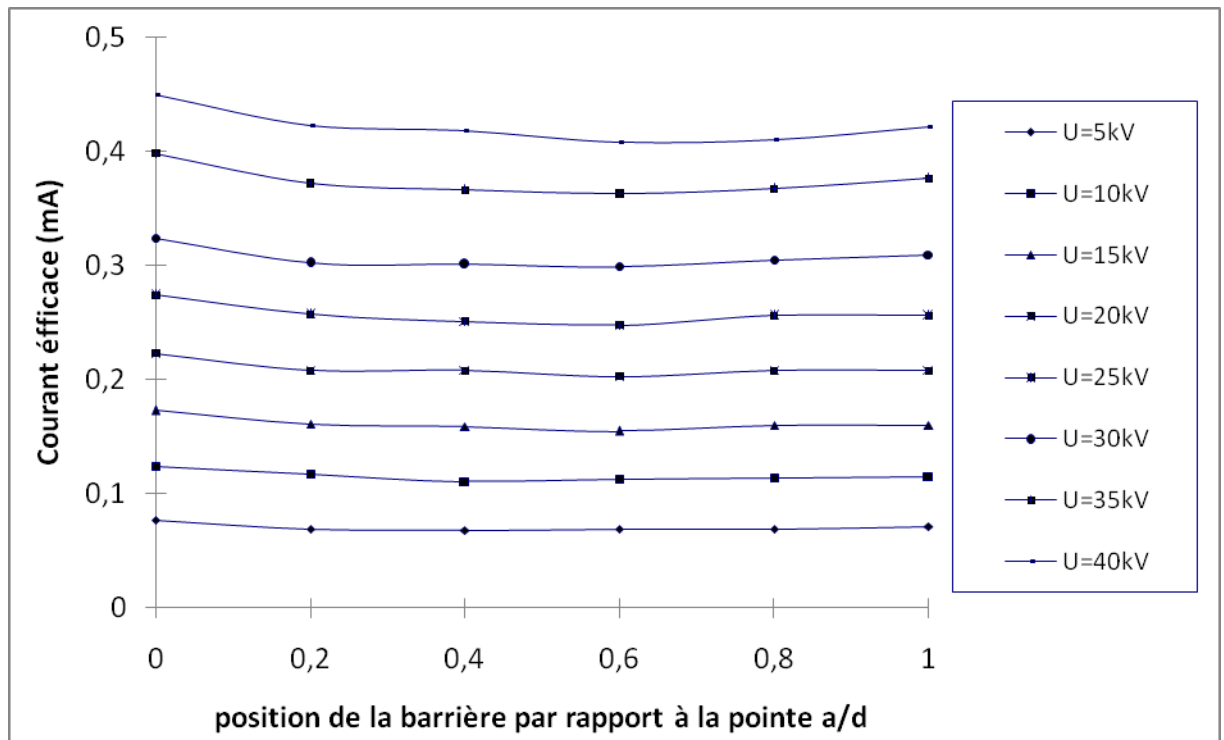


Figure IV.7 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la position de la barrière (Barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$)

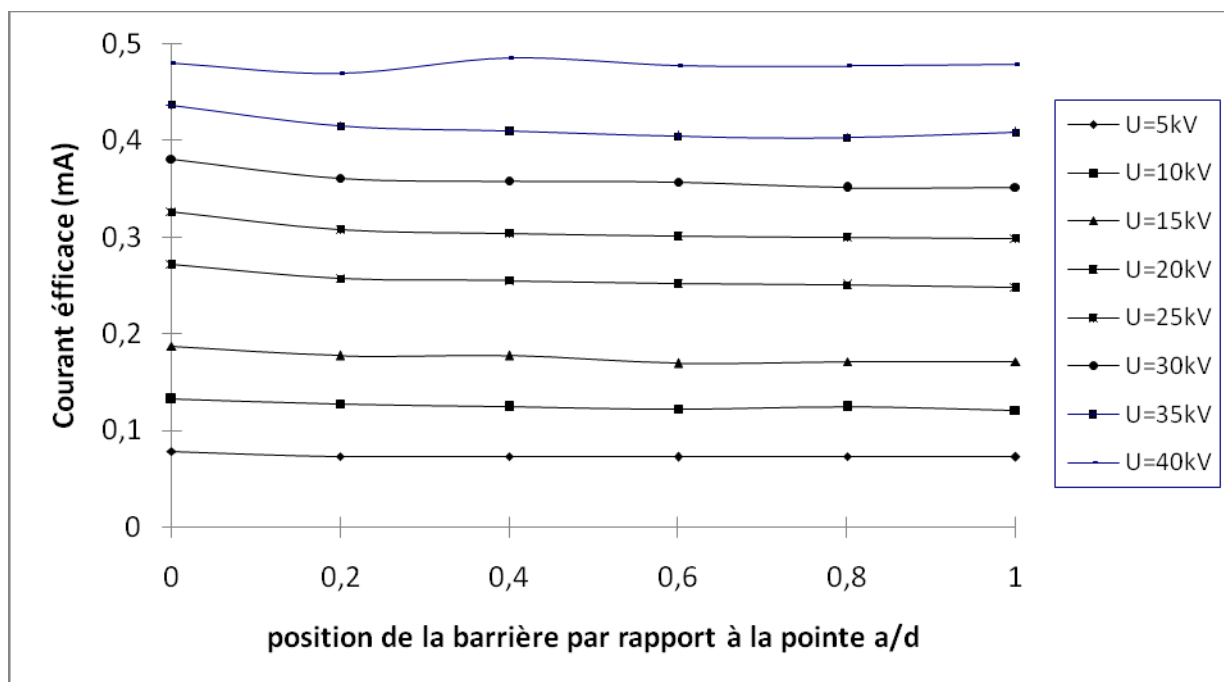


Figure IV.8 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la position de la barrière (Barrière en bakélite, $e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=10\text{cm}$)

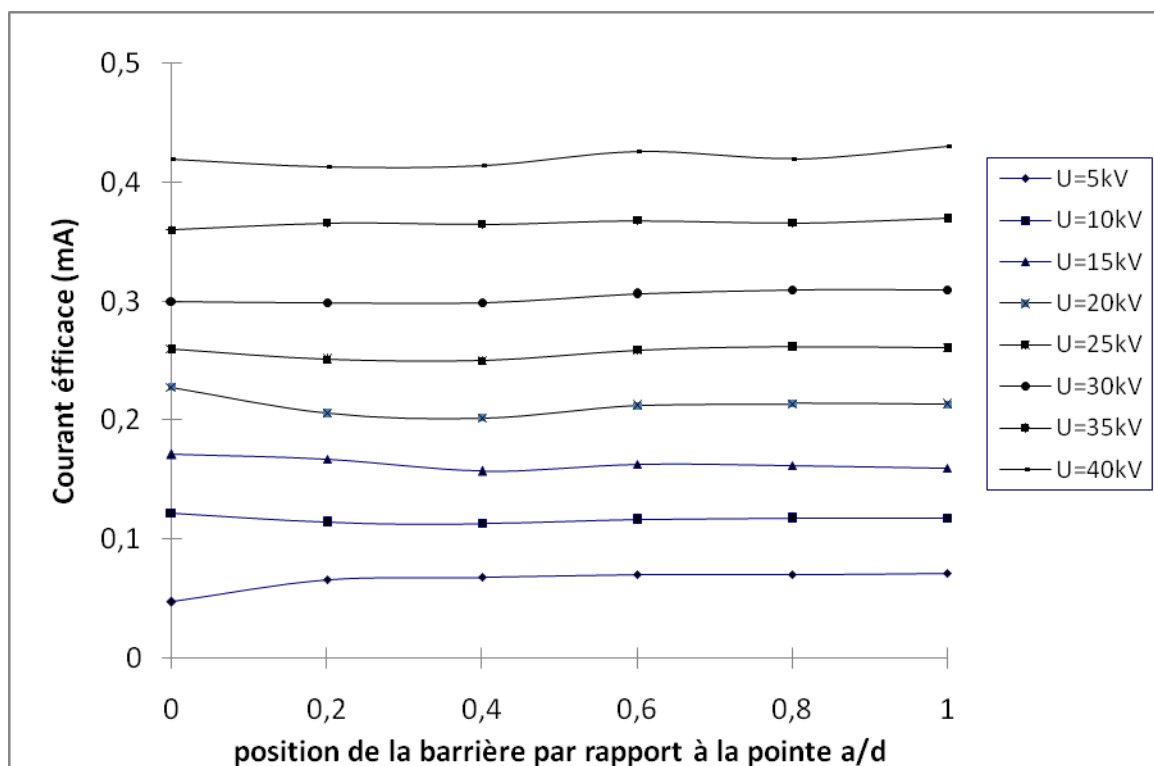


Figure IV.9 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la position de la barrière (Barrière en presspahn, $e=4\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=8\text{cm}$)

