

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



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

Mémoire de Magister

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

Présenté par

MOULA Belkacem

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'UMMTO

Thème

Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22 » sous tension alternative 50 Hz

Soutenu publiquement le 16/05/2007 devant le jury composé des membres :

Président :	A. Boubakeur	Professeur, ENP
Rapporteurs :	M. Tegar	Maître de conférences, ENP
	F. Guerbas	Chargée de cours, USTHB
Examineurs :	A. Mekhaldi	Professeur, ENP
	S. Bouazabia	Maître de conférences, USTHB
	D. Namane	Chargée de cours, ENP
Invités :	B. Safta	PDG, SKMK/SONELGAZ, Blida
	D. Rahal	Chef d'UTH, SKMK/SONELGAZ, Blida

Dédicaces

A mes très chers parents

A mes frères

A ma sœur

A mes oncles sans oublier ma grand-mère

A tous mes amis (es) qui m'aiment et qui m'apprécient

A toutes celles et tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Le présent travail a été réalisé au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et au laboratoire des Analyses des Huiles Diélectriques de l'Entreprise de Réparation des Transformateurs Electriques SKMK-SONELGAZ de Blida.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Madame Fettuma GUERBAS, Chargée de Cours à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène et à Monsieur Madjid TEGUAR, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, de m'avoir confié ce sujet et de l'aide précieuse qu'ils m'ont toujours apportée jusqu'à l'achèvement de ce travail. Leurs insignes observations et suggestions ont été d'un grand apport pour son aboutissement.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur Ahmed BOUBEKEUR, Chef du laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique, pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie chaleureusement Monsieur Abdelouahab MEKHALDI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et Monsieur Slimane BOUAZABIA, Maître de Conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène, qui ont bien voulu examiner mon travail et m'honorer de leur participation dans le jury.

Que Madame Dalila NAMANE, Chargée de Cours à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, soit vivement remerciée d'avoir évalué ce travail. Je suis très honoré de sa présence parmi les membres de jury de ce mémoire.

Mes sincères remerciements accompagnés de vive reconnaissance vont aux personnels de l'Entreprise de Réparation des Transformateurs, SKMK/SONELGAZ de Blida. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude pour avoir mis à ma disposition les différents appareils du laboratoire des analyses des huiles ainsi que leurs aide et disponibilité significatives à chaque sollicitation. Je remercie plus particulièrement Madame Dalal RAHAL, Chef d'Unité de Traitement des Huiles et Monsieur Bachir SAFTA, Président Directeur Général de l'entreprise (SKMK), qui ont bien voulu juger ce travail, qu'ils acceptent mes sympathiques sentiments pour qu'ils soient mes invités d'honneur à l'examen de ce mémoire.

Je ne saurais terminer sans remercier mes amis (es) de l'Université MOULOU MAMMARI de Tizi-Ouzou et de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, pour leurs encouragements et leur soutien moral.

Finalement, je remercie tous les membres de ma famille plus particulièrement mes parents, mes frères, ma sœur, mes oncles et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة سلوك زيت المحول في نظام نتوء- مستوى، تحت توتر متناوب ذو تردد صناعي 50 هرتز. عرضت الزيت المستعملة والمسماة بوراك 22 لعوامل مختلفة المتمثلة في التوتر المطبق، المسافة بين الأقطاب و نصف قطر إنحناء قطب التوتر المرتفع. نعالج نتائج التجارب الخاصة بتغيرات توتر الإنفصام، التيار الكهربائي، الممانعة المكافئة الملاحظة من الأقطاب، الشحنة والطاقة الكهربائية. قصد متابعة درجة تلوث الزيت، قمنا بتحليل فيزيوكيميائية بعد كل سلسلة من الإنفصامات.

الكلمات المفتاحية: زيت المحول، الصلابة الكهربائية، توتر الإنفصام، شجيرات، تحليل فيزيوكيميائي.

Résumé

Notre travail porte sur l'étude du comportement de l'huile de transformateur, sous tension alternative à fréquence industrielle 50 Hz, dans un système d'électrodes pointe-plan. L'huile utilisée dénommée Barak 22 a été étudiée pour différents paramètres tels que, la tension appliquée, la distance inter-électrodes et le rayon de courbure de l'électrode haute tension. Les résultats d'essais concernant l'évolution de la tension de claquage, du courant, de l'impédance vue des électrodes, de la charge électrique et de l'énergie du système sont examinés. Des analyses physico-chimiques caractérisant la dégradation de l'huile après chaque série de claquages sont aussi présentées.

Mots clés : Huile de transformateur, rigidité diélectrique, tension de claquage, streamers, analyses physico-chimiques.

Abstract

This work is devoted to study the transformer oil behaviour under ac voltage at industry frequency (50Hz), in a point-plane arrangement. The used oil named Borak 22 is examined for different parameters such as the applied voltage, the distance between electrodes and HV electrode curvature radius. The experiment results concerning the evolution of the breakdown voltage, the current, the equivalent impedance between electrodes, the electrical charge and the system energy are examined. Physical-chemical analysis characterising the degradation degree of this oil gaps after each series of breakdowns are also presented.

Key words: Transformer oil, dielectric strength, breakdown voltage, streamers, physical-chemical analysis.

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale	1
 Chapitre I : Huiles minérales isolantes pour transformateurs	
I.1. Introduction	4
I.2. Différentes catégories d’huiles isolantes	4
I.2.1. Les huiles synthétiques	4
I.2.1.1. Hydrocarbures halogénés	4
I.2.1.2. Hydrocarbures aromatiques et aliphatiques.....	4
I.2.1.3. Les esters	5
I.2.1.4. Les huiles silicones.....	5
I.2.2. Les huiles d’origine végétale	5
I.2.3. Les huiles minérales	5
I.2.3.1. Origine	5
I.2.3.2. Présentation des huiles minérales.....	6
I.2.3.2.1. Tendance paraffinique	6
I.2.3.2.2. Tendance naphénique	6
I.2.3.2.3. Tendance aromatique.....	7
I.2.3.2.4. Choix des huiles de bases	7
I.2.3.3. Caractéristiques des huiles minérales isolantes	7
I.2.3.3.1. Caractéristiques électriques	8
I.2.3.3.1.1. Permittivité	8
I.2.3.3.1.2. Conductivité et facteur de pertes diélectriques.....	8
I.2.3.3.1.3. Rigidité diélectrique	9
I.2.3.3.2. Caractéristiques d’étude	9
I.2.3.3.2.1. Masse volumique et coefficient de dilatation volumique. 9	
I.2.3.3.2.2. Capacité thermique massique à pression constante	10
I.2.3.3.2.3. Conductivité thermique	10
I.2.3.3.2.4. Viscosité	10
I.2.3.3.2.5. Point d’écoulement	10
I.2.3.3.3. Caractéristiques de service	11
I.2.3.3.3.1. Solubilité des gaz.....	11
I.2.3.3.3.2. Solubilité de l’eau.....	11
I.2.3.3.3.3. Acidité et couleur.....	11
I.2.3.3.3.4. Stabilité à l’oxydation.....	11
I.2.3.3.3.5. Stabilité thermique.....	11
I.2.3.3.3.6. Stabilité électrique aux décharges partielles.....	12
I.2.3.3.4. Sécurité d’emploi.....	12
I.2.3.3.4.1. Point d’éclair et point de feu.....	12
I.2.3.3.4.2. Température d’auto- inflammation.....	12
I.2.3.3.4.3. Caractéristiques de combustion	12
I.2.3.4. Huiles minérales isolantes usagées.....	13
I.2.3.4.1. Définition.....	13

I.2.3.4.2. Altération des huiles en service.....	13
I.2.3.4.3. Facteurs favorisant l'altération de l'huile minérale isolante.....	13
I.2.3.4.3.1. Produits volatils	13
L'eau	13
L'air.....	13
Gaz dissous.....	14
I.2.3.4.3.2. Produits insolubles dans l'huile minérale isolante	14
I.2.3.4.3.3. Produits solubles dans l'huile minérale isolante.....	14
I.2.3.4.3.4. Facteur favorisant la formation de gaz	14
Décharges partielles	14
L'arc électrique.....	14
La chaleur.....	15
I.2.3.4.4. Rappels sur la régénération des huiles minérales isolantes usagées.....	15
I.2.3.4.4.1. Principe général de la régénération	15
I.3. Conclusion	16

Chapitre II : Claquage des diélectriques liquides

II.1. Introduction	17
II.2. Mécanismes de claquages dans les diélectriques liquides	18
II.2.1. Mécanisme de multiplication électronique	18
II.2.2. Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse.....	19
II.2.2.1. Mécanisme thermique	20
II.2.2.2. Mécanisme de cavitation.....	21
II.2.2.2.1. Cavitation d'origine électrique.....	21
II.2.2.2.2. Cavitation électrohydrodynamique	21
II.2.3. Mécanisme de claquage par pont	22
II.2.3.1. Origine des particules.....	22
II.2.3.2. Teneur des particules.....	22
II.2.3.3. Rôle des particules dans le claquage	23
Particules isolantes	23
Particules conductrices.....	23
II.2.4. Longues décharges dans les liquides.....	23
II.3. Facteurs influant sur la rigidité diélectriques des liquides	24
II.3.1. Paramètres électrogéométriques.....	24
II.3.2. Pression hydrostatique.....	24
II.3.3. Température	24
II.3.4. Tension	25
II.3.5. Humidité.....	25
II.3.6. Influence de l'insertion d'une barrière isolante.....	25
II.3.6.1. Influence de la position de la barrière	26
II.3.6.2. Influence des dimensions et du nombre de barrières	27
II.3.6.3. Influence de la perforation de la barrière	27
II.4. Conclusion	27

Chapitre III : Techniques expérimentales et résultats

III.1. Introduction	28
III.2. Techniques expérimentales	28
III.2.1. Station d'essais	28
III.2.2. Cellule d'essais	30
III.2.3. Présentation de l'huile.....	31
III.2.4. circuits de mesures	31
III.2.4.1. Mesure de la tension de claquage	31
III.2.4.2. Mesure du courant.....	31
III.2.4.3. Mesure de la charge	33
III.3. Résultats et interprétations	34
III.3.1. Tension de claquage.....	34
III.3.1.1. Effet de la distance inter-électrodes	34
III.3.1.2. Effet du rayon de courbure de la pointe.....	35
III.3.2. Rigidité diélectrique	35
III.3.3. Influence du temps de repos entre deux claquages successifs	37
III.3.4. Courant.....	37
III.3.4.1. Forme et caractère du courant.....	37
III.3.4.2. Effet de la tension appliquée.....	41
III.3.4.3. Effet de la distance inter-électrodes	45
III.3.4.4. Effet du rayon de courbure de la pointe.....	47
III.3.5. Impédance équivalente.....	53
III.3.5.1. Influence de la tension appliquée.....	53
III.3.5.2. Influence de la distance inter-électrodes.....	56
III.3.5.3. Influence du rayon de courbure de la pointe.....	58
III.3.6. Charge électrique	64
III.3.6.1. Influence de la tension appliquée.....	67
III.3.6.2. Effet de la distance inter-électrodes	69
III.3.6.3. Effet du rayon de courbure de la pointe.....	71
III.3.7. Energie du système	77
III.3.7.1. Influence de la tension appliquée.....	77
III.3.7.2. Effet de la distance inter-électrodes	80
III.3.7.3. Effet du rayon de courbure de la pointe.....	82
III.3.8. Effet de la position de la barrière isolante sur la tenue diélectrique du système ..	88
III.4. Conclusion	90

Chapitre IV : Analyses physico-chimiques

IV.1. Introduction.....	91
IV.2. Mesure de la viscosité cinématique à 20°C	91
IV.3. Mesure de l'indice de couleur.....	92
IV.4. Mesure du point d'éclair.....	93
IV.5. Mesure de l'indice de réfraction	95

IV.6. Mesure de l'indice d'acidité	96
IV.7. Mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité à 90°C.....	97
IV.7.1. Permittivité relative	98
IV.7.2. Facteur de pertes diélectriques.....	98
IV.8. Conclusion	99
Conclusion Générale.....	100

Références Bibliographiques

Introduction Générale

Introduction Générale

L'intérêt porté aux liquides est aussi vieux que la science elle-même et l'on s'est toujours rendu compte de l'importance de leurs propriétés dans presque toutes les sciences. Les diélectriques liquides sont utilisés par l'industrie dans diverses applications. C'est ainsi que l'étude des phénomènes de conduction et de claquage dans les diélectriques liquides revêt d'une grande importance [1]. Depuis le début du siècle précédent, des progrès significatifs concernant ce sujet ont été accomplis et une quantité importante d'informations a été accumulée.

Il existe de nombreuses interprétations de l'apparition du claquage dans les diélectriques liquides. Certains auteurs tels que Von Hippel, Adamcezewski et Lewis, proposaient d'adopter les résultats acquis dans les solides et les gaz [2]. Cette théorie suppose que des mécanismes basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications électroniques, interviennent dans le claquage des diélectriques liquides. Cependant, les résultats obtenus restaient limités et n'arrivaient pas à expliquer par exemple, l'influence de la pression sur la tension de claquage [3]. D'autres auteurs l'attribuent aux phénomènes d'ionisation par avalanches dans les bulles d'air et de vapeur incluses dans le liquide qui, éventuellement, prennent naissance lors des fortes impulsions des courants qui précèdent le claquage. Les partisans de cette opinion qui sont entre autres : Sharbaugh, Watson (USA) et Krasucki (Angleterre), ont proposé des processus de claquage avec intervention d'une phase gazeuse [2]. Cette phase gazeuse est une cavité (ou bulle) résultant d'une ébullition locale du liquide ou d'une cavitation due à une dépression locale par action du champ électrostatique ou du mouvement électrohydrodynamique du liquide [3]. En plus de ces mécanismes, le claquage peut être dû à la présence d'impureté de diverses natures, conductrices ou isolantes, déformables ou rigides, en suspension dans le diélectrique liquide ; on parle dans ce cas de mécanisme de claquage par pont.

L'utilisation simultanée de techniques ultrarapides d'enregistrement optiques et de mesures électriques a permis de réaliser d'importants progrès dans la compréhension des processus fondamentaux à savoir : électronique, optique, thermique, mécanique et hydrodynamique conduisant au claquage des diélectriques liquides [4]. Ainsi, il est devenu possible de photographier et de suivre l'évolution des différents événements précédant le claquage [5]. Durant cette phase de préclaquage, une phase de génération donne naissance à une perturbation, dont l'indice de réfraction est différent de celui du liquide. De l'instabilité de l'interface de cette perturbation, dépendent les événements ultérieurs ; une phase de propagation correspondant au développement des phénomènes prenant naissance à l'interface de la perturbation. En général, ces phénomènes sont appelés streamers « zones ionisées » revêtant la forme d'arborescences. Leurs structures peuvent être en forme de buisson, en forme de parapluie ou encore très filamenteuses. Ils sont caractérisés également par plusieurs paramètres : vitesse, courant, charge et émission lumineuse [6].

Il ressort des nombreux travaux rapportés dans la littérature que les facteurs essentiels influant sur la forme et la fréquence d'apparition des streamers, par conséquent, sur la forme et l'amplitude du courant et de la charge correspondants sont : l'amplitude et la polarité de la tension appliquée, la géométrie des électrodes exceptionnellement le rayon de courbure de la pointe, la distance inter-électrodes, la nature du liquide, la pression hydrostatique, la température etc... En effet, des travaux de recherche [6-8] ont montré que, la fréquence d'apparition des streamers est d'autant plus importante que le niveau de tension appliquée est élevé. Selon, certains chercheurs [9-11], la longueur finale des streamers dans un système pointe-plan sous tension alternative et impulsionnelle, augmente avec l'accroissement de la tension appliquée. Le courant et la charge correspondant aux streamers évoluent dans le même sens que la tension appliquée [6, 12-16] et le rayon de courbure de l'électrode pointe [17]. Cependant, ils sont d'autant plus faibles que la distance inter-électrodes est élevée [6, 12].

L'utilisation des huiles minérales dans le matériel électrique remonte pratiquement au début de leur production industrielle [18]. Elles sont des substances naturelles obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, utilisées comme imprégnants d'isolation solide ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers [19]. Ces huiles devront s'adapter à des contraintes de plus en plus sévères et leur dégradation au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement.

L'objectif visé par notre travail consiste en étude du comportement diélectrique, durant les phases de préclaquage et de claquage de l'huile minérale isolante pour transformateur dénommée commercialement « Borak 22 » dans les grands intervalles pointe-plan, auxquels une contrainte alternative de fréquence industrielle (50 Hz) est appliquée. Afin de suivre le degré de contamination de l'huile, nous avons effectué des analyses physico-chimiques, en prélevant des échantillons de l'huile après chaque série de claquages.

Le présent manuscrit comporte quatre chapitres distincts :

Nous commençons le premier chapitre par un rappel sur les différentes huiles utilisées à l'échelle industrielle. Nous nous intéressons à l'huile minérale isolante pour transformateur, car elle est la plus répandue en industrie d'isolation électrique. A cet effet, nous mettons l'accent sur la présentation de ses différentes caractéristiques à savoir : électriques, physiques et chimiques. Nous citons aussi les facteurs favorisant l'altération de l'huile en service. Enfin, nous évoquons l'ensemble de procédés permettant la régénération des huiles minérales usagées.

Le second chapitre porte sur les différents mécanismes de claquage des diélectriques liquides. Nous rappelons les facteurs influençant la rigidité diélectrique des liquides.

Le troisième chapitre est consacré à la description des techniques expérimentales réalisées et à la présentation et discussion de l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. En effet, nous examinons l'influence : des paramètres électrogéométriques du système, du temps de repos entre deux claquages successifs et de la position d'une barrière isolante sur la tension de claquage. Par ailleurs, nous étudions l'évolution du courant, de l'impédance vue des électrodes, de la charge électrique et de l'énergie en fonction des paramètres suivants : tension appliquée, distance inter-électrodes et rayon de courbure de l'électrode pointe.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous exposons les différents appareils du laboratoire des analyses des huiles de transformateurs de Sharikat Khadamet Mouhaouilat Kahrabaia (SKMK) de Blida. Ce chapitre présente également les résultats relatifs à l'évolution des différentes caractéristiques physico-chimiques et diélectriques de l'huile en fonction du nombre de claquages. Ces caractéristiques consistent en permittivité relative, facteur de pertes diélectriques, indice d'acidité, viscosité cinématique, indice de couleur, indice de réfraction et point d'éclair.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I

Huiles minérales isolantes pour transformateurs

I.1. Introduction

L'industrie électrique fait un grand usage d'huiles isolantes. En effet, ces dernières contribuent à l'élaboration de matériels électriques très divers : transformateurs, condensateurs, câbles et disjoncteurs etc... Les tensions nominales dans ces appareils s'étendent de quelques centaines de volts à un millier de kilovolts.

Les huiles diélectriques sont classées selon leur origine en huiles minérales, huiles végétales et huiles de synthèses. Les huiles minérales sont des produits naturels obtenues directement par raffinage de bruts pétroliers. Elles sont les plus répandues en industrie d'isolation électrique en raison de leur coût de revient réduit. Ces huiles utilisées comme imprégnants d'isolation solide ou comme produits de remplissage de matériels électriques, ont notamment deux fonctions principales : l'isolation électrique et le transfert thermique.

Les huiles minérales isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes : électriques, thermiques, chimiques etc... Malgré les avantages qu'ils présentent, ces diélectriques se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes. L'analyse des performances de l'huile en service peut être appréciée par le diagnostic des différentes caractéristiques physico-chimiques et diélectriques. Ces dernières nous renseignent quant au degré de détérioration de l'huile.

I.2. Différentes catégories d'huiles isolantes

On distingue trois classes d'huiles utilisées à l'échelle industrielle [19] :

I.2.1. Les huiles synthétiques

Les liquides de synthèse sont utilisés lorsque des propriétés particulières sont recherchées (résistance au feu, tenue aux décharges partielles, gassing négatif,...). Ces produits de synthèse ont été différenciés par leur type de structures chimiques.

I.2.1.1. Hydrocarbures halogénés

La nécessité de réduire les risques d'incendie de matériels électriques est à l'origine de la synthèse des hydrocarbures halogénés. L'industrie électrotechnique a essentiellement employé des produits chlorés qui présentaient l'avantage de ne pas donner de gaz inflammables ou explosibles sous décharges partielles ou dans un claquage électrique. Le principe est de remplacer une partie des atomes d'hydrogène de la molécule par des atomes de chlore. Sous ionisation ou arc électrique, il se forme des molécules HCl au lieu d'hydrogène gazeux.

Les premières fabrications industrielles de polychlorobiphényles (PCB) datent de 1929. Ils sont désignés sous le nom générique d'askarel. Ils étaient employés essentiellement dans les transformateurs pour leur résistance au feu et les condensateurs (pour leur tenue aux décharges partielles) jusqu'à ce que leur persistance dans l'environnement conduise à leur interdiction progressive dans tous les pays [18].

I.2.1.2. Hydrocarbures aromatiques et aliphatiques

Ils sont caractérisés par un fort pouvoir d'absorption gazeux sous ionisation (les alkybenzènes), utilisés dans les câbles à haute tension et notamment pour le remplissage des

diviseurs capacitifs. Les polybutènes utilisés essentiellement dans les câbles « imprégnés masse » se caractérisent par une haute viscosité [18].

I.2.1.3. Les esters

Il existe plusieurs types d'ester en électrotechnique. Les phtalates ont été utilisés dès le début de la remise en question des PCB, pour l'imprégnation de condensateurs basse et moyenne tension, actuellement seul le dioctylphtalate (DOP) est encore utilisé pour l'imprégnation de condensateurs basse tension. Les tétraesters sont utilisés pour le remplissage de transformateurs de distribution « résistants au feu », leur point de feu élevé (> 300°C) étant la caractéristique primordiale de ces produits [18].

I.2.1.4. Les huiles silicones

Les huiles silicones les plus couramment utilisées sont des diméthyl-polysiloxanes. Elles se présentent sous la forme de liquides non toxiques ayant la consistance d'une huile, caractérisées par les propriétés suivantes [20]:

- Leur viscosité peut aller de 10 à 100 centistokes. Celle-ci variant beaucoup moins avec la température que celle des huiles minérales ou des diphényles chlorés.
- Leur point de congélation est exceptionnellement bas (-60°C).
- Leur bonne stabilité thermique (température d'utilisation jusqu'à 200°C).

Compte tenu de leur prix élevé, les huiles silicones sont utilisées dans l'isolation de petits matériels travaillant à haute température.

L'inconvénient des diméthylsiloxanes est que leur rigidité diélectrique diminue considérablement à la suite d'une rupture diélectrique, et que la présence d'un arc dégage une grande quantité de gaz [20].

I.2.2. Les huiles d'origine végétale

Les huiles végétales ont fait partie des premiers liquides isolants utilisés pour la fabrication d'appareils électriques. Il existe une grande variété d'huiles végétales. Seule l'huile de ricin est utilisée depuis de longues années. Elle sert à l'imprégnation des condensateurs de stockage d'énergie.

Elles sont généralement peu toxiques et biodégradables. Ces qualités sont dues notamment à une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Ces deux caractéristiques, qui sont favorables pour l'aspect écotoxicologique, représentent un inconvénient important pour les applications électrotechniques. Par ailleurs, leur tenue diélectrique n'est pas très élevée. Pour ces raisons, les huiles végétales sont relativement peu utilisées (essentiellement dans certains types de condensateurs pour courant continu), bien que leur emploi dans les transformateurs ait été proposé récemment [19].

I.2.3. Les huiles minérales

I.2.3.1. Origine

Ce sont des produits naturels obtenus de la distillation fractionnée de bruts de pétrole sélectionnés, soumis ensuite à un raffinage poussé. Leur composition chimique est

extrêmement compliqué (plusieurs milliers de molécules différentes) d'hydrocarbures, de composés soufrés, oxygénés, azotés et de traces de composés organométalliques [19].

Pour obtenir des huiles minérales de qualité diélectrique, les bruts pétroliers doivent être raffinés suivant un procédé qui inclut habituellement une distillation, suivie d'une opération de déparaffinage, d'une extraction par solvant et d'une hydrogénation catalytique [21].

Les huiles ainsi obtenues sont des diélectriques non polaires, dont la permittivité relative reste voisine de 2.2 dans un large domaine de fréquence et de température.

I.2.3.2. Présentation des huiles minérales

Une huile minérale isolante ou diélectrique est une huile qui présente une faible conductivité électrique du fait d'une densité de charges peu importante. Elle se compose principalement [22] :

- D'une huile dite de base (ou d'un mélange d'huiles de base) obtenue selon des procédés traditionnels de raffinage du pétrole brut ;
- De composés chimiques appelés additifs, en teneur très variable, qui permettent d'atteindre les spécifications d'emploi des huiles finies.

La composition d'une huile minérale reflète, en général, celle du distillat d'origine. Les huiles de base en électrotechnique répandent à trois grandes classes de tendances chimiques. Elles sont définies par leur teneur en carbone paraffinique (C_p), en carbone naphténiq (Cn) et en carbone aromatique (Ca).

I.2.3.2.1. Tendence paraffinique

Dans ce type d'huile, la tendance paraffinique ou la présence d'hydrocarbures paraffiniques prédomine. Ces hydrocarbures sont des molécules complexes à structure saturée et à chaîne droite ramifiée ou non, mais non cycliques.

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 [23].

I.2.3.2.2. Tendence naphténiq

C'est une huile riche en hydrocarbures naphténiq, c'est à dire, il y a présence d'hydrocarbures cycliques à liaisons saturées. 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.

Ce type d'hydrocarbures renferme les propriétés les plus recherchées pour les huiles de graissages.

I.2.3.2.3. Tendance aromatique

Ce sont des huiles composées de fonctions à noyau benzéniques se caractérisant par une densité très élevée, un indice de viscosité très faible, une très faible résistance à l'oxydation, un point d'aniline très bas (soit un pouvoir solvant très élevé) et une facilité d'émulsion avec l'eau. L'utilisation de ces hydrocarbures dans la fabrication des huiles est très limitée en raison de leur altérabilité. Ils sont facilement oxydables et provoquent la formation des dépôts résineux ou asphaltiques accompagnés de dérivés corrosifs. La fabrication d'huiles finies lubrifiantes, isolantes ou autres, est orientée par les tendances des huiles de base [23].

Le point d'aniline de l'huile, qui est défini comme la température minimale pour laquelle des volumes égaux d'huile et d'aniline sont miscibles en toute proportion, mesure le pouvoir solvant de l'huile. Sa vapeur est en relation avec la teneur en hydrocarbures aromatiques de l'huile, mais est influencée également par d'autres facteurs chimiques : ramifications, insaturation et masse moléculaire.

I.2.3.2.4. Choix des huiles de bases

Le choix des huiles de base est déterminé par rapport :

- A la nature chimique recherchée de l'huile : paraffinique, naphénique ou aromatique.
- Aux caractéristiques physiques et chimiques que l'on désire conférer à l'huile finie : la viscosité, la densité, l'indice de viscosité, la résistance à l'oxydation, etc...

L'obtention d'une huile finie apte à répondre aux exigences des diverses contraintes d'utilisation, fait appel à l'usage d'un certain nombre d'additifs. Ces derniers, qui sont d'une importance capitale dans l'industrie des huiles minérales isolantes sont des produits chimiques incorporés en petite quantité dans l'huile de base, pour améliorer certaines propriétés tels que l'indice de viscosité, le pouvoir antioxydant pouvant retarder l'action de l'oxygène sur l'huile en service, le point d'écoulement, etc...

I.2.3.3. Caractéristiques des huiles minérales isolantes

Les propriétés des liquides sont généralement divisées en propriétés physiques, chimiques et électriques. Cependant, certaines propriétés appartiennent indifféremment à l'une ou l'autre de ces divisions. Les propriétés chimiques relatives aux applications électriques étant limitées, et les propriétés électriques étant prépondérantes. La division se fait en caractéristiques électriques, caractéristiques d'étude, caractéristiques de service et autres caractéristiques [24].

I.2.3.3.1. Caractéristiques électriques

Les caractéristiques électriques des liquides en général, dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire etc...), et de leurs conditions d'utilisation au conditionnement (filtration, déshydratations etc...). On cite : la permittivité, la conductivité, le facteur de pertes diélectriques et la rigidité diélectrique.

I.2.3.3.1.1. Permittivité

C'est une caractéristique électrique liée à la formation du liquide, elle dépend essentiellement de sa structure chimique. Pour une huile diélectrique, la permittivité définit la possibilité de libérer des charges sous l'action d'un champ électrique [21]. Elle résulte des phénomènes de polarisation électronique et atomique.

La permittivité relative ε_r , d'un produit est définie comme le rapport entre la capacité d'un condensateur rempli de ce produit et la capacité du même condensateur vide [19].

$$\varepsilon_r = c_p / c_0 \quad (I.1)$$

La permittivité relative des hydrocarbures est faible et voisine de 2. La présence d'hétéroatomes (oxygène, chlore...), en créant des dipôles de fortes intensités, confère aux molécules une permittivité élevée.

La permittivité relative décroît avec la température et la fréquence du courant. Cependant, pour les produits polaires et visqueux, on observe, au-dessous d'une certaine température, une brusque chute de la permittivité due à l'immobilisation des dipôles [19].

I.2.3.3.1.2. Conductivité et facteur de pertes diélectriques

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est de toute évidence, la présence de courant qui traverse le liquide. Ce courant caractérisant la conductivité électrique du fluide est le résultat de déplacement des charges libres existantes (positive et négative), sous l'effet du champ électrique [25].

Aux faibles champs, la conduction présente généralement un caractère ohmique. Aux champs élevés, la conduction des isolants perd son caractère ohmique. Plusieurs théories rendent compte des courants élevés selon qu'ils sont contaminés ou non par des impuretés [21].

En pratique, pour mieux caractériser un diélectrique du point de vue pertes, il est usuel d'utiliser la tangente de l'angle de perte $\text{tg}(\delta)$ qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui résulte lorsque le diélectrique se compose exclusivement du matériau isolant. Cette caractéristique est une fonction croissante de la température et dépend de la tension [24].

Sachant que beaucoup de liquides isolants ont des dipôles dans leurs structures moléculaires, la polarisation par orientation a une importance particulière. En effet, elle est la cause majeure des pertes par polarisation et responsable de la dépendance fréquentielle de ε_r et de $\text{tg}(\delta)$ [26].

I.2.3.3.1.3. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique à fréquence industrielle est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à l'huile sans décharge [21]. Comme la conductivité, la rigidité diélectrique à fréquence industrielle est une caractéristique de conditionnement du liquide mais l'est aussi de sa formulation.

Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans les 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 » [25].

I.2.3.3.2. Caractéristiques d'étude

I.2.3.3.2.1. Masse volumique et coefficient de dilatation volumique

La masse volumique ρ_θ exprimée en kilogrammes par mètre cube, est le rapport d'une masse m du liquide à son volume v , mesuré à la température θ . Elle est déterminée à 20°C, et diminue quand la température augmente [24].

La masse volumique est obtenue à 20 °C par la formule suivante :

$$\rho_{20} = \rho_\theta [1 + \alpha_v (\theta - 20)] \quad (\text{I.2})$$

où

α_v : coefficient moyen de dilatation volumique du liquide au voisinage de la température θ .

α_v : est défini par :

$$\alpha_v \Delta\theta = \Delta v / v \quad (\text{I.3})$$

et peut être déterminé à partir de deux valeurs ρ_{01} et ρ_{02} de la masse volumique ($\rho_{01} > \rho_{02}$) par :

$$\alpha_v = (\rho_{01} - \rho_{02}) / \rho_{02} \Delta\theta \quad (\text{I.4})$$

La masse volumique est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend de la composition chimique. Ainsi, les huiles minérales paraffiniques ont une masse volumique plus faible que les huiles naphthéniques [19].

Le coefficient de dilatation volumique α_v définit la variation de la masse volumique en fonction de la température [18].

I.2.3.3.2.2. Capacité thermique massique à pression constante

Pour les huiles minérales, la capacité thermique massique à pression constante croît avec la température et décroît avec la masse volumique suivant la relation suivante [18, 19] :

$$C_p = (1684 - 3,39\theta) / \sqrt{\rho_{15}} \quad [J / Kg.K] \quad (I.5)$$

avec ρ_{15} : masse volumique à 15°C.

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

I.2.3.3.2.3. Conductivité thermique

Mesurée en Watt par mètre Kelvin, elle exprime le flux thermique s'écoulant, en régime permanent sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent. La valeur moyenne est $\lambda = 0,14 W / (m.K)$ [18, 24].

I.2.3.3.2.4. Viscosité

La viscosité et sa variation avec la température sont des paramètres de première importance pour le transfert thermique. En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil, pour refroidir les parties actives chaudes [19].

La viscosité d'un fluide traduit les forces qui opposent les molécules de ce fluide à une force tendant à les déplacer. C'est donc, la résistance au mouvement que manifeste tous les fluides. L'indice de viscosité exprime la variation de la viscosité en fonction de la température. Les huiles pour transformateur ont un indice très bas ; ce qui permet une circulation plus facile, donc un refroidissement plus efficace.

I.2.3.3.2.5. Point d'écoulement

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

Les liquides utilisés se figent généralement à températures pouvant aller à -60°C (polybutènes, huiles silicones), à -30°C (huile minérale), sans parler des liquides de synthèse ayant un haut point d'écoulement (+9°C pour les chlorobiphényles), et des huiles pour câbles à matière non migrante dont les points d'écoulement sont de 80 à 100°C [27].

Le point d'écoulement est défini comme la température la plus basse, pour laquelle un liquide peut couler lorsqu'il est refroidi à des conditions fixées. Lorsqu'un liquide est refroidi, il acquiert une certaine consistance qui n'est pas la congélation, correspondant à l'état solide d'un corps pur à température fixe. Cette consistance est liée à la masse moléculaire, à la composition du liquide en mélange de différentes molécules (isomères et additifs) [27].

Les huiles à point d'écoulement plus bas sont obtenues à partir des coupes naphthéniques.

I.2.3.3.3. Caractéristiques de service

I.2.3.3.3.1. Solubilité des gaz

Tous les gaz se dissolvent plus au moins dans l'huile minérale, comme d'ailleurs dans les liquides. La plus grande valeur du volume de gaz qui peut être mis en solution à la saturation, s'appelle coefficient de solubilité S. Ce coefficient est défini comme étant le rapport du volume du gaz dissous au volume d'huile et est exprimé en pour-cent.

I.2.3.3.3.2. Solubilité de l'eau

Les propriétés électriques des liquides sont affectées par leur teneur en eau. Cette dernière dépend de la température et de la pression partielle d'eau dans l'atmosphère au dessus du liquide. La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de la composition chimique de celle-ci. Elle croît avec la concentration en hydrocarbures aromatiques. Dans le cas d'une huile vieillie, les produits de dégradation augmentent la quantité d'eau qu'elle peut contenir [24].

I.2.3.3.3.3. Acidité et couleur

Dans les huiles neuves, on ne constate pas de présence d'acides minéraux, mais celle d'acides organiques.

L'acidité d'une huile neuve est très faible. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante. Cette stabilité s'explique par les dépôts qui précipitent [28].

La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve. Elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile. Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service. Elle renseigne également sur le vieillissement de l'huile, puisque celle-ci devient plus foncée avec l'âge [29].

I.2.3.3.3.4. Stabilité à l'oxydation

On désigne par oxydation, un ensemble de réactions complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissout. La vitesse des réactions d'oxydation croît avec la température et la concentration en oxygène. Les conséquences de l'oxydation de l'huile sur l'isolation sont [27] :

- 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.2.3.3.3.5. Stabilité thermique

La stabilité thermique concerne généralement les matériaux en association avec l'huile. Cependant, la connaissance du comportement de l'huile seule présente de l'intérêt, dans le cas de points chauds hors bobinage. L'oxygène joue un rôle prépondérant dans la décomposition thermique des huiles, pour des températures de 175°C à 235°C [30].

I.2.3.3.3.6. Stabilité électrique aux décharges partielles

Sous l'action d'un champ électrique intense et par l'intermédiaire de décharges partielles dans des occlusions gazeuses qui se forment ou qui préexistent, les liquides se décomposent en donnant des gaz. La stabilité électrique, désignée sous le vocable Gassing, s'évalue par le coefficient de Gassing G. Deux méthodes indiquent, suivant les conditions d'essai, si les isolants liquides sont des absorbeurs ou des émetteurs de gaz. Le comportement au gassing d'un isolant liquide est particulièrement fonction de sa composition chimique, mais des variations de certains paramètres d'essais peuvent modifier les résultats de façon considérable. Ces deux méthodes se différencient par leurs conditions d'essais. G_A exprimé en millimètres cube par minute est positif ou négatif suivant qu'il y ait émission ou absorption de gaz. Dans le cas d'arc électrique, et donc de températures très élevées (supérieure à 2000°C), il n'y a pas de liquides qui puissent résister. La nature des gaz formés et leurs proportions relatives permettent de caractériser la sévérité de la contrainte [31].

I.2.3.3.4. Sécurité d'emploi

La sécurité d'emploi des liquides isolants concerne les risques d'incendies et d'explosions, dont ils pourraient être la cause de la santé des individus et les risques pour l'environnement. Le danger d'incendie repose sur des caractéristiques d'inflammabilité (point d'éclair, point de feu, température d'auto inflammation) et certaines caractéristiques de combustion (indice d'oxygène, quantité de chaleur dégagée). Le danger d'explosion est lié à la nature des gaz produits par décomposition des liquides sous arcs électriques et points chauds, hydrogène, méthane et acétylène étant les principaux gaz concernés.

I.2.3.3.4.1. Point d'éclair et point de feu

Le chauffage progressif d'un liquide provoque le dégagement de vapeurs suivant sa courbe de tension de vapeur, qu'il s'agisse d'un corps pur ou d'un mélange. Dès que la concentration de ces vapeurs dans l'atmosphère surmontant le liquide, devient suffisante pour former un mélange inflammable, elles brûlent à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée le point d'éclair du liquide [24].

En poursuivant le chauffage, l'expérience montre qu'une combustion permanente s'établit en présence d'une flamme à partir d'une certaine température qui correspond au point de feu du liquide. Les liquides ininflammables n'ont pas de point de feu.

I.2.3.3.4.2. Température d'auto- inflammation

La température d'auto-inflammation d'un liquide est la température minimale à laquelle se produit une combustion instantanée, elle peut être supérieure à celle du point d'éclair. Cette température correspond au comportement d'un liquide dans un incendie, alors que le point de feu caractérise des limites thermiques de service (par exemple, 105 °C pour une isolation papier-huile) [24].

I.2.3.3.4.3. Caractéristiques de combustion

Le point de feu permet de distinguer les liquides inflammables et les liquides ininflammables, situation simple quand la construction électrique disposait seulement d'huiles minérales et d'Askarels. L'interdiction des Askarels et l'apparition de liquides de

remplacement pose le problème de l'inflammabilité en termes nouveaux. Ces liquides de remplacement ont un point de feu élevé (> 300 °C) qui peut réduire les risques d'incendie, mais, quoique dits peu inflammables, ils n'en brûlent pas moins et leur comportement dans les matériels pris dans un incendie pose problème. Pour répondre à cette interrogation, les caractéristiques de combustion (indice limite d'oxygène, capacité thermique de combustion, dégagement de fumées) sont maintenant considérées, associées en outre à la corrosivité des produits de combustion et à leur toxicité [19].

I.2.3.4. Huiles minérales isolantes usagées

I.2.3.4.1. Définition

Une huile usagée est conventionnellement définie comme étant une huile qui ne remplit plus tous les rôles qui lui sont assignés ; c'est donc une huile qui a perdu certaines de ces qualités ou de ces caractéristiques du fait de son utilisation. La détérioration de l'huile en service résulte non seulement de la dégradation de quelques additifs améliorant ses caractéristiques, mais également de la présence de contaminants d'origine extérieure à l'huile.

I.2.3.4.2. Altération des huiles en service

En service, l'huile quelque soit sa qualité et sa stabilité, qu'elle soit inhibée ou non, finit par s'oxyder et s'altérer. Le maintien de l'huile altérée en exploitation peut constituer un danger potentiel. L'altération de l'huile se traduit par l'oxydation de cette dernière et par une augmentation accentuée de son acidité.

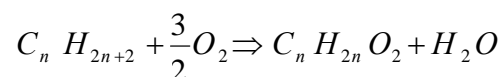
I.2.3.4.3. Facteurs favorisant l'altération de l'huile minérale isolante

Les contaminants d'une huile minérale isolante usagée peuvent se diviser en trois grandes classes.

I.2.3.4.3.1. Produits volatils

Les produits volatils les plus communs des huiles en service sont :

a- L'eau : la présence de l'eau dans l'huile peut avoir des origines diverses. Elle peut provenir de la condensation de l'air atmosphérique et des réactions chimiques d'oxydation. En effet, au contact d'une atmosphère humide, l'huile se charge d'humidité dans une proportion égale par rapport à la saturation et la réaction d'oxydation est [12] :



L'eau peut se présenter sous forme dissoute ou libre. Sa solubilité dépend de la température, elle augmente avec cette dernière. Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau- huile [27].

b- L'air : la solubilité des gaz dans l'huile dépend de la pression de la phase gazeuse. Les bulles d'air peuvent présenter un risque sur l'isolation papier-huile [27].

c- Gaz dissous : Les différentes catégories de gaz dissous proviennent de la décomposition de l'huile. Les gaz sous forme de CO, CO₂, H₂, O₂ et C₂H₄ sont susceptibles de se libérer sous l'effet d'un champ électrique intense, provoquant alors l'apparition de décharges partielles et la formation de nouveaux produits de dégradation [32].

Les huiles minérales renferment un certain nombre de gaz, parmi lesquels l'oxygène qui provoque une oxydation de l'huile d'autant plus rapide que la température est élevée. Cette oxydation entraîne la formation de produits acides et dans une phase ultérieure, de dépôts solides, en partie solubles dans l'huile, mais qui augmentent sa viscosité et peuvent se déposer sur les isolations avec lesquelles l'huile est en contact. Les produits d'oxydation sont toujours des peroxydes, produits éminemment instables amorçant de véritables réactions en chaîne, souvent nommés « oxydation autocatalytique » [32].

I.2.3.4.3.2. Produits insolubles dans l'huile minérale isolante

Les produits insolubles proviennent de l'oxydation de l'huile, de la dégradation du papier isolant (carbone), des usures mécaniques (métal, oxydes métalliques) et de l'air ambiant (poussières). En service, les produits insolubles sont entraînés par l'huile en circulation et finissent par se déposer sur les parois des canaux de circulation et sur les conducteurs. En raison de leur conductibilité très faible, ils ralentissent les échanges thermiques entre l'huile et les différents organes à refroidir, tout en provoquant en ce point des échauffements exagérés. Le retrait de ces produits insolubles pose, en général, moins de problèmes que les produits volatiles et solubles [23].

I.2.3.4.3.3. Produits solubles dans l'huile minérale isolante

Les produits solubles correspondent à l'ensemble de la famille des corps formés par oxydation, des produits réactifs, aux acides et non acides, des résines et des asphaltes [27].

I.2.3.4.3.4. Facteur favorisant la formation de gaz

Dans un appareil dont l'isolation comporte de l'huile, la présence de points trop chauds, de décharges partielles ou d'un arc électrique se traduit par la décomposition de l'huile et la formation de gaz. Ces gaz, en partie se dissolvent dans l'huile et en partie s'en dégagent, pour venir se rassembler soit en certains points de l'appareil, soit comme c'est souvent le cas dans des accessoires spécialement conçus pour les collecter. La nature des gaz formés, leurs proportions relatives, la vitesse du dégagement gazeux varient avec la nature et l'intensité du défaut qui leur donne naissance et d'autre part avec la constitution de l'isolation détériorée. L'analyse des gaz dégagés ou dissous peut donc, dans une certaine mesure servir à caractériser le défaut et sa gravité.

➤ Décharges partielles

Les gaz formés par les décharges partielles dans l'huile contiennent de l'hydrogène en très grande proportion et de petites quantités d'hydrocarbures [28].

➤ L'arc électrique

Les gaz formés par la présence d'un arc électrique dans l'huile contiennent surtout de l'hydrogène, du méthane, de l'éthylène et de l'acétylène. Dans le cas d'un arc grêle, la

composition se rapproche de celle des gaz de décharges partielles, c'est à dire que l'hydrogène prédomine : quand l'intensité de l'arc augmente, le mélange s'appauvrit en hydrogène et s'enrichit en hydrocarbures (méthane, éthylène, acétylène) [28].

➤ La chaleur

La décomposition thermique de l'huile conduit à la formation d'hydrogène et d'hydrocarbures gazeux en même temps qu'elle libère l'air dissous [28].

I.2.3.4.4. Rappels sur la régénération des huiles minérales isolantes usagées

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

I.2.3.4.4.1. Principe général de la régénération

Les opérations successives pour l'obtention d'un produit de haute qualité, constituent une nouvelle forme de raffinage de l'huile usagée. Ce cycle comprend habituellement les phases successives dans l'ordre suivant [23] :

- a. **la décantation** qui a pour but d'éliminer les corps solides, les grosses impuretés et l'eau libre.
- b. **La séparation des impuretés** en suspension dans l'huile. Cette opération représente à l'heure actuelle la phase la plus difficile de la régénération. En effet, les particules très fines qui sont en suspension dans l'huile, demeurent insensibles par rapport aux anciens procédés de précipitation des sédiments par rupture de la suspension colloïdale ou par électrolyte tel que le silicate de soude.
- c. **La déshydratation** qui a pour but d'éliminer l'eau par chauffage à une température de 150°C. On peut aussi utiliser un desséchant à savoir le CaCl_2
- d. **Le traitement à l'acide** conduit à la floculation des suspensions carbonées et la sulfonation des produits oxydés, mais sans qu'il en résulte une attaque sur l'huile même. Ce traitement s'opère sur l'huile chauffée à une température de l'ordre de 30°C à laquelle est ajoutée 4% en volume d'acide sulfurique H_2SO_4 à 90-92%. Ces produits sont mélangés soit au préalable, soit directement dans un bac de décantation à fond conique. Les boues acides sont précipitées au fond du bac et séparées de l'huile épurée. L'huile épurée fera l'objet de traitements ultérieurs. Ces traitements permettent la réduction des teneurs en métaux provenant des additifs et de l'usure mécanique à quelques PPM (parties par millions) dans l'huile régénérée.
- e. **La neutralisation** de l'huile intervient après le traitement à l'acide. En effet, l'huile épurée contient encore des acides de différentes sortes, en particulier sulfonique et petites particules d'acide sulfurique. La neutralisation a pour but de transformer les restes acides dans l'huile épurée en sels. A cet effet, la soude et le carbonate de chaux à 1% en poids sont généralement utilisés.

- f. **Le passage à la terre** est une opération qui se fait dans une cuve conique munie d'un agitateur. Elle précède directement le mélange de l'huile à la terre activée. Après neutralisation l'huile est malaxée avec 1 à 10% de terre activée durant 15 à 20 minutes, à une température variable entre 80 et 100°C. En fin l'huile mélangée est filtrée à travers des filtres presse. Ce traitement permet d'améliorer leurs qualités par décoloration et élimination des produits aisément oxydables.

I.3. Conclusion

Évalué en terme de risques, la nécessité de surveiller les transformateurs en service, est d'une première importance. Les techniques actuelles les plus puissantes pour évaluer l'état d'un transformateur sont fondées sur l'analyse physico-chimique des différentes propriétés de l'huile. En effet, pour assurer la continuité de fonctionnement de l'appareil, l'huile isolante doit avoir les qualités suivantes [33] :

- Forte rigidité diélectrique ;
- Stabilité thermique dans une large gamme de température ;
- Grande pureté, ce qui entraîne une homogénéité et une bonne reproductibilité de la rigidité diélectrique ;
- Non polaire, ce qui conduit à une faible dissociation d'espèces et conduit à une faible contamination ;
- Non toxique et biodégradable, et donc conforme à la loi en vigueur sur la protection de l'environnement ;
- Grand indice d'aromaticité, ce qui lui confère de bonnes propriétés de gassing.

CHAPITRE II

Claquage des diélectriques liquides

II.1. Introduction

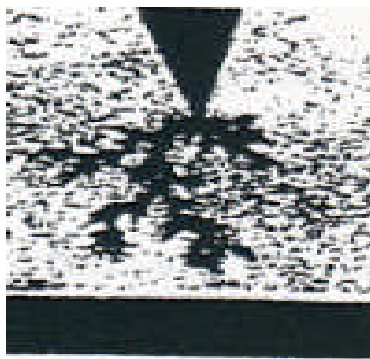
Les isolants liquides ont une grande importance dans la technique de haute tension, car ils jouent un double rôle : isolation et refroidissement. On doit leur intégration en tant que diélectrique en 1887 par G. Westinghouse. Les huiles hydrocarbures sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie des transformateurs de puissance [34].

Ils présentent une bonne rigidité diélectrique (plusieurs fois supérieure à celle des gaz), des permittivité et pertes diélectriques très faibles ($\epsilon_r = 2 \text{ à } 2,5$ et $\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$). Cependant, leur principal inconvénient est leur inflammabilité, sans compter d'autres problèmes liés à la santé publique dont font l'objet les PCB (polychlorobiphényles) [35].

Les études sur le mécanisme de la conduction et du claquage dans les liquides se sont développées de façon considérable depuis quelques décennies, car ces processus ont une grande importance dans de nombreux domaines contemporains de la physique, de la chimie, de l'électrotechnique et de la radiobiologie. Ces études sont étroitement liées à d'autres domaines très importants, comme la physique des plasmas, les semi-conducteurs, la physique et la technique de la résistance des matériaux au claquage électrique, etc ... [2].

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

Durant ces dernières décennies, des progrès importants ont été réalisés en matière d'explication du mécanisme de décharges dans les huiles. En effet, il est généralement admis que le claquage d'un isolant liquide est précédé d'une phase de préclaquage. Cette dernière comporte deux phases : une phase de génération et une phase de propagation. La phase de génération correspond à l'apparition d'une perturbation dans le liquide soumis à un champ élevé, dont l'indice de réfraction diffère de celui du liquide. Cette perturbation évoluant en streamer prend naissance au voisinage de l'électrode acérée, se propage dans le liquide et conduit au claquage. En général, dans les liquides purs et pour un système d'électrodes pointe-plan, les streamers positifs (produits lorsque la pointe est anode) sont filamenteux (Figure II.1.a), et leur vitesse moyenne est supérieure ou très supérieure (2 à 50 fois) à celle des streamers négatifs ; elle excède la vitesse du son (environ 1 km/s) dans la plupart des liquides et peut atteindre 100 km/s. Les streamers négatifs sont plutôt lents et leur allure rappelle celle des buissons (Figure II.1.b) [36].



(a) Pointe positive



(b) Pointe négative

Figure II.1: Formes des streamers dans le cyclohexane [tension appliquée : $U=40$ kV, distance inter-électrodes : $L=2$ mm, rayon de courbure de l'électrode pointe : $r_p=3$ μm][36]

II.2. Mécanismes de claquages dans les diélectriques liquides

Deux conceptions théoriques différentes du claquage dans les diélectriques liquides ont été avancées. La première est basée sur le phénomène de l'ionisation par avalanche dans le liquide (comme dans les gaz), et la seconde sur le phénomène d'ionisation par avalanche dans les bulles d'air et de vapeur incluses dans le liquide qui, éventuellement, prennent naissance lors de fortes impulsions de courants qui précèdent le claquage. En présence d'impuretés, le claquage peut intervenir suite à l'établissement d'un pont de particules entre les électrodes [2].

II.2.1. Mécanisme de multiplication électronique

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

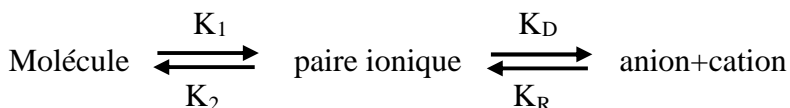
Le processus de multiplication électronique a été proposé à l'origine par Townsend, pour décrire les phénomènes d'amorçage dans les gaz. Ce processus est une conséquence de l'accélération d'un ou plusieurs électrons par le champ, sur une distance égale au libre parcours moyen. Le gain d'énergie acquis par ces charges permet l'ionisation à la suite de collisions, d'une ou plusieurs molécules [3].

La connaissance de la conduction des liquides s'est améliorée, quand les liquides polaires tels que le nitrobenzène, ont été étudiés. L'aspect chimique des phénomènes de conduction et ses relations avec l'électrochimie furent alors les premiers compris. Plus tard les notions de cinétiques électrochimiques furent appliquées avec succès aux liquides polaires et non polaires [37].

La conduction électrique des liquides a pu être parfaitement comprise à partir du moment où des mesures de distribution du champ électrique entre les électrodes ont été faites à différents instants sous tension. On a pu alors connaître la provenance des porteurs de charge et leur vitesse de déplacement [17].

Les porteurs de charge sont créés au sein du liquide (création en volume) ou aux électrodes. En volume, l'apparition de nouveaux porteurs est due à une réaction que l'on peut schématiser comme suit [17] :

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



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

Les constantes de vitesses K_1 et K_2 , indépendantes du champ électrique ne sont pas calculables à l'aide de modèle simple. Par contre, la formation des paires d'ions résultant des

interactions coulombiennes K_R et de dissociation K_D de deux charges de signe opposé en interaction électrostatique peuvent être calculées [17].

L'application d'un champ électrique dans le liquide modifie les énergies d'interaction entre les ions dans le liquide. La théorie cinétique exacte du champ sur la dissociation des paires, est due à Onsager. Elle prévoit que K_D varie avec la valeur absolue du champ alors que K_R est indépendante du champ [24].

Des porteurs de charges peuvent être aussi créés aux électrodes, soit par décharge des ions du liquide sur les électrodes, soit par création de nouveaux ions. La décharge d'ions cause la formation dans le liquide, d'une charge d'espace de signe opposé (hétérogène) à l'électrode voisine, alors que l'injection s'accompagne d'une charge d'espace de même signe (homocharge). L'échange de charges à l'électrode peut donc être caractérisé par la mesure du champ électrique près des électrodes [38].

La décharge des ions ne pose pas de problèmes, ni théoriques car elle semble toujours se produire, ni pratique car elle élimine les ions de la solution. Par contre, l'injection qui est responsable de l'accroissement très rapide de la conduction des liquides aux champs élevés, dépend beaucoup du système liquide-électrodes [37].

Plusieurs mécanismes de création d'ions peuvent être envisagés [37] :

- Injection d'électrons par la cathode et capture des électrons : les liquides ne sont pas suffisamment purs dans leurs conditions d'utilisation, pour que leurs conduction soit électronique et les électrons soient immédiatement piégés par des composés accepteurs d'électrons (O_2, \dots) ;
 - Ionisation du liquide ;
 - Réaction électrochimique.

La formation d'avalanches électroniques dans un liquide, susceptibles de conduire au claquage (comme dans les gaz) a été très controversée. Plusieurs arguments sont en défaveur d'une telle hypothèse. Dans la plupart des liquides [39] :

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

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

Dans les liquides ultra purs et en géométrie pointe-plan, sous tension continue, il a été observé qu'à partir d'un certain seuil de tension, des bulles gazeuses se forment au voisinage de la pointe, puis sont violemment chassées vers le plan. Cette phase gazeuse résulterait soit de la vaporisation et de la nucléation des bulles, soit de la cavitation. Certains auteurs supposent que les cavités gazeuses existent a priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités [39].

II.2.2.1. Mécanisme thermique

Le mécanisme thermique se traduit par le phénomène d'ébullition locale du liquide suite à une dissipation d'énergie, associée à de fortes impulsions de courant, à partir d'aspérités de l'électrode pointe.

Watson et Sharbaugh, partisans de l'opinion qui stipule que suite à une grande concentration d'ions près des électrodes, des échauffements locaux du liquide peuvent faire apparaître des bulles de vapeurs [2]. Le courant correspondant à l'injection de charges à partir de la cathode serait limité par la charge d'espace. Ce courant est donné sous forme suivante :

$$I = A V^n \quad (\text{II.1})$$

$$A = Cste \text{ et } 1.5 < n < 2$$

Le champ de claquage E_c est lié à l'énergie W nécessaire à la vaporisation du liquide par la relation :

$$W = cte E_c^n \tau \quad (\text{II.2})$$

Avec τ : temps de séjour du liquide dans la région de champ fort.

D'autre part, pour vaporiser un volume de liquide donné, il faut lui fournir une énergie :

$$W = C_p (T_b - T_a) + L_v \quad (\text{II.3})$$

C_p : Capacité thermique massique à pression constante ;

T_b : Température d'ébullition ;

T_a : Température ambiante ;

L_v : Chaleur latente de vaporisation à volume constant.

Watson et Sharbaugh ont établi un critère de claquage en identifiant les deux énergies ci-dessus. Ce modèle est qualitativement vérifié sur certains hydrocarbures, sous des tensions impulsionnelles de quelques micros secondes, mais demeure incomplet du fait qu'il utilise une équation relative à un état stationnaire, alors que l'on est en présence d'un régime transitoire d'échauffement [3].

Un modèle plus élaboré et tenant compte du régime transitoire a été proposé par Kao. D'après cet auteur, si la densité de courant est suffisante pour ramener la température du liquide à son point d'ébullition, il y a claquage. Dans la théorie que Kao a formulée, le claquage se produit dans des bulles qui se formeraient de plusieurs façons [24]:

- A partir de poches de gaz des électrodes.
- Par une répulsion électrostatique des charges d'espace qui dépasseraient la tension superficielle.
- En raison d'une dissociation des molécules du liquide par des électrodes, ou d'une vaporisation du liquide par le courant dû à des impuretés ou émis à partir d'aspérités sur les électrodes.

II.2.2.2. Mécanisme de cavitation

Un liquide soumis à une dépression à température constante donnera naissance à une bulle, si la pression devient inférieure à sa pression de vapeur saturante [12].

L'application d'un champ électrique au liquide peut engendrer une dépression soit par [12] :

- Le phénomène d'électrostriction du liquide, là où le champ est renforcé.
- La mise en mouvement du liquide.

II.2.2.2.1. Cavitation d'origine électrique

Le modèle est basé à la fois sur l'existence de particules en suspension et sur la formation de bulles par cavitation. Il prévoit les variations du champ disruptif avec la pression du liquide étudié.

Il assimile les zones instables à des bulles qui se formeraient en des points de pression nulle, liées à des particules solides en suspension ou éventuellement aux électrodes. Le phénomène de cavitation est d'origine électrique, c'est à dire que ce sont les forces interfaciales d'origine électrique qui auraient tendance à soulever le liquide, des électrodes. Le décollement est si rapide que la cavité formée serait du vide. Le métal (coté cathode) émettrait des électrons dans la cavité. Ces électrons, accélérés par le champ électrique, bombarderaient le liquide dissipant ainsi, lors de l'impact, une énergie suffisante pour vaporiser assez de liquide pour que la bulle puisse se développer. Le claquage se produira lorsque la bulle aura dépassé une taille limite, désignée sous le nom de taille critique [3].

II.2.2.2.2. Cavitation électrohydrodynamique

L'apparition d'une phase gazeuse pourrait résulter d'une cavitation due à une dépression locale dans le liquide. Cette dépression est induite par la mise en mouvement du liquide, sous l'effet d'une tension appliquée au système. Les écoulements peuvent atteindre une vitesse [3] :

$$V_{EHD} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \quad (\text{II.4})$$

en un temps

$$t \cong \frac{\eta}{\varepsilon E_0^2} \quad (\text{II.5})$$

ou

ε : Permittivité du liquide ;

η : Viscosité du liquide ;

E_0 : Champ sur la pointe.

Ce mouvement induit une dépression dans le liquide donnée par la relation suivante :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_{EHD}^2 \quad (\text{II.6})$$

ρ : Masse volumique du liquide

V_{EHD} : Vitesse d'écoulement électrohydrodynamique.

La dépression pourrait être suffisante pour générer une bulle par cavitation électrohydrodynamique.

II.2.3. Mécanisme de claquage par pont

Les grands volumes de liquides, utilisés dans l'industrie électrique, contiennent généralement des impuretés sous forme de particules en suspension : fibres, poussières, débris métalliques, gouttelettes d'eau, bulles de gaz,... Ces particules (isolantes ou conductrices) présentes dans le liquide, sont responsables d'une diminution significative de sa rigidité diélectrique [35]. Sous l'action d'un champ électrique, les particules sont attirées vers les zones de champ intense pour former des ponts entre les électrodes, facilitant ainsi le claquage du liquide [34]. Dans le cas des particules déformables (bulles de gaz, gouttelettes d'eau), le claquage peut intervenir suite à l'élongation de ces particules reliant ainsi les électrodes par un canal, après ionisation.

II.2.3.1. Origine des particules

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

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

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

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

II.2.3.2. Teneur des particules

D'après une analyse quantitative des particules recueillies en filtrant une huile de transformateur, 94% étaient combustibles (c'est à dire constituées de fibres de cellulose), le reste étant constitué de matériaux ou de poussières. Durant le service, la teneur en particules, telles que les fibres de cellulose, de métal et de résine, doit vraisemblablement augmenter lentement par suite de vieillissement des métaux et de l'usure due à la circulation forcée de huile pour le refroidissement. En outre, en cas de situation anormale, comme l'échauffement local ou l'existence de décharges partielles, la teneur en particules de carbones tend à augmenter [24].

II.2.3.3. Rôle des particules dans le claquage

La présence d'impuretés dans les liquides isolants conduit au renforcement local du champ électrique. La déformation du champ dépend de plusieurs paramètres comme [24] :

- Formes, dimensions, permittivité et conductivité des impuretés ;
- Concentration des impuretés entre les électrodes ;
- Intervalles et formes des électrodes ;
- Valeurs des charges libres existant à la surface des particules.

i. Particules isolantes

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

ii. Particules conductrices

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

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

II.2.4. Longues décharges dans les liquides

Dans un liquide, des intervalles de quelques centimètres sont considérés comme longs intervalles. Le mécanisme d'évolution des décharges pour de tels intervalles est similaire dans ses caractéristiques générales, à celui observé dans l'air pour des intervalles de l'ordre de quelques mètres. Ce mécanisme est appelé comme dans le gaz : mécanisme de streamer-leader [5, 38, 40].

L'étude des mécanismes de streamers n'a cessé de se développer. De nombreux travaux ont porté sur la progression des streamers dans des géométries divergentes [36, 41]. Il est généralement admis que quelque soit la géométrie et la polarité des électrodes, le claquage est précédé d'une phase de préclaquage pouvant être elle-même séparée en deux [36] :

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

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

II.3. Facteurs influant sur la rigidité diélectriques des liquides

II.3.1. Paramètres électrogéométriques

L'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la tension de claquage [2, 9, 11, 38] (Figure II.2). Par ailleurs la rigidité diélectrique du liquide diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes [21]. En champ non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain niveau, une densité d'énergie sous forme d'impulsions est injectée à partir d'aspérités de la pointe. Le rayon de courbure de la pointe joue un rôle important sur la nature et la durée des phénomènes prédisruptifs, plus ce rayon est faible, plus l'intensité du champ électrique obtenu est considérable.

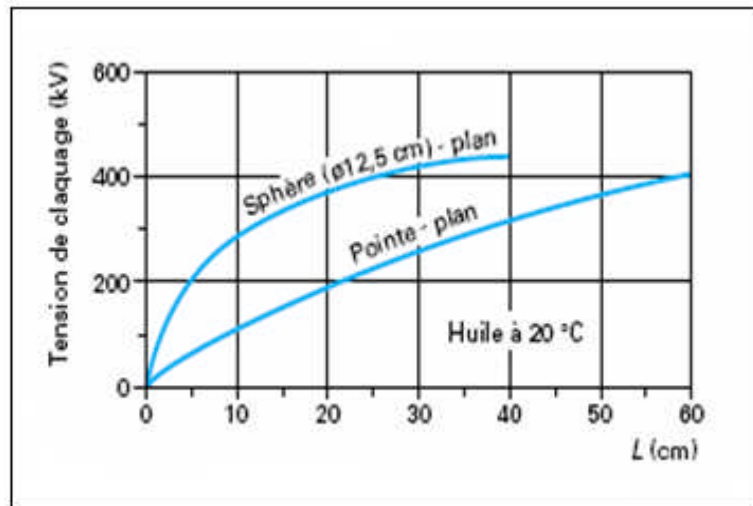


Figure II.2 : Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan [38]

II.3.2. Pression hydrostatique

Il est connu depuis longtemps que la pression hydrostatique a un effet considérable sur la tension de claquage des diélectriques liquides ; celle-ci est d'autant plus élevée que la pression est accrue [42, 43].

II.3.3. Température

L'augmentation de la température entraîne la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile [24]. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent.

II.3.4. Tension

Le temps de montée de la tension, sa polarité, sa durée et son amplitude affectent énormément la vitesse de propagation et la forme du streamer. Pour des niveaux de tension légèrement supérieurs à la tension seuil de génération, plusieurs auteurs confirment l'apparition de bulles gazeuses au voisinage de l'électrode pointe [3, 14, 15, 44-46].

II.3.5. Humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier (Figure II.3) [21, 47]. Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes, suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau-huile [48].

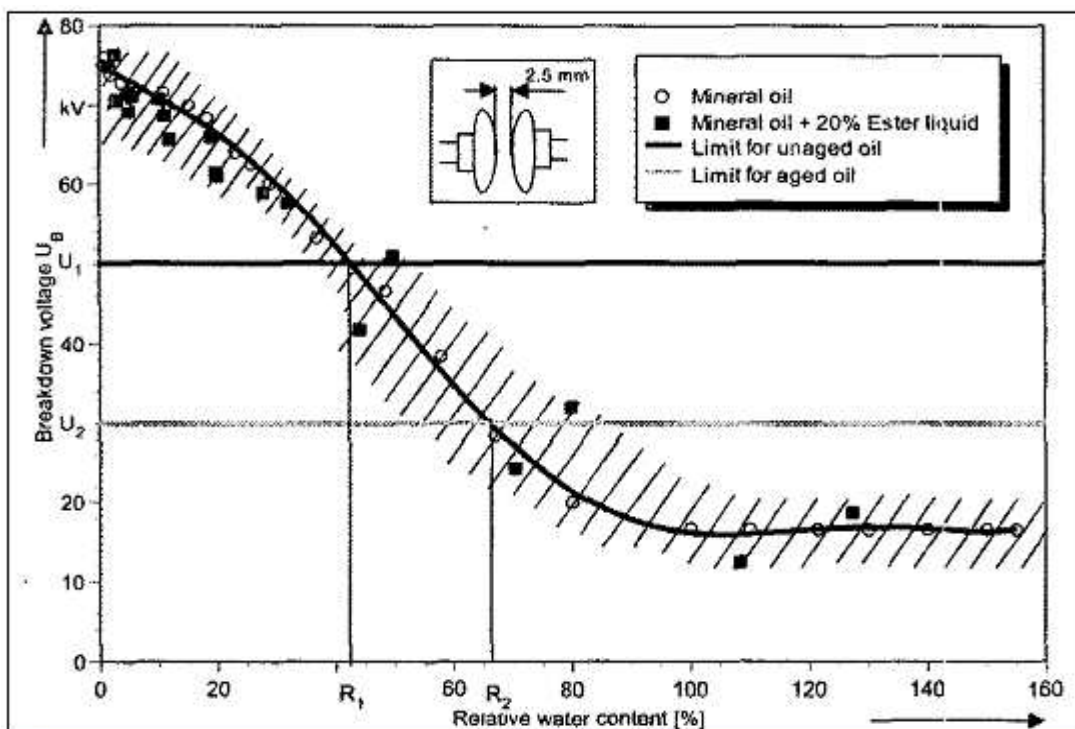


Figure II.3 : Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau, dans l'huile minérale et dans une solution composée de l'huile minérale avec 20% d'ester liquide [47].

II.3.6. Influence de l'insertion d'une barrière isolante

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

L'avantage fourni par l'utilisation des barrières isolantes dans un intervalle d'huile est l'amélioration de la rigidité diélectrique de celui-ci. Cet effet bénéfique fut remarqué dans l'air les années 1920 par C.P.Steinmetz. L'amélioration serait due surtout à l'uniformisation du champ dans l'espace barrière-plan, due à la charge positive déposée sur la surface de la barrière en face de la pointe [49].

Quand la barrière est à surface propre (grande résistivité superficielle), elle entraîne une augmentation considérable de la tension disruptive quand elle est placée près de la pointe. Cette augmentation est causée surtout par l'allongement du canal de la décharge disruptive qui suit un chemin allant de la pointe vers le bord de la barrière et de ce bord vers le plan mis à la terre [50] (Figure II.4).

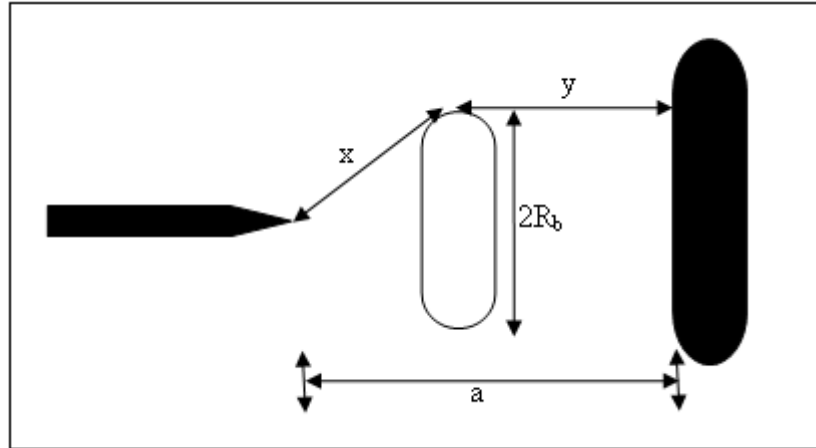


Figure II.4 : Représentation schématique de la longueur de fuite minimale de la décharge dans l'huile minérale [51, 52]

A. Boubakeur [50] a montré dans l'air que la barrière est à la fois un obstacle électrostatique et géométrique. Pour justifier l'obstacle électrostatique, l'auteur a utilisé une barrière trouée au centre pour vérifier si la charge électrique déposée sur la barrière aurait un rôle important, ainsi il a étudié jusqu'à quel diamètre des trous, la barrière n'entraîne aucun effet améliorateur. Il a remarqué que quand la barrière est percée, la tension disruptive de l'arrangement pointe-barrière-plan tend à diminuer, quand le diamètre du trou augmente. Il est intéressant de noter que même avec un trou de 10 mm de diamètre, le chemin suivi par la décharge disruptive passe généralement par le bord de la barrière, il passe par le trou quand son diamètre est supérieur à 10 mm, pour une distance pointe-plan supérieur à un mètre et une barrière de largeur 1.2 m.

A. Zouaghi [51] a montré qu'une barrière montée perpendiculairement aux lignes du champ augmente significativement la rigidité du système. Cependant, il est autrement lorsque la barrière est montée en parallèle avec les lignes du champ. Dans le cas des interfaces parallèles, la barrière facilite le déplacement de la décharge et implique ainsi des claquages à des tensions plus basses inférieures à celles du système sans barrière

II.3.6.1. Influence de la position de la barrière

L'influence de la position de la barrière dépend également des paramètres électrogéométriques du système à savoir la distance inter-électrodes, la configuration des électrodes. Les niveaux de tensions de claquages supérieurs sont obtenus dans l'huile minérale, quand la barrière est au voisinage de la pointe [51]. Dans un système pointe-plan, le maximum de la caractéristique tension de décharge en fonction de la position de la barrière, est obtenu dans l'air pour une position de la barrière à 20% de l'électrode pointe [50]. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge [49, 50, 53].

II.3.6.2. Influence des dimensions et du nombre de barrières

L'influence de l'épaisseur de la barrière sur la tenue diélectrique du système dans l'huile est négligeable, aussi bien pour les petites distances inter-électrodes, que pour les grandes distances [51]. Toutefois ce paramètre influe sur la distribution de porteurs de charges positifs à la surface de la barrière. Par conséquent, le champ devient de plus en plus uniforme entre la barrière et le plan [49, 50, 53].

La rigidité diélectrique de l'arrangement pointe-barrière-plan augmente significativement avec la largeur de la barrière [51]. En effet, cette rigidité dépend de la longueur du canal de la décharge. Cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière et barrière plan [49, 50, 53].

Pour des petites largeurs, la décharge pourrait se faire de manière directe. Par contre, pour les grandes largeurs de la barrière devant la longueur de l'intervalle pointe-plan, la décharge se fait par étapes.

Dans l'huile minérale, le nombre de barrières n'a aucune influence apparente sur la tension de claquage d'une structure divergente [51], ceci peut être due au fait que l'angle solide constitué par la pointe et la barrière dépend uniquement du rayon de la première barrière et de sa position. Cependant, l'intérêt de cette association peut apparaître lors d'un défaut sur la première [49, 51].

II.3.6.3. Influence de la perforation de la barrière

La présence d'une perforation sur la barrière dans l'huile minérale diminue significativement son efficacité et par conséquent la tenue diélectrique du système. Cette diminution est fonction de la position de la barrière et du rayon de l'ouverture. En effet, plus la barrière s'approche de la pointe, plus l'effet de la perforation augmente. Lorsque la barrière est placée au voisinage du plan, l'influence de ce défaut dépend de la probabilité du passage de la décharge à travers le trou qui dépend à son tour de la distribution des charges sur la surface de la barrière [51].

II.4. Conclusion

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

CHAPITRE III

Techniques expérimentales et résultats

III.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les techniques expérimentales réalisées au laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, et les résultats obtenus concernant l'étude diélectrique de l'huile de transformateur sous tension alternative 50 Hz. Nous nous sommes intéressés durant nos essais à :

- La variation de la tension de claquage et la rigidité diélectrique en fonction des paramètres électrogéométriques du système. Par ailleurs, nous avons examiné l'influence du temps de repos entre deux claquages successifs sur la tension de claquage.
- L'évolution du courant, de l'impédance vue des électrodes, de la charge électrique et de l'énergie en fonction des paramètres suivants : tension appliquée, distance inter-électrodes et rayon de courbure de l'électrode pointe.
- L'influence de la position d'une barrière isolante en presspahn entre les électrodes sur la tension de claquage.

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.

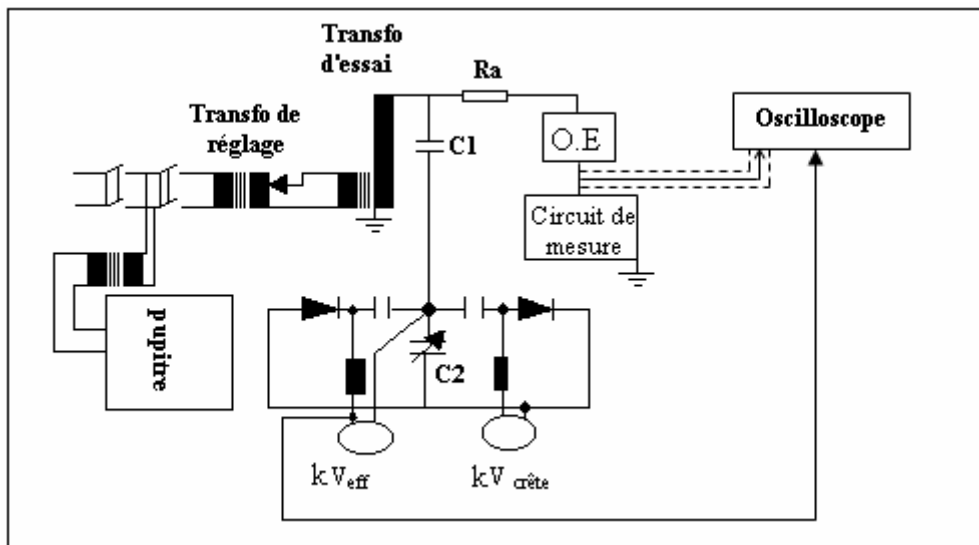


Figure III.1 : Dispositif expérimental

III.2.1. Station d'essai

Cette station d'essais comprend les organes suivants :

- ❖ *Un transformateur de réglage*

Il permet le réglage de la tension à la sortie du transformateur d'essai de zéro à la pleine tension indépendamment de la charge et d'une façon continue. Le réglage peut se

faire, soit manuellement (à l'aide d'un volant), soit à l'aide d'un moteur dont le fonctionnement est commandé à partir du pupitre. Ses caractéristiques sont :

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

❖ *Un transformateur d'essais*

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

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

❖ *Un diviseur capacitif de tension*

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

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

❖ *Un pupitre de commande*

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

❖ *Des appareils annexes de protection*

L'alimentation du laboratoire se fait à partir d'un tableau général situé dans le laboratoire, mais à l'extérieur de la plate-forme d'essai (la cage de faraday). Le transformateur de haute tension et son régulateur sont protégés indépendamment par un fusible et un relais thermique de 250 A. Ces protections sont liées avec le circuit de la bobine du contacteur

principal, ce qui donne une protection suffisante contre les surcharges du transformateur et les courants de court-circuit.

III.2.2. Cellule d'essais

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

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

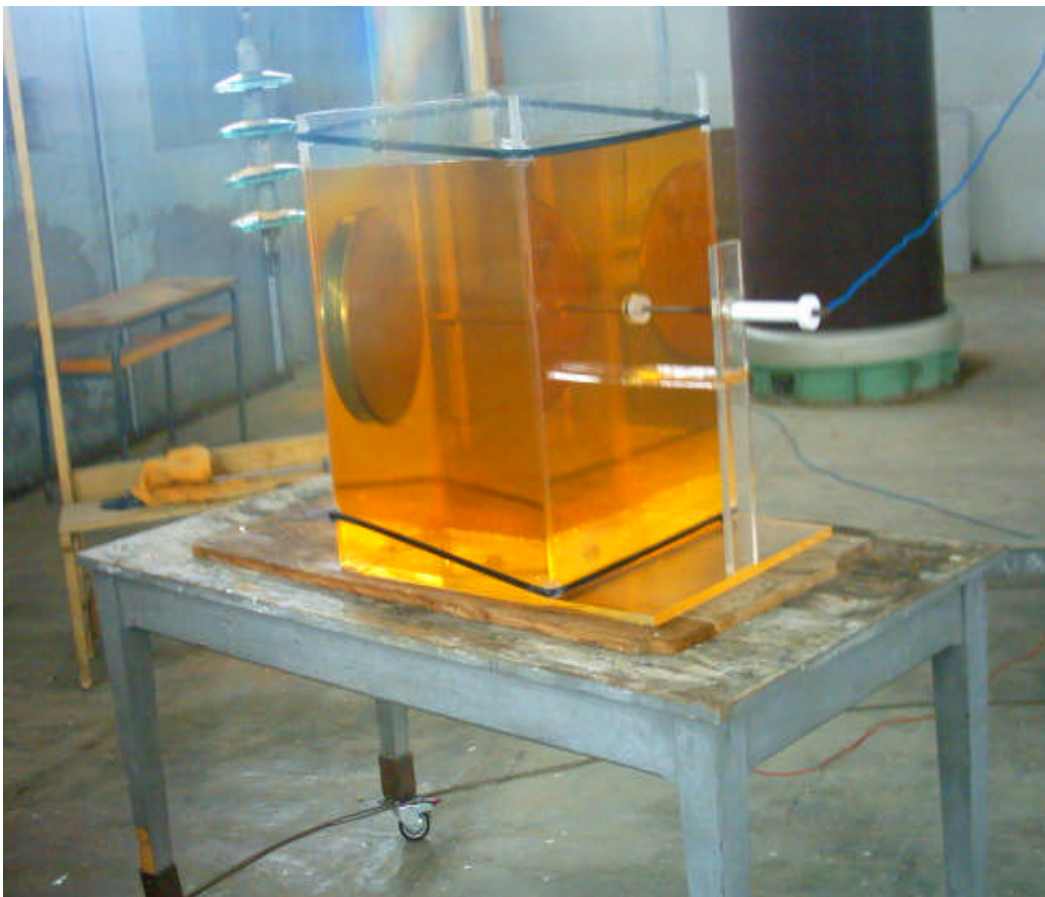


Figure III.2 : Cellule d'essais

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

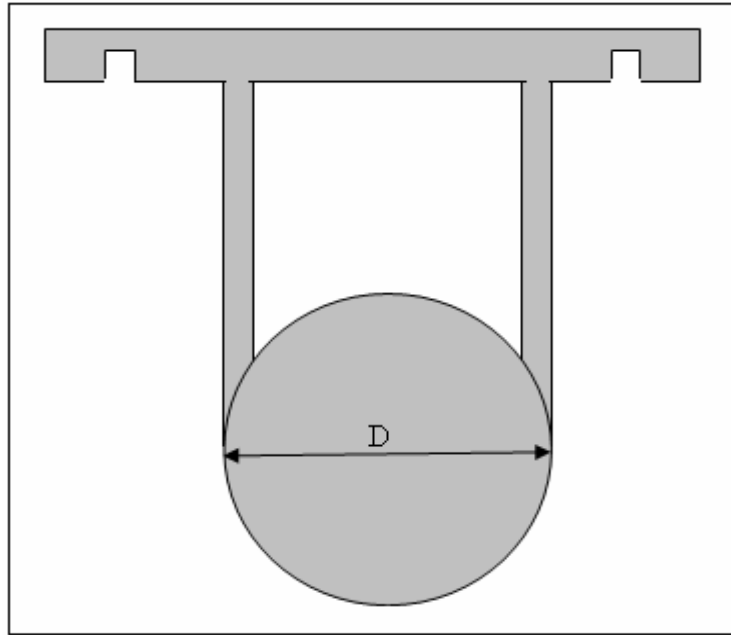


Figure III.3 : Forme de la barrière utilisée

III.2.3. Présentation de l'huile

L'huile minérale dénommée « Borack 22 » est de type naphthénique. 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, deux fûts ont été mis à notre disposition par l'entreprise de réparation des transformateurs électriques (SKMK SONELGAZ de Blida). Nous rappelons que tout au long de nos essais au laboratoire de Haute Tension de l'ENP, des échantillons d'huiles ont été prélevés après chaque série de claquages. Ces échantillons sont mis dans des bouteilles opaques en verre, portant le nombre de claquages effectués ainsi que la date de prélèvement.