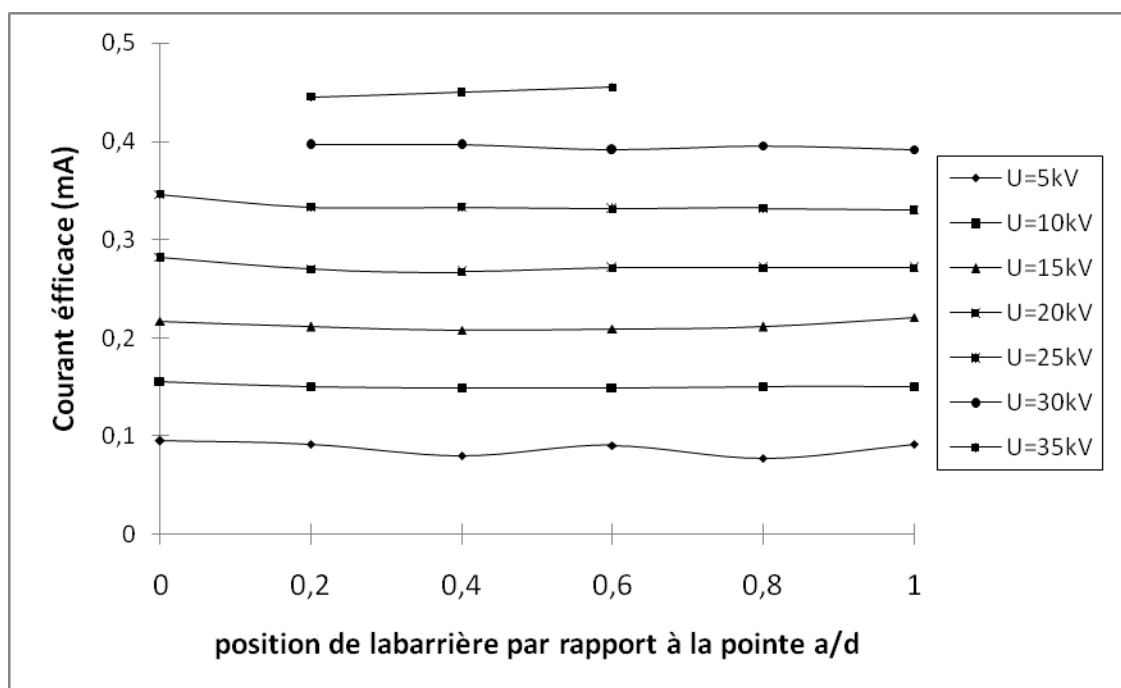


Figure IV.10 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la position de la barrière (Barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=20\text{cm}$, $d=4\text{cm}$)

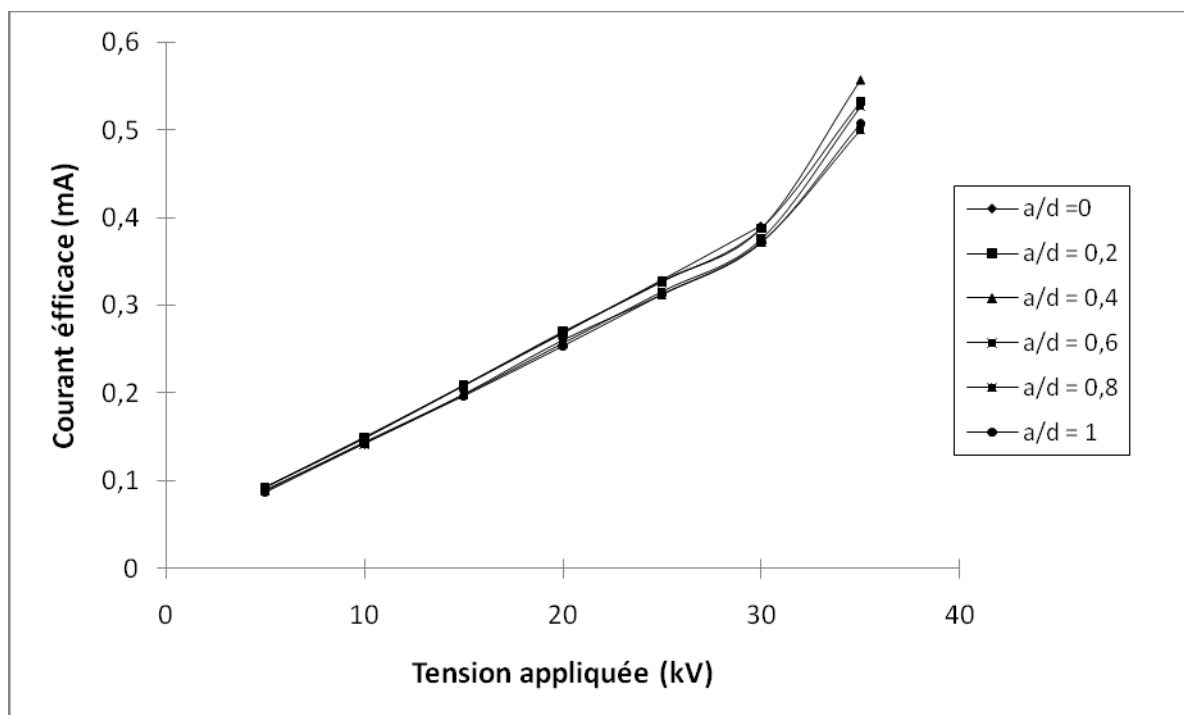


Figure IV.11 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière (Barrière en presspahn, $e=2\text{mm}$, $D=10\text{cm}$, $d=6\text{cm}$)

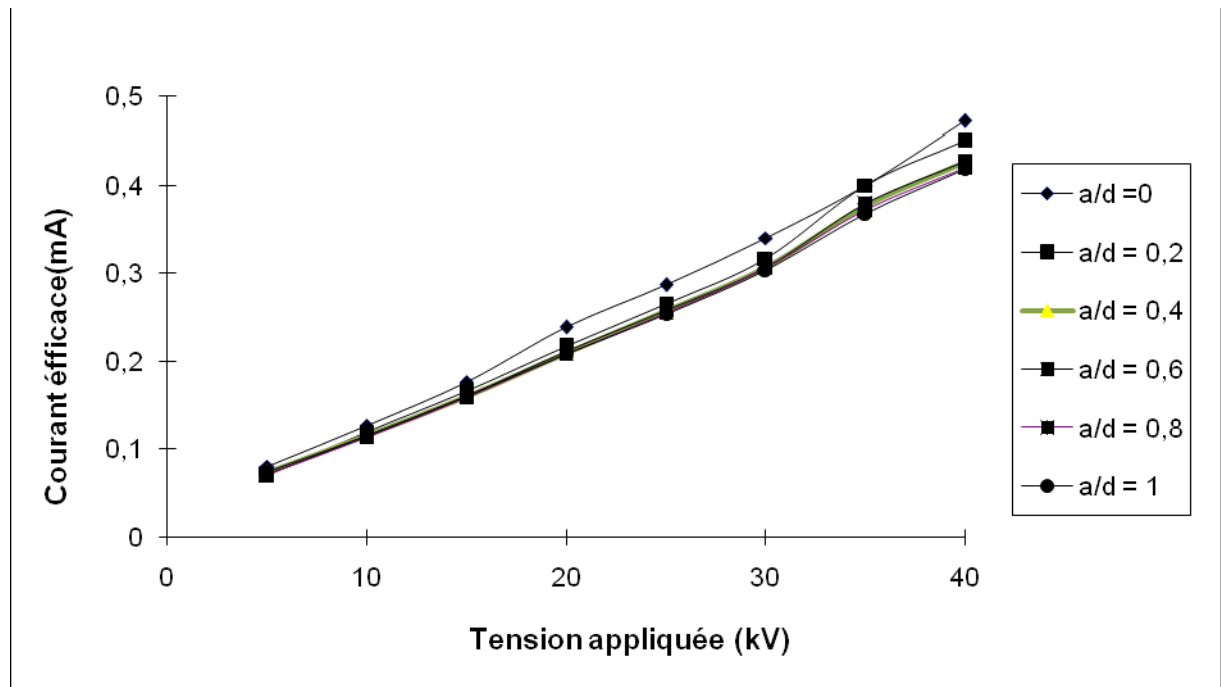


Figure IV.12 : Variation du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière (Barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d= 12\text{cm}$)

IV.1.2.3 Influence des dimensions de la barrière

IV.1.2.3.1 Effet du diamètre de la barrière

Les essais sont réalisés en utilisant des barrières ayant différents diamètres (10,14 et 20cm), pour différentes distances inter-électrodes (4,6,8,10 et 12cm) et pour des barrières en papier presspahn d'épaisseurs différentes (2 et 4mm).

Nous observons aux figures IV.11,12 et 13 que le diamètre de la barrière ne modifie pas la valeur du courant de préclaquage, puisque il n'y a pas eu de décharges qui perturberaient la répartition du champ électrique . Rappelons que lors des essais nous ne dépassons pas $50\% U_{\text{claquage}}$.