III.2.4. circuits de mesures

III.2.4.1. Mesure de la tension de claquage

La mesure de la tension de claquage a été effectuée pour chaque configuration à l'aide du voltmètre électrostatique, donnant la valeur de la tension en kilovolts efficace. Cette mesure permet non seulement de déterminer l'impact de la configuration du modèle sur la tension de claquage, mais aussi de déterminer les paliers des tensions à appliquer, pour l'enregistrement du courant ainsi que la charge.

III.2.4.2. Mesure du courant

La mesure du courant est effectuée à l'aide d'un dispositif constitué par deux résistances et un amplificateur opérationnel de type $\mu A741$ inséré dans le retour de terre comme le montre la figure (III.4). L'onde est reportée à l'aide d'un câble coaxial, permettant la visualisation de la tension (image du courant) sur un oscilloscope numérique (TEKTRONIX TDS 340A 100MHz).

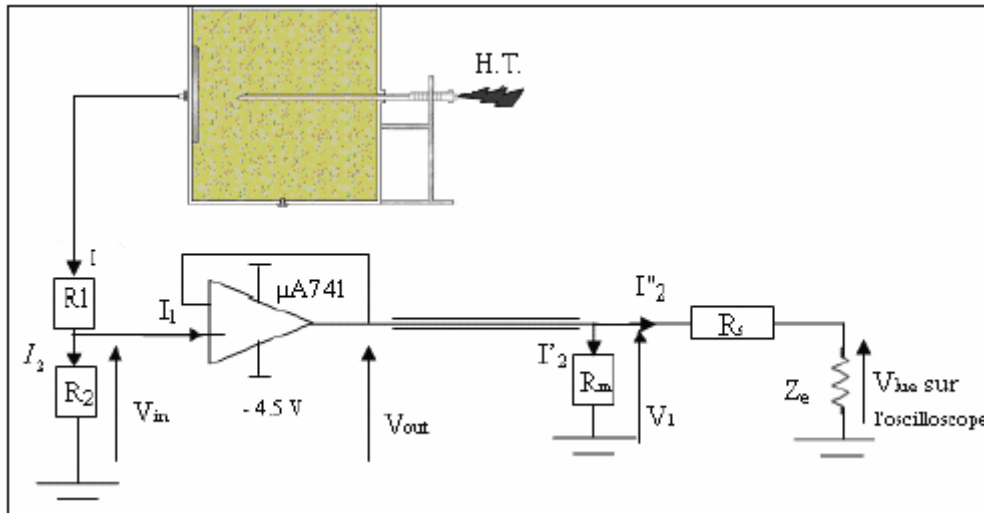


Figure III.4 : Circuit de mesure du courant

Nous précisons que :

$Z_e = 1 \text{ M}\Omega$, est l'impédance d'entrée de l'oscilloscope ;

$R_s = 4.5 \text{ M}\Omega$, la résistance de protection ;

$R_m = 6.6 \text{ k}\Omega$, la résistance d'adaptation du câble de mesure ;

$R_1 = 220 \Omega$, la résistance placée pour diviser la tension d'entrée ;

$R_2 =$ est 100Ω , la résistance placée pour mesurer l'image du courant.

Le courant I peut être donné en fonction de V_{in} et R_2 par :

$$I = \frac{V_{in}}{R_2} \quad (\text{III.1})$$

Par ailleurs, le courant I_1 est nul car l'impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel est très grande. Ce qui nous permet d'avoir les égalités suivantes :

$$I = I_2 \quad (\text{III.2})$$

$$V_{in} = V_{out} \text{ et } V_1 = V_{out} \quad (\text{III.3})$$

d'où :

$$V_{in} = V_1 \quad (\text{III.4})$$

A partir des équations précédentes :

$$V_1 = R_2 I \quad (\text{III.5})$$

Nous pouvons alors, tirer la relation entre le courant et le signal capté :

$$I = \frac{V_1}{R_2} \quad (\text{III.6})$$

$$I = \frac{1}{100} V_1 \quad (\text{III.7})$$

ou alors :

$$I = 0.01 V_1 \text{ [A]} \quad (\text{III.8})$$

Puisque V_{lue} désigne la tension lue sur l'oscilloscope et comme $V_1 = V_{in}$, nous avons :

$$\frac{V_1}{R_s + Z_e} = \frac{V_{lue}}{Z_e} \Rightarrow V_1 = \frac{R_s + Z_e}{Z_e} V_{lue} \quad (\text{III.9})$$

De l'équation (III.4), nous pouvons écrire :

$$V_{in} = V_1 = \frac{R_s + Z_e}{Z_e} V_{lue} \quad (\text{III.10})$$

donc :

$$V_{in} = 5.5 V_{lue} \quad (\text{III.11})$$

Les équations (III.8) et (III.11) permettent la déduction du courant :

$$I = 55 V_{lue} \text{ [mA]} \quad (\text{III.12})$$

Pour déduire le caractère du courant traversant entre les électrodes, nous avons visualisé simultanément le courant et la tension d'alimentation reliés à l'oscilloscope.

III.2.4.3. Mesure de la charge

Pour la mesure de la charge, nous avons utilisé le même circuit précédent, sauf que cette fois-ci, nous avons remplacé les résistances R_1, R_2 par une capacité C_m de $0.1 \mu\text{F}$ (Figure III.5).

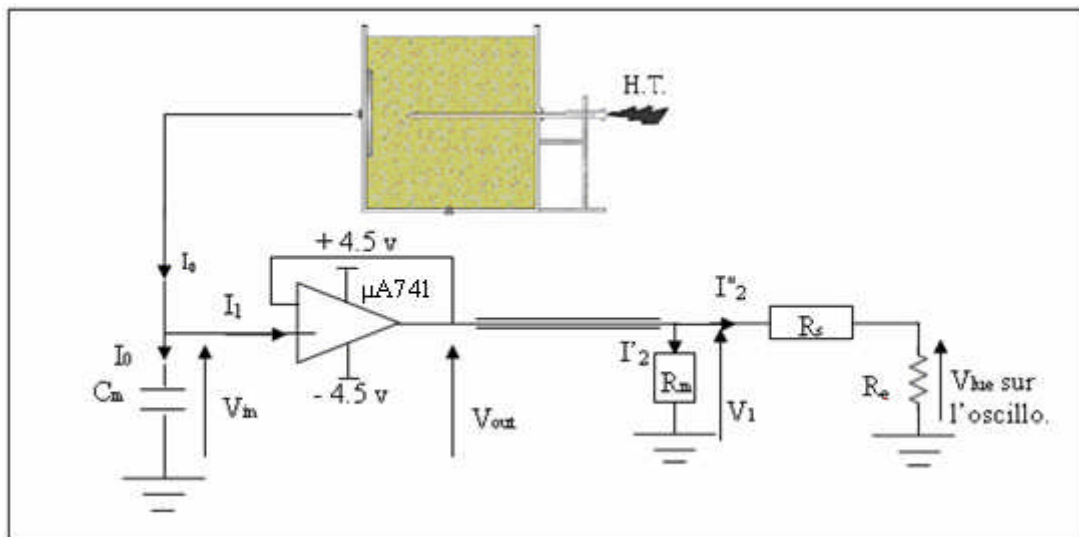


Figure III.5 : Circuit de mesure de la charge

Si, V_{lue} désigne la tension lue sur l'oscilloscope et comme $V_1 = V_{in}$, nous avons :

$$I_2' = \frac{V_1}{R_s + R_e} = \frac{V_{lue}}{R_e} \Rightarrow V_1 = \frac{R_s + R_e}{R_e} V_{lue} \quad (\text{III.13})$$

$$\Rightarrow V_{in} = V_1 = \frac{R_s + R_e}{R_e} V_{lue} \quad (\text{III.14})$$

donc

$$V_{in} = 5.5 V_{lue} \quad (\text{III.15})$$

Comme la charge aux bornes de la capacité est donnée par la relation :

$$Q = C_m V_{in} \quad (\text{III.16})$$

Nous pouvons écrire : $Q = 5.5 C_m V_{lue} [\mu\text{Cb}] \quad (\text{III.17})$

III.3. Résultats et interprétations

III.3.1. Tension de claquage

Durant nos essais de claquages électriques, nous avons constaté l'existence de deux modes de claquages: « claquage direct » et « claquage en rafales ». Ce dernier mode de claquage à été également observé par d'autres auteurs [7, 38] dans l'huile minérale, en géométrie tige-plan et sphère-plan jusqu'aux très grandes distances (respectivement 80 cm et 30 cm) sous tension alternative.

III.3.1.1. Effet de la distance inter-électrodes

Pour un rayon de courbure de l'électrode pointe donné, nous constatons que l'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne un accroissement de la tension de claquage (Figure III.6). Ceci est dû à la diminution de l'effet du champ électrique. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux trouvés par d'autres auteurs, sous tensions alternative [9, 19, 38, 54] et impulsionnelle en polarité positive [10, 11].

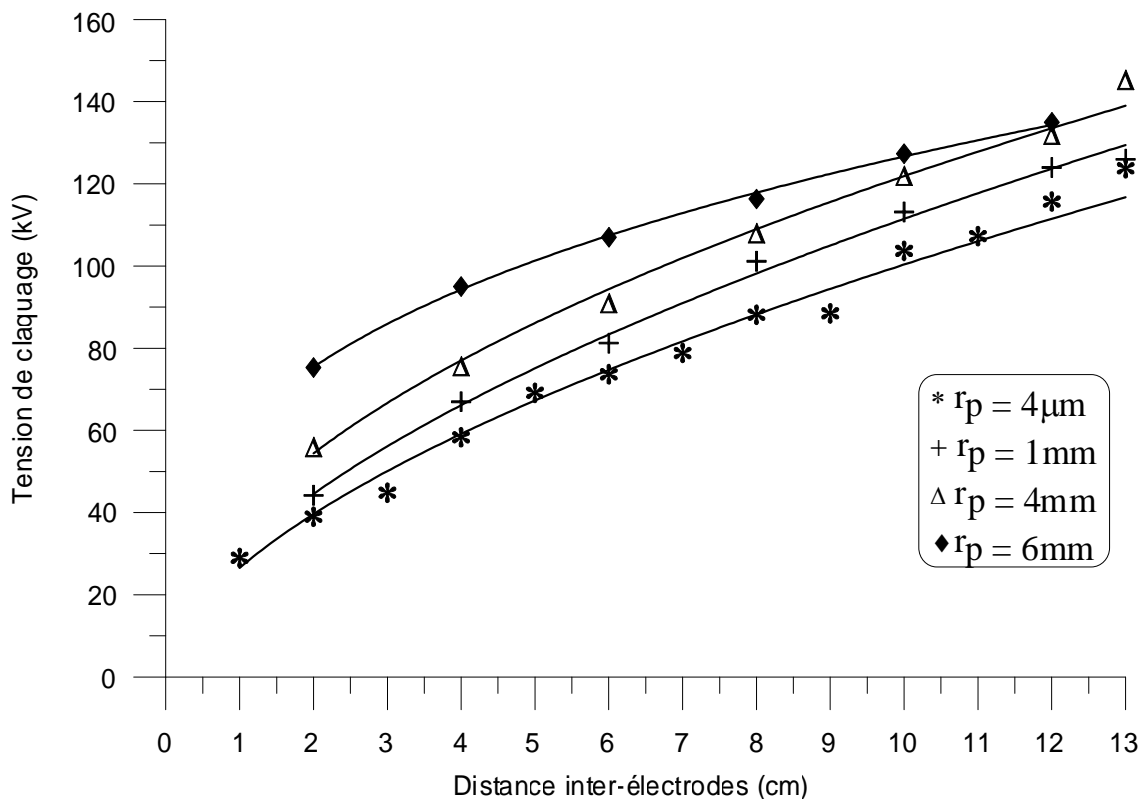


Figure III.6 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes, pour différents rayons de courbure de la pointe

III.3.1.2. Effet du rayon de courbure de la pointe

Les résultats obtenus dans notre étude montrent que la tension de claquage est d'autant plus importante que le rayon de courbure de l'électrode pointe est élevé. Cette augmentation de la tension de claquage s'accroît pour les grands rayons (Figure III.7). Il est évident que l'augmentation du rayon de courbure de l'électrode haute tension engendre une diminution de l'intensité du champ électrique. Ce qui rend le système plus rigide et donc une augmentation de la tension de claquage.

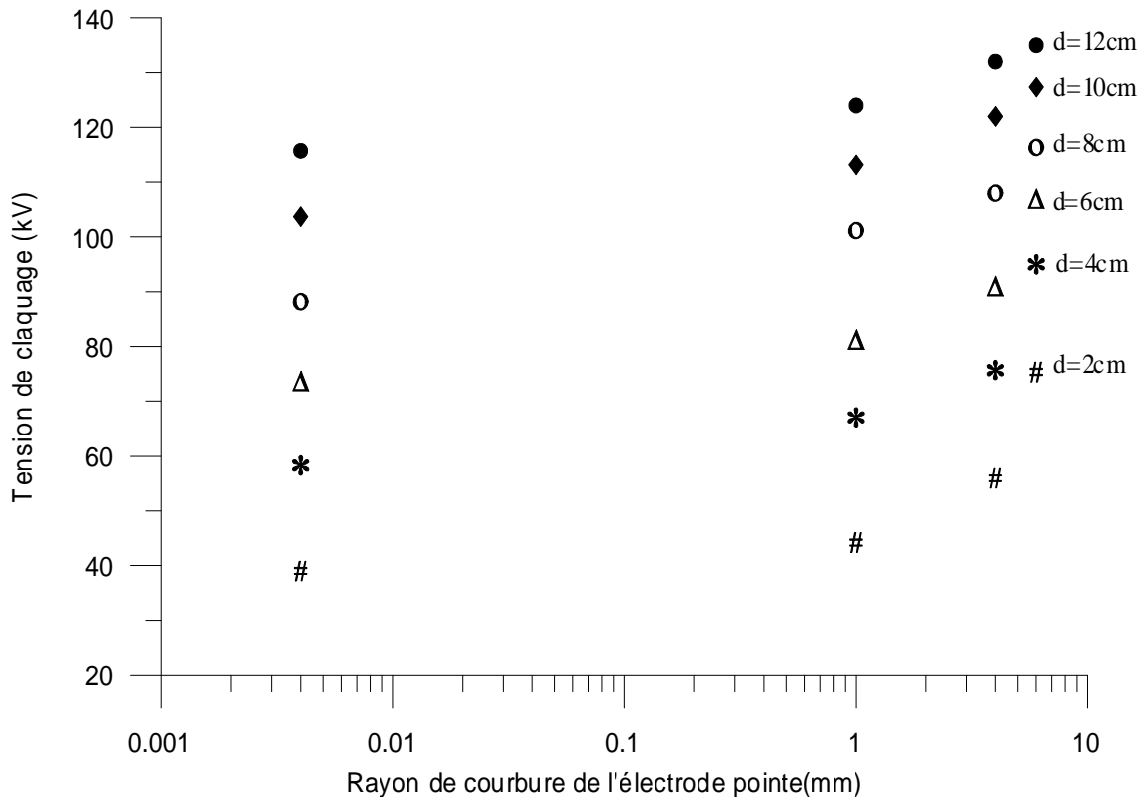


Figure III.7 : Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différentes distances inter-électrodes

III.3.2. Rigidité diélectrique

Les figures III.8 et III.9 représentent la variation de la rigidité diélectrique moyenne définie par le rapport de la tension de claquage sur la distance inter-électrodes, respectivement, en fonction de l'intervalle inter-électrodes et du rayon de courbure de l'électrode pointe.

D'après ces deux caractéristiques, la rigidité diélectrique diminue quand l'espace inter-électrodes et le volume d'huile concerné augmentent. Nos résultats coïncident avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [34].

Par ailleurs, l'augmentation du rayon de courbure de l'électrode pointe engendre un accroissement de la rigidité diélectrique. Cet accroissement est la conséquence de l'uniformisation du champ électrique, ce dernier devient plus uniforme en diminuant l'intervalle entre les électrodes.

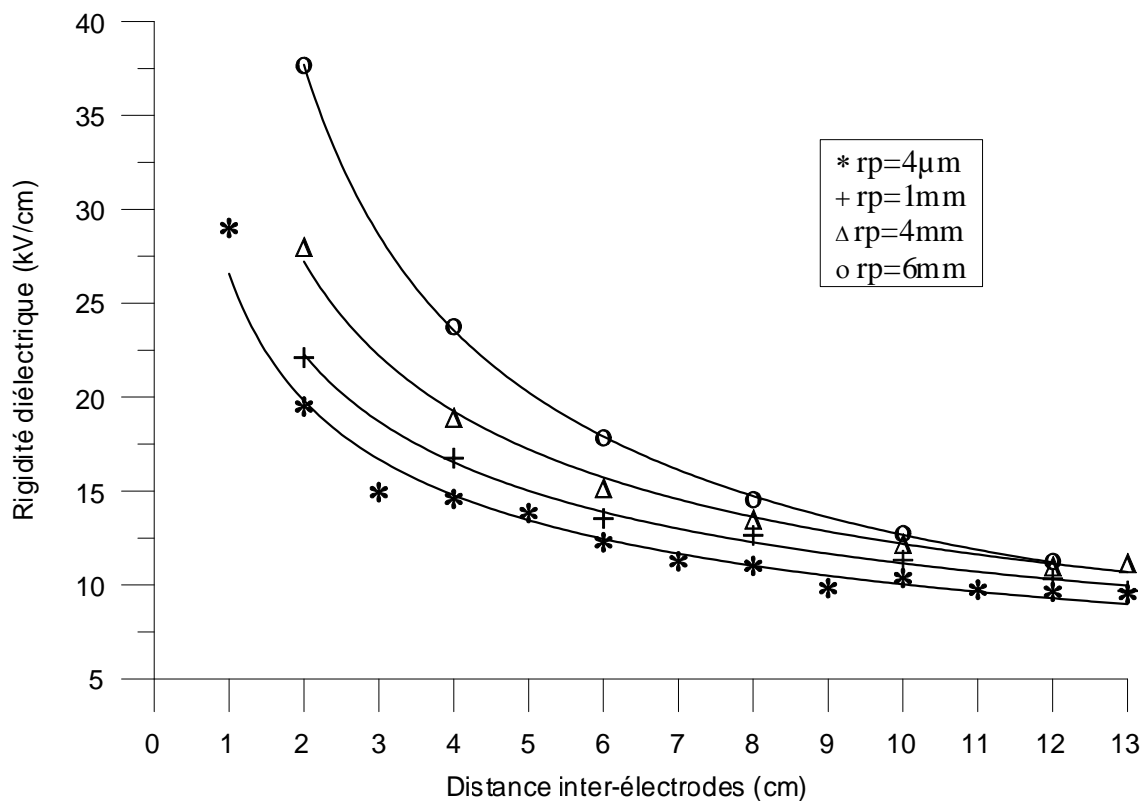


Figure III.8 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction de la distance inter-électrodes, pour différents rayons de courbure

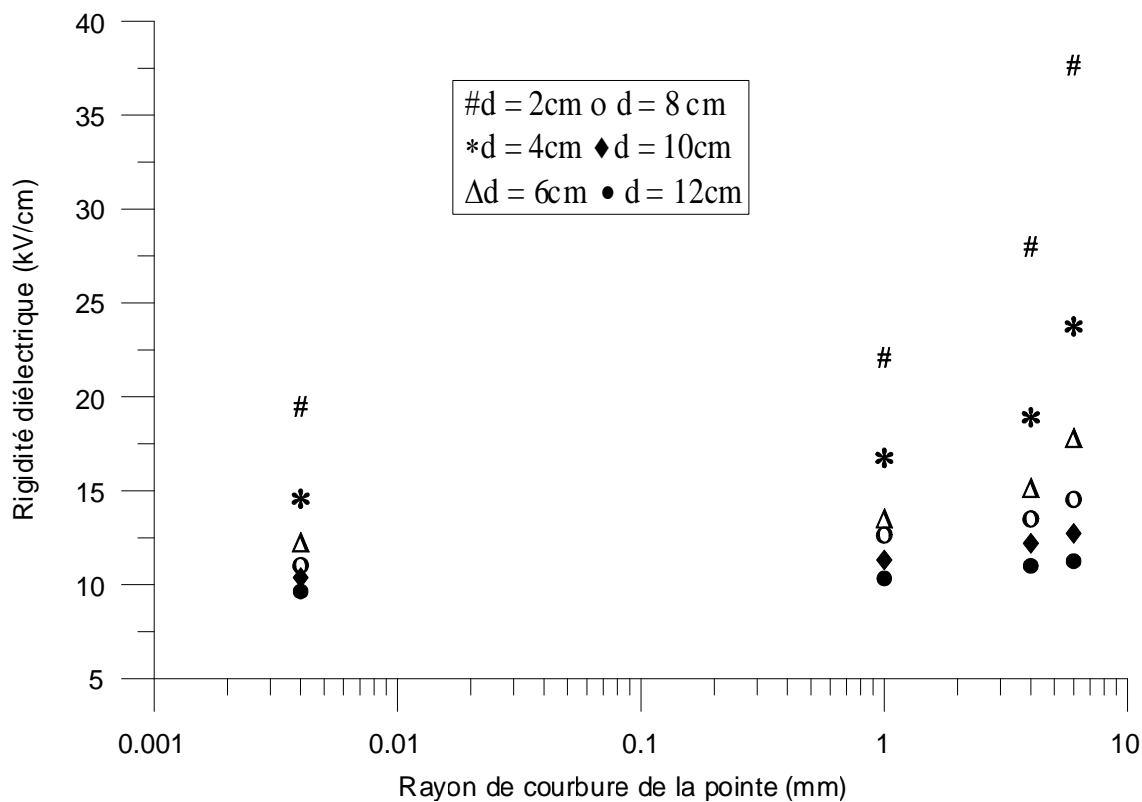


Figure III.9 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différents écarts inter-électrodes

III.3.3. Influence du temps de repos entre deux claquages successifs

Dans le but d'examiner l'influence du temps de repos entre deux claquages successifs sur le niveau de la tension de claquage, nous avons pris les temps suivants : 30 s, 60 s, 120 s, 180 s, 360 s, 480 s, 600 s et 900 s et ceci pour trois distances inter-électrodes différentes : 1 cm, 6 cm, et 12 cm.

Il ressort de ces résultats expérimentaux que la tension de claquage ne varie pratiquement pas en fonction du temps de repos (Figure III.10). En conclusion, après 30 secondes, l'huile retrouve sa stabilité, cette durée est suffisante pour que les conditions initiales soient supposées identiques d'un essai à l'autre.

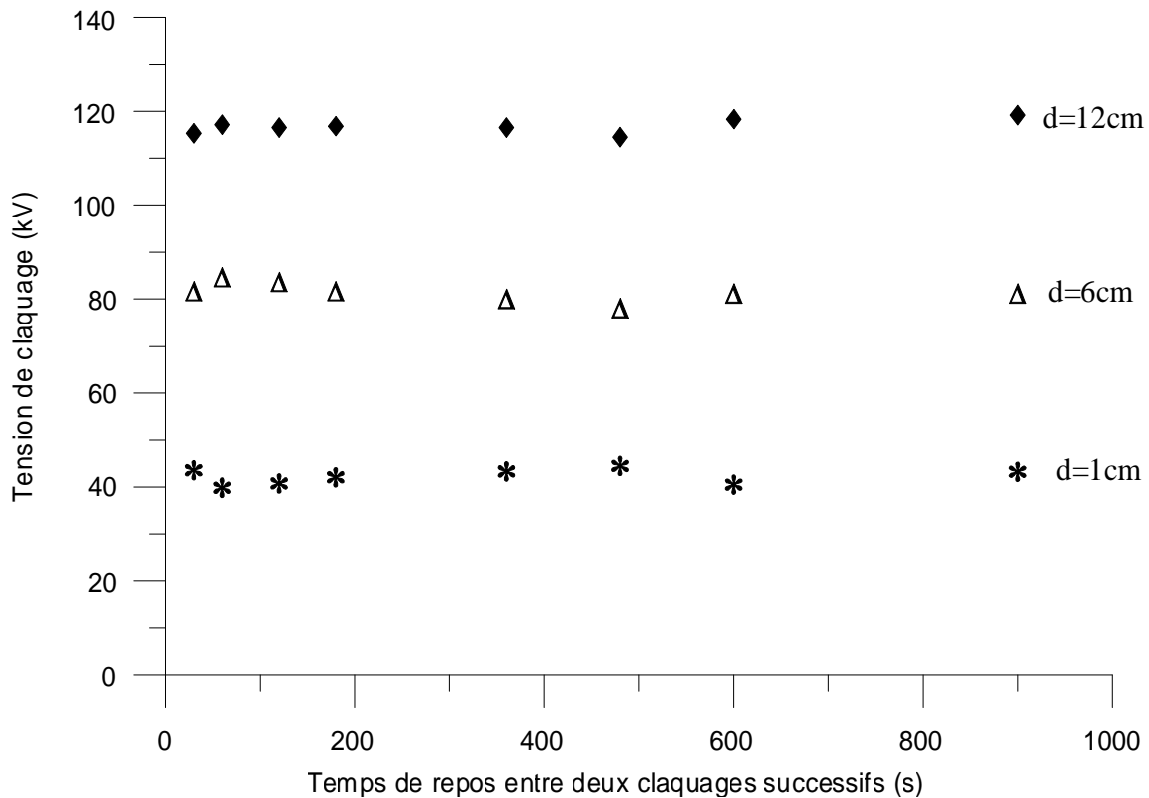


Figure III.10 : Variation de la tension de claquage en fonction du temps de repos entre deux claquages successifs

III.3.4. Courant

III.3.4.1. Forme et caractère du courant

Le courant enregistré est périodique présentant des déformations au niveau de la valeur crête dans les deux alternances (positive et négative). Ces déformations deviennent plus importantes avec l'accroissement de la tension appliquée (figures III.11 à III.13) et moins importantes en augmentant l'écart entre les électrodes (figures III.14 et III.15).

L'enregistrement simultané des signaux, de courant et de tension, permet de mesurer le déphasage entre leurs fondamentaux. Pour une tension de 5kV, le courant est en avance de 90° sur la tension (Figure III.16). Ce déphasage reflète le caractère purement capacitif du courant. Un même résultat a été trouvé par d'autres chercheurs [3, 12, 15]. Cependant, pour des tensions allant de 15kV à 30kV, ce déphasage diminue pour se stabiliser au voisinage de 70° (Figures III.17 à III.19).

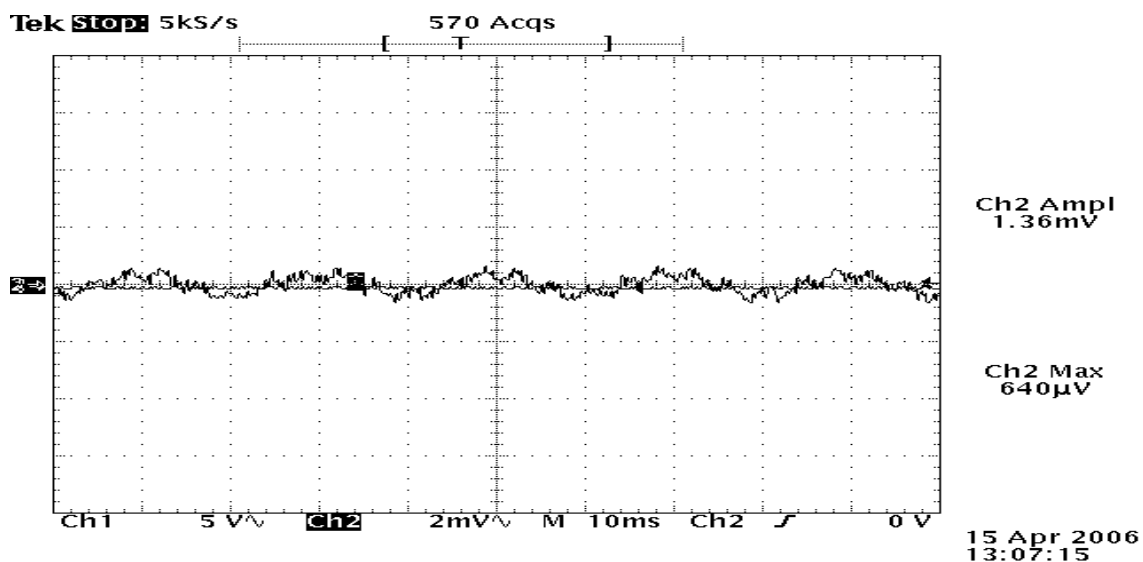


Figure III.11 : Forme du courant, pour une tension appliquée de 5 kV ($d=3$ cm)

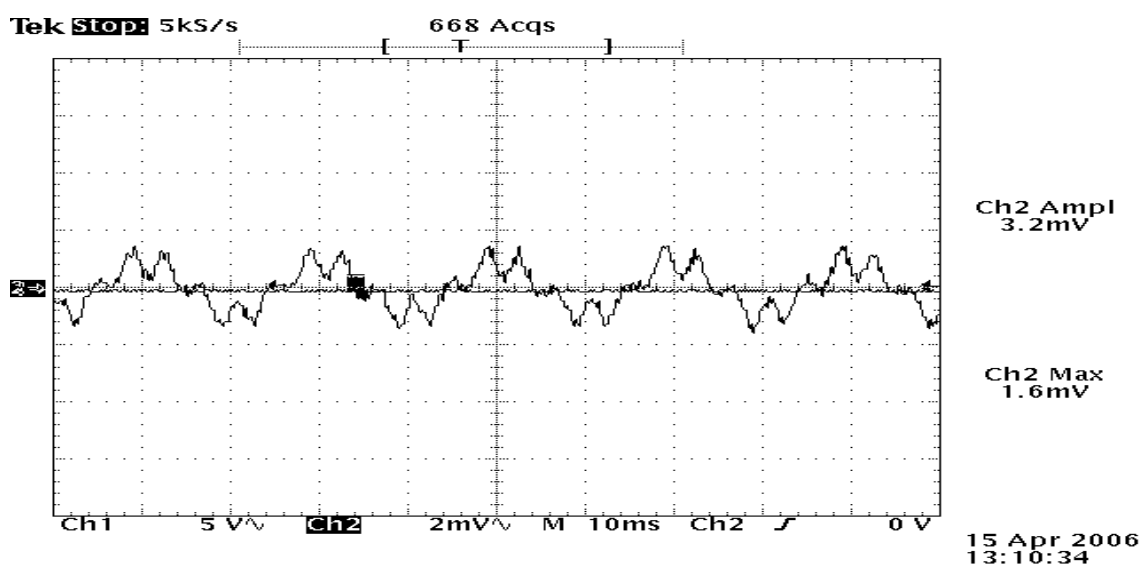


Figure III.12 : Forme du courant, pour une tension appliquée de 15 kV ($d=3$ cm)

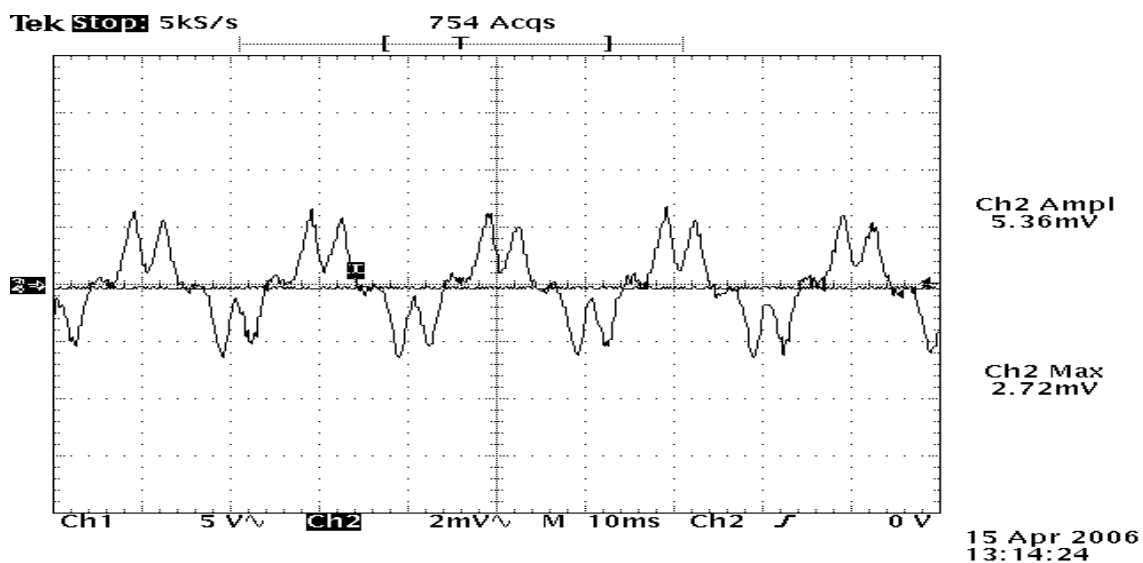


Figure III.13 : Forme du courant, pour une tension appliquée de 25 kV ($d=3$ cm)

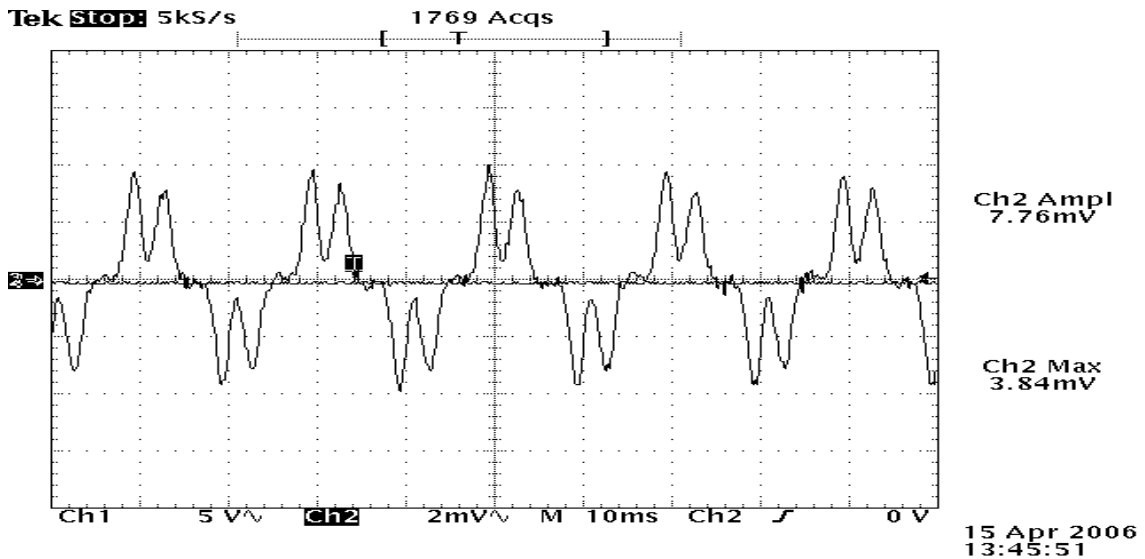


Figure III.14 : Forme du courant, pour une distance inter-électrodes de 8 cm ($U=45$ kV)

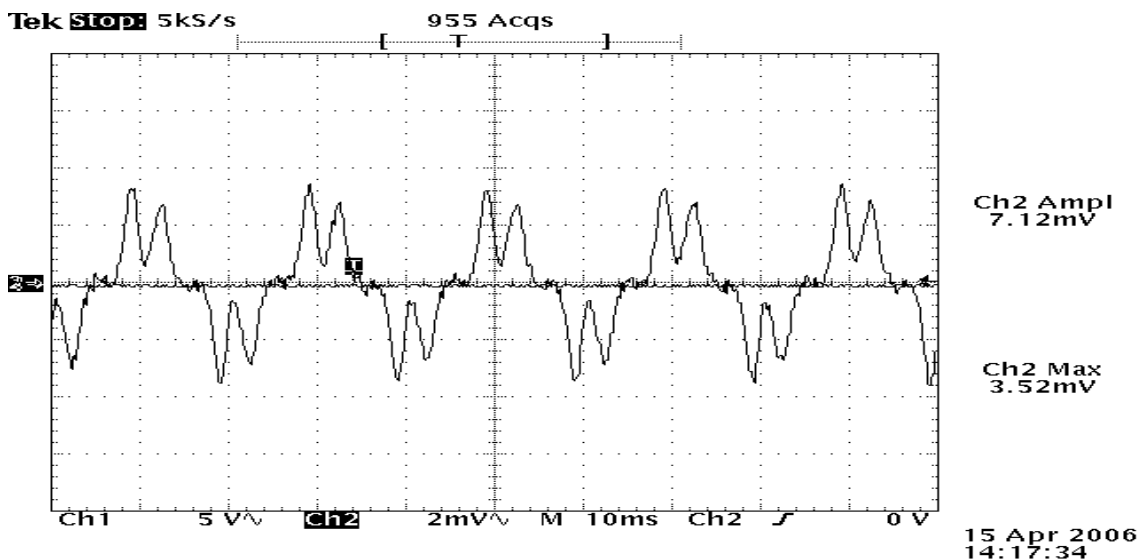


Figure III.15 : Forme du courant, pour une distance inter-électrodes de 10 cm ($U=45$ kV)

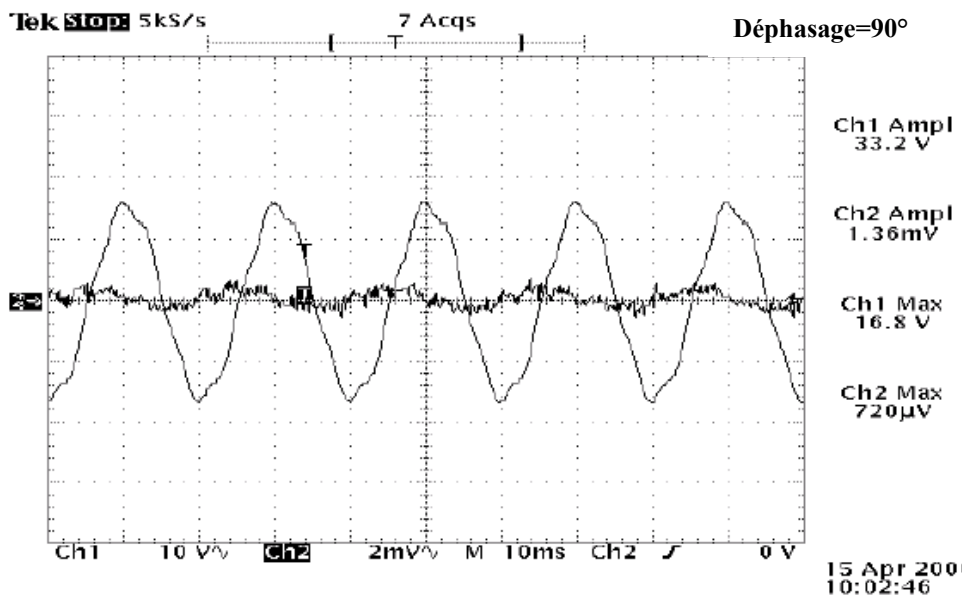


Figure III.16 : Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 5 kV

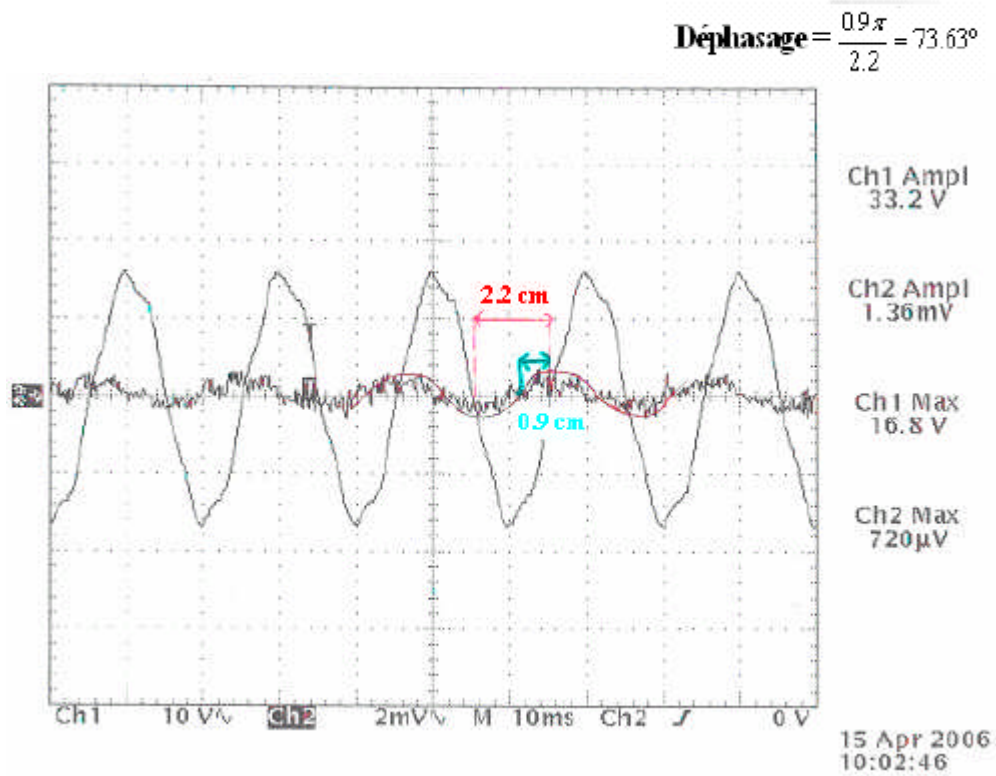


Figure III.17 : Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 15 kV

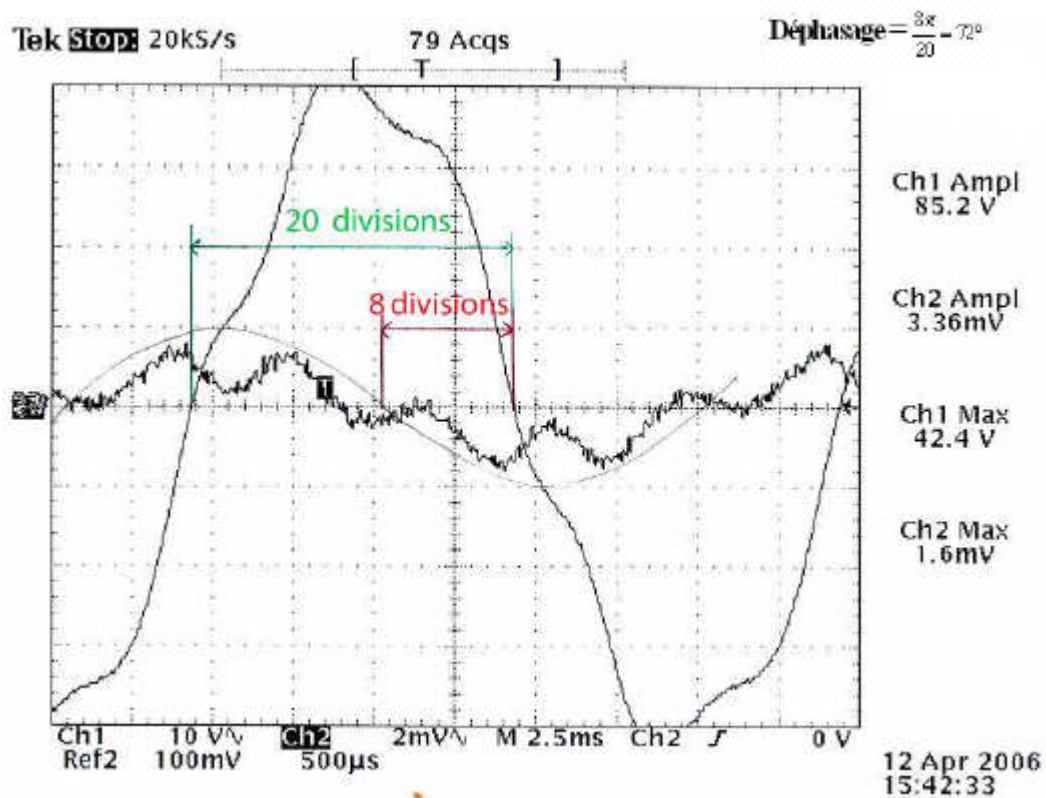


Figure III.18 : Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 20 kV

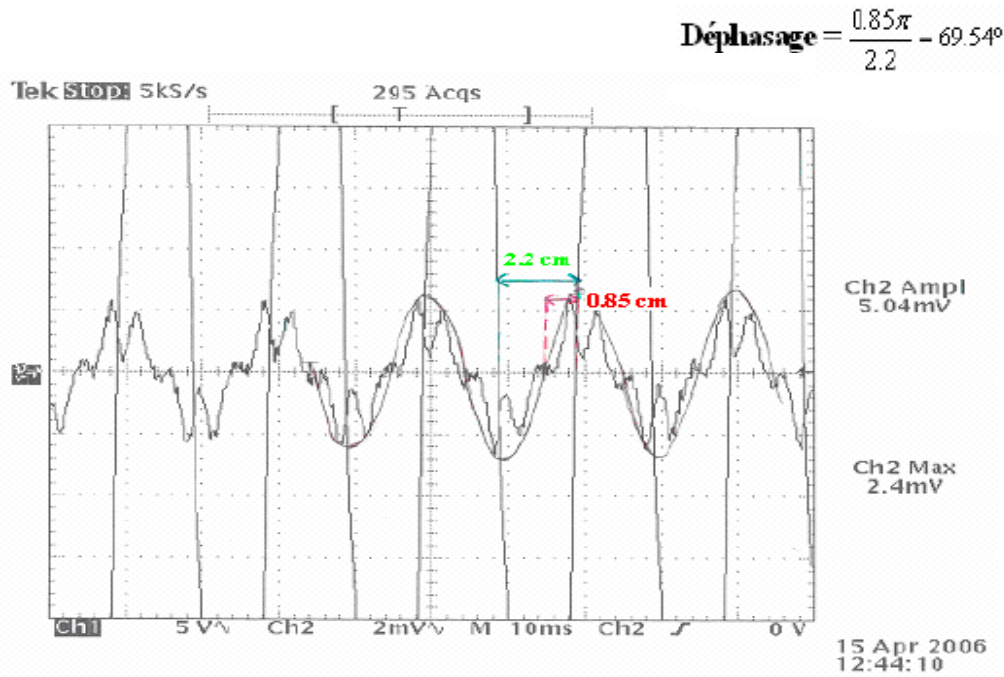


Figure III.19 : Déphasage courant-tension, pour une tension appliquée de 30 kV

III.3.4.2. Effet de la tension appliquée

Il ressort des résultats obtenus d'après les figures (III.20 à III.23), que le courant électrique croît en augmentant la tension appliquée. Cet effet est également observé par d'autres chercheurs [6, 12, 14, 15].

L'application d'une tension pour les intervalles d'huile engendre un courant dont l'expression est la suivante [3, 9, 12, 45] :

$$i = \frac{d}{dt}(Cu) = C \frac{du}{dt} + u \frac{dC}{dt} \quad (\text{III.18})$$

Pour des niveaux de tensions inférieurs à 5 kV, nous constatons une augmentation linéaire du courant généré en fonction de la tension appliquée. Ceci confirme que la capacité C est constante.

Par conséquent, nous obtenons : $i = C \frac{du}{dt}$ (III.19)

donc : $I = C wU$ (III.20)

A partir de 5 kV, nous constatons une diminution de la pente de la caractéristique $I(U)$ (Figures III.20 à III.23). Ceci est le résultat du changement de la capacité, due à la génération de bulles gazeuses. Ces dernières donnent naissance à des pics de courant selon certains chercheurs [3, 12]. Ces pics ont lieu sur un intervalle de temps assez faible, pour que la tension puisse être considérée constante. Par conséquent, les pics de courant résultent de la variation de la capacité électrique. Le courant correspondant peut s'écrire comme suit :

$$i = u \frac{dC}{dt} = i_p \quad (\text{III.21})$$

D'après les résultats d'autres chercheurs [3], les pics de courant évoluent dans le sens inverse du courant traversant le système réduisant ainsi sa valeur instantanée. Cette réduction de la valeur instantanée du courant est due au changement de phase du liquide. Pour mieux illustrer cette hypothèse, nous nous intéressons au sens de variation du module du courant instantané lors de la génération de bulles gazeuses en tension alternative.

Si, nous assimilons notre configuration pointe-plan à un système de deux sphères concentriques de rayon r_p et r_p+d , la capacité électrique de ce système sera donnée par [3, 12, 45]:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_p + d}} \quad (\text{III.22})$$

avec r_p rayon de courbure de l'électrode pointe et d distance inter-électrodes.

Etant donné que ($r_p \ll d$), l'équation (III.22) devient :

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_p \quad (\text{III.23})$$

Le courant qui traverse le système sous tension alternative est :

$$i = \frac{d}{dt}(Cu) = C \frac{du}{dt} + u \frac{dC}{dt} = i_f + i_p \quad (\text{III.24})$$

Le premier terme Cdu/dt représente le fondamental du courant, le second terme udC/dt est l'amplitude du pic de courant. Ce dernier s'écrira :

$$i_p = 4\pi\epsilon_0 u \frac{d}{dt}(r_p \epsilon_r) \quad (\text{III.25})$$

La réduction de la valeur instantanée du courant, lors de l'apparition du pic de courant i_p signifie que ce dernier est négatif. Pour que cela soit possible, il faut qu'il ait diminution :

- ✓ Soit du rayon de courbure de la pointe ;
- ✓ Soit de la permittivité relative ϵ_r de l'huile.

Des analyses de l'état de surface de la pointe révèlent qu'à cause de l'érosion, le rayon de courbure a tendance à s'agrandir. Donc r_p ne peut qu'augmenter. Par conséquent, la seconde hypothèse, la seule à prendre en compte, confirme un changement de phase du liquide qui passe à l'état vapeur (avec $\epsilon_r \cong 1$). Ce résultat a été confirmé par un certain nombre de chercheurs [3, 14, 15, 43, 44, 46].

A partir d'un certain niveau de tension situé au voisinage de 10 kV, la caractéristique courant-tension retrouve sa linéarité. Nous pensons que le mécanisme physique est celui de transition des bulles en streamers ; les électrons émis sont accélérés par le champ électrique appliqué, entraînant des avalanches électroniques en phase liquide.

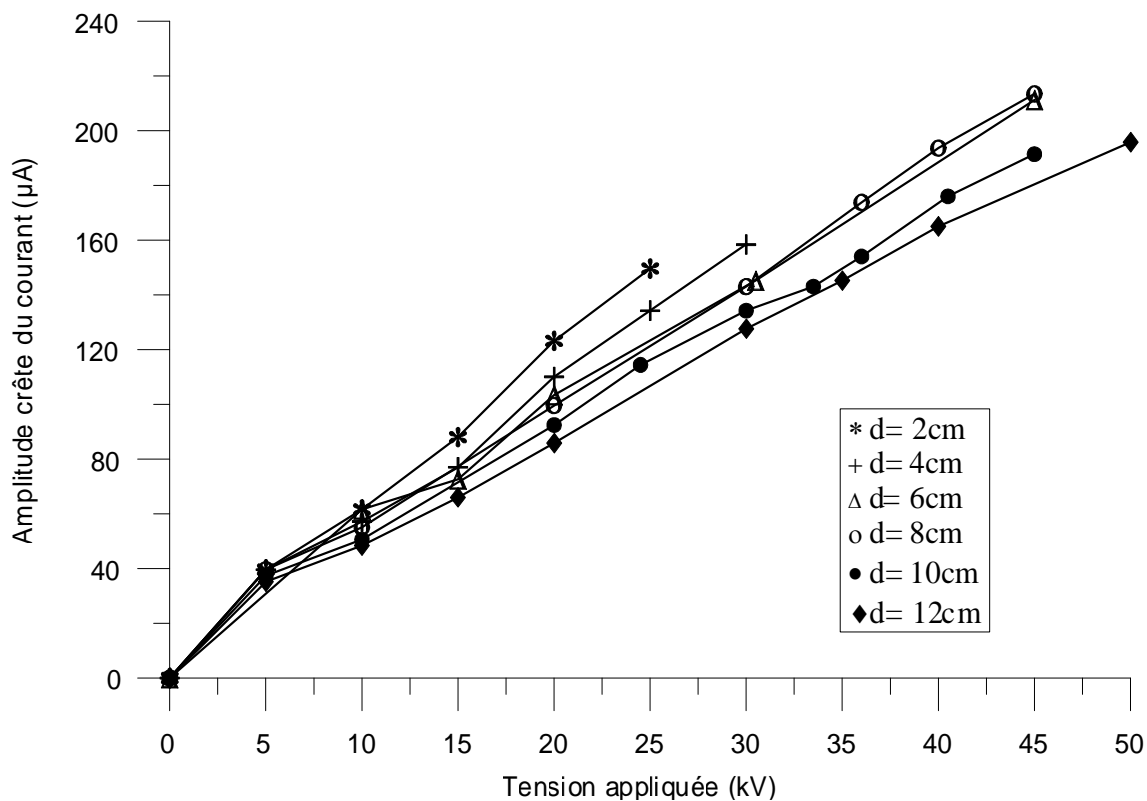


Figure III.20 : Variation du courant en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=4\mu\text{m}$)

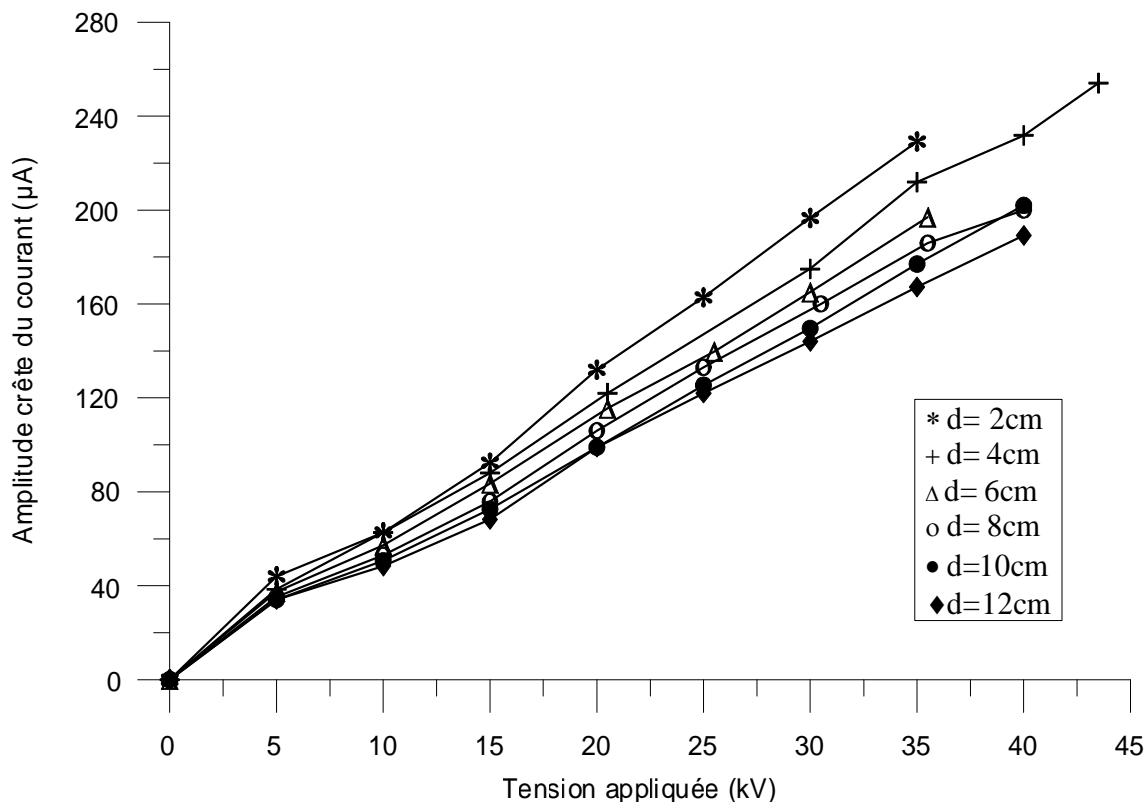


Figure III.21 : Variation du courant en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=1\text{mm}$)

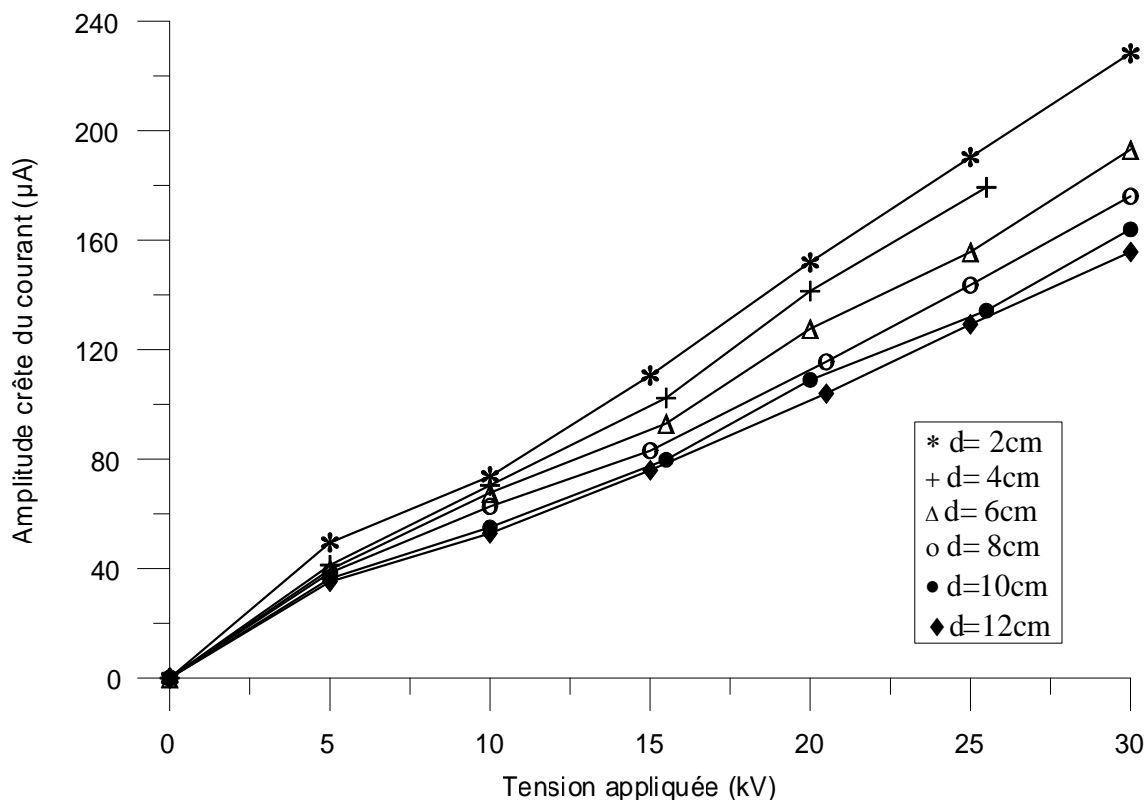


Figure III.22 : Variation du courant en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=4mm$)

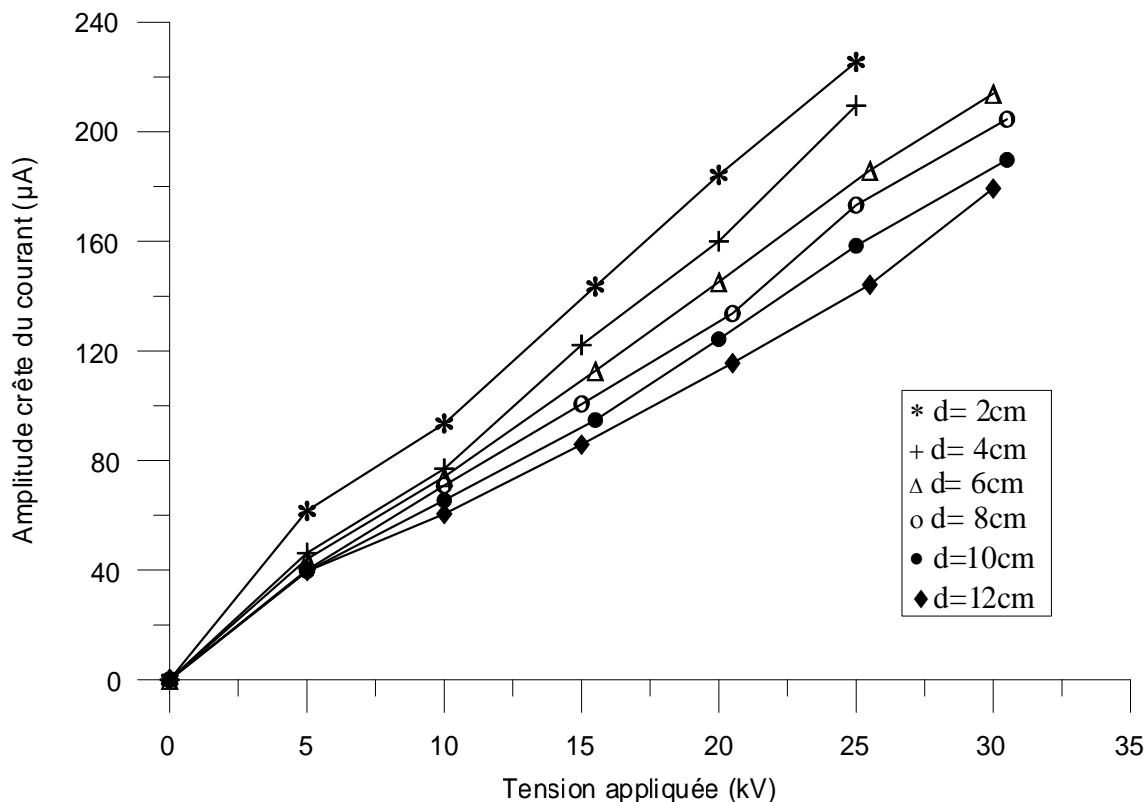


Figure III.23 : Variation du courant en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=6mm$)

III.3.4.3. Effet de la distance inter-électrodes

Les variations de l'amplitude du courant en fonction de la distance inter-électrodes, pour les différentes tensions appliquées sont présentées aux figures (III.24 à III.27). Nous remarquons que, quelle que soit la tension appliquée, le courant électrique décroît légèrement lorsque l'espace inter-électrodes augmente. Ce résultat a été déjà obtenu par d'autres auteurs [12]. Notons que la raideur de cette diminution du courant s'accroît avec l'augmentation de la tension appliquée. Cela est valable pour les différents rayons de courbures utilisés.

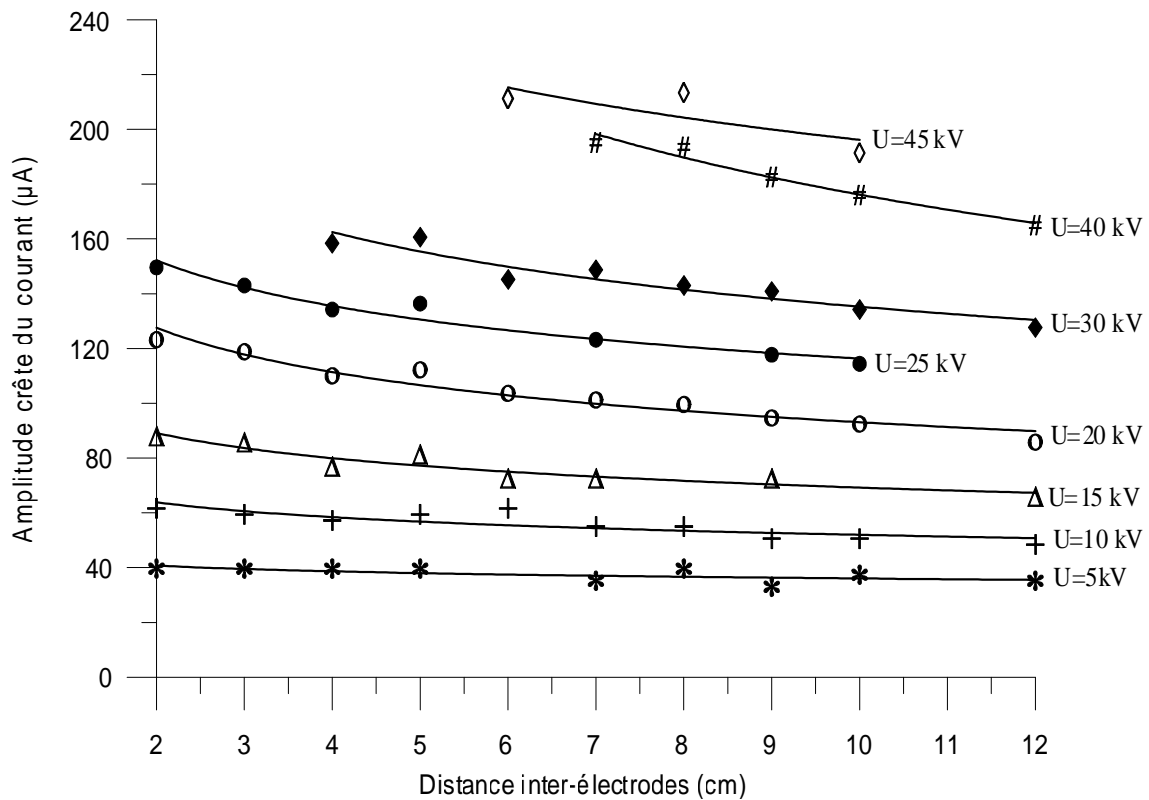


Figure III.24 : Variation du courant en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=4\mu\text{m}$)

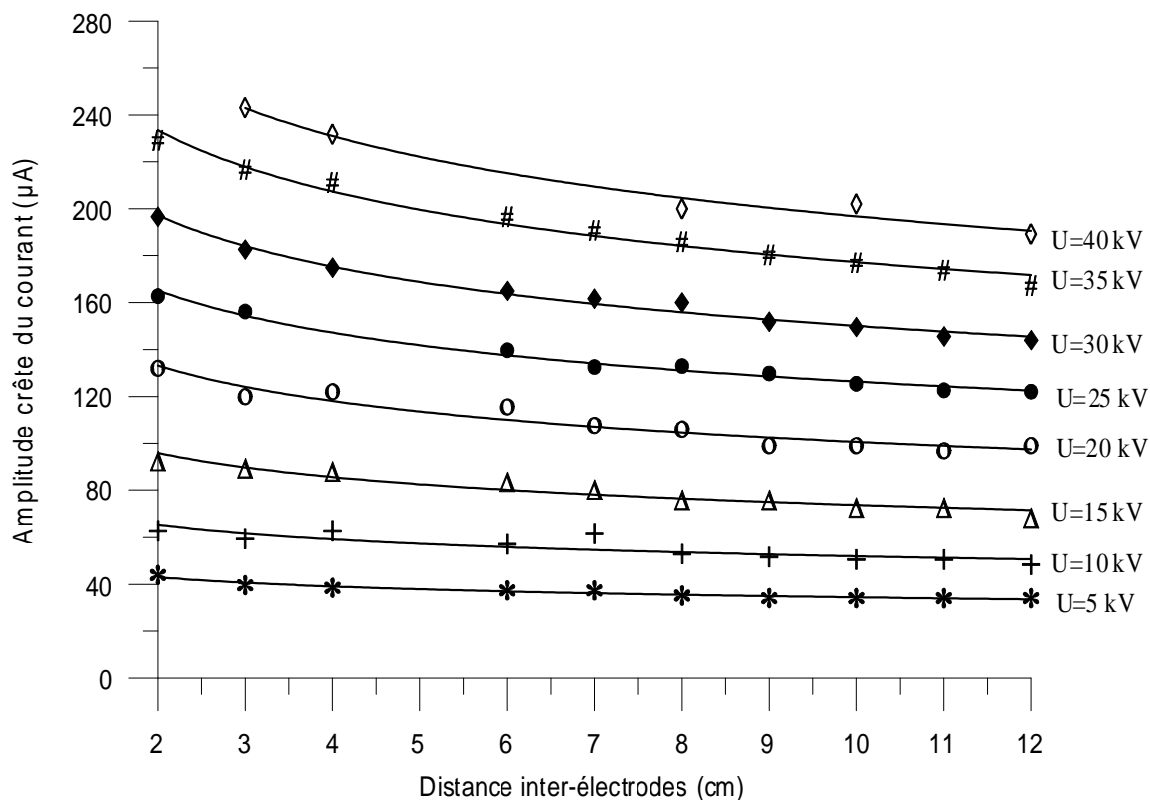


Figure III.25 : Variation du courant en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=1\text{mm}$)

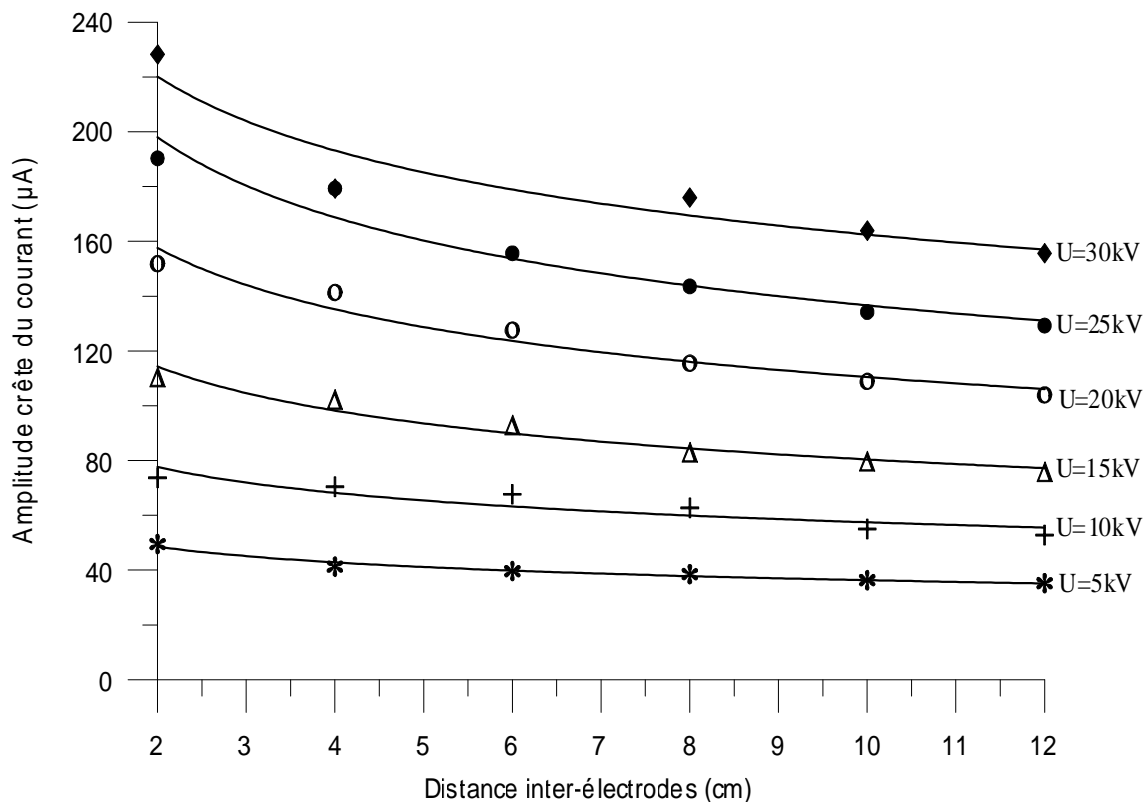


Figure III.26 : Variation du courant en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=4\text{mm}$)

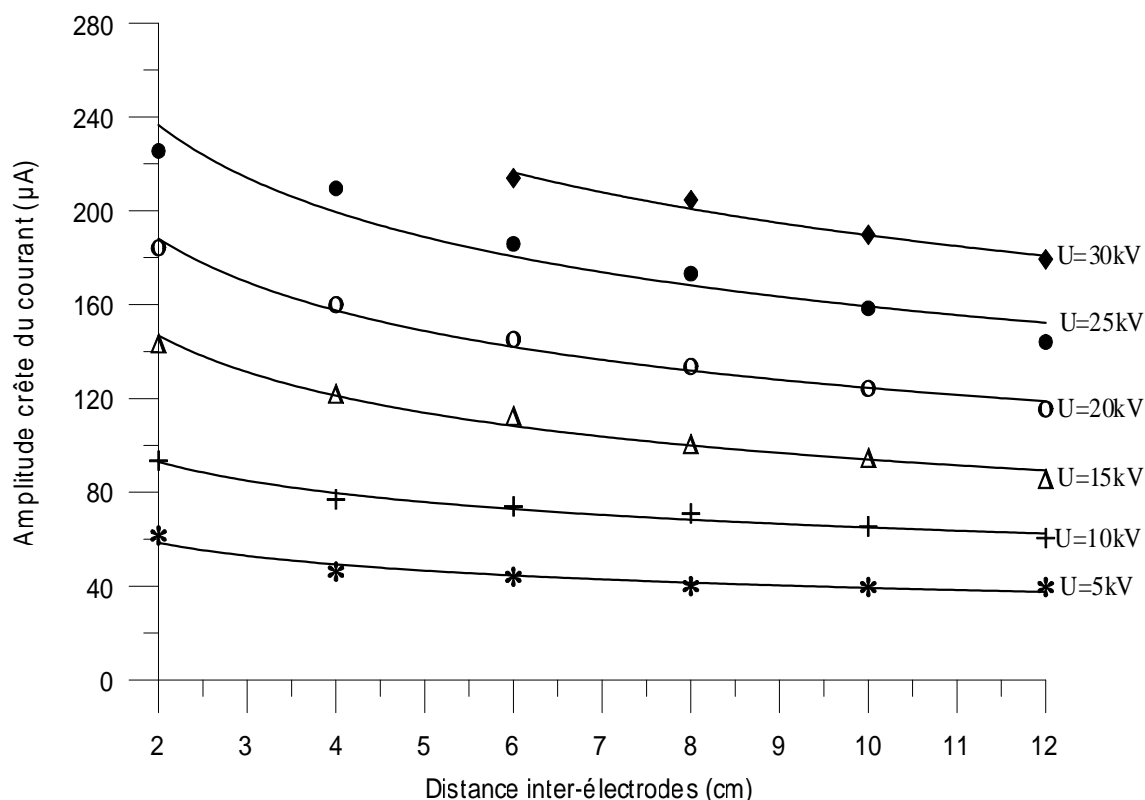


Figure III.27 : Variation du courant en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=6\text{mm}$)

III.3.4.4. Effet du rayon de courbure de la pointe

A partir des caractéristiques expérimentales (Figures III.28 à III.38), donnant l'évolution du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour les différentes distances inter-électrodes et pour les différentes tensions appliquées, nous pouvons déduire que le courant augmente légèrement entre $4\ \mu\text{m}$ et $1\ \text{mm}$, et rapidement ailleurs. Cette augmentation pourrait s'expliquer par la quantité de charge injectée sous forme d'impulsions de courant à partir de la pointe, qui augmente avec le rayon de courbure de l'électrode acérée, en dépassant un certain champ seuil correspondant au champ de génération. Une même analyse a été confirmée par d'autres chercheurs [17, 43].