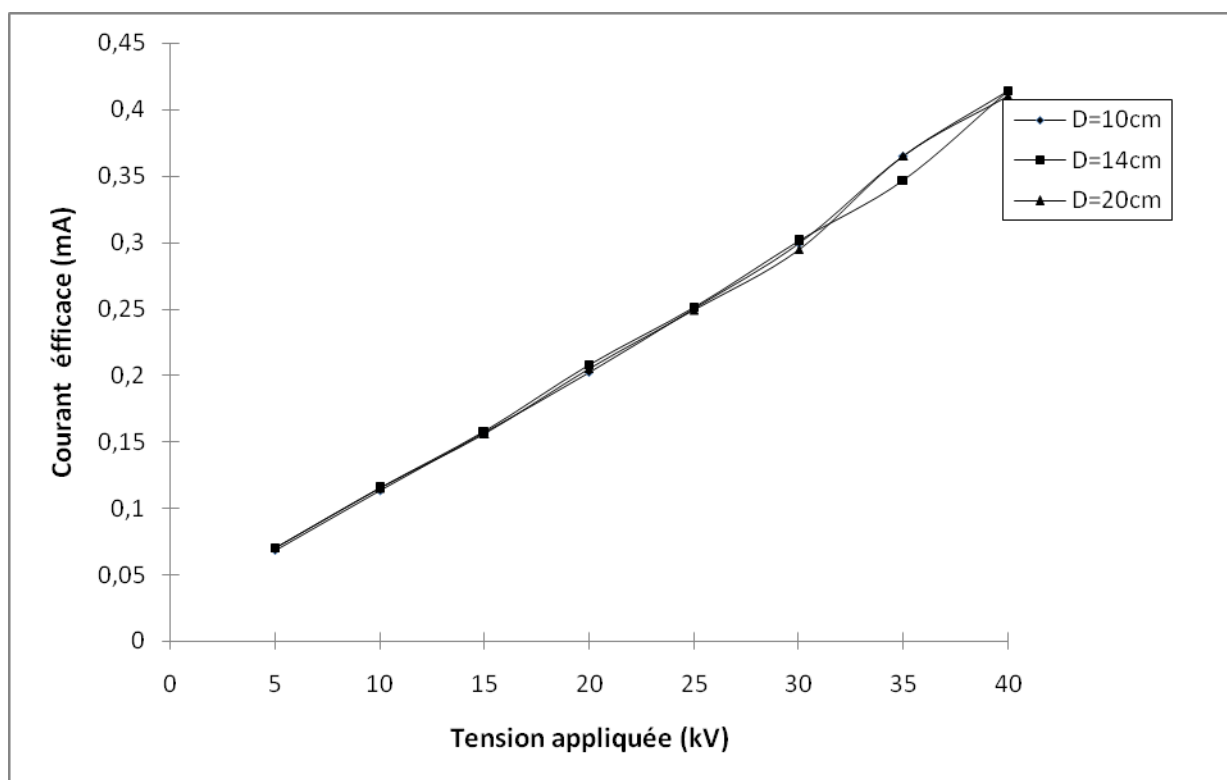


Figure IV.13 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différents diamètres de la barrière (Barrières en presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $a=0.4 d$)

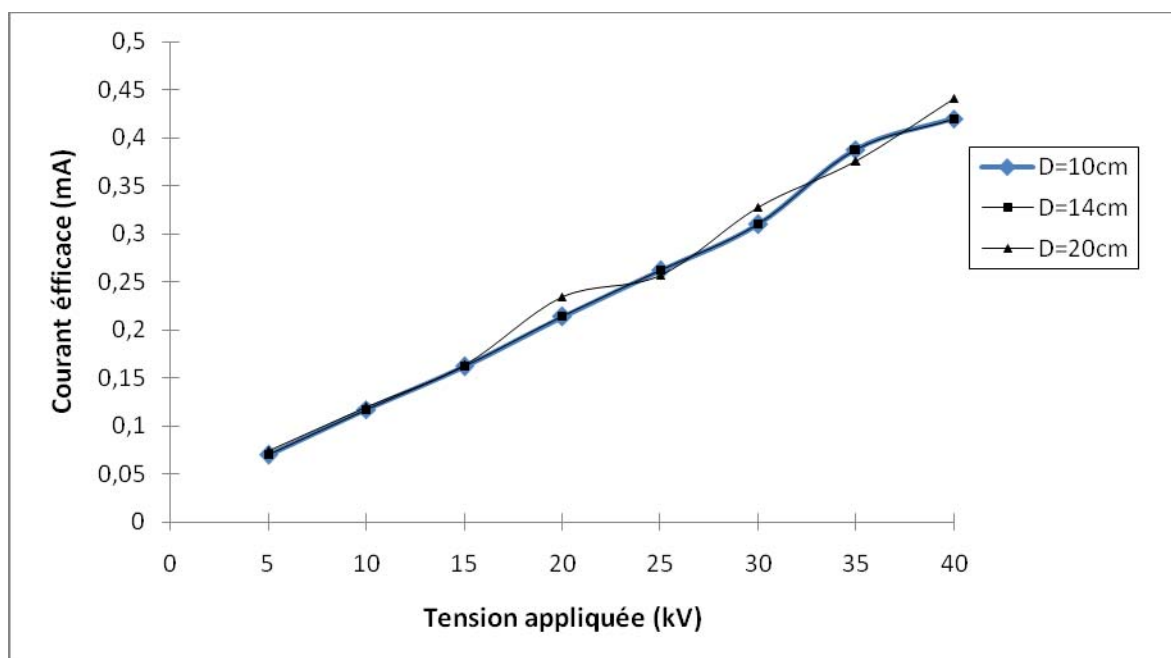


Figure IV.14 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée (Barrières en presspahn, $e=4\text{mm}$, $d=12\text{cm}$, $a=0.8 d$)

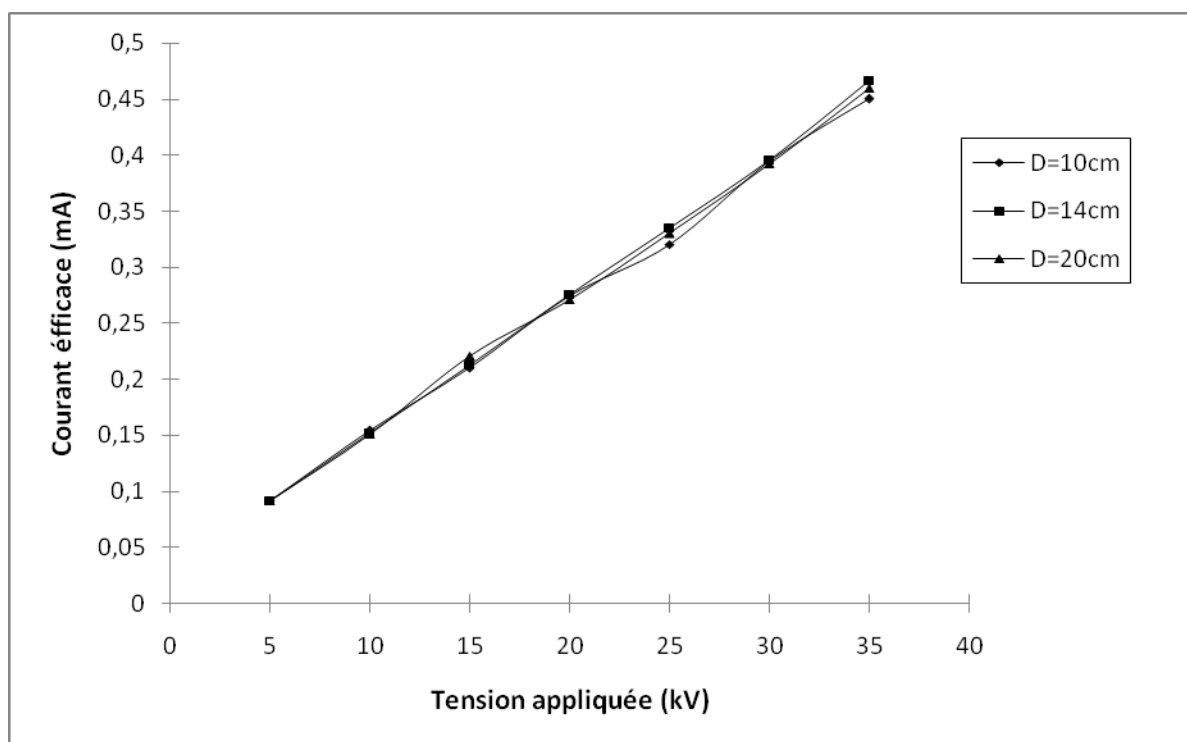


Figure IV.15 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée (Barrières en presspahn, $e=2\text{mm}$, $d=4\text{cm}$, $a=1\text{d}$)

IV.1.2.3.2 Effet de l'épaisseur de la barrière

L'objectif de ces essais est d'analyser l'influence de l'épaisseur de la barrière sur le courant de préclaquage des systèmes d'isolation.

Nous remarquons d'après les résultats obtenus, que l'effet de l'épaisseur de la barrière n'intervient pas.