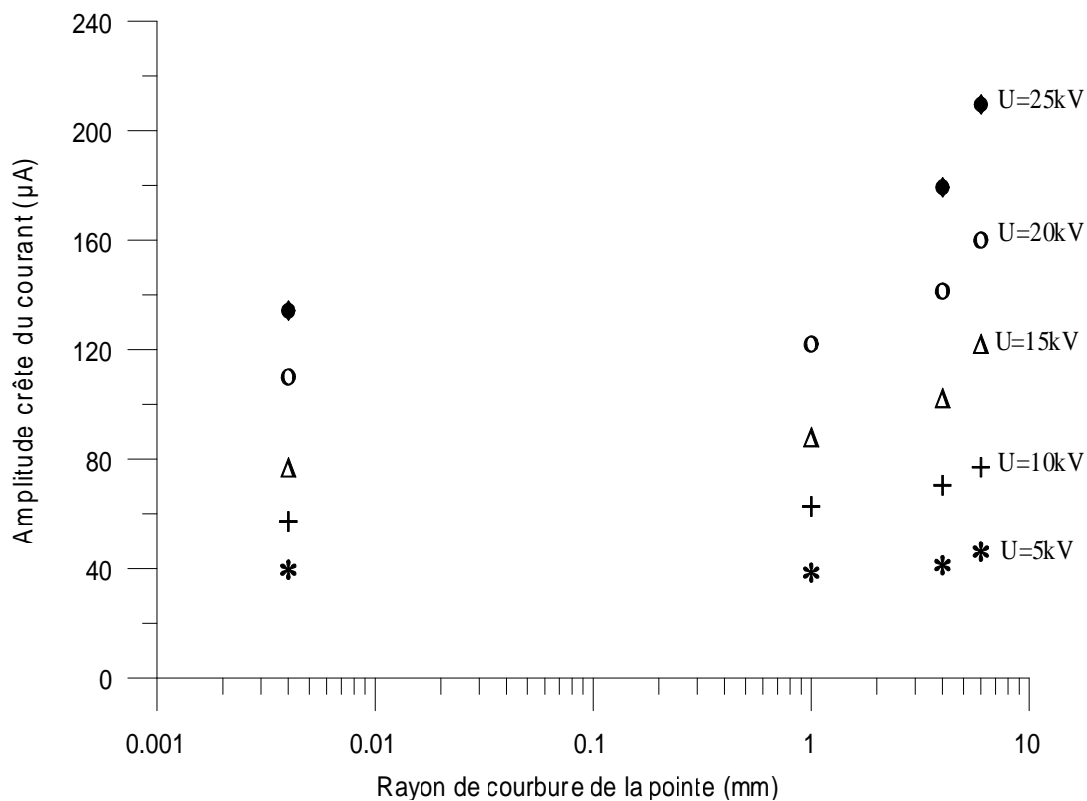


Figure III.28 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=4cm)

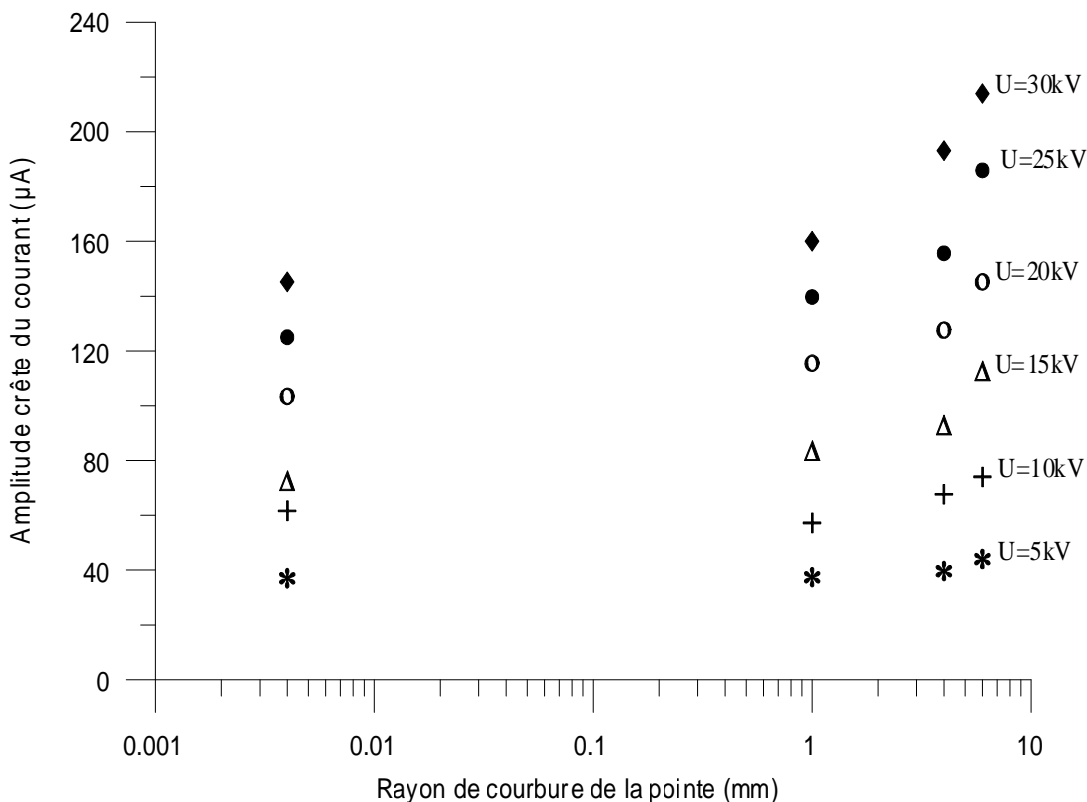


Figure III.29 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=6cm)

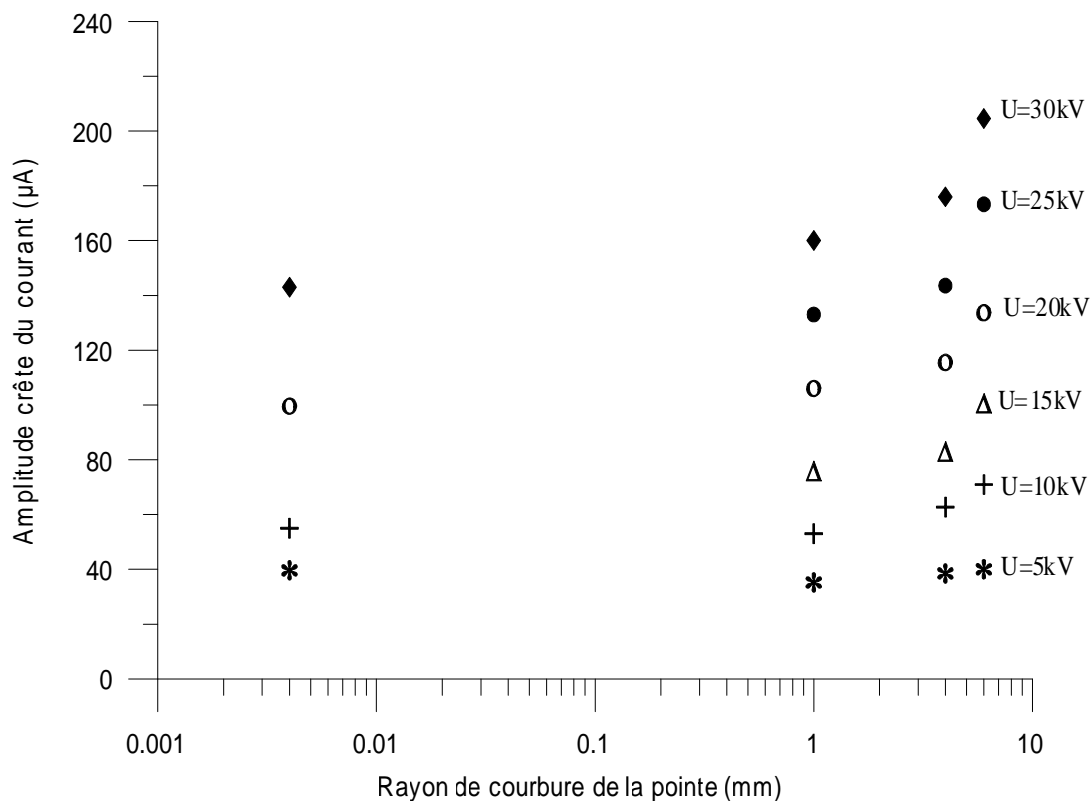


Figure III.30 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=8cm)

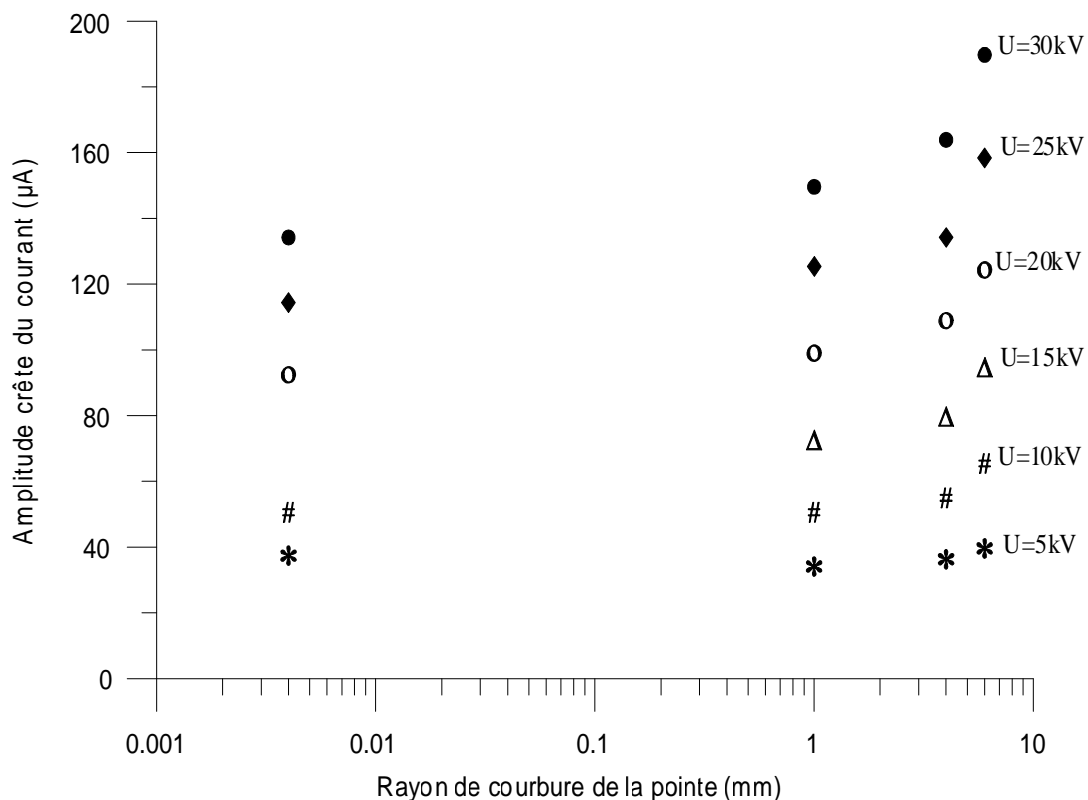


Figure III.31 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=10cm)

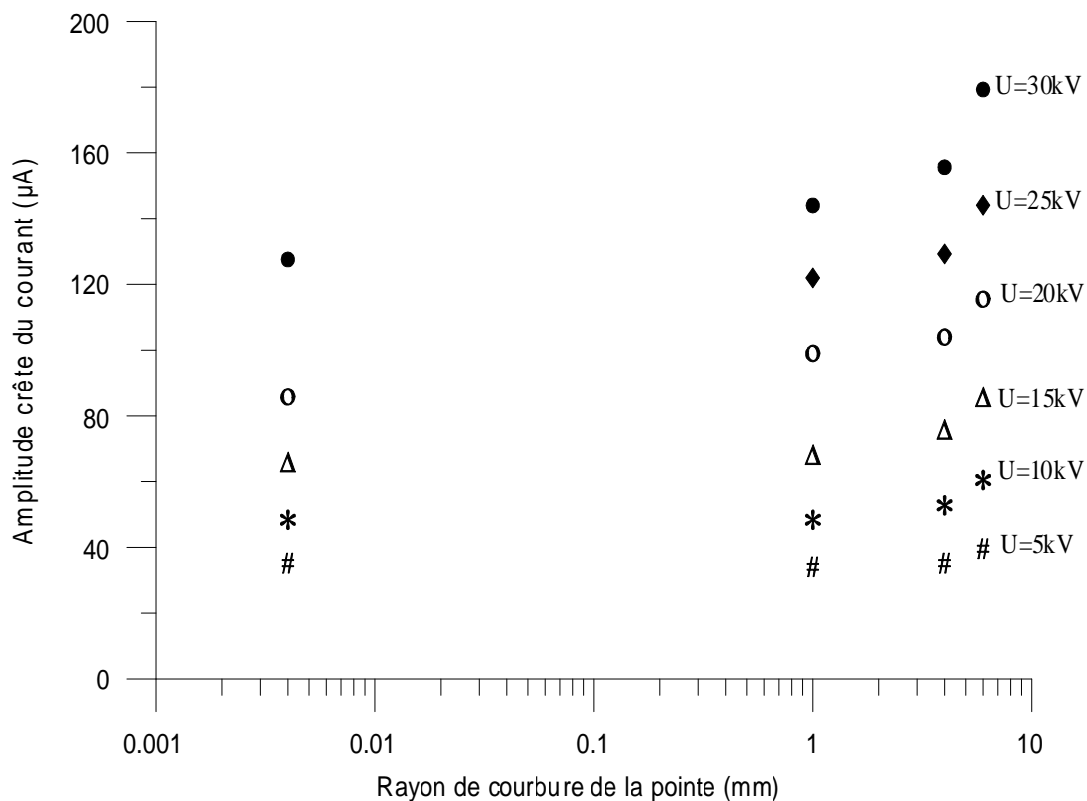


Figure III.32 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=12cm)

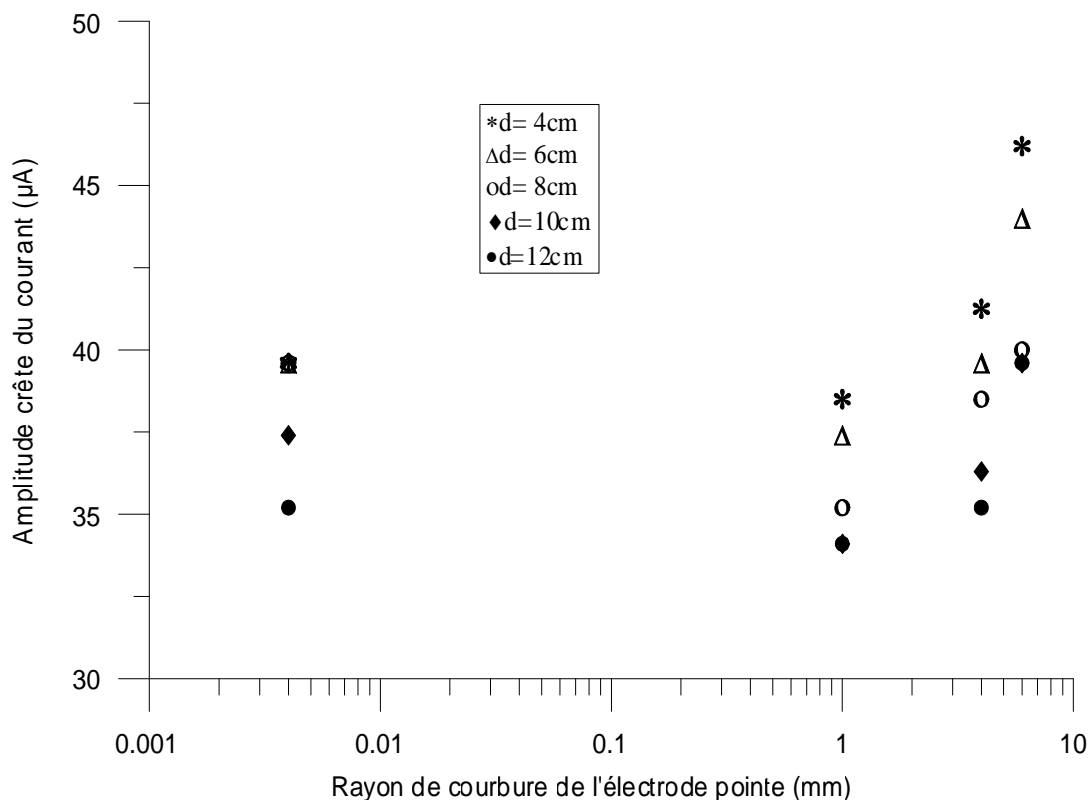


Figure III.33 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=5kV)

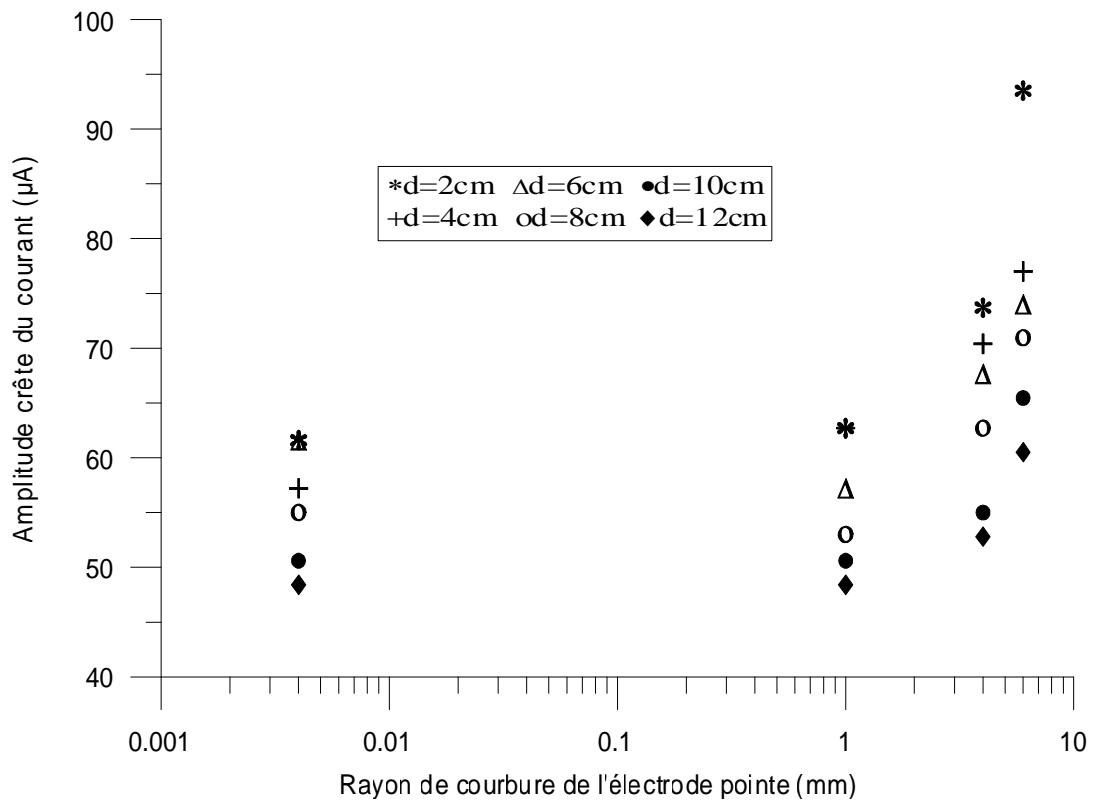


Figure III.34 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=10kV)

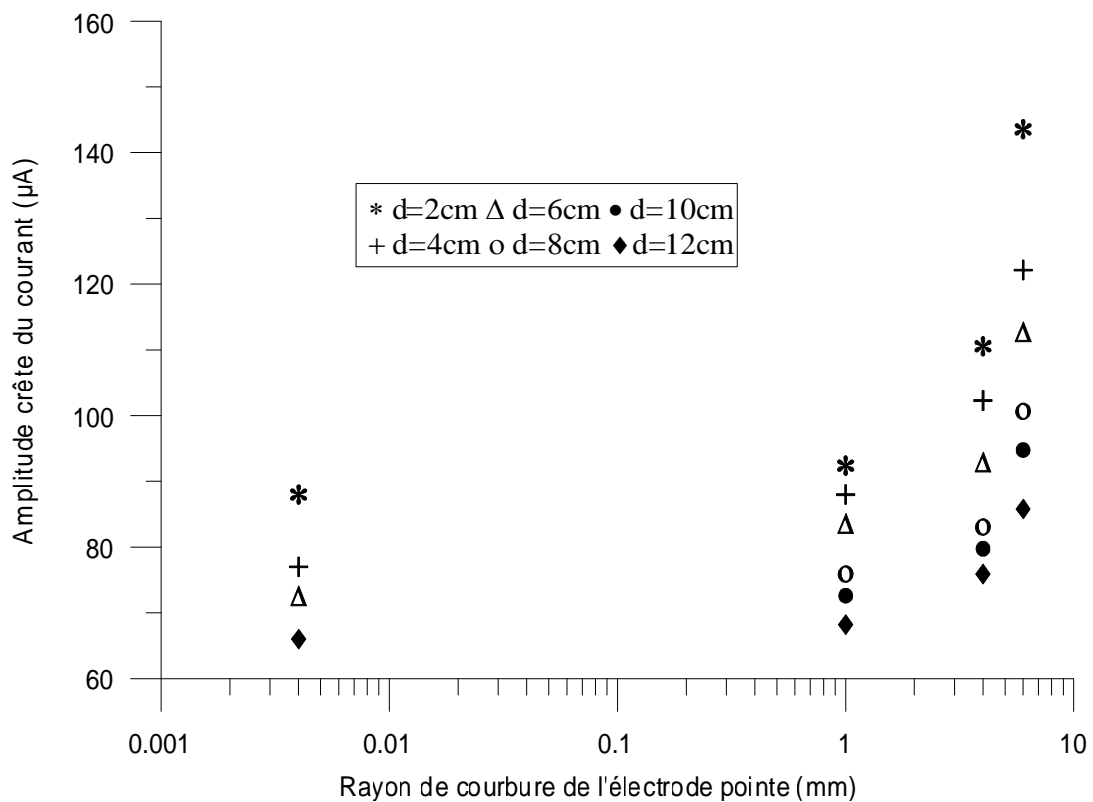


Figure III.35 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=15kV)

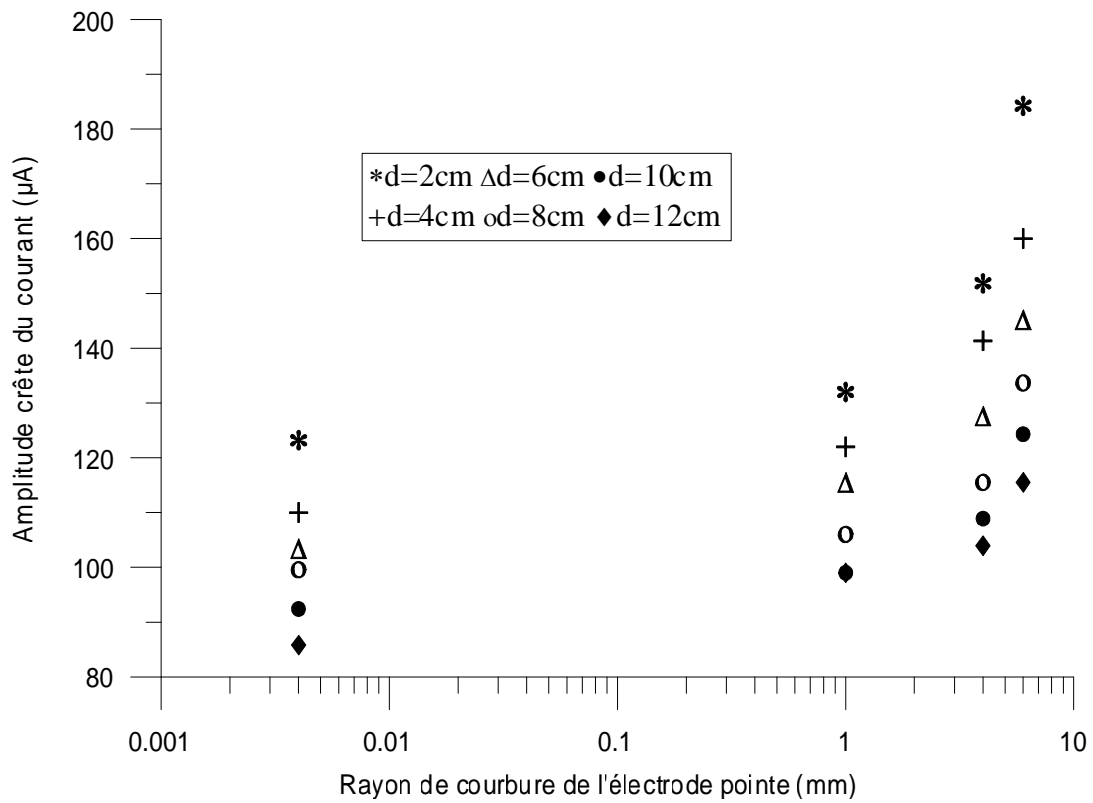


Figure III.36 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=20kV)

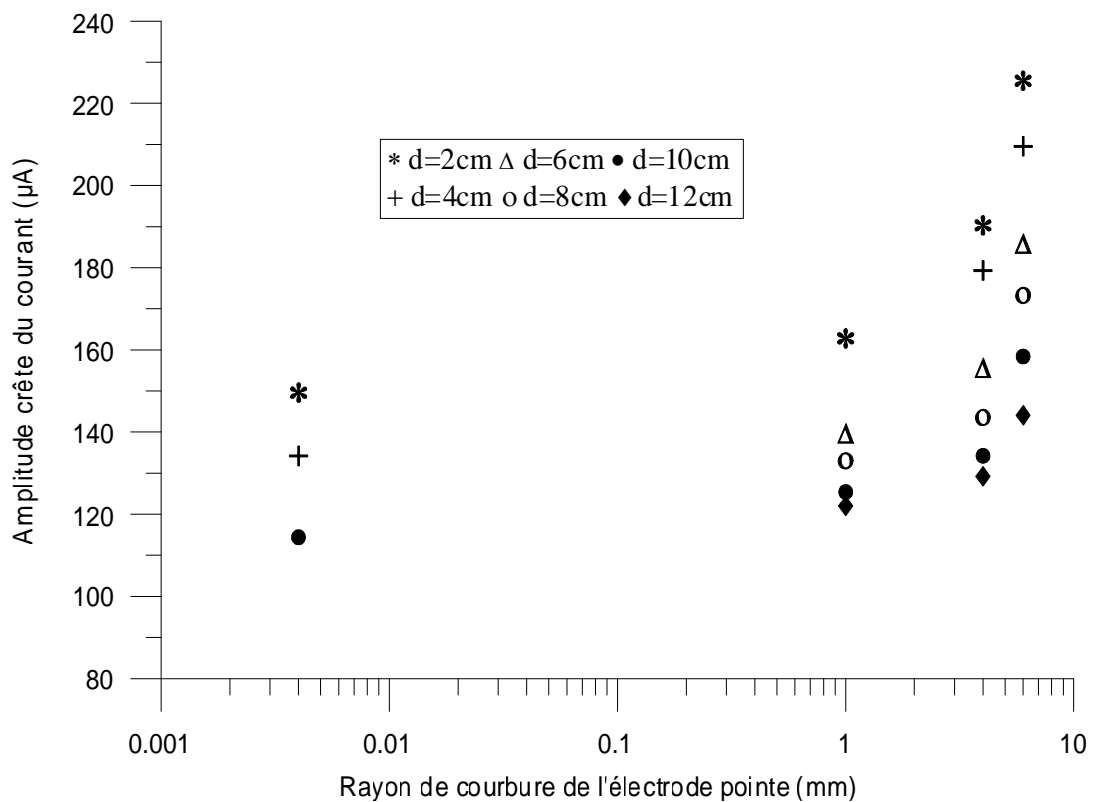


Figure III.37 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=25kV)

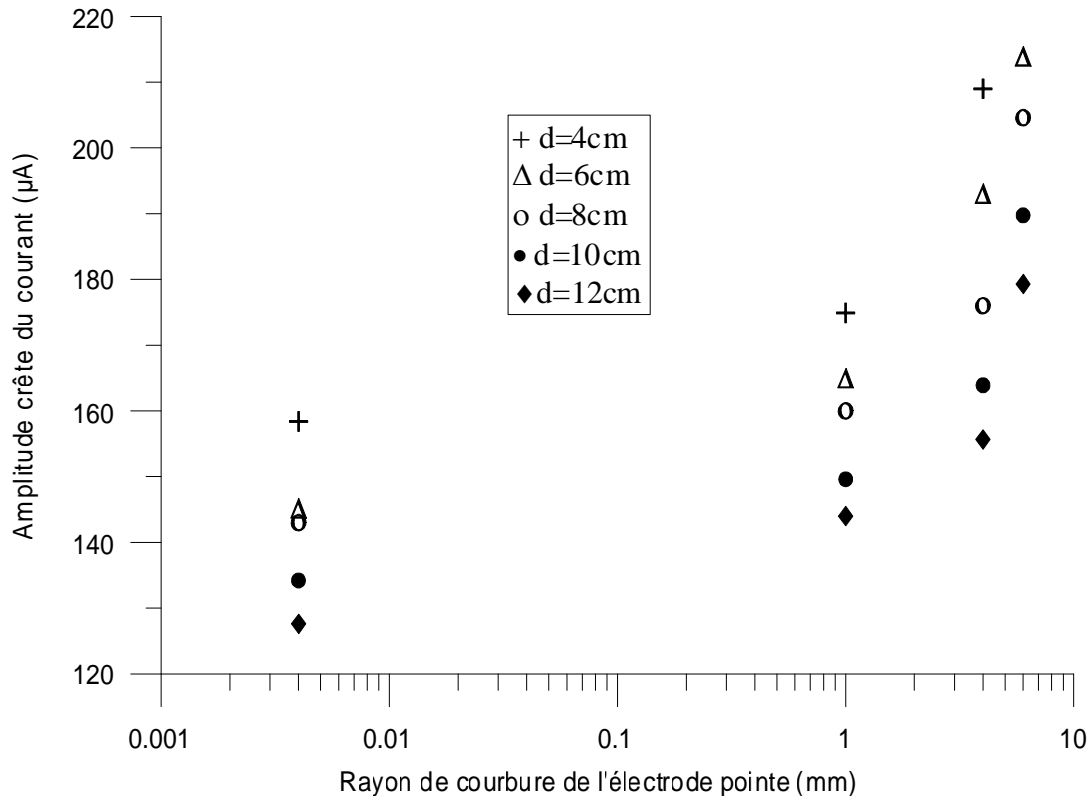


Figure III.38 : Variation du courant en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes ($U=30\text{kV}$)

III.3.5. Impédance équivalente

L'impédance équivalente vue des électrodes représente le rapport entre la tension appliquée et le courant circulant.

III.3.5.1. Influence de la tension appliquée

Pour une configuration donnée, l'influence de la tension appliquée sur l'impédance équivalente vue des électrodes est observée fortement pour des tensions comprises entre 5 kV et 10 kV (Figures III.39 à III.42). En dehors de l'intervalle mentionné précédemment, l'impédance équivalente reste peu sensible à l'accroissement de la tension appliquée.

L'augmentation de l'impédance équivalente dans l'intervalle [5 kV 10 kV] confirme le changement d'état du liquide. Il s'agit de l'apparition de bulles gazeuses au niveau de l'huile à proximité de l'électrode pointe selon certains auteurs [14, 15, 44-46]. Ces bulles diminueront la capacité du système [12, 45], d'où l'augmentation de l'impédance équivalente.

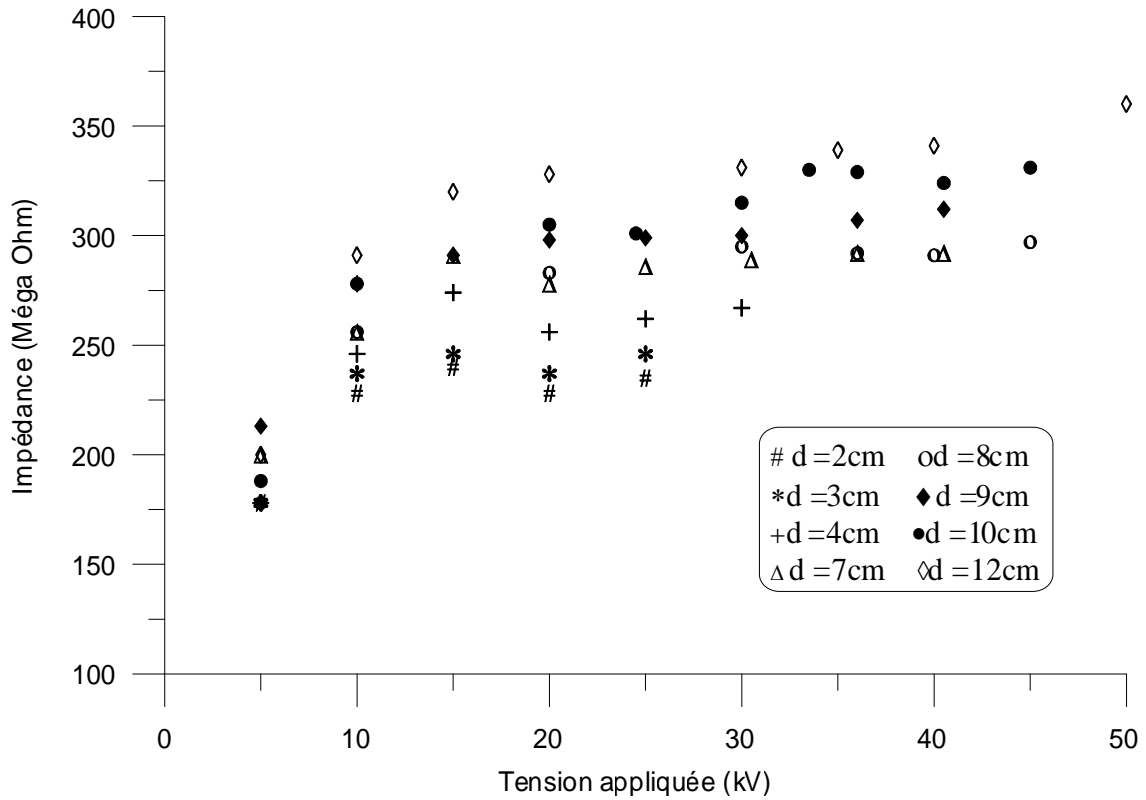


Figure III.39 : Variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=4\mu\text{m}$)

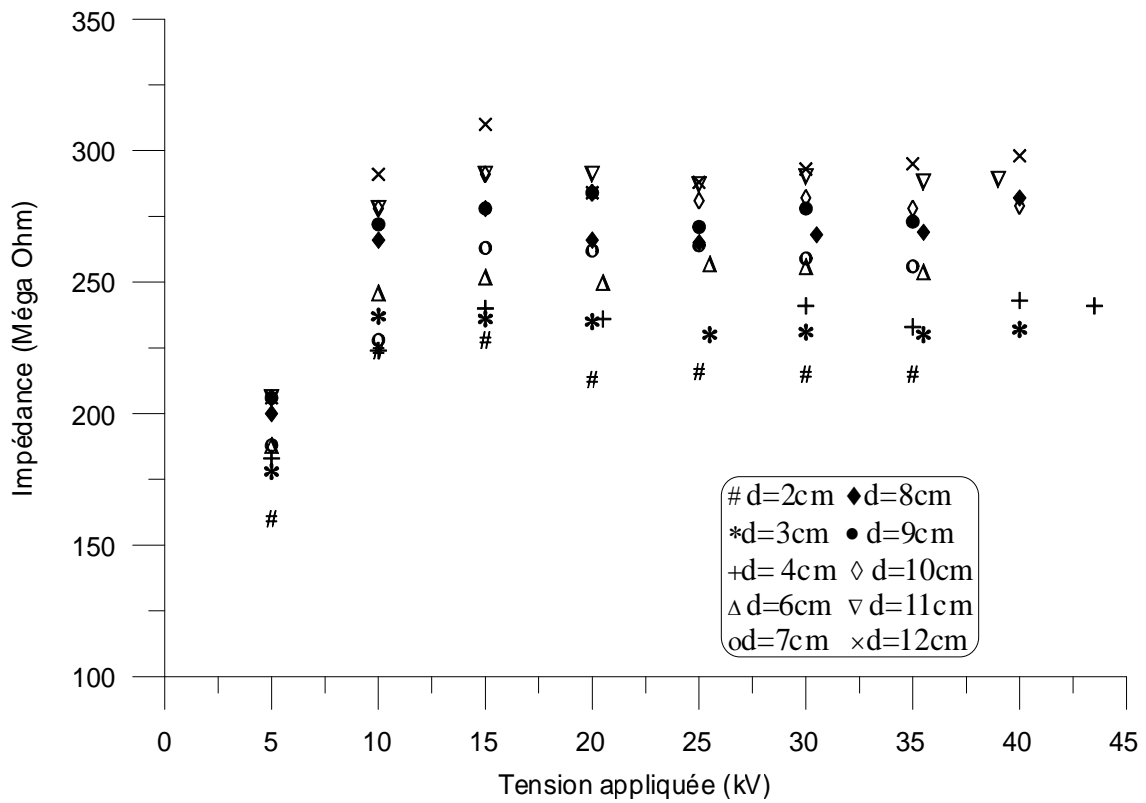


Figure III.40 : Variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=1\text{mm}$)

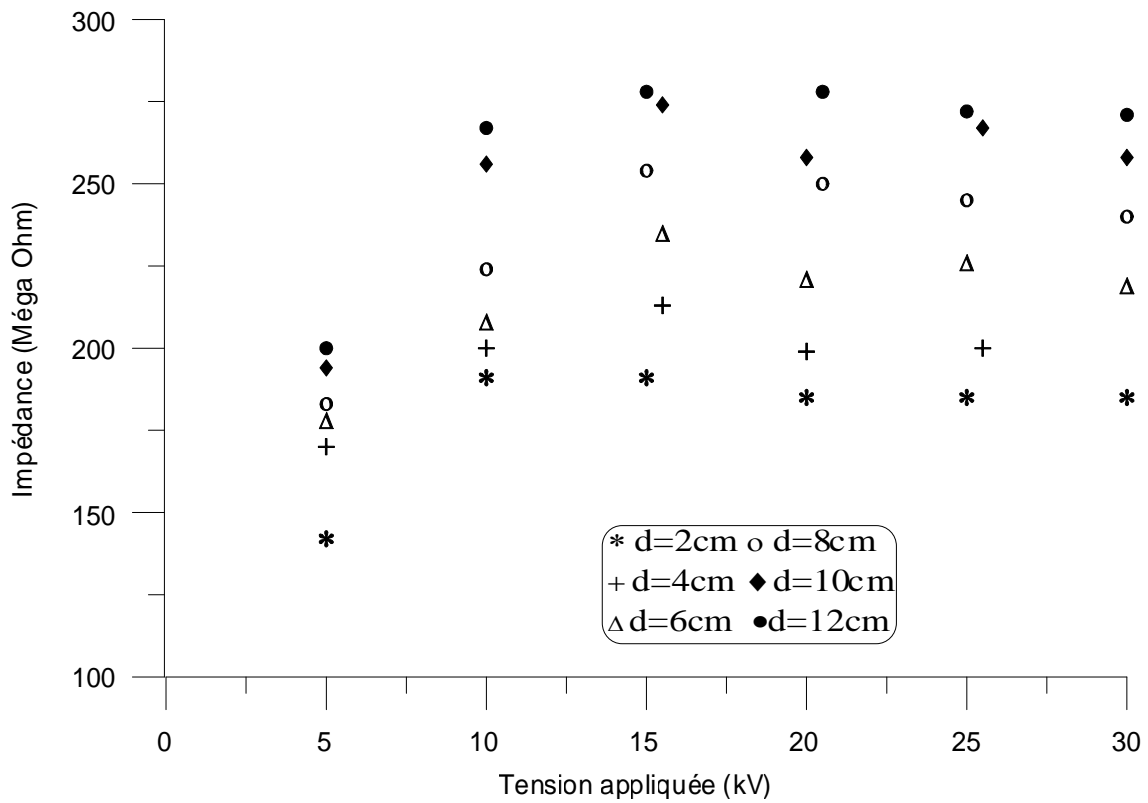


Figure III.41 : Variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p = 4\text{mm}$)

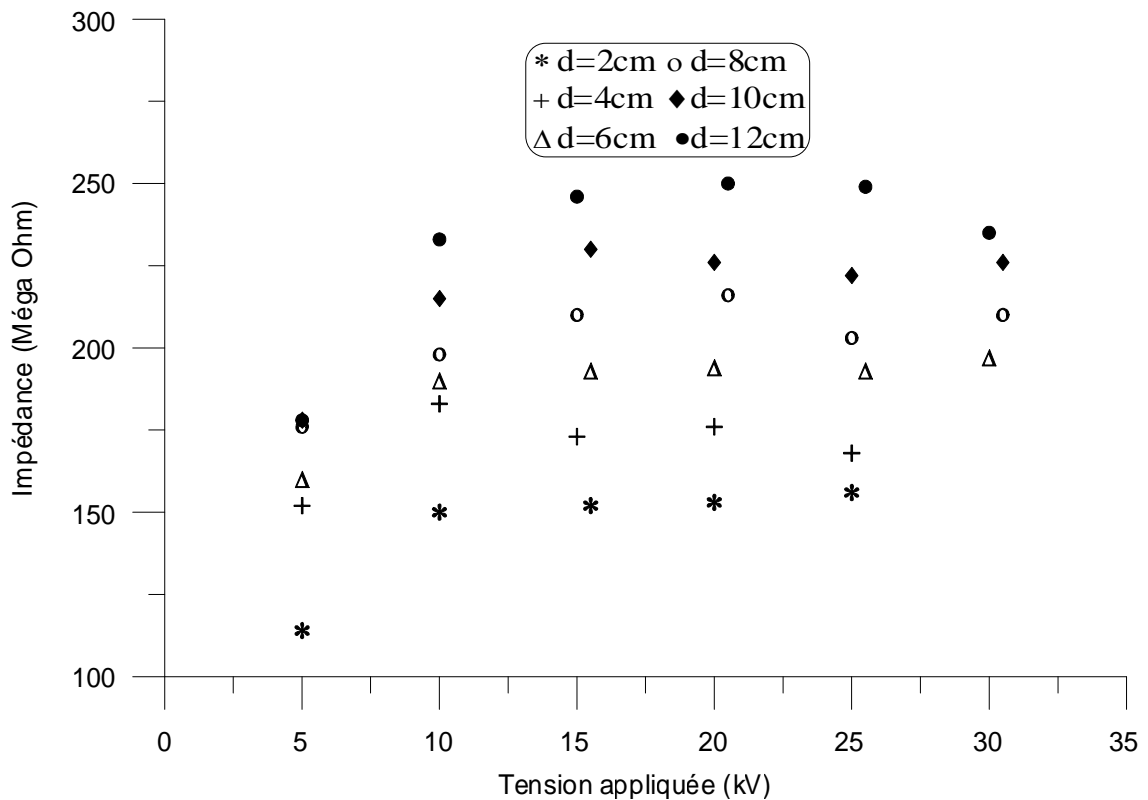


Figure III.42 : Variation de l'impédance en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p = 6\text{mm}$)

III.3.5.2. Influence de la distance inter-électrodes

Nous constatons d'après les figures (III.43 à III.46), que l'impédance vue des électrodes augmente légèrement avec la distance inter-électrodes. Cette augmentation est plus significative, pour les petits intervalles pointe-plan.

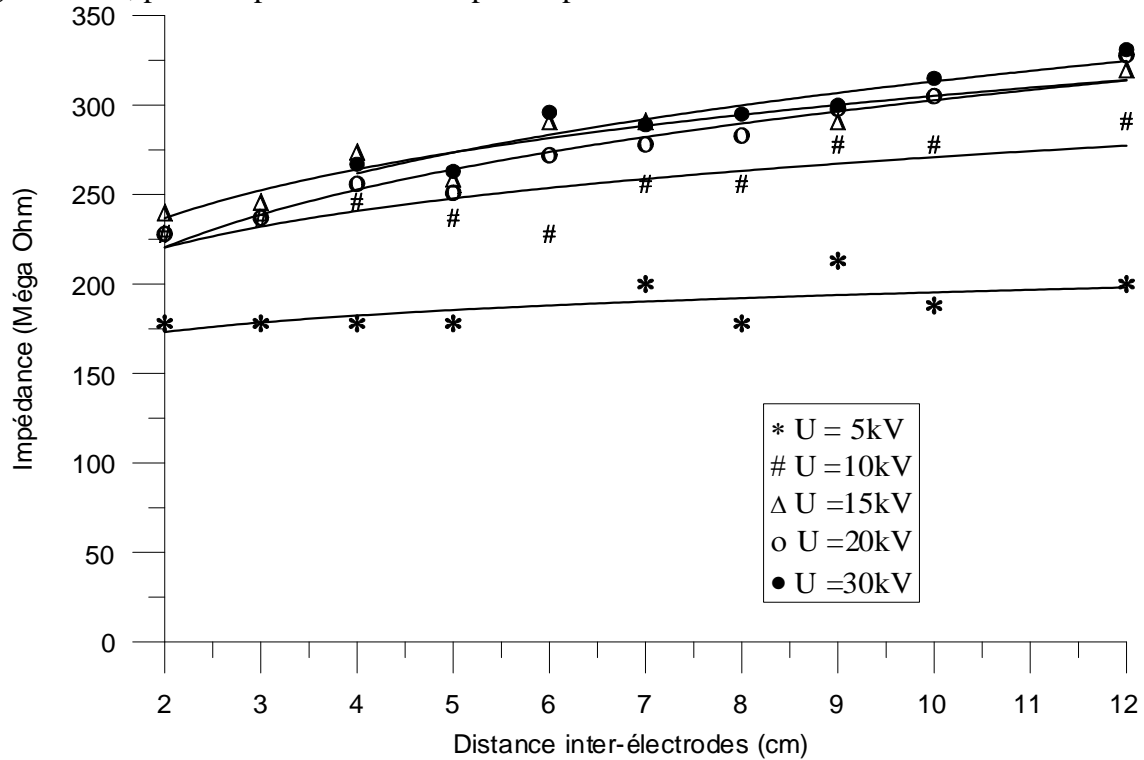


Figure III.43 : Variation de l'impédance en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p = 4 \mu\text{m}$)

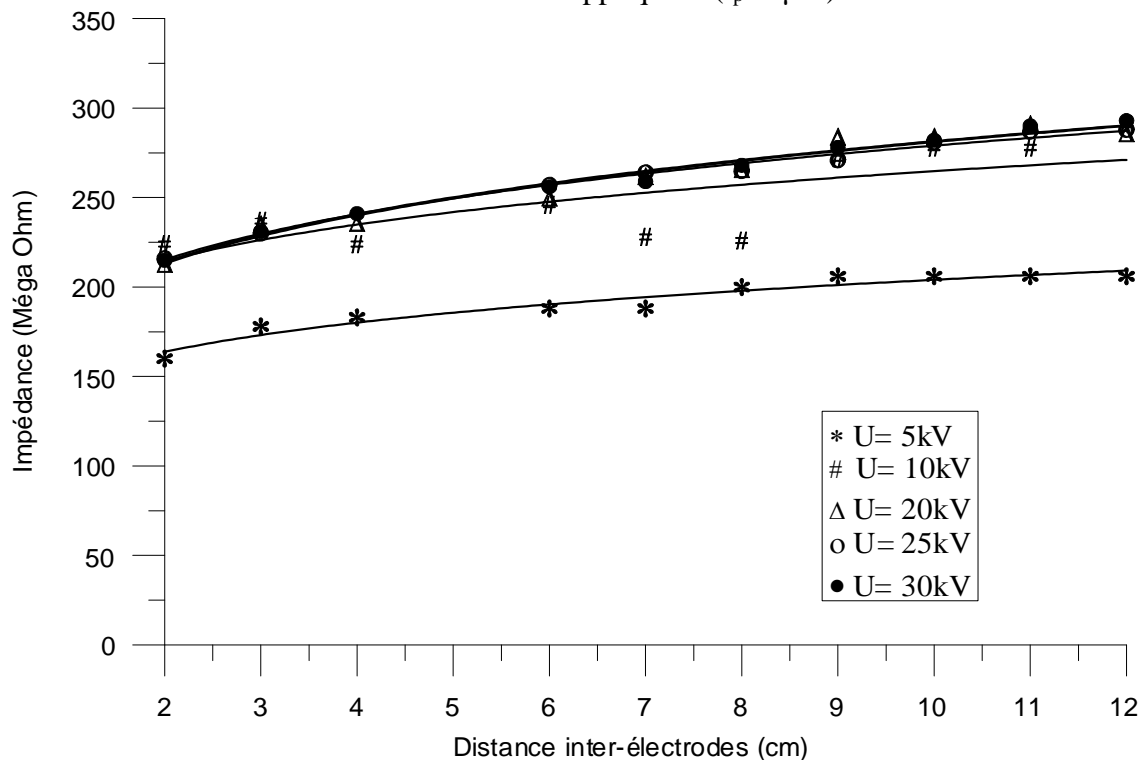


Figure III.44 : Variation de l'impédance en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p = 1 \text{ mm}$)

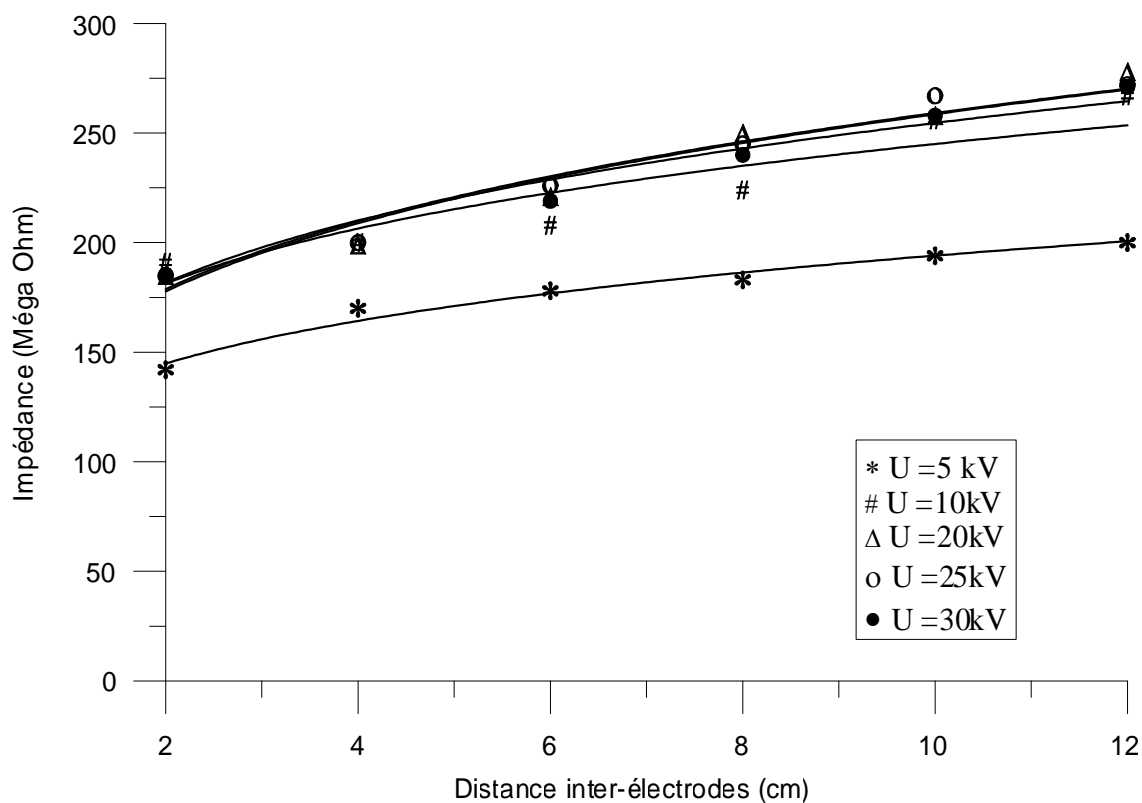


Figure III.45 : Variation de l'impédance en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p = 4\text{mm}$)

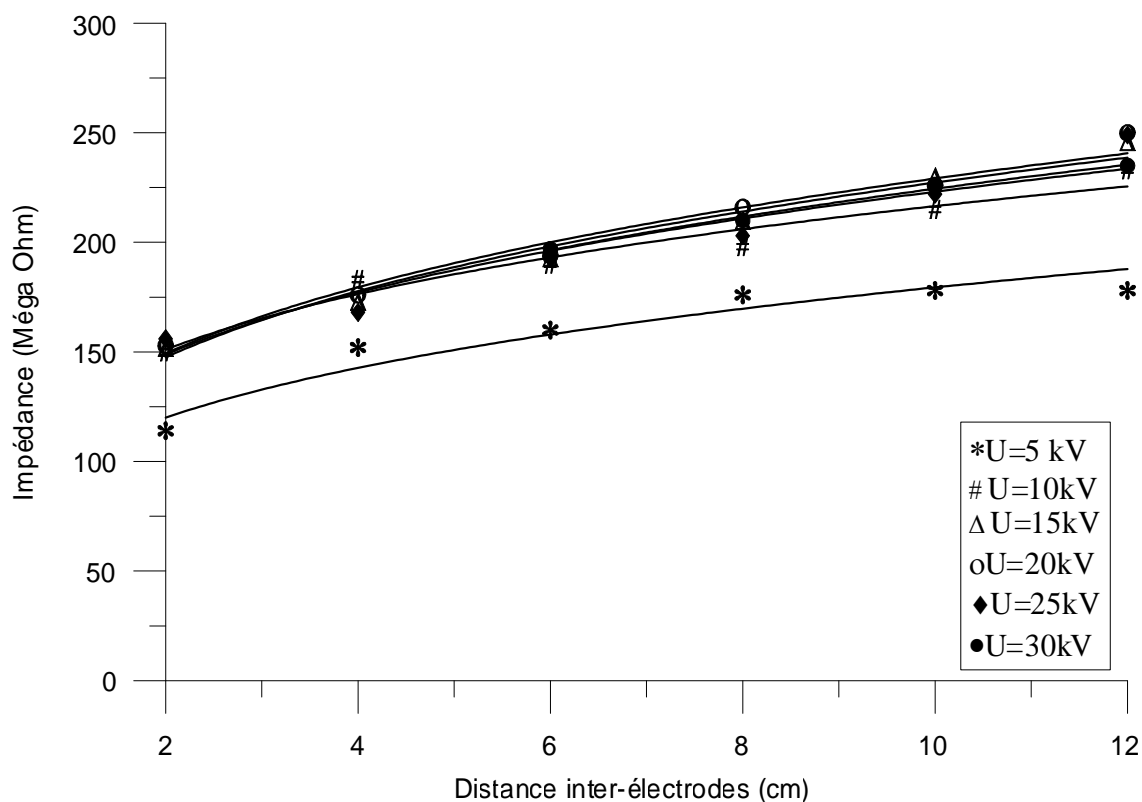


Figure III.46 : Variation de l'impédance en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p = 6\text{mm}$)

III.3.5.3. Influence du rayon de courbure de la pointe

Les caractéristiques donnant la variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de la pointe (Figures III.47 à III.58), montrent que cette impédance est d'autant plus faible que le rayon de courbure de l'électrode haute tension est plus important, la diminution de l'impédance s'accroît pour les grands rayons. Ceci est dû probablement à l'augmentation de la quantité de charge injectée de la pointe, qui sert à modifier l'état de l'huile.

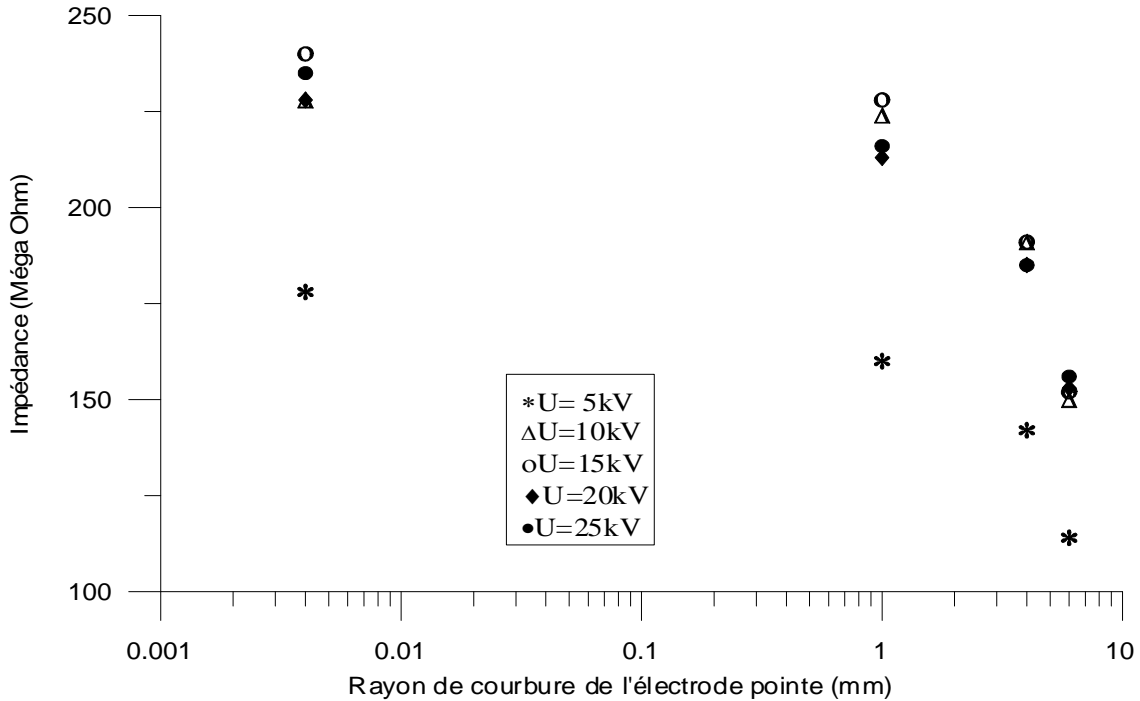


Figure III.47 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=2cm)

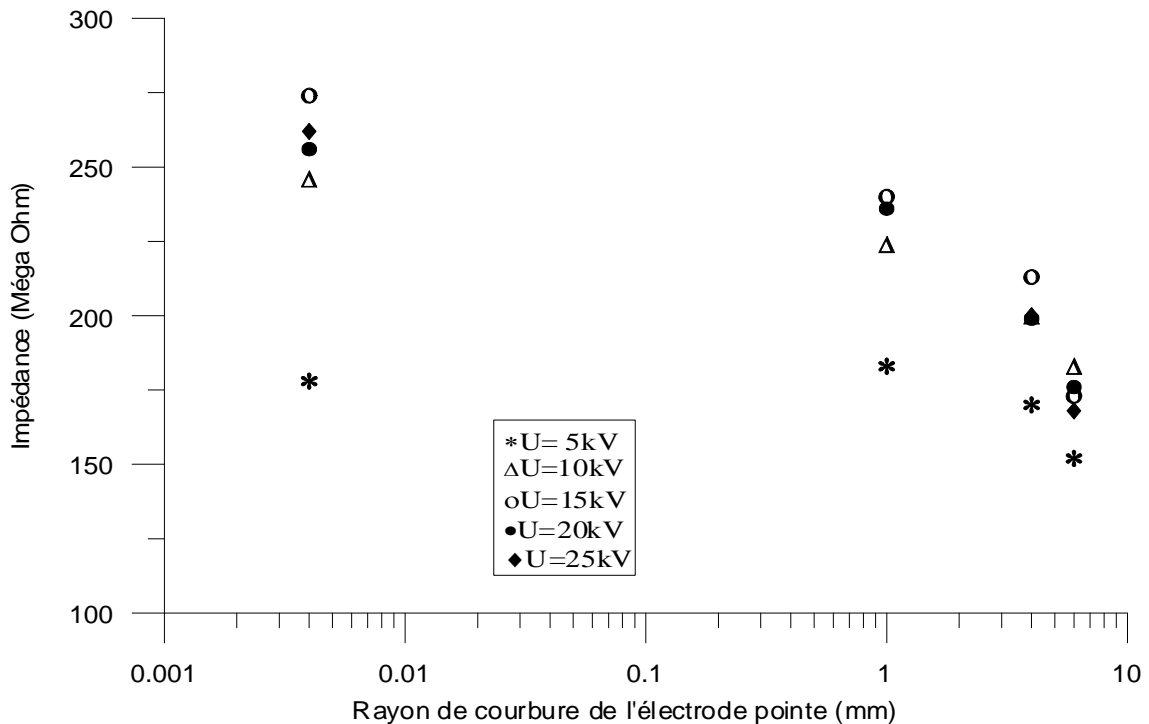


Figure III.48 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=4cm)

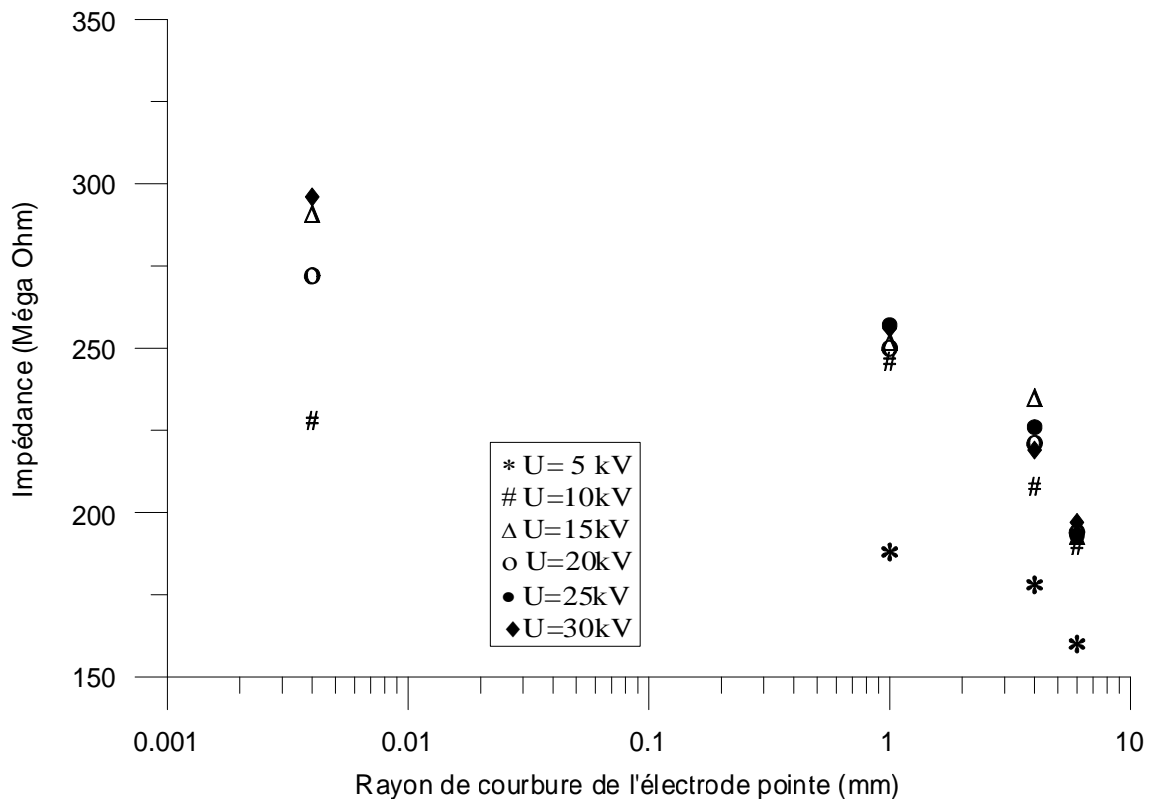


Figure III.49 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=6cm)

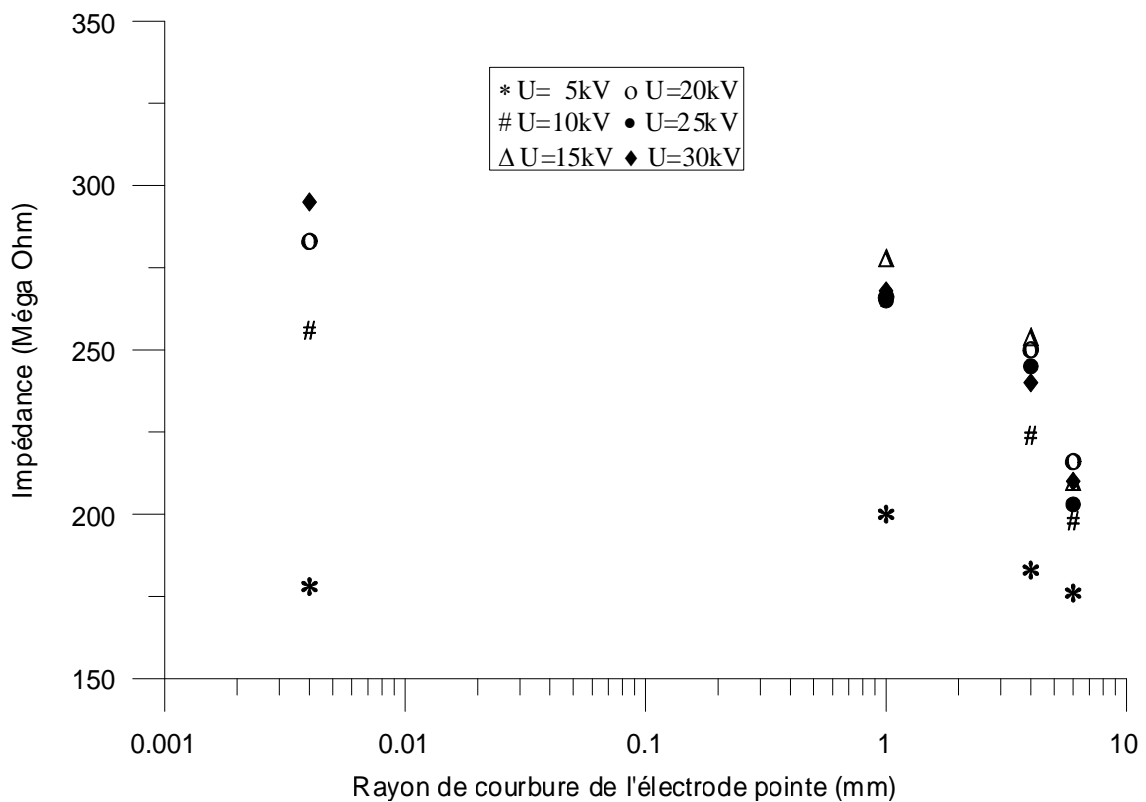


Figure III.50 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=8cm)

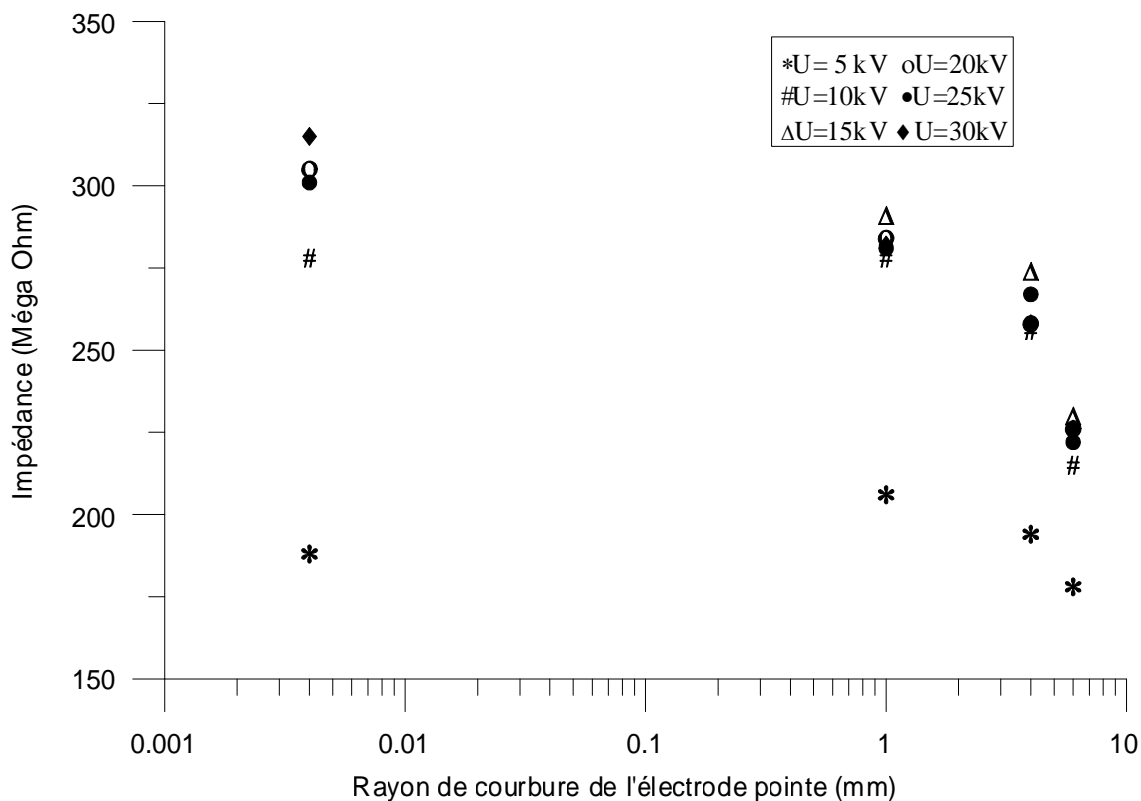


Figure III.51 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=10cm)

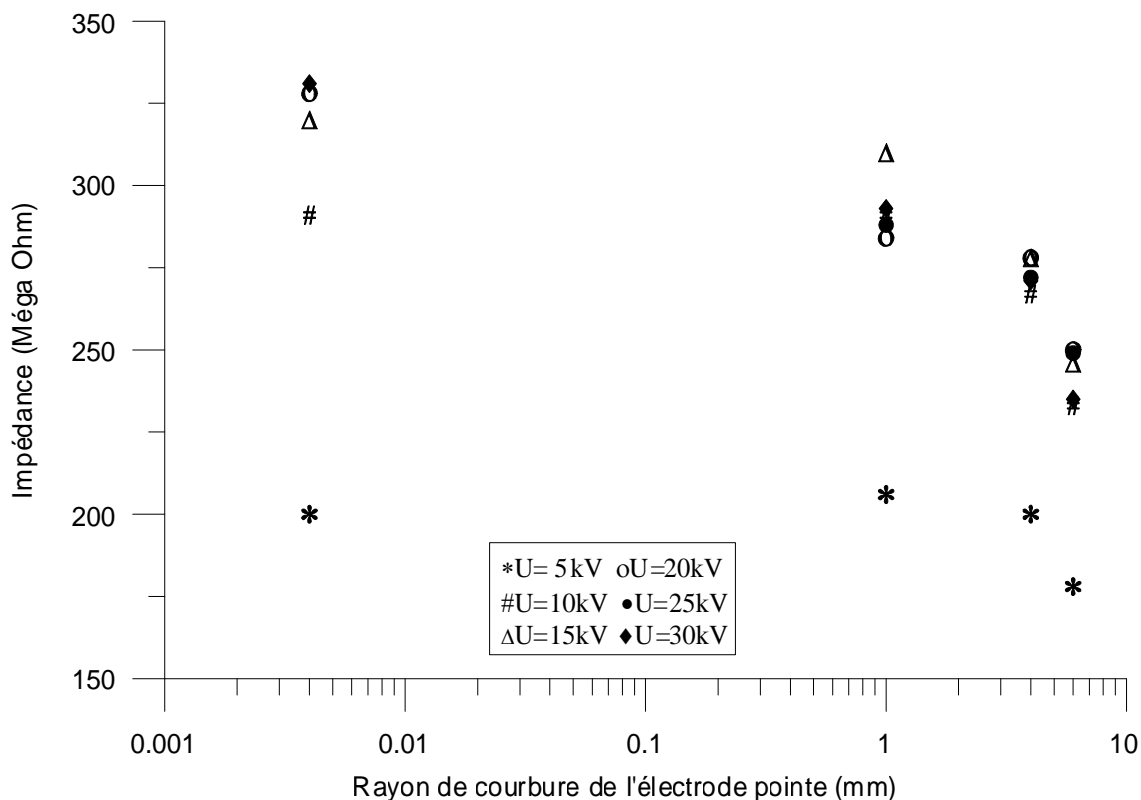


Figure III.52 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=12cm)

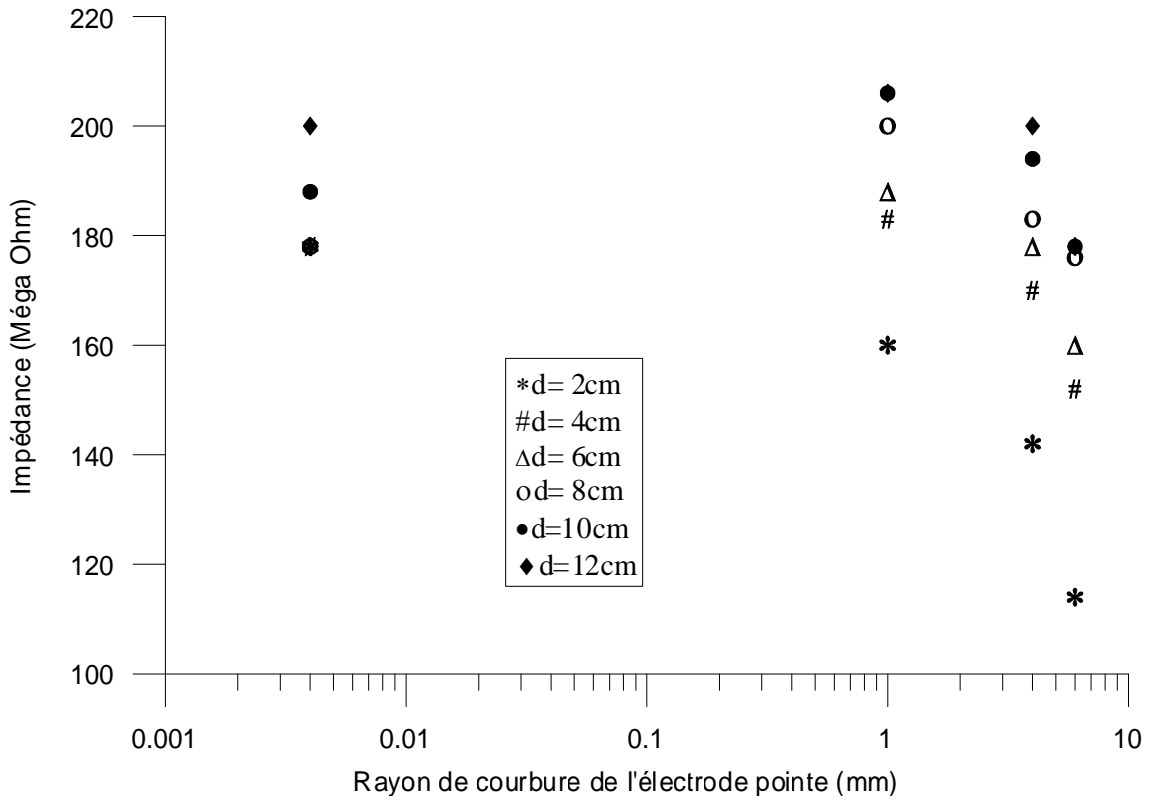


Figure III.53 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=5kV)

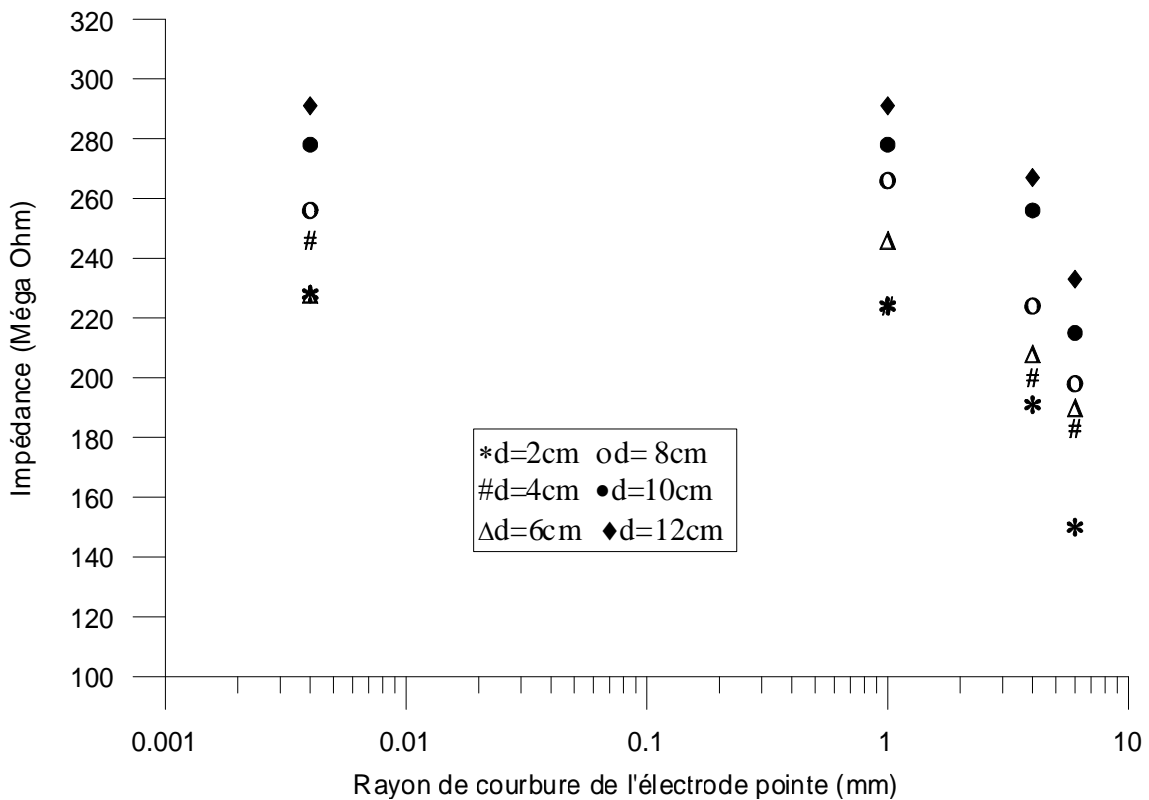


Figure III.54 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=10kV)

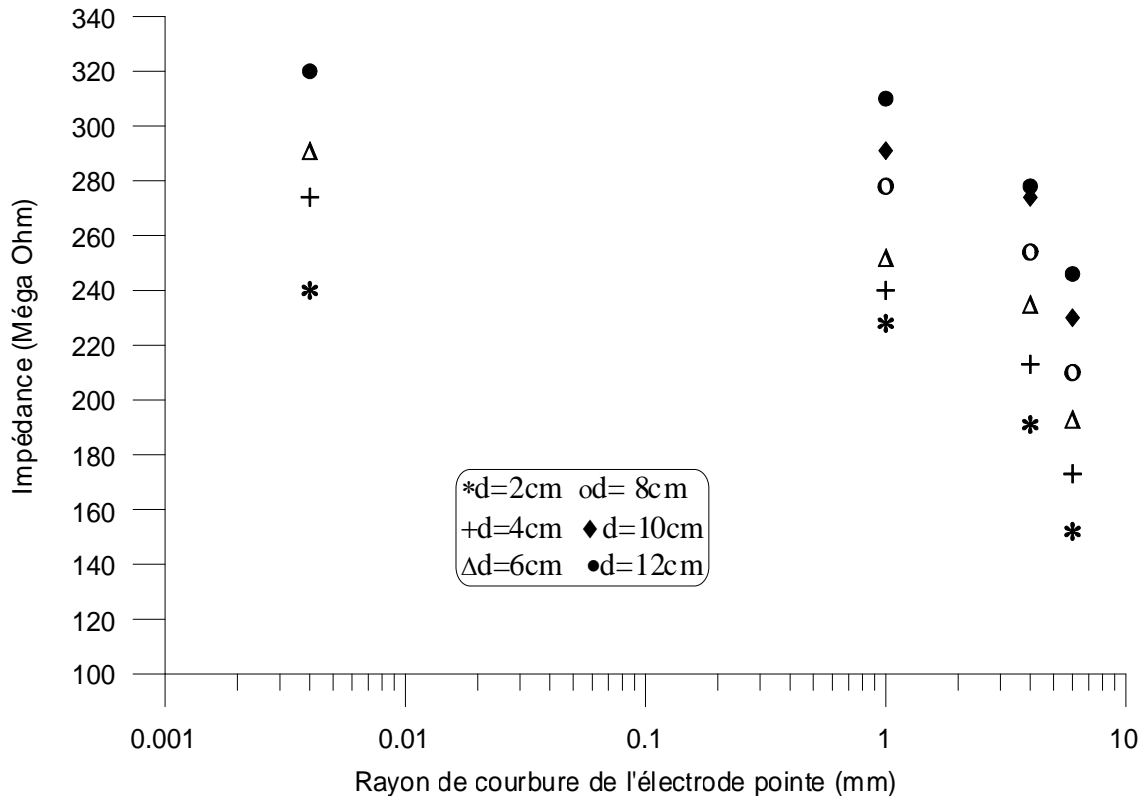


Figure III.55 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=15kV)

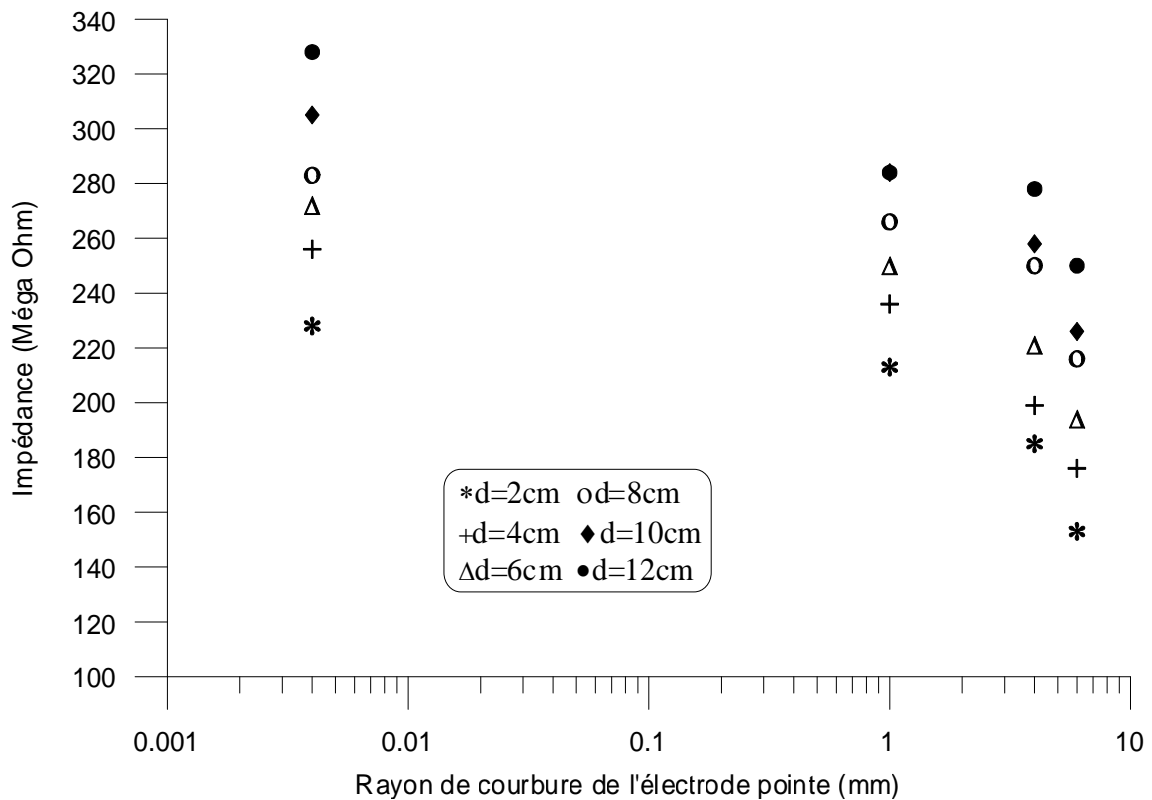


Figure III.56 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=20kV)

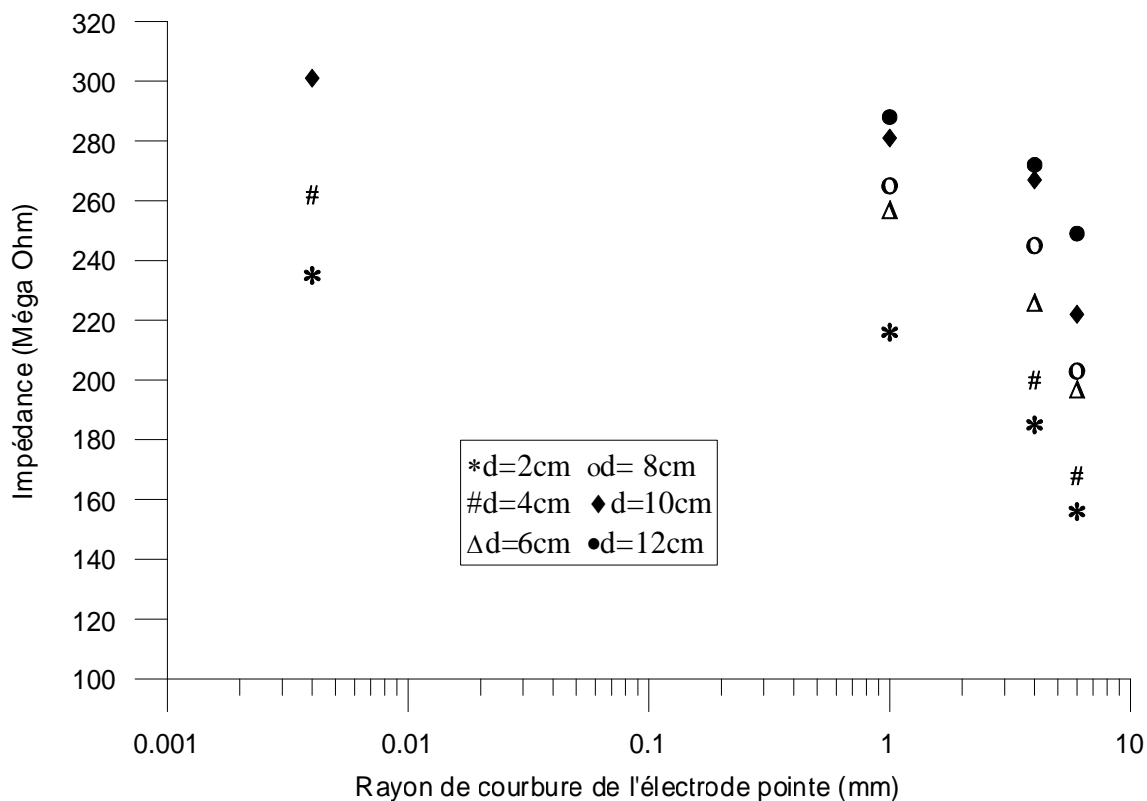


Figure III.57 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=25kV)

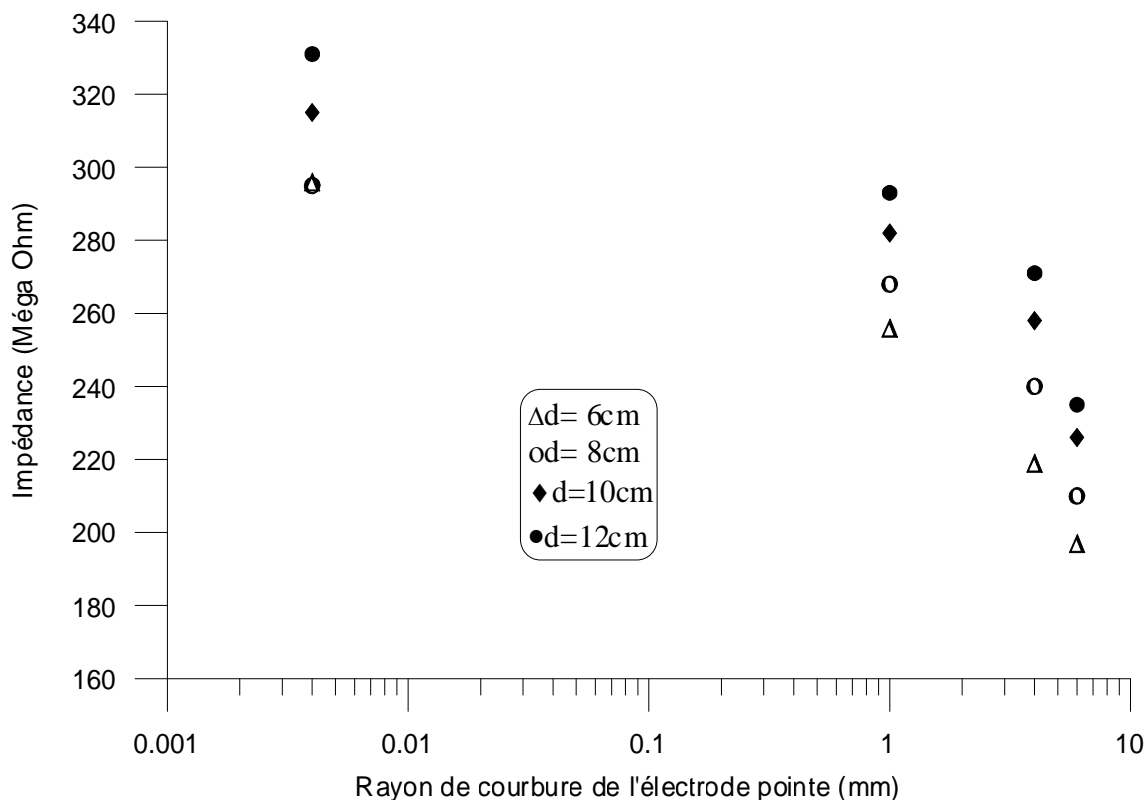


Figure III.58 : Variation de l'impédance en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=30kV)

III.3.6. Charge électrique

Le signal de la charge électrique obtenu est également périodique. Ce signal présente des déformations dans les deux alternances (positive et négative). Ces déformations croissent avec la tension appliquée (Figures IV.59 à III.62) et diminuent avec l'accroissement de la distance inter-électrodes (Figures III.63 à III.66).