Le même résultat a été obtenu que pour la tension de claquage[34]. L'épaisseur de la barrière n'a aucun effet sur le courant de préclaquage.

Ceci est observé soit, pour la caractéristique $I=f(U)$ pour différentes épaisseurs de la barrière (figures IV.16,17), soit pour la caractéristique $I=f(a/d)$ pour différentes épaisseurs (figures IV.18), soit pour celle de $I=f(d)$.

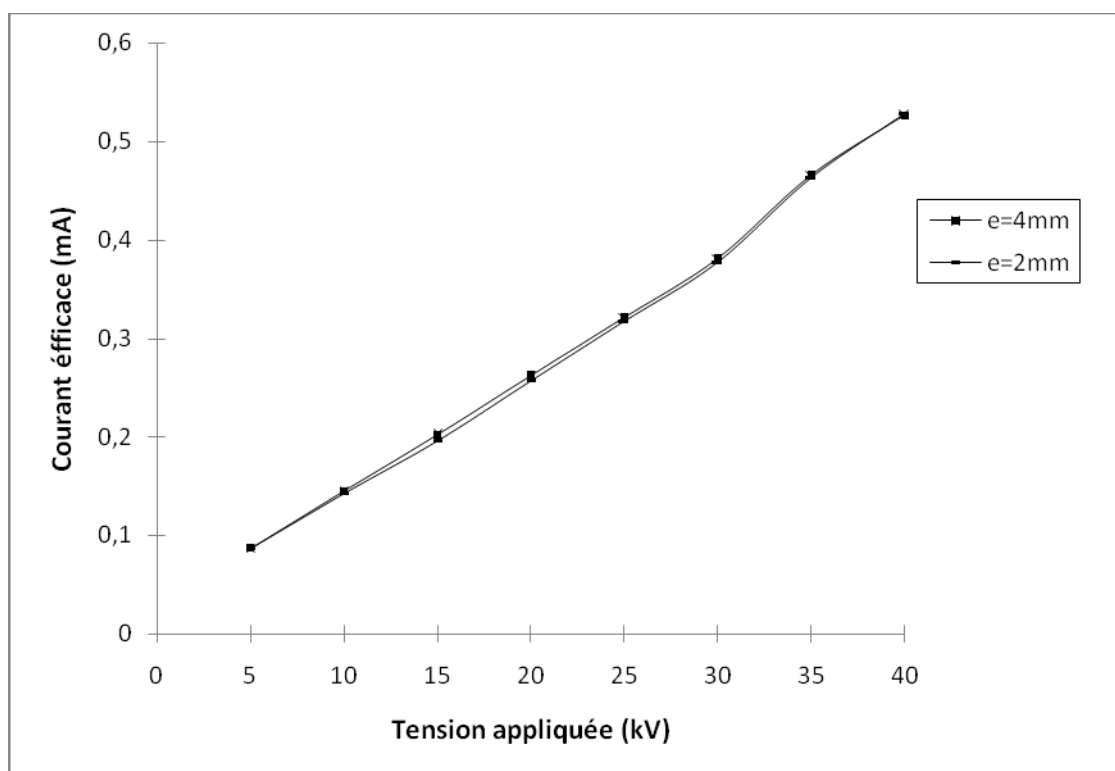


Figure IV.16 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes épaisseurs de la barrière (Barrières en bakélite, D=14cm, d=6cm, a/ d=0.2)

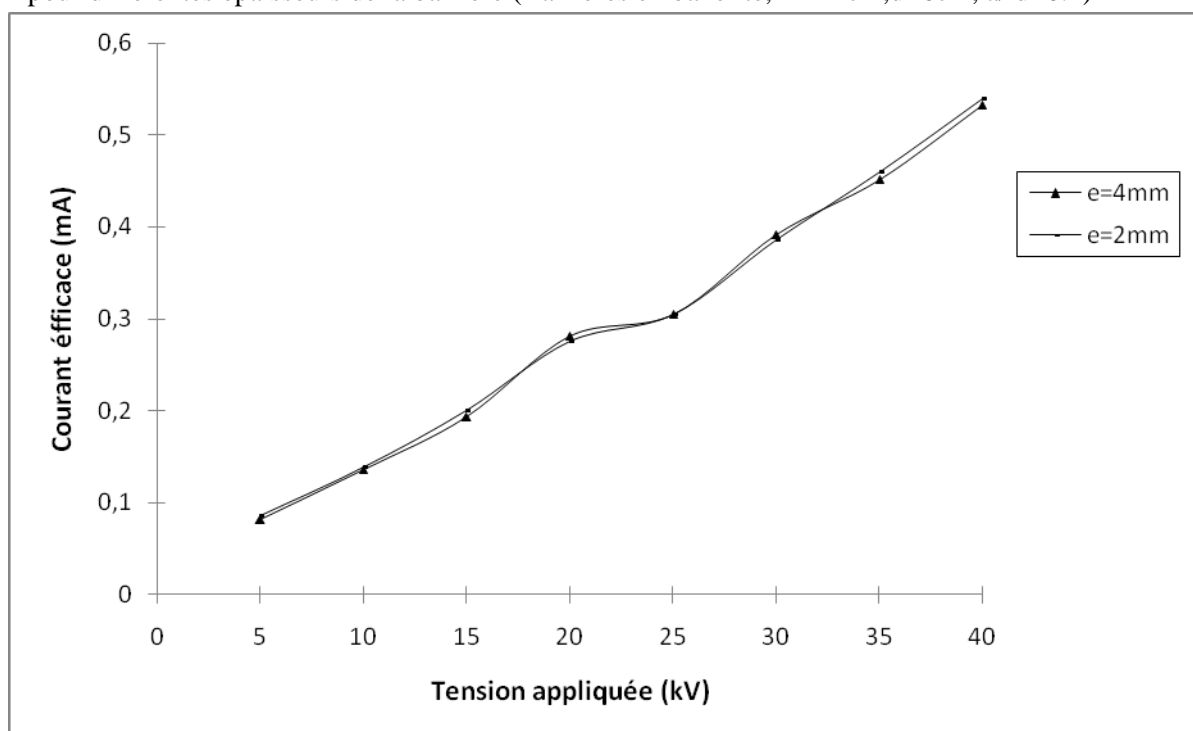


Figure IV.17 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes épaisseurs de la barrière (Barrières en bakélite, D=14cm, d= 8cm, a/ d=0.2)

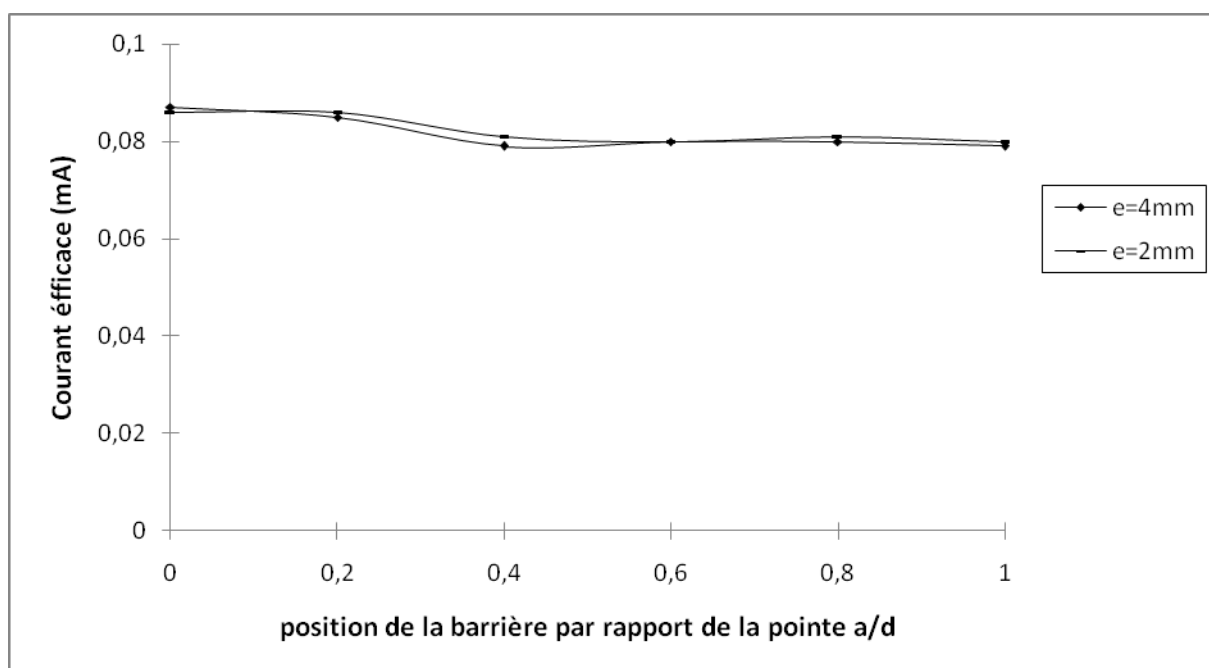


Figure IV.18 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la position de la barrière pour différentes épaisseurs (Barrières en bakélite, $D=14\text{cm}$, $d=8\text{cm}$, $U=5\text{kV}$)