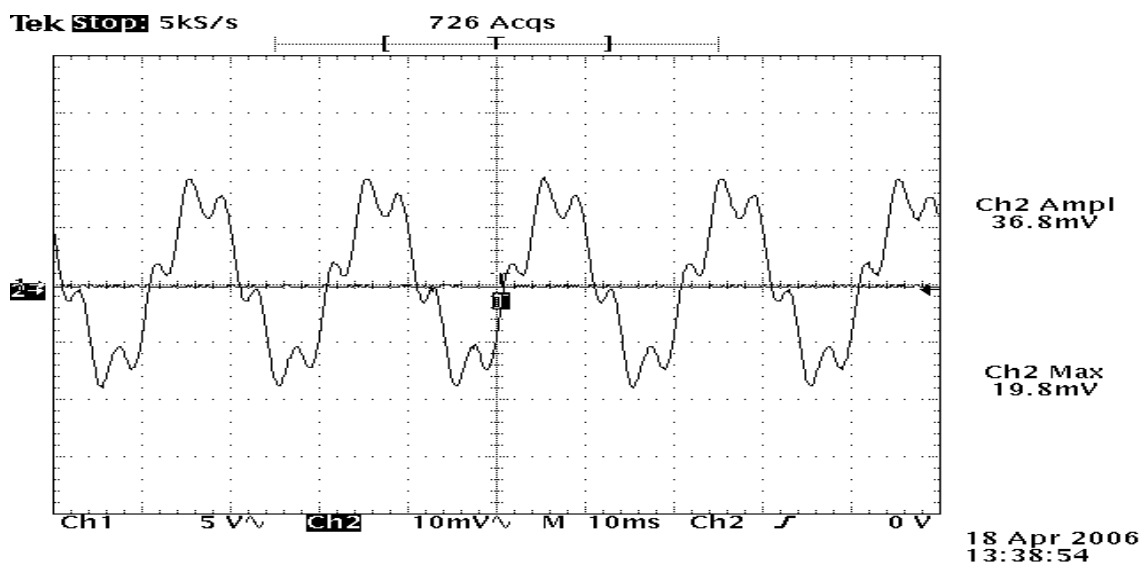


Figure III.59 : Forme de la charge, pour une tension appliquée de 5 kV ($d=12\text{cm}$)

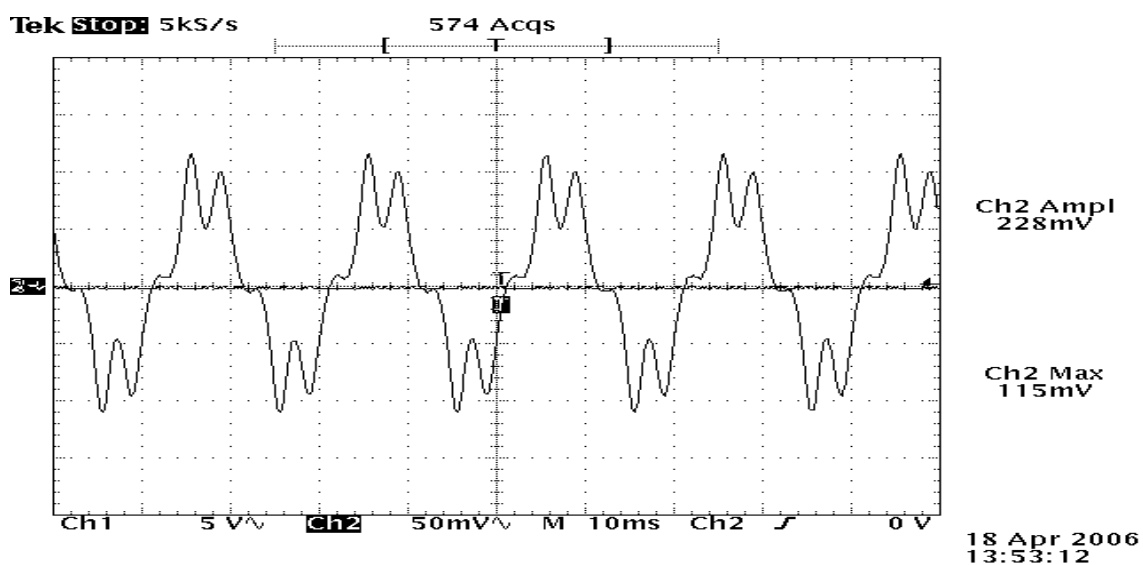


Figure III.60 : Forme de la charge, pour une tension appliquée de 30 kV ($d=12\text{cm}$)

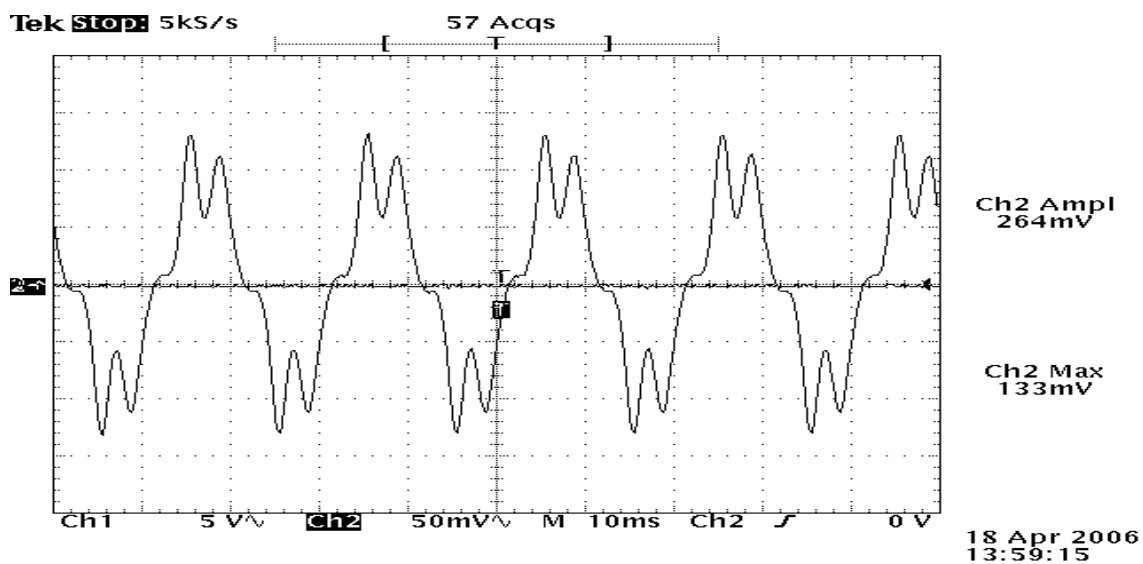


Figure III.61 : Forme de la charge, pour une tension appliquée de 35 kV ($d=12\text{cm}$)

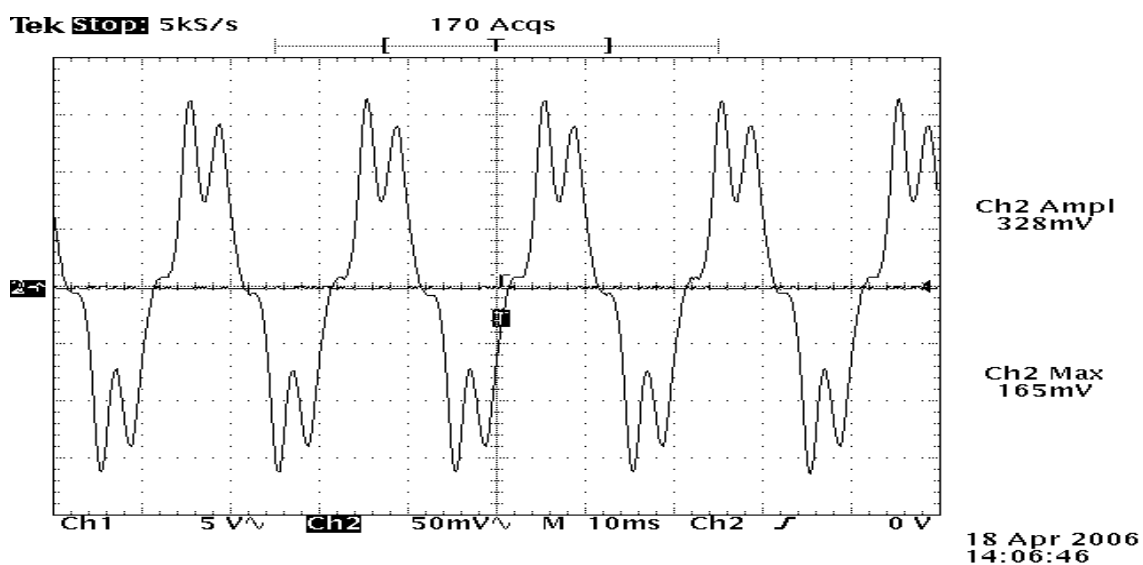


Figure III.62 : Forme de la charge, pour une tension appliquée de 45 kV ($d=12\text{cm}$)

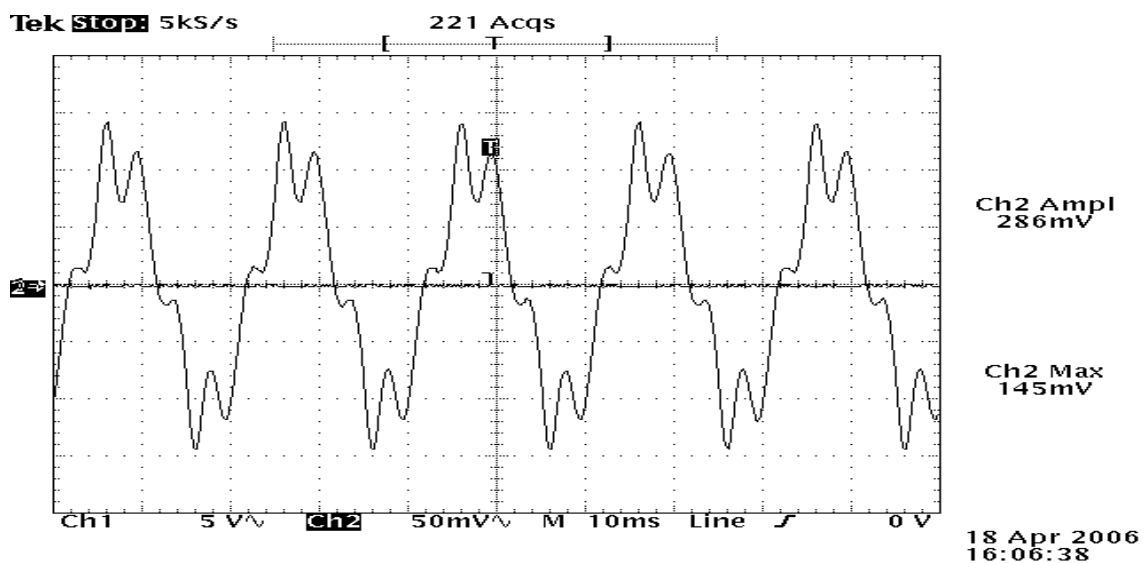


Figure III.63 : Forme de la charge, pour une distance inter-électrodes de 4cm ($U=30\text{kV}$)

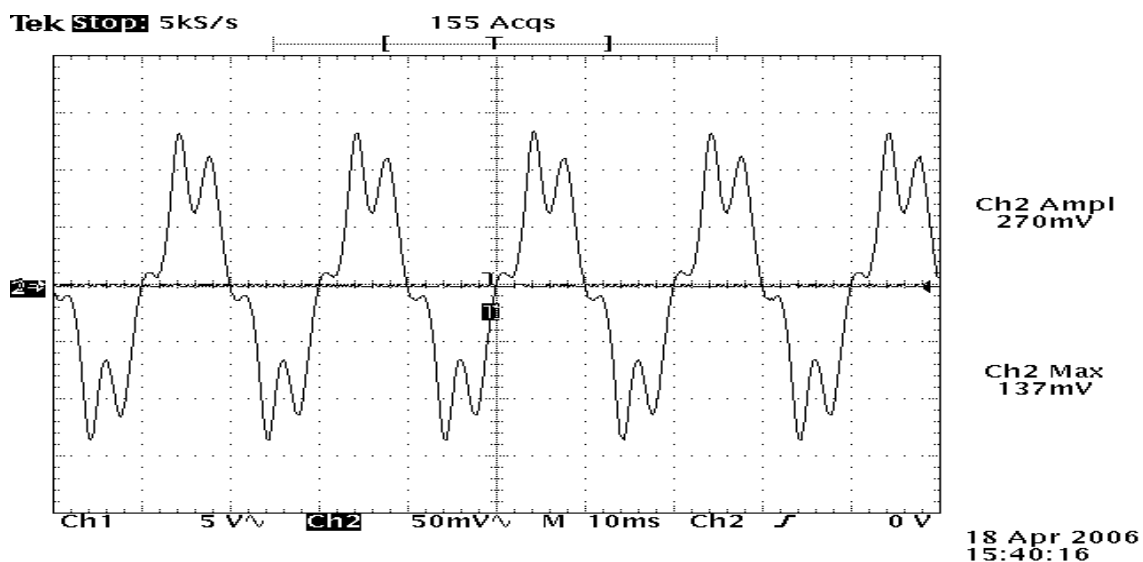


Figure III.64 : Forme de la charge, pour une distance inter-électrodes de 6cm ($U=30kV$)

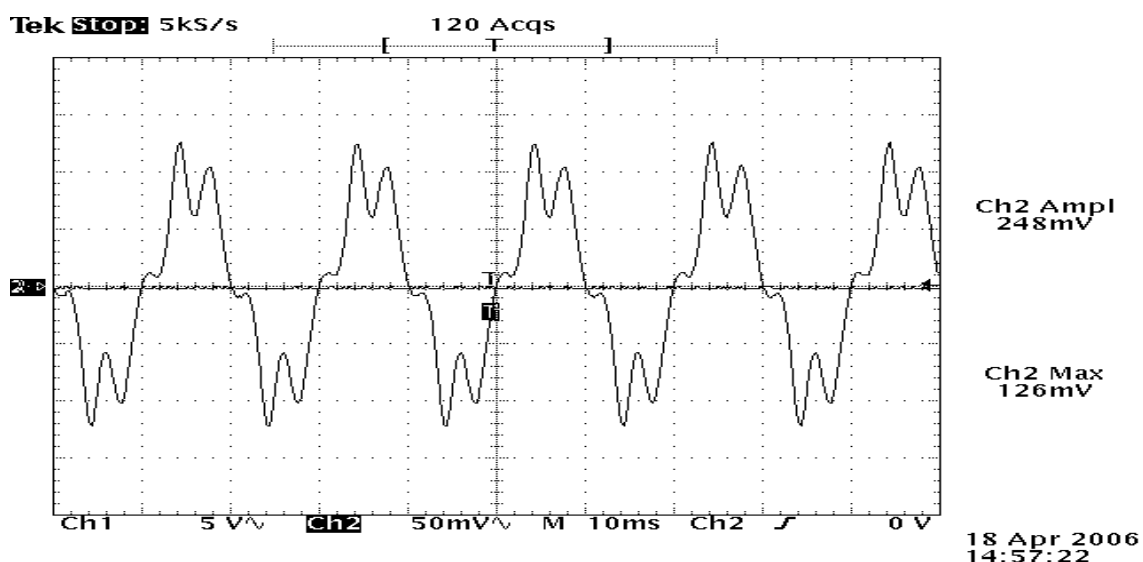


Figure III.65 : Forme de la charge, pour une distance inter-électrodes de 8cm ($U=30kV$)

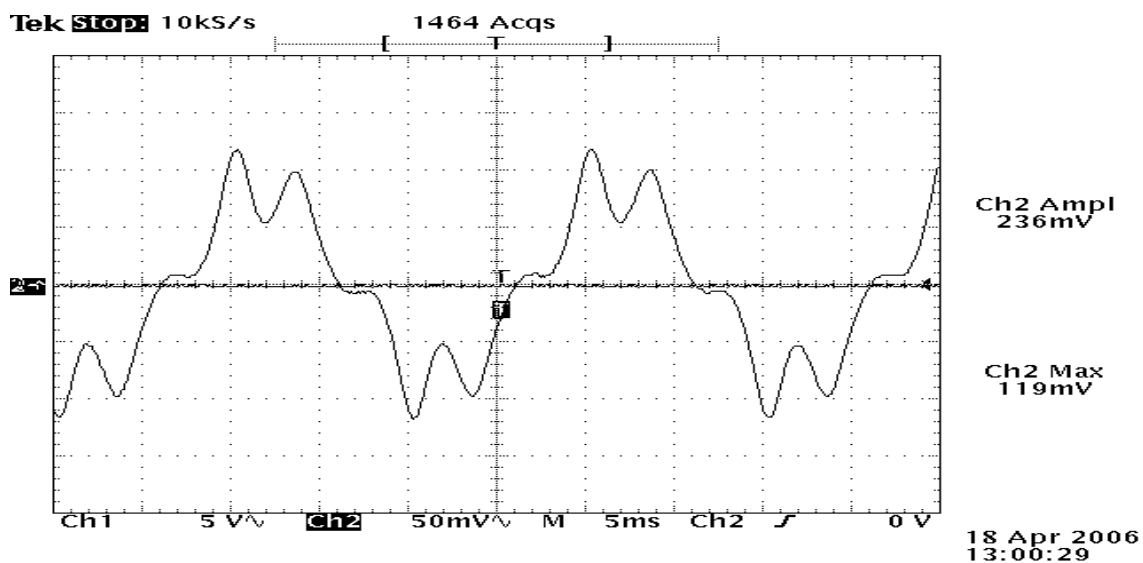


Figure III.66 : Forme de la charge, pour une distance inter-électrodes de 10cm ($U=30kV$)

III.3.6.1. Influence de la tension appliquée

La connaissance de la charge est d'une importance capitale. Elle nous informe sur le niveau énergétique mis en jeu lors de l'application de la tension. Nous constatons d'après les figures (III.67 à III.70), l'augmentation de la charge électrique en fonction de la tension appliquée. Le même effet a été également retrouvé dans l'huile minérale [6, 12], le tetraester et le toluène pour les streamers positifs [6], sous tension alternative. L'augmentation de la charge totale pourrait être la conséquence de l'accroissement de la taille des streamers. En effet, des travaux de recherche antérieurs ont mis en évidence l'effet de l'augmentation de la longueur finale des streamers en fonction de la tension appliquée [9-11, 13].

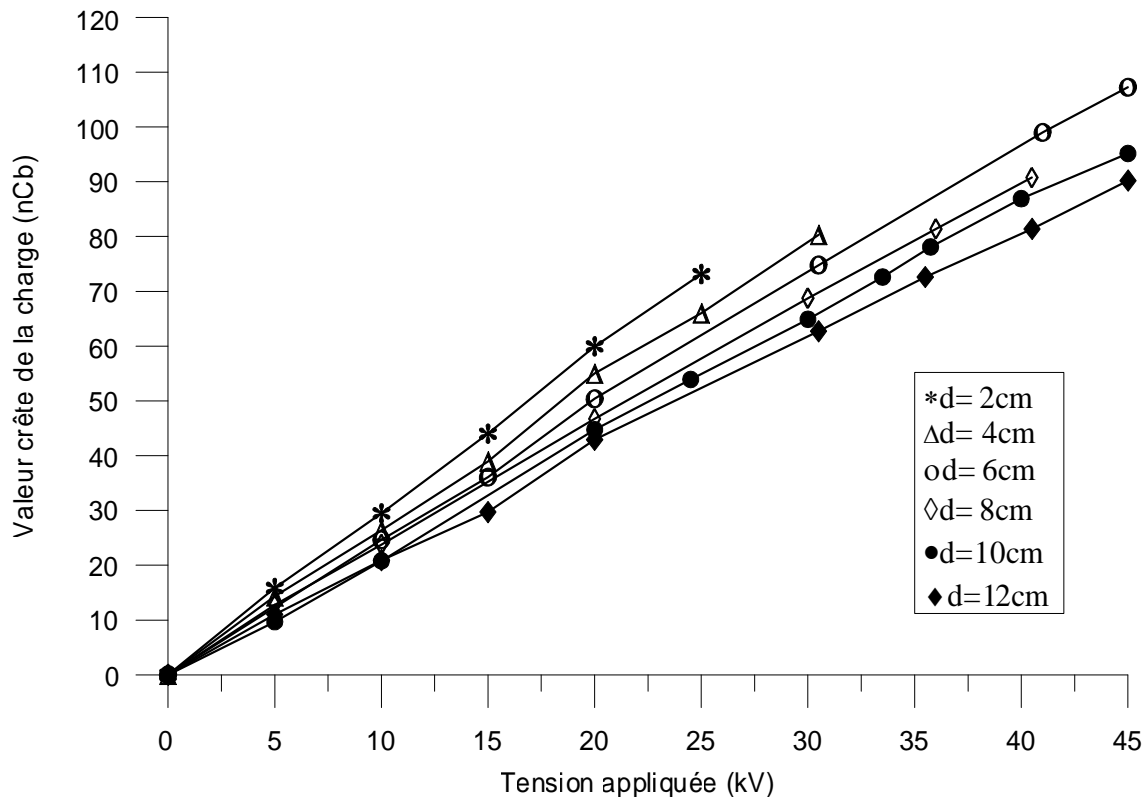


Figure III.67 : Variation de la charge en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=4\mu\text{m}$)

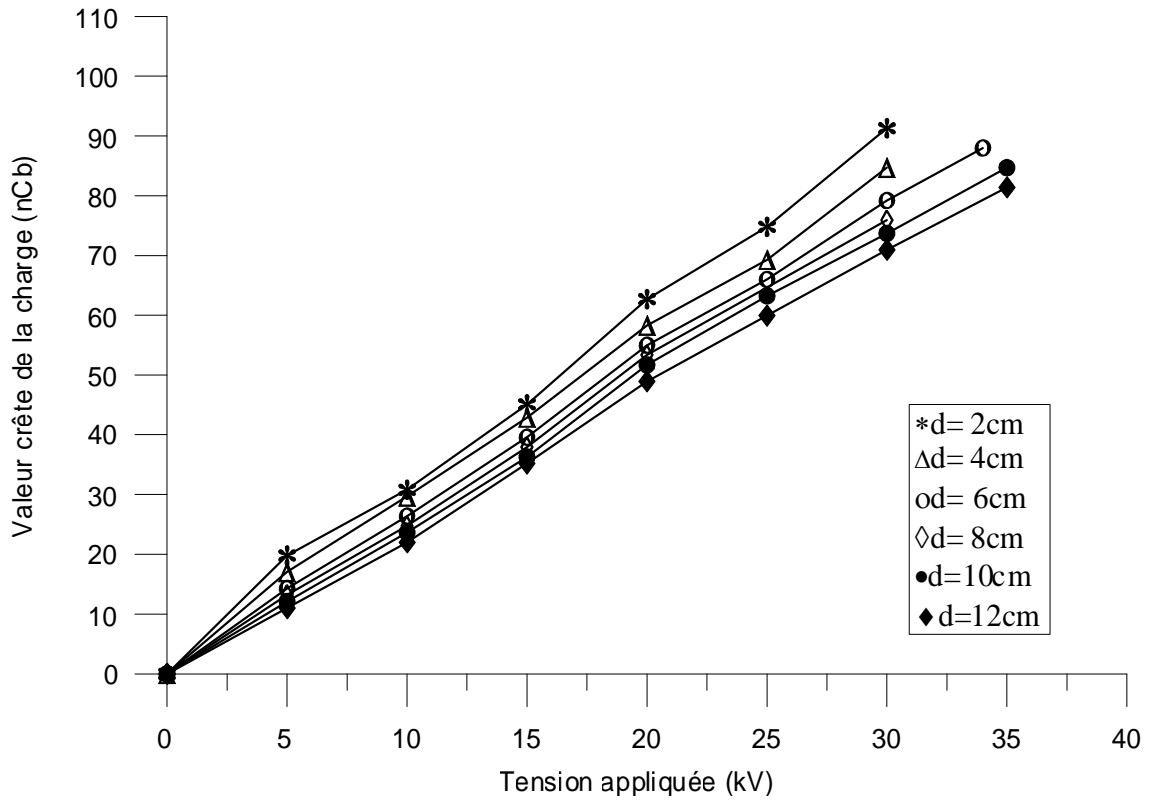


Figure III.68 : Variation de la charge en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=1\text{mm}$)

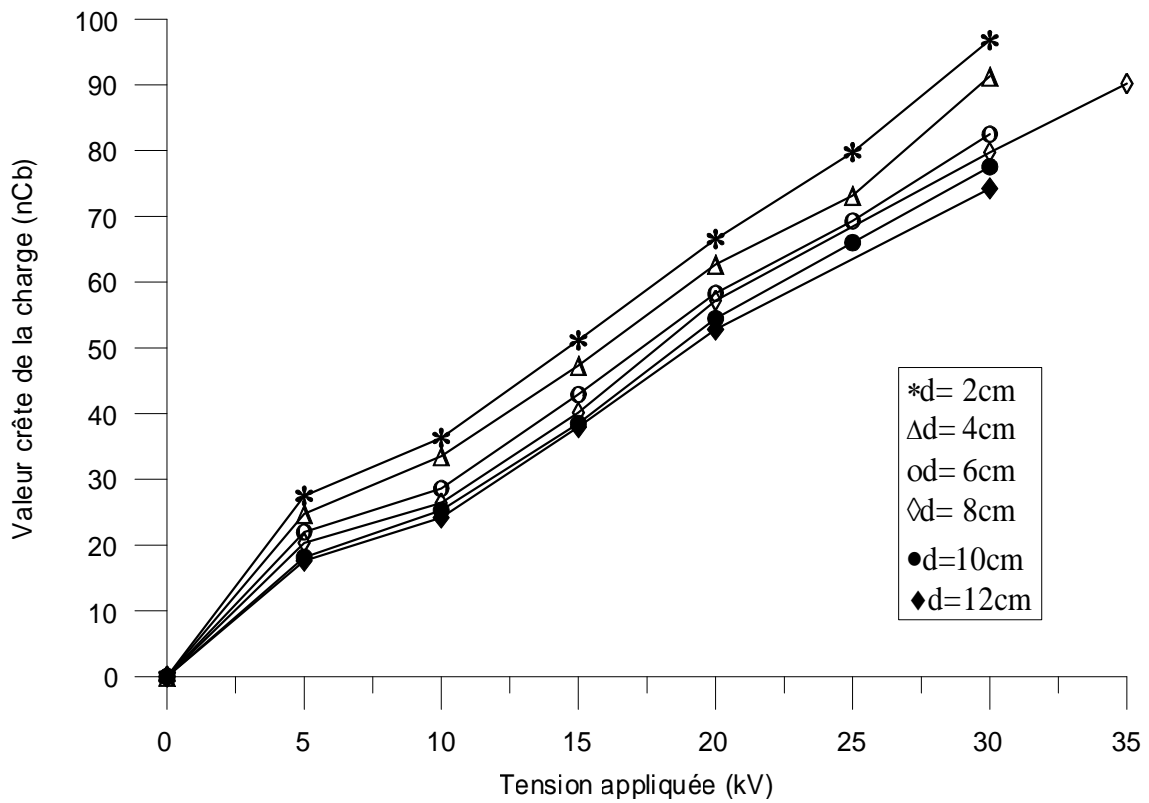


Figure III.69 : Variation de la charge en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=4\text{mm}$)

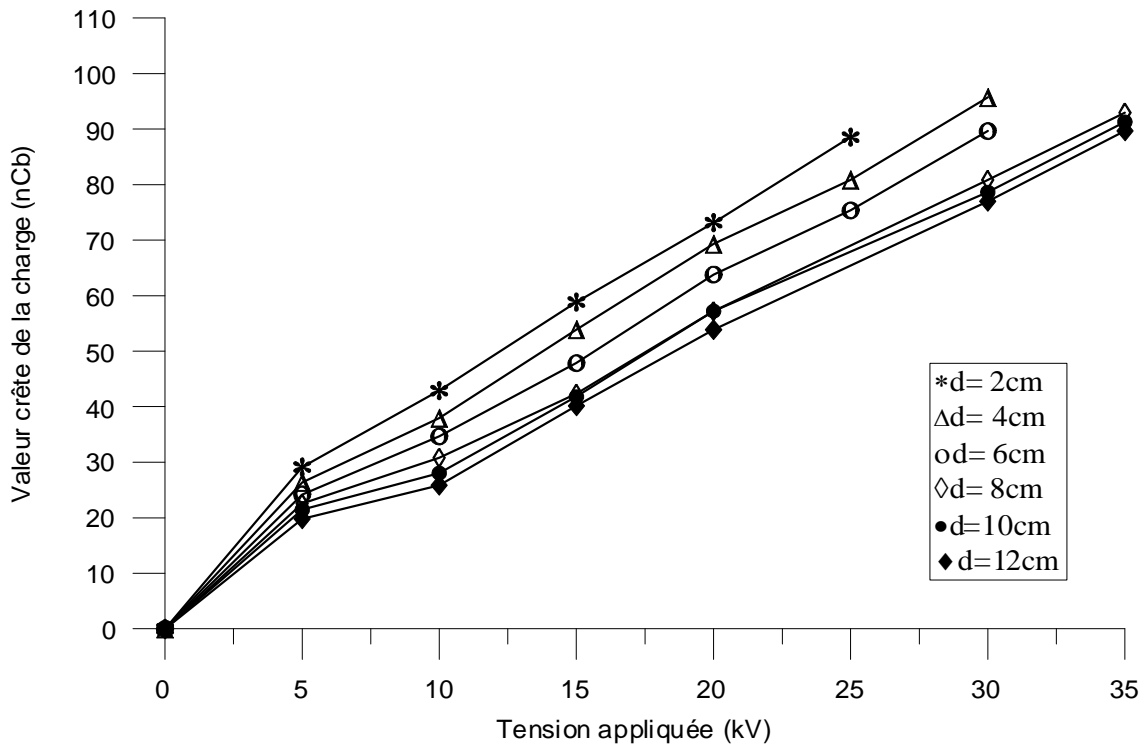


Figure III.70 : Variation de la charge en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=6\text{mm}$)

III.3.6.2. Effet de la distance inter-électrodes

Comme il a été observé pour le courant, la charge totale entre les électrodes diminue faiblement avec l'accroissement de la distance inter-électrodes (Figures III.71 à III.74). Ceci pourrait être dû à la réduction du champ appliqué à la pointe, suite à l'augmentation de l'écart inter-électrodes. Ce résultat concorde avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [12, 55].