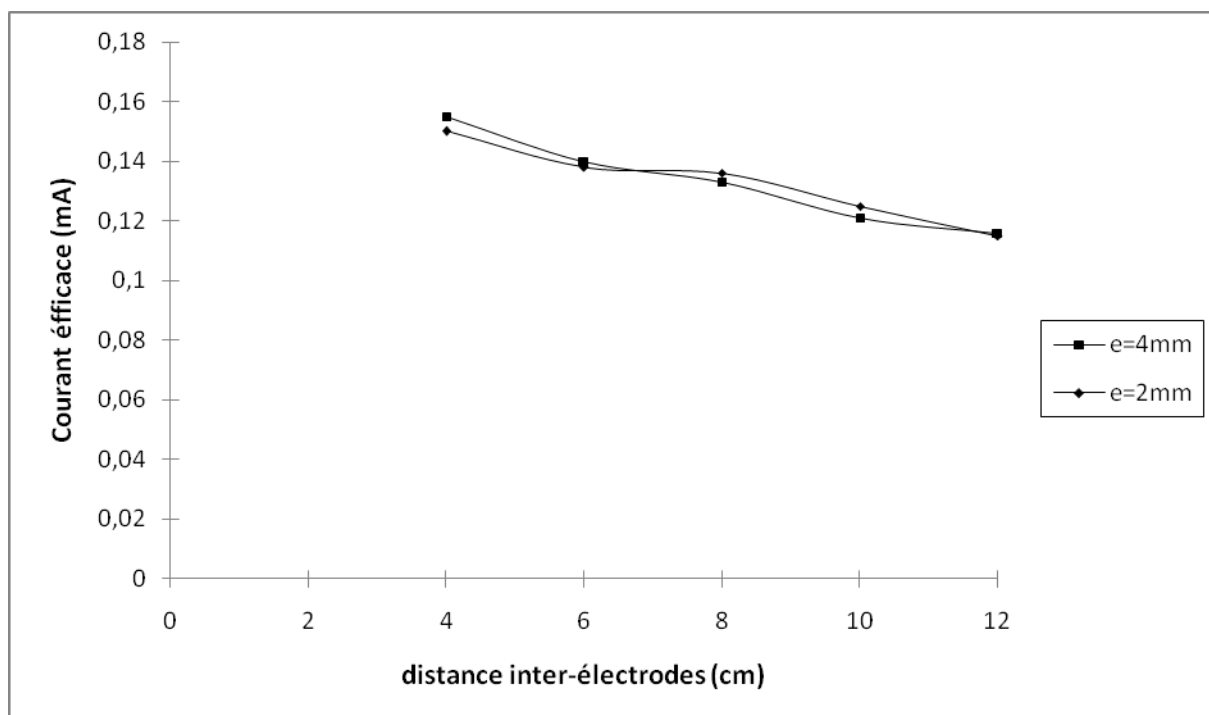


Figure IV.19 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes épaisseurs (Barrières en bakélite, $D=14\text{cm}$, $U=10\text{kV}$, $a/d=1$)

IV.1.2.4 Influence de la nature de la barrière

Pour analyser l'effet de la nature de la barrière sur le courant de préclaquage, nous avons procédé par comparaison des caractéristiques $I=f(a/d)$ pour une barrière en bakélite et une autre en presspahn, en fixant : l'épaisseur et le diamètre de la barrière, la distance inter-électrodes et la tension appliquée. Ceci a permis d'avoir les figures IV. 20,21,22,23.

Nous observons que la nature de la barrière n'a pas d'influence, malgré la différence entre une barrière en Bakélite et une autre en Presspahn, et qui réside dans les valeurs différentes de leurs permittivités (tableau III.1) ainsi que dans la résistance mécanique aux chocs de chaque matériau.

Cependant, la barrière isolante jouera son rôle de résistance au passage du courant sans tenir compte de sa nature.

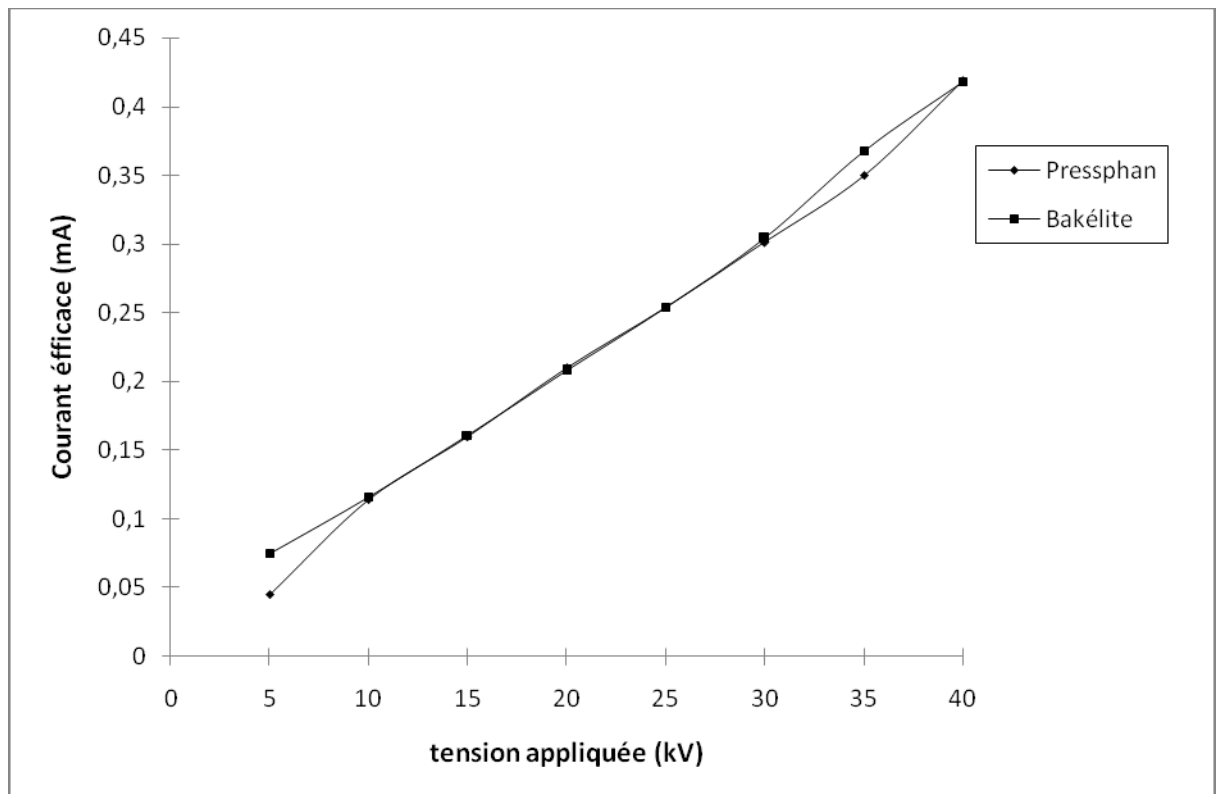


Figure IV.20 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de barrières ($e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a/d=1$)

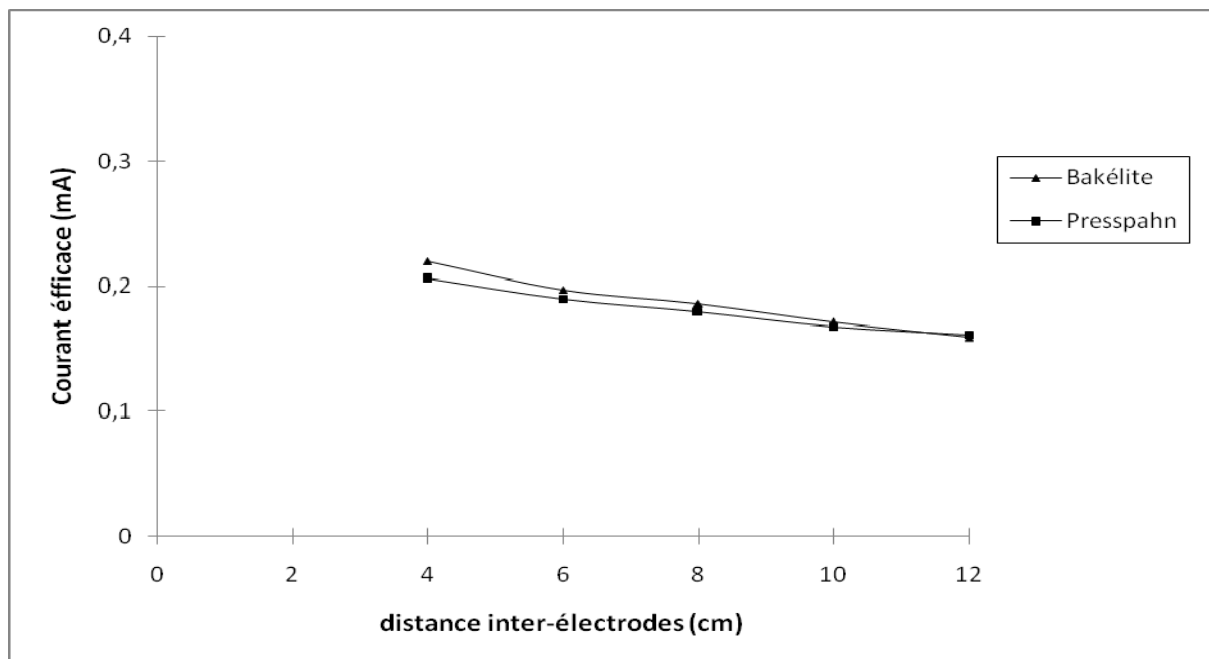


Figure IV.21 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes natures de barrières ($e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $U=15\text{kV}$, $a/d=0.2$)

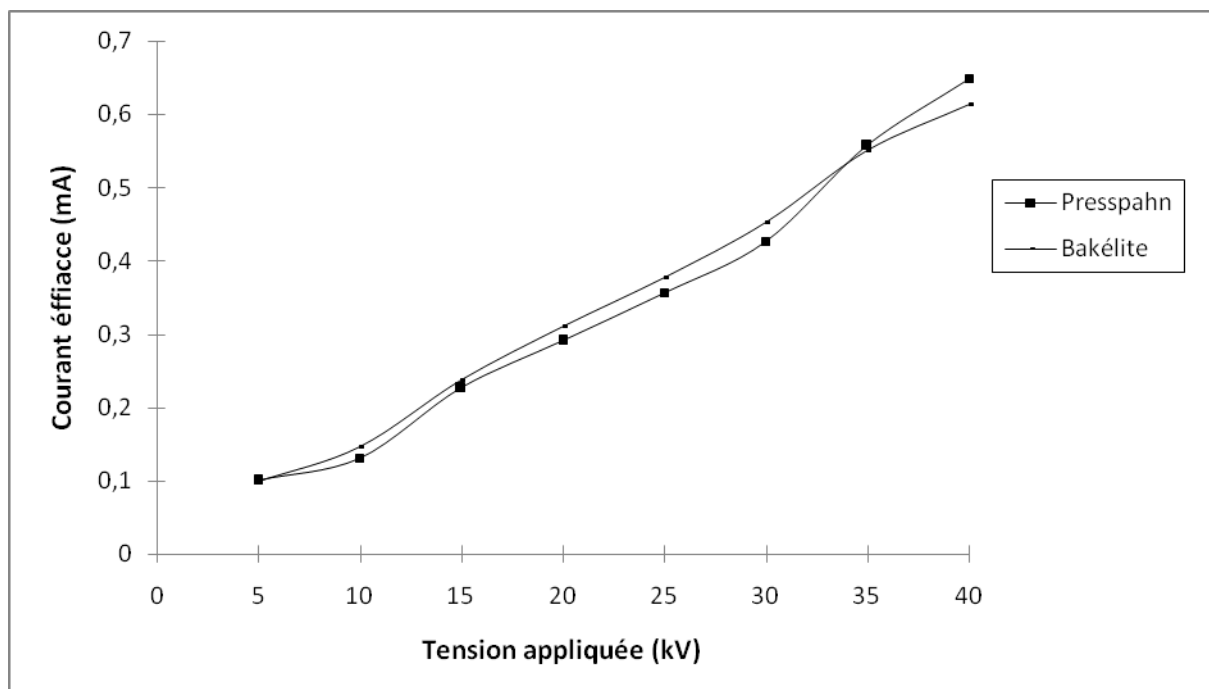


Figure IV.22 : Variations du courant de préclaquage en fonction de la tension appliquée pour différentes natures de barrières ($e=2\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=4\text{cm}$, $a/d=0.2$)

IV.1.3 Variations de l'impédance équivalente

IV.1.3.1 Système pointe-plan

Afin de visualiser l'impédance de ce système, nous avons tracé les caractéristiques $Z = f(U)$ et $Z = f(d)$.

Il ressort des résultats obtenus, que l'impédance du système n'est pas constante (figure IV.23), ce qui montre que les caractéristiques du milieu (la conductivité par exemple) varient avec la tension appliquée faisant varier l'impédance du système, indépendamment de la distance inter-électrodes.

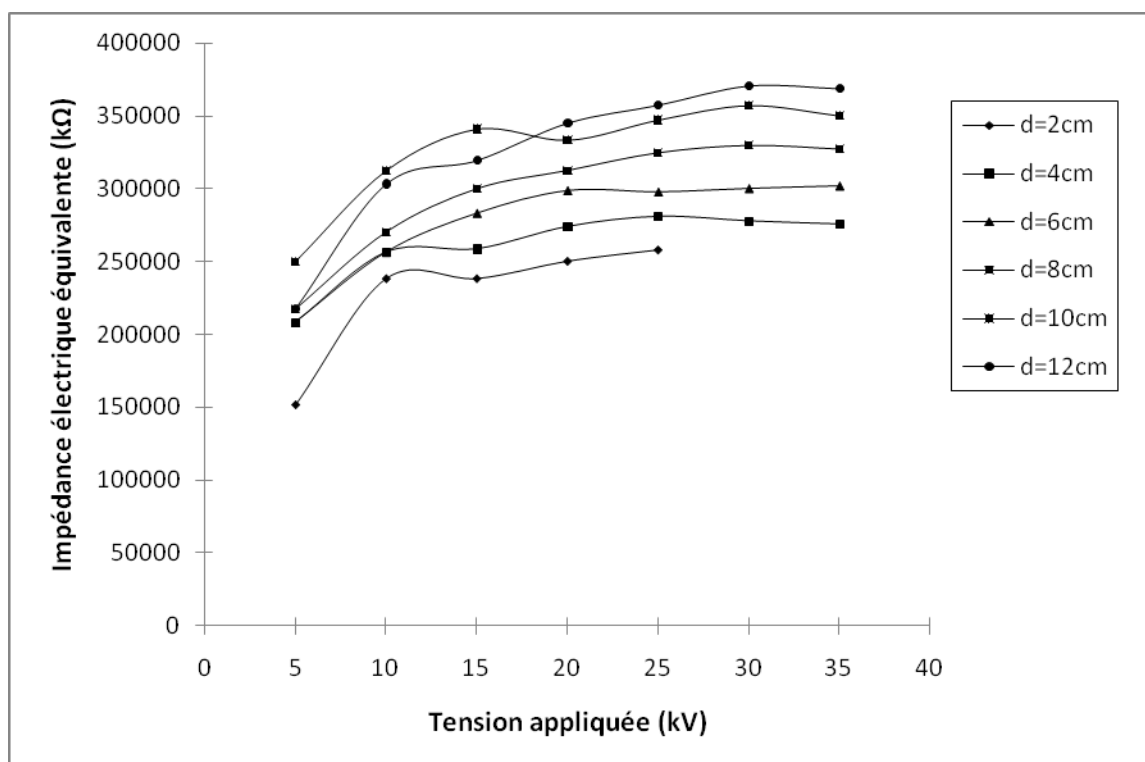


Figure IV.23 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes

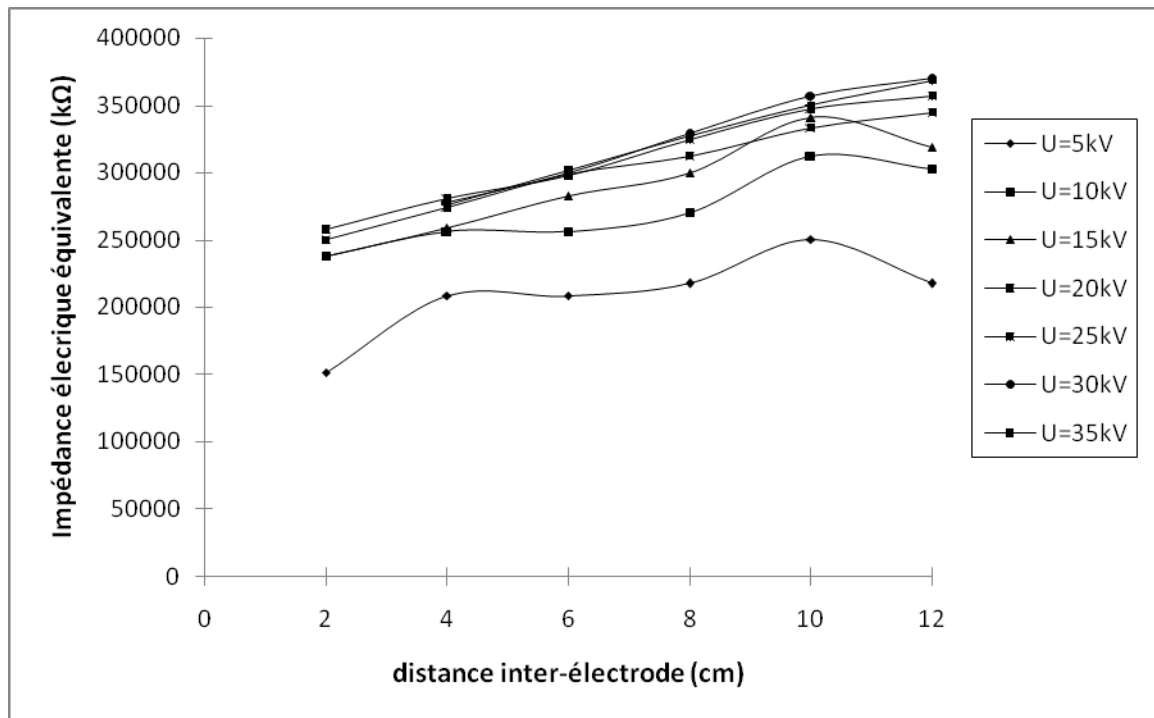


Figure IV.24 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la distance inter-électrodes pour différents niveaux de tension

IV.1.3.2 Système pointe-barrière-plan

Comme pour le système précédant, l'insertion de la barrière ne stabilise pas l'impédance de ce nouveau système (pointe-barrière-plan).

En effet, une caractéristique très importante du milieu d'isolation « la permittivité » (tableau III.1), qui joue un rôle capital dans la répartition du champ électrique à l'intérieur de ce milieu et qui fait que l'impédance varie.

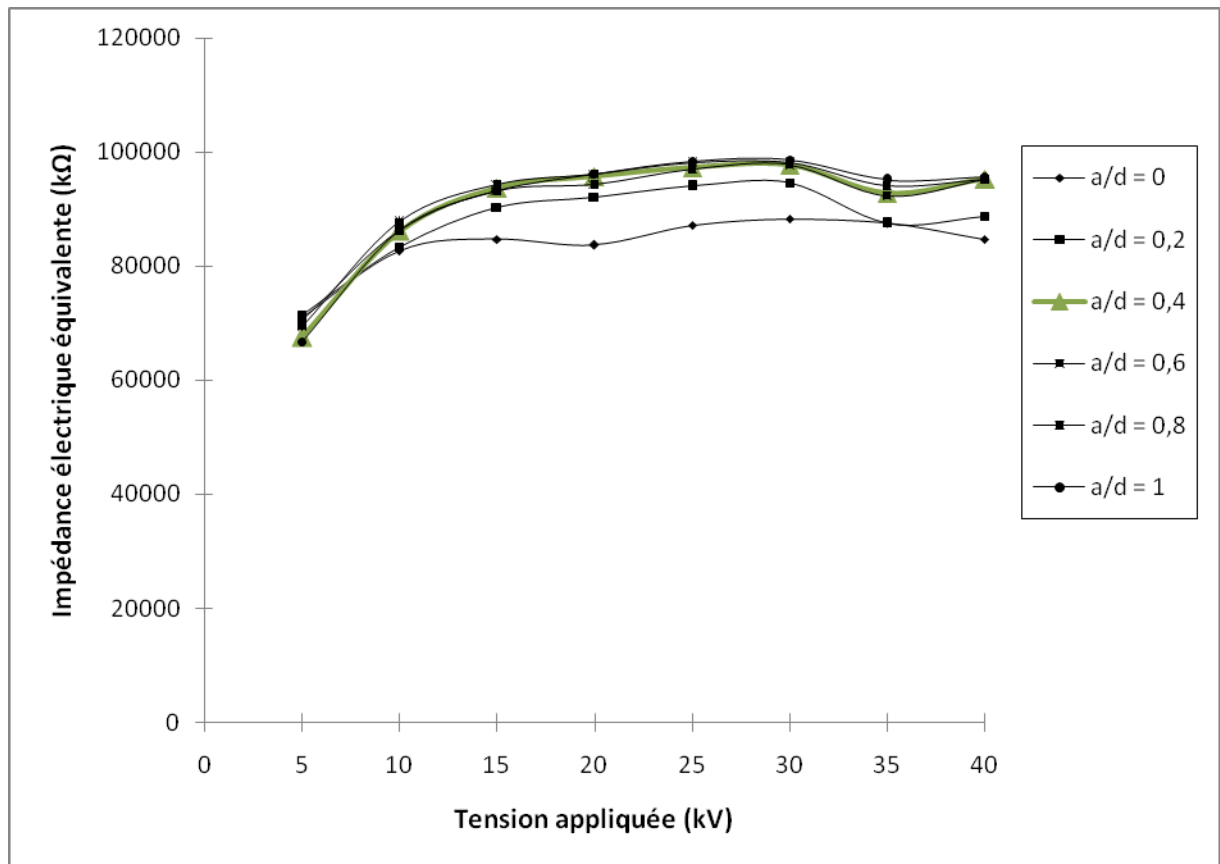


Figure IV.25 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière (Barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$)

IV.1.3.3 Effet de la barrière sur l'impédance équivalente

Pour étudier l'effet de l'insertion de la barrière, nous avons procédé par une comparaison entre les impédances équivalentes des deux systèmes (avec et sans barrière).

D'après les résultats obtenus (figures IV.3.4.5.6), nous constatons que l'insertion de la barrière isolante modifie significativement l'impédance du système pointe-plan.

En effet, nous remarquons que quelles que soient la nature, les dimensions, la position de la barrière et la tension appliquée, l'impédance diminue malgré la variation de ses paramètres.

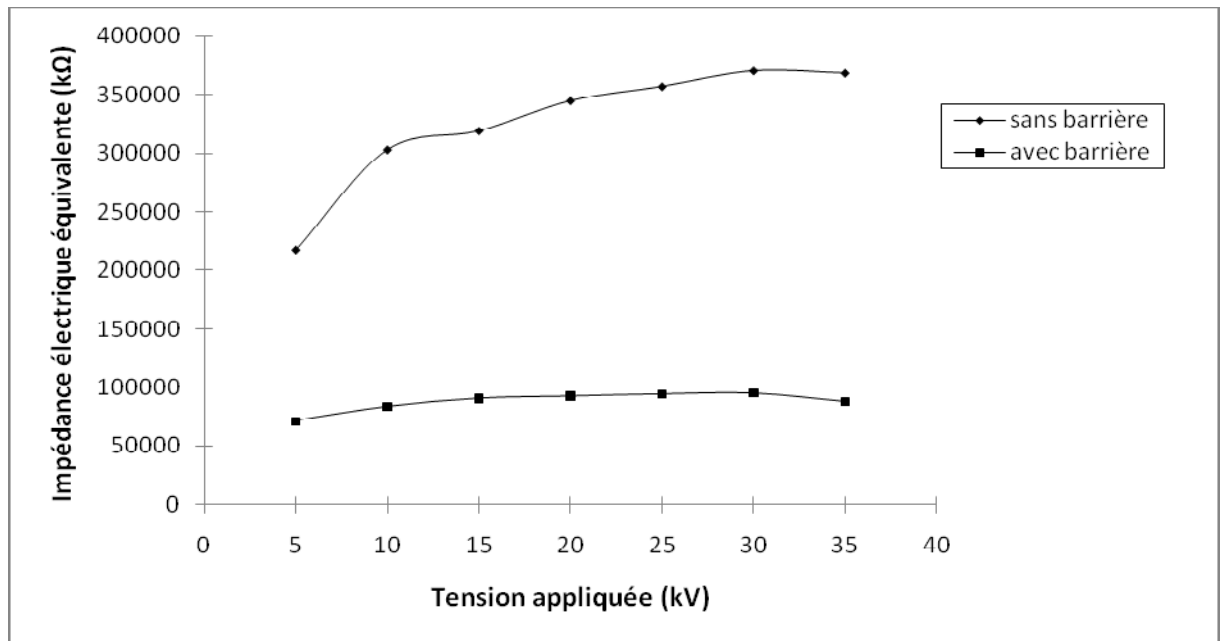


Figure IV.26 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière (Barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a=0.2\text{ d}$)

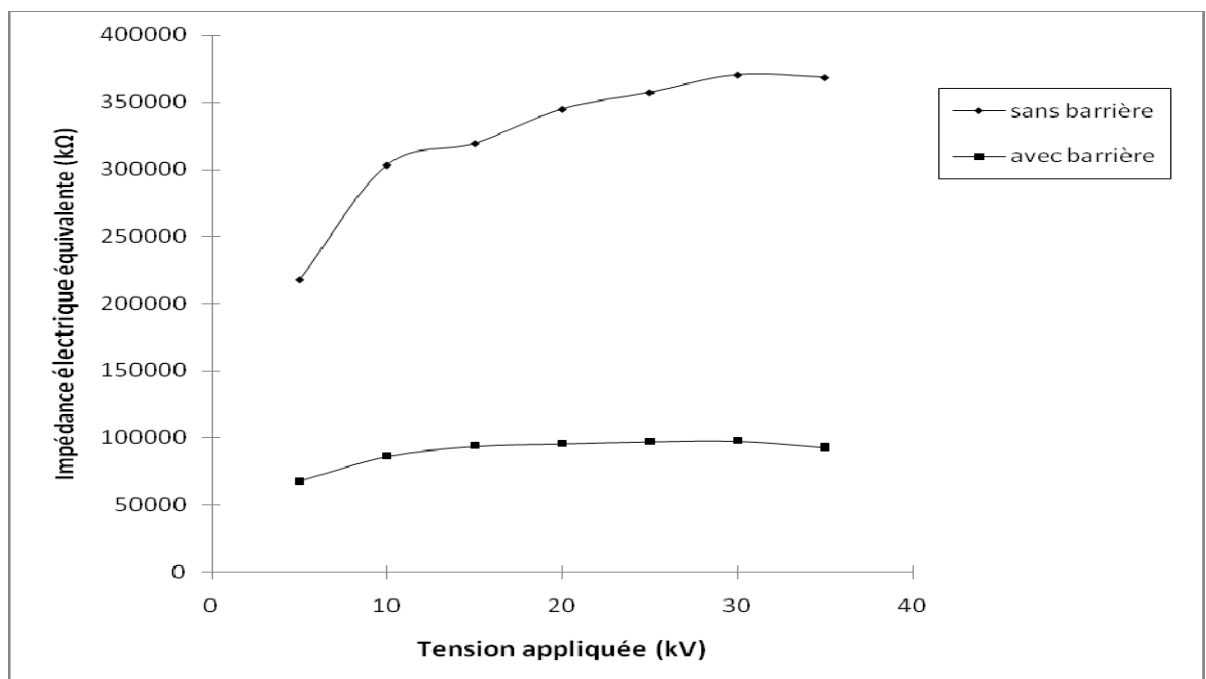


Figure IV.27 : Variations de l'impédance équivalente en fonction de la tension appliquée pour différentes positions de la barrière (Barrière en bakélite, $e=4\text{mm}$, $D=14\text{cm}$, $d=12\text{cm}$, $a=0.4\text{ d}$)

IV.2 Conclusion

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

Les essais effectués ont permis de visualiser l'influence de la distance inter-électrodes, l'effet d'insertion d'une barrière isolante et sa position dans un système divergent sur le courant de préclaquage. Ainsi que l'influence de quelques paramètres de la barrière sur le même courant telles que sa nature et ses dimensions.

Enfin, ces essais ont permis la visualisation de l'impédance équivalente des deux systèmes étudiés (sans et avec barrière) et de parvenir à les comparer.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

La recherche bibliographique répartie sur les deux premiers chapitres, nous a permis d'acquérir des connaissances sur les liquides et huiles destinés à l'isolation, et d'approfondir la compréhension des mécanismes conduisant à leur claquage, ainsi que l'influence de l'insertion d'une barrière isolante sur la rigidité diélectrique du milieu isolant .

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

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

1. Dans les intervalles d'huile « pointe-plan », pour une tension alternative à fréquence industrielle, la barrière isolante à surface propre joue en premier lieu le rôle d'obstacle géométrique provoquant l'allongement de la décharge électrique et en conséquence, l'augmentation du courant de préclaquage.
2. L'influence de la tension sur le courant de préclaquage est aussi importante, en raison des champs électriques élevés imposés aux barrières.
3. La distance inter-électrodes, la position de la barrière, sa nature et ses dimensions (diamètre et épaisseurs) n'ont quasiment pas d'influence sur le courant de préclaquage.
4. En plus de la modification du courant de préclaquage, la barrière isolante modifie considérablement l'impédance équivalente qui possède un caractère actif non négligeable.

Comme perspectives à notre travail, nous proposons de faire des mesures de la charge électrique injectée dans les intervalles d'huile avec et sans barrière.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Nöelle BERGER** ; Liquides isolants en électrotechnique – caractéristiques des produits, Technique de l'ingénieur D2 471, 2002.
- [2] **A. BOUBAKER , A. BEROUAL** ; Influence of barrier on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in point-plane arrangement, IEEE Transactions on Electrical Insulating, 1991, Vol.26,N°6,pp.1130-1139.
- [3] **A.ZOUAGHI**; Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu, Ecole Centrale de Lyon, France, 1997.
- [4] **A.C.M .WILSON** ; Insulating liquids: their uses, manufacture and properties. Peter Peregrinus Ltd, Stevenage (U.K), 1980.
- [5] **B.HOCHART** ; Le transformateur de puissance 2^{ème} Ed, édition Lavoisier, 1988.
- [6] **M.KOSTIENKO , L.PIETRONSKI** ; Machines électriques T1, Ed Mir, 1976.
- [7] **S.E ABDI** ; Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur, Mémoire de Magister, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2002.
- [8] **PUGH (D.R)** ; Advances in fault diagnosis by combustible gaz analysis. Minute de la 41e Conférence annuelle Internationale de Doble, Sec.10-1201, Doble Engineering Co, Watertown MA, 1974.
- [9] **S.BOUAZABIA** ; Mécanismes de décharges dans les diélectriques liquides, cours de graduation, USTHB, Alger, 2001.
- [10] **R.BENAMAR** ; Influence du nombre de claquage sur les propriétés de l'huile de transformateur, Mémoire de Magister, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2008.
- [11] **Norme française NFT 60-100** ; Mesure de la viscosité absolue cinématique, Mars 1966.

- [12] **Norme française NF T 60-103** ; Point d'éclair en vase clos, des lubrifiants et des huiles combustibles, Décembre 1968.
- [13] **N.AOUCHAR, C.BEKHALED** ; Application des systèmes hybrides neuro-flous au diagnostic des huiles de transformateur, Projet de fin d'études, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2005.
- [14] **Norme française NF T 60-112** ; Détermination de l'indice de neutralisation (indice d'acide ou indice de base), janvier 1986.
- [15] **Norme internationale, CEI 60599** ; Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres, Second édition, 1999-03.
- [16] **Norme internationale, CEI 250** ; Méthodes recommandées pour la détermination de la permittivité et du facteur de dissipation des isolants électriques aux fréquences industrielles, audibles et radioélectriques (ondes métriques comprises), 1^{ière} édition, 1969.
- [17] **Norme internationale CEI 156** ; détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle - Méthode d'essai. Deuxième édition, 1995-07.
- [18] **Norme international CEI 628**; Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization, second edition, 1985.
- [19] **Norme française NFC27-232** ; Méthodes de détermination du nombre de taille des particules dans les isolants liquides, Mars 1990.
- [20] **P.J.VUARCHEX** ; Caractéristiques des diélectriques liquides, Technique de l'ingénieur, K714, 1988.
- [21] **A.BOUBAKER** ; Cours 4ème Année, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger
- [22] **M.KRINS , H. BORSI , E.GOCKENBACH** ; Influence of Ageing on the Dielectric Properties of Carbonized Transformer oil, IEEE, International symposium on Electrical Insulation, ISEI, Volume 2, Montréal, Canada, 1996, pp.546-549.

- [23] **FOFANA (I), BORSI (H) et GOCKENBACH (E)**; Fundamental investigations on some transformer liquids under various outdoor conditions. IEEE trans. On Dielect. & Elec. Insul. Vol 8, n° 6, déc 2001, pp.1040-1047.
- [24] **R.TOBAZEON**; Préclaquage et claquage des diélectriques, Technique de l'ingénieur, D2450, 1997.
- [25] **D.KHELIL, S. ZOUTAT**; Etude des phénomènes de décharge électrique dans la BORAK22 sous tension alternative, Projet de fin d'études, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2006.
- [26] **F.GUERBAS**; Etude de la géométrie des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition en streamers, Thèse de Magister, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 1994.
- [27] **A.A.ZAKY , R.HAWLEY**; Conduction and breakdown in mineral oil, Peter Peregrinus Ltd, London, 1973, pp. 79.
- [28] **F.V.TOPALIS, I.A.STATHOPULOS**; Barrier effect in small and medium air gaps, 7th ISH, International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 1991, pp.439-442.
- [29] **S.M. LEBEDEV , L.I. LESCHENCO , G.S .GARKUNOVA**; Barrier application in HV cables, 9th ISH, International Symposium on High VOLTAGE Engineering, Garz, Austria, 1995, pp.1074-1-1074-3.
- [30] **W.KNORR, W.PESCHKE, D.BREITFELDER**; Lightning and switching impulse strengths of oil-paper insulation, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1985, pp.314-317.
- [31] **F.V.TOPALIS , I.A.STATHOPULOS**; Barrier effect on electrical breakdown in air gaps : A theoretical approach, 9th ISH, International Symposium on High Voltage Engineering, Garz, Austria, 1995, pp.2147-1-2147-4.
- [32] **F.V.TOPALIS , I.A.STATHOPULOS**; Barrier effect on electrical breakdown in non Uniform small and medium air gaps, 7th ISH, International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 1991, pp.439-442.

[33] **B.MOULA**; Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22 » sous tension alternative 50 Hz, Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2007.

[34] **F.KADRI, H.RAHALI**; Influence des barrières isolantes sur La tension de décharge disruptive des intervalles d'huile sous tension alternative, Projet de fin d'études, Département Génie Electrique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, 2008.