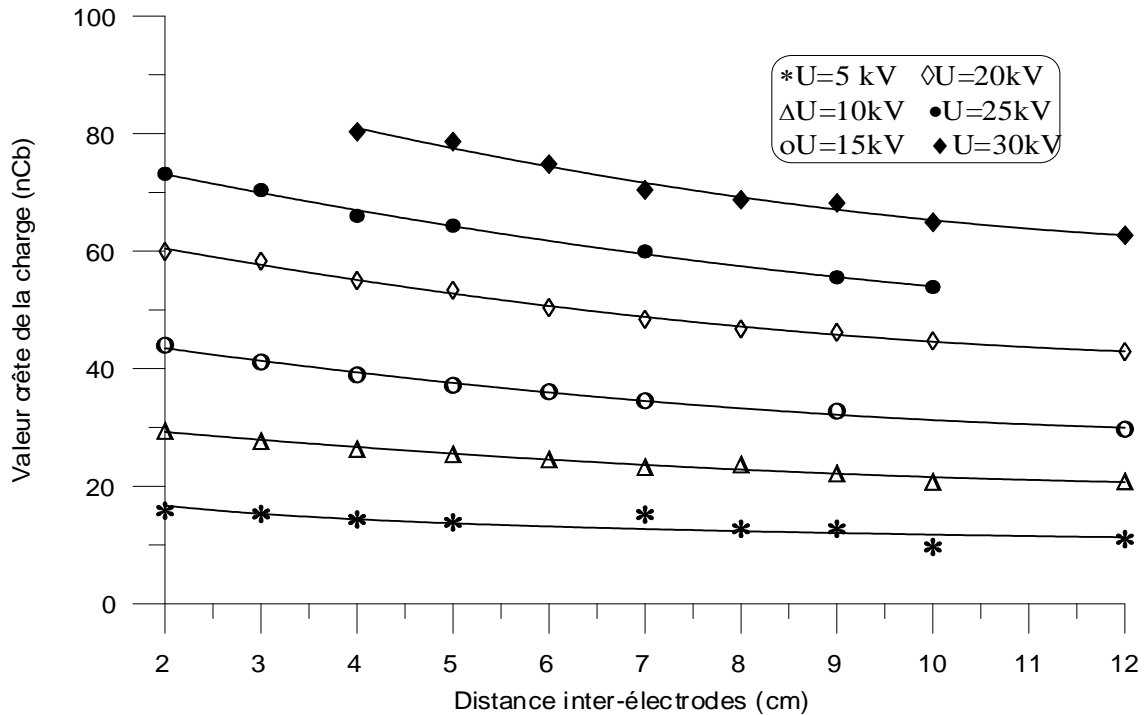


Figure III.71 : Variation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=4\mu\text{m}$)

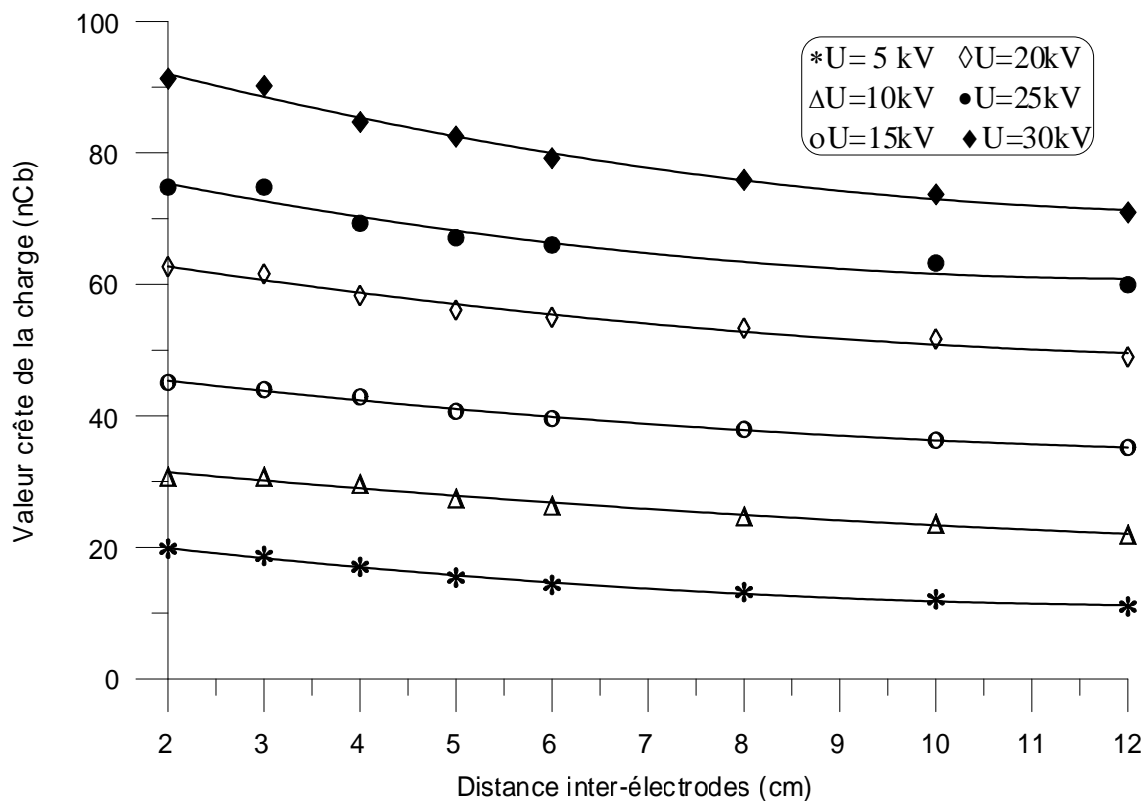


Figure III.72 : Variation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=1\text{mm}$)

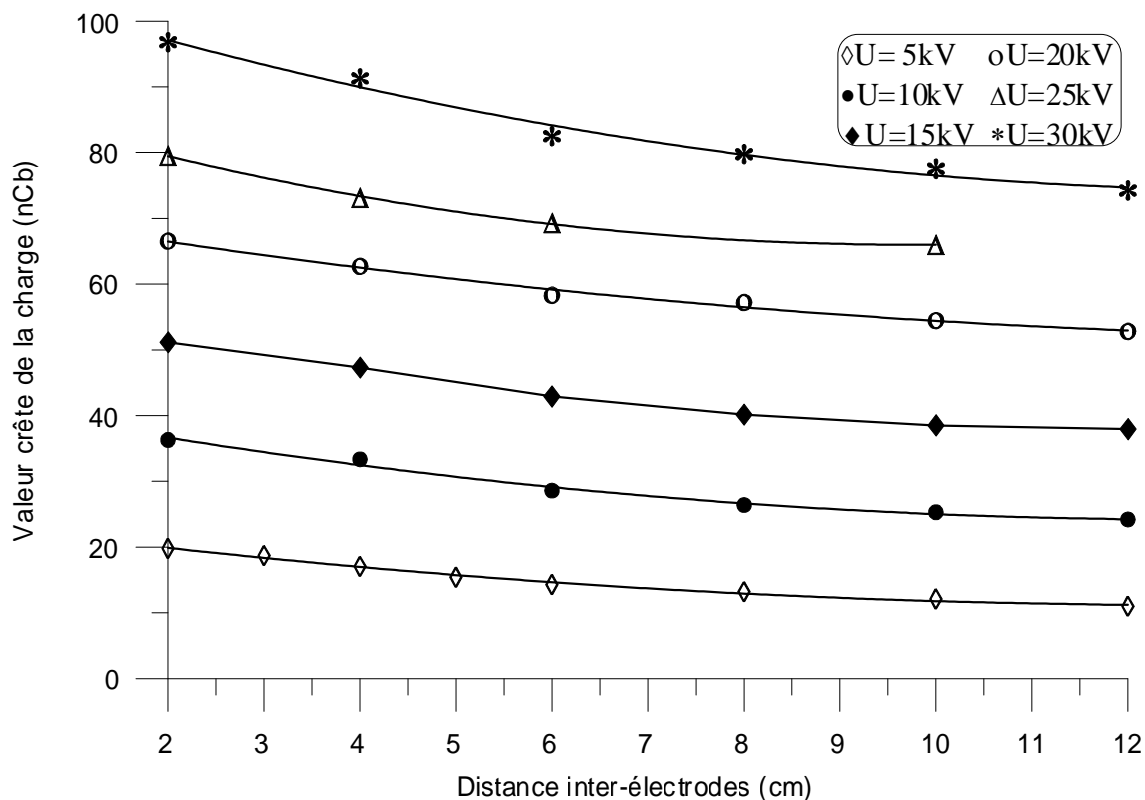


Figure III.73 : Variation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=4\text{mm}$)

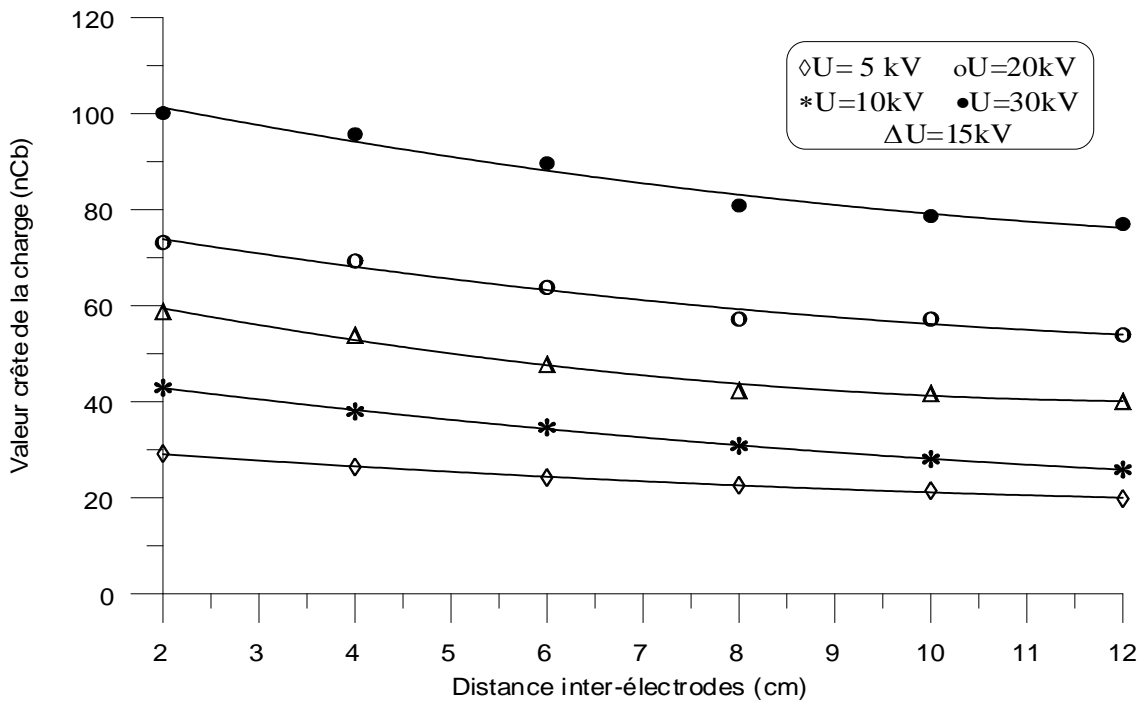


Figure III.74 : Variation de la charge en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=6\text{mm}$)

III.3.6.3. Effet du rayon de courbure de la pointe

Les résultats obtenus pour des rayons de $4\mu\text{m}$, 1mm , 4mm et 6mm , montrent que la charge électrique est d'autant plus importante que le rayon de courbure de l'électrode pointe est élevé. Ceci est confirmé pour tous les paliers de tension appliquée (Figures III.75 à III.80) ainsi que pour tous les écarts inter-électrodes (Figures III.81 à III.86). Notons aussi que cette augmentation devient plus significative, pour des rayons supérieurs à 1mm .

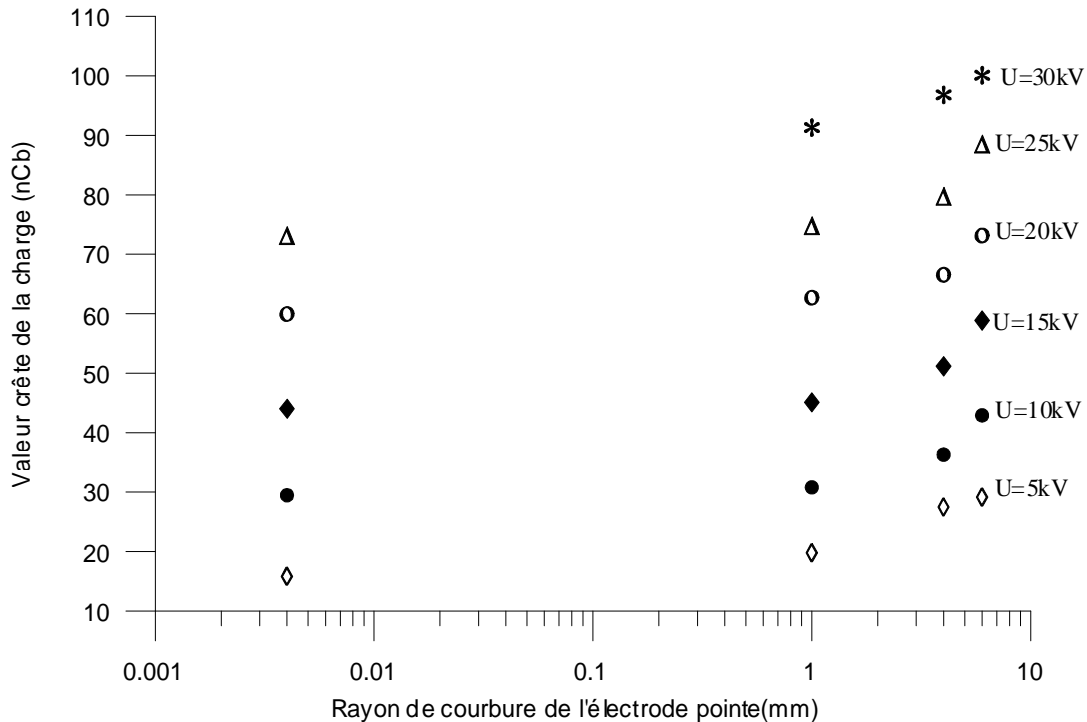


Figure III.75 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées ($d=2\text{cm}$)

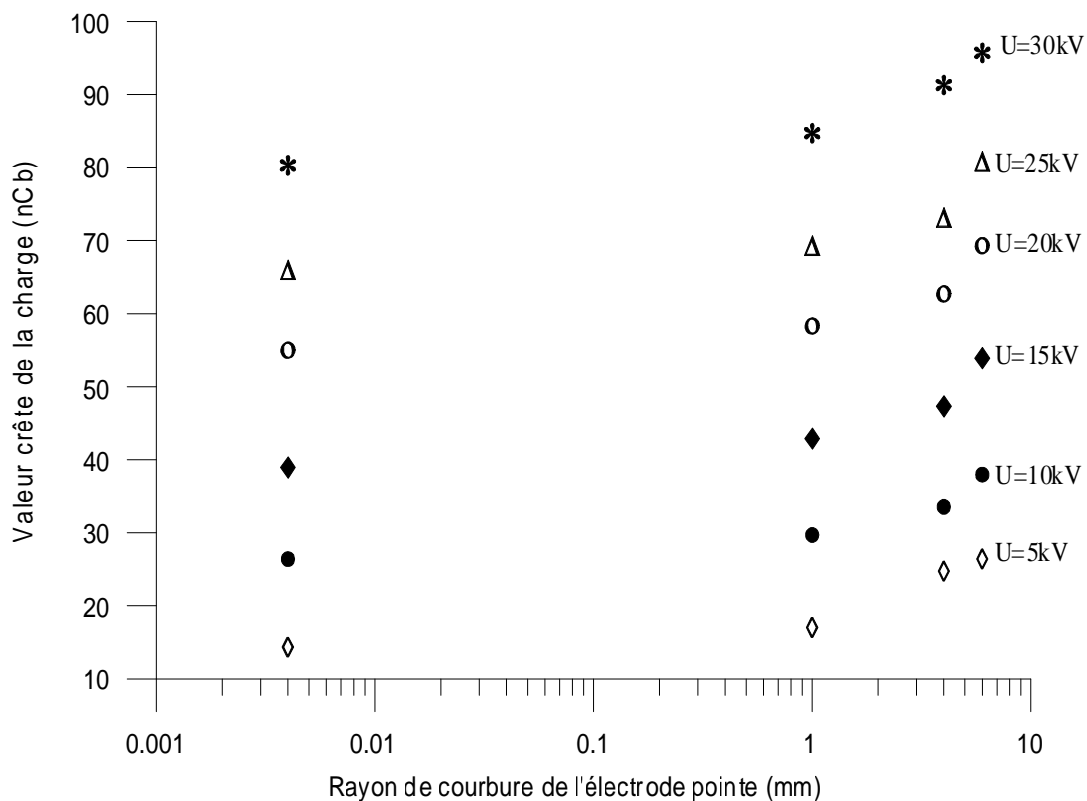


Figure III.76 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=4cm)

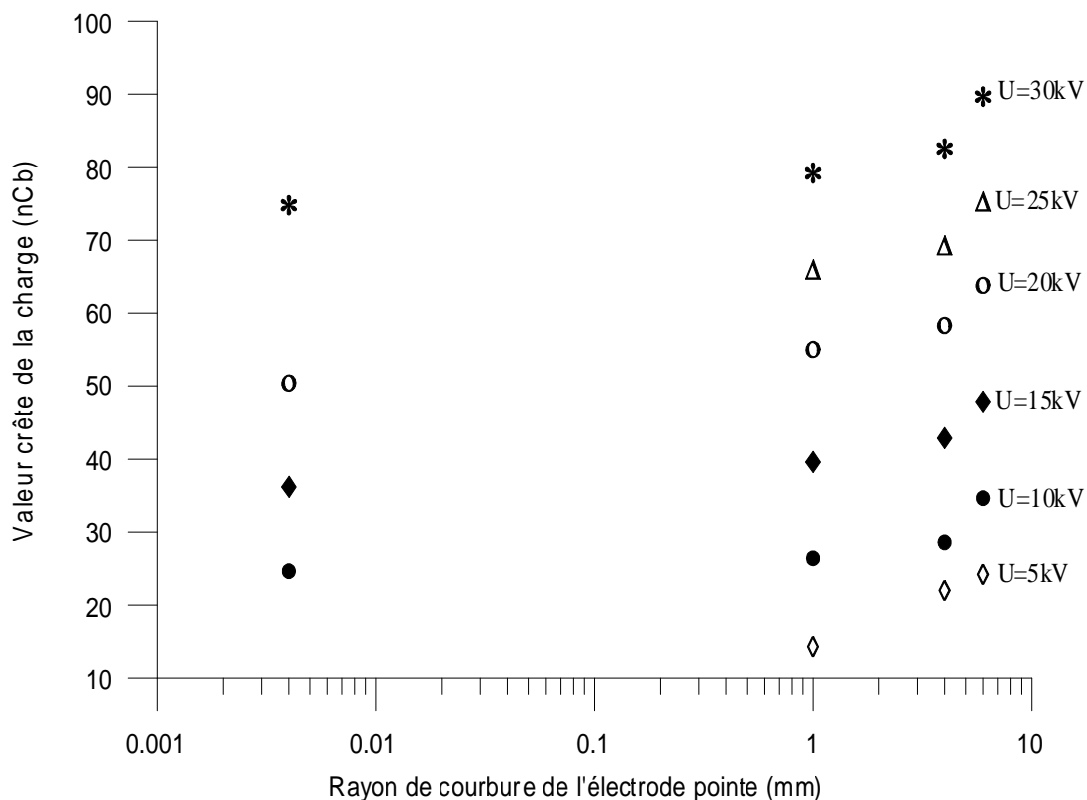


Figure III.77 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=6cm)

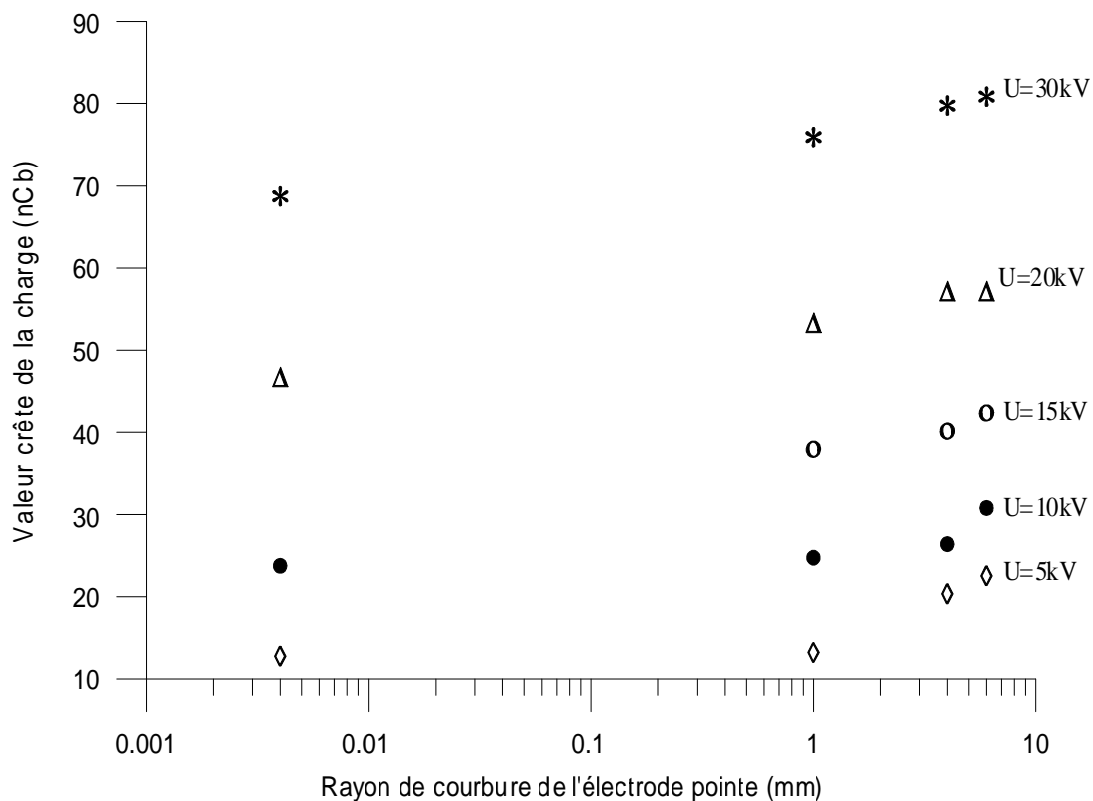


Figure III.78 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=8cm)

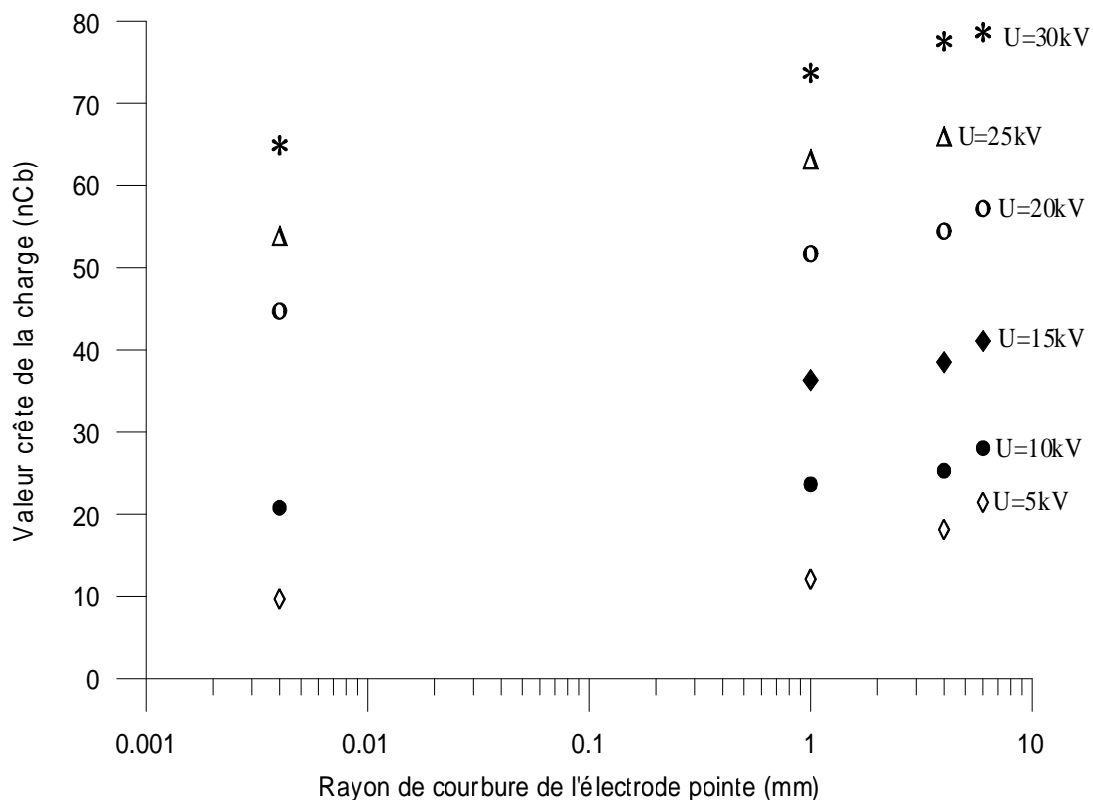


Figure III.79 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=10cm)

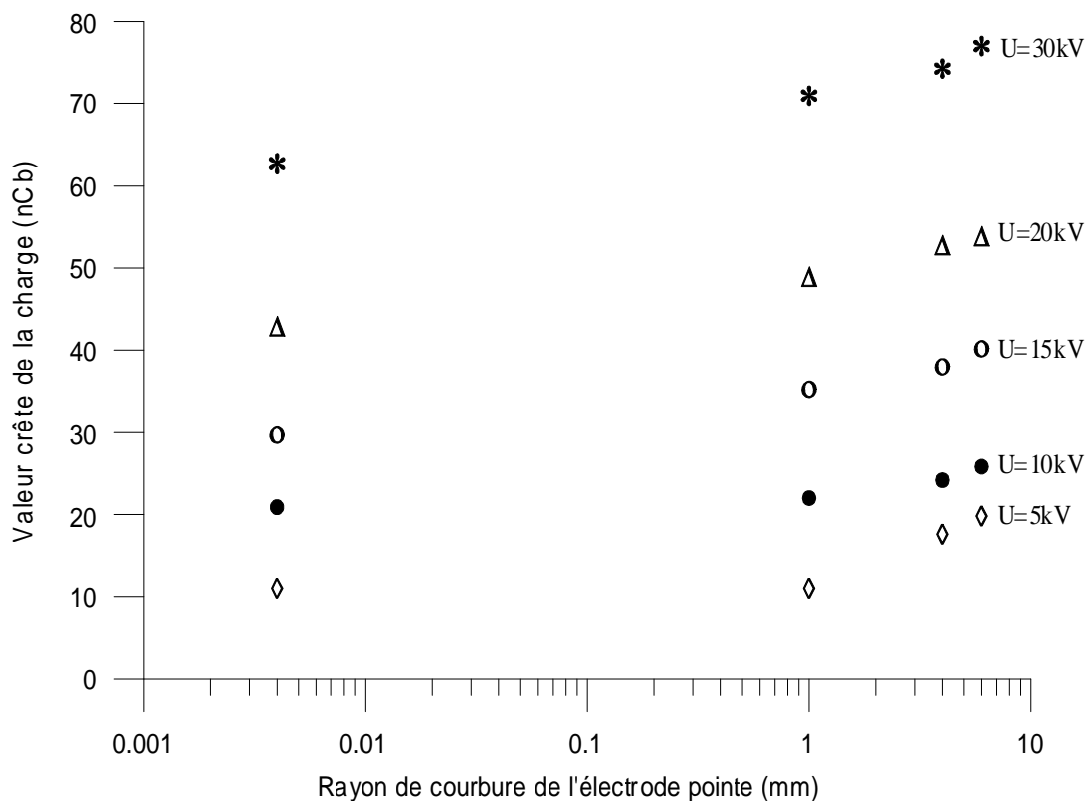


Figure III.80 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=12cm)

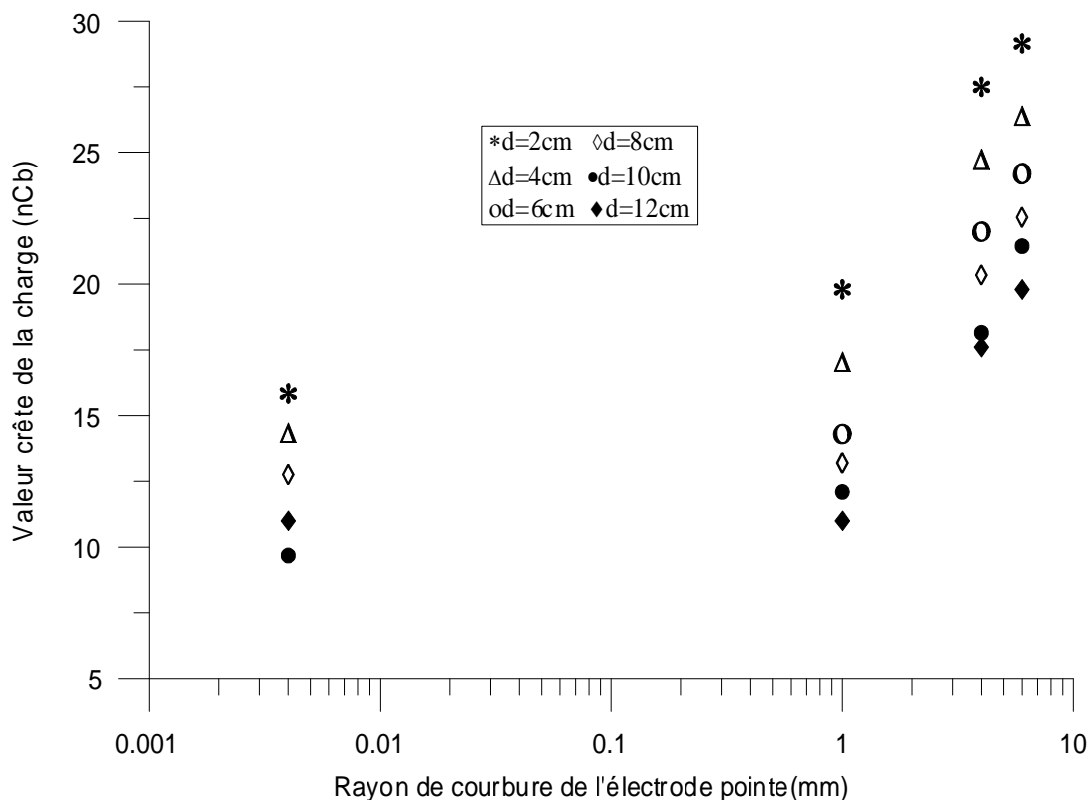


Figure III.81 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=5kV)

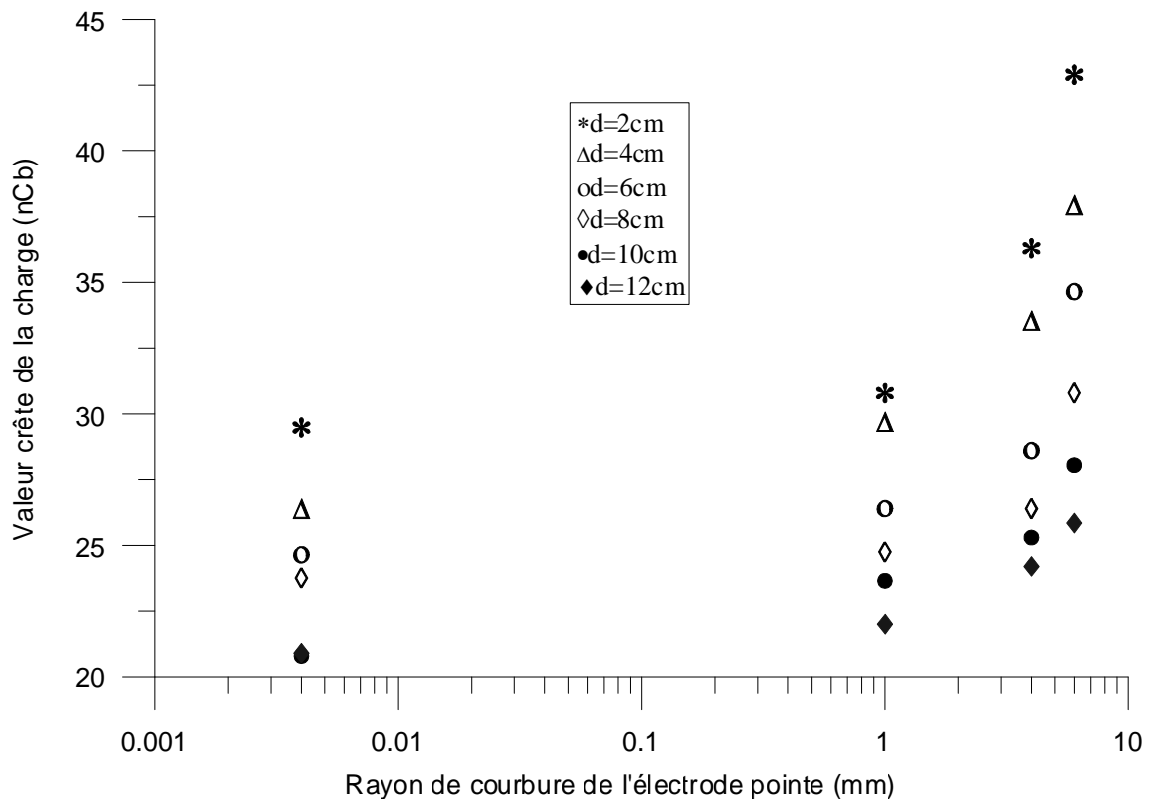


Figure III.82 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=10kV)

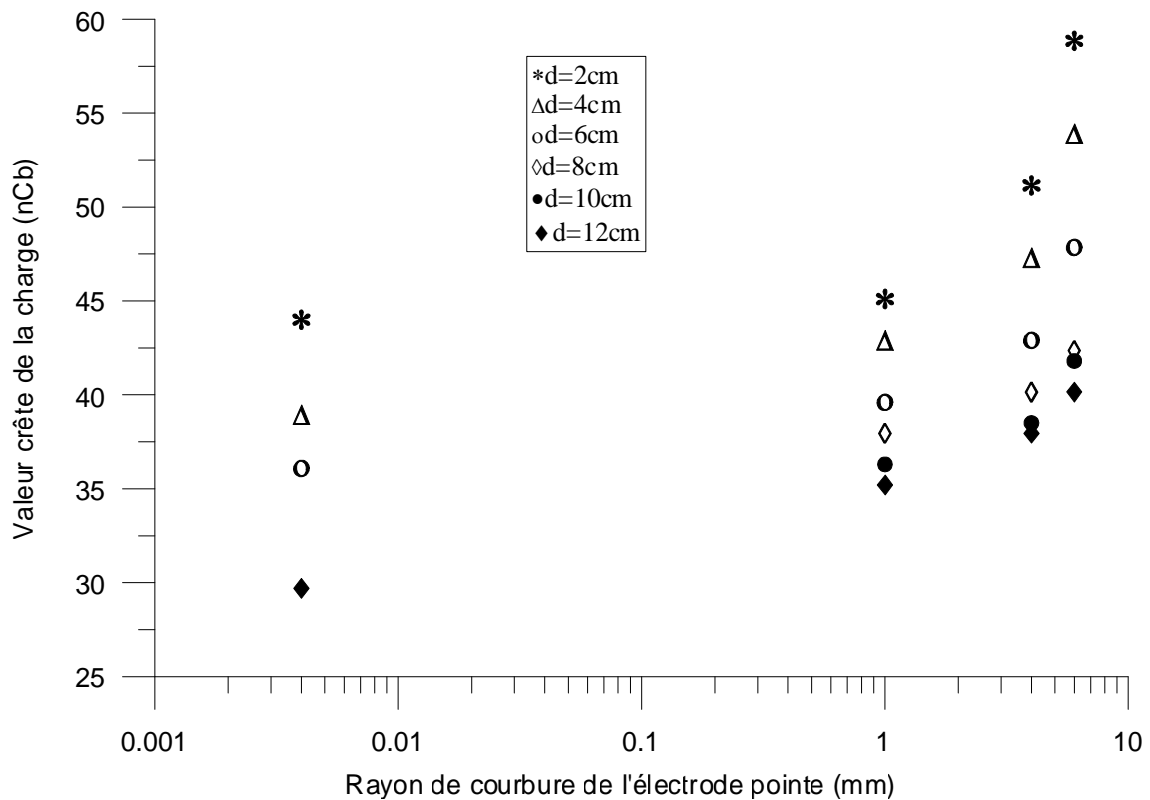


Figure III.83 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=15kV).

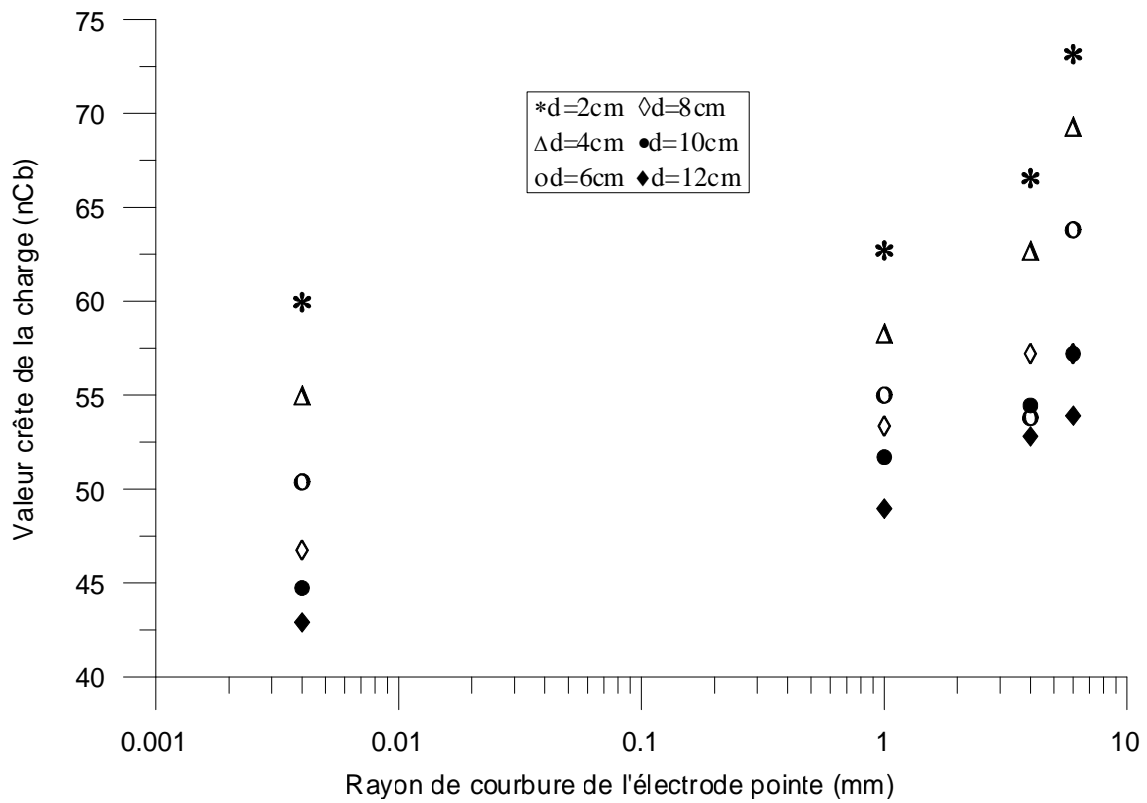


Figure III.84 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=20kV)

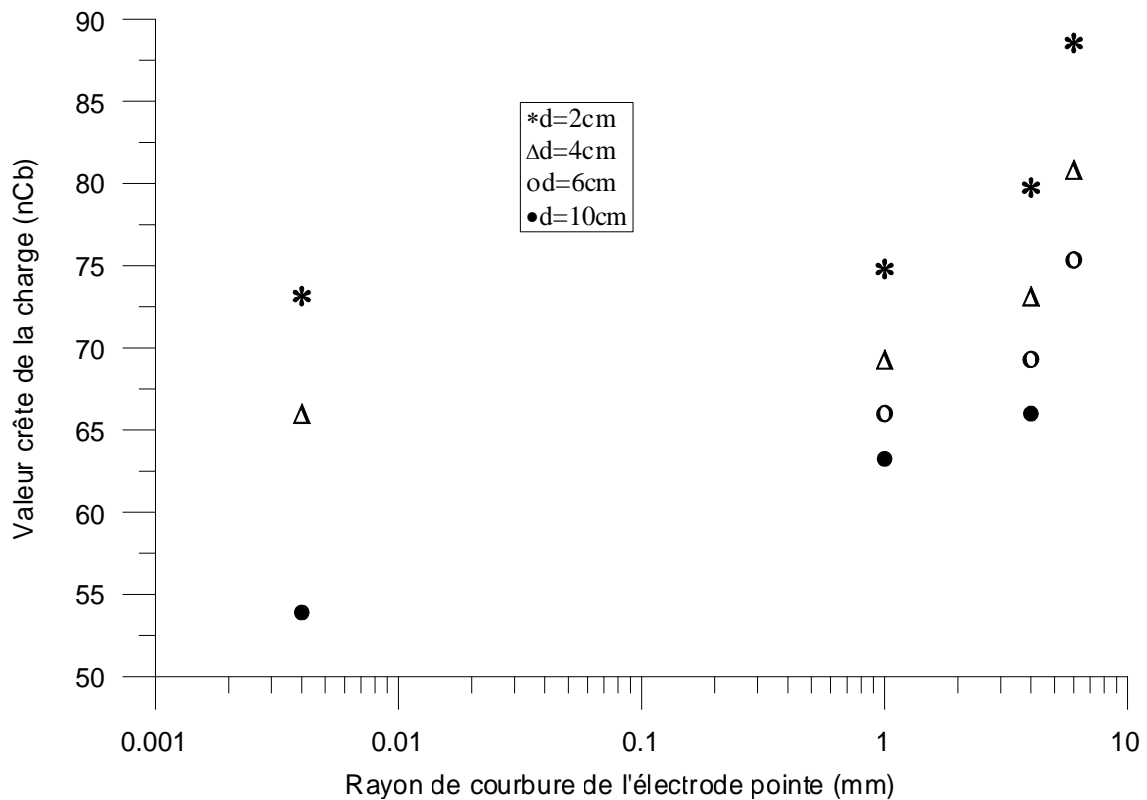


Figure III.85 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=25kV)

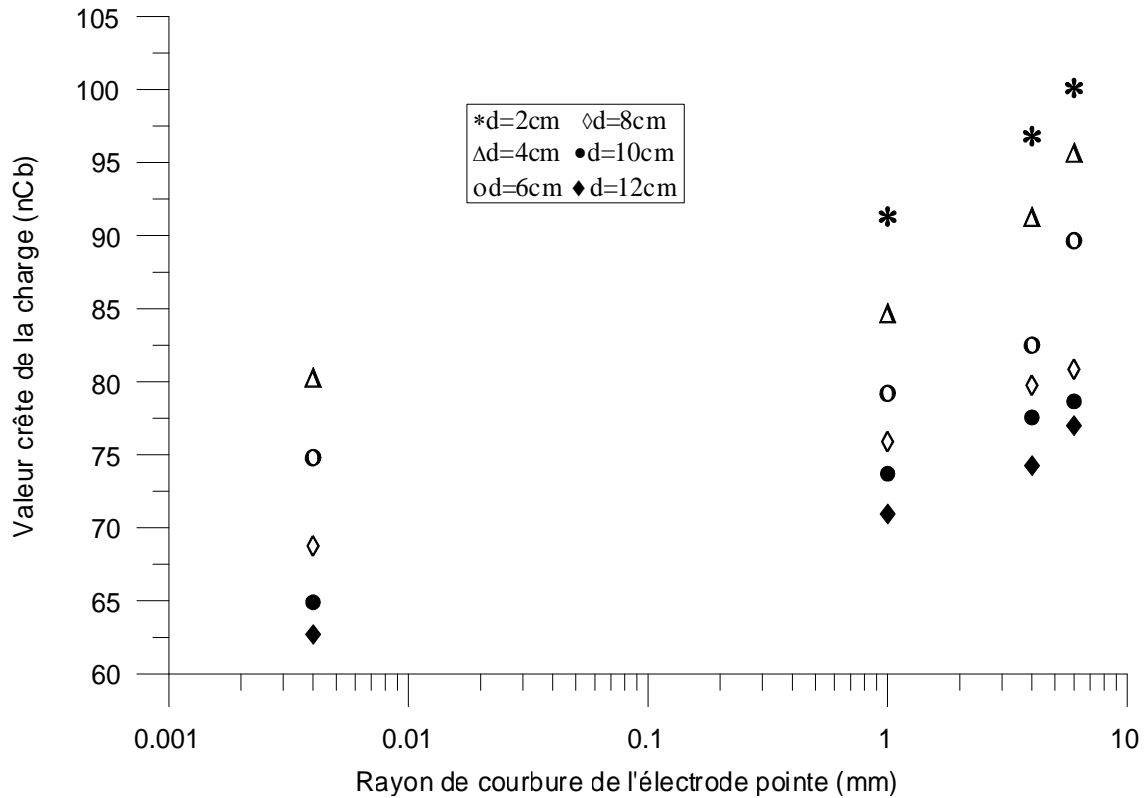


Figure III.86 : Variation de la charge en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes ($U=30\text{kV}$)

III.3.7. Energie du système

III.3.7.1. Influence de la tension appliquée

Les caractéristiques présentées aux figures (III.87 à III.90) montrent l'évolution de l'énergie en fonction de la tension appliquée, pour les différentes distances inter-électrodes. Nous remarquons que l'augmentation de la tension appliquée engendre la croissance de l'énergie. Ceci est dû à l'augmentation de la quantité de charge générée dans l'huile entre l'électrode pointe et le plan.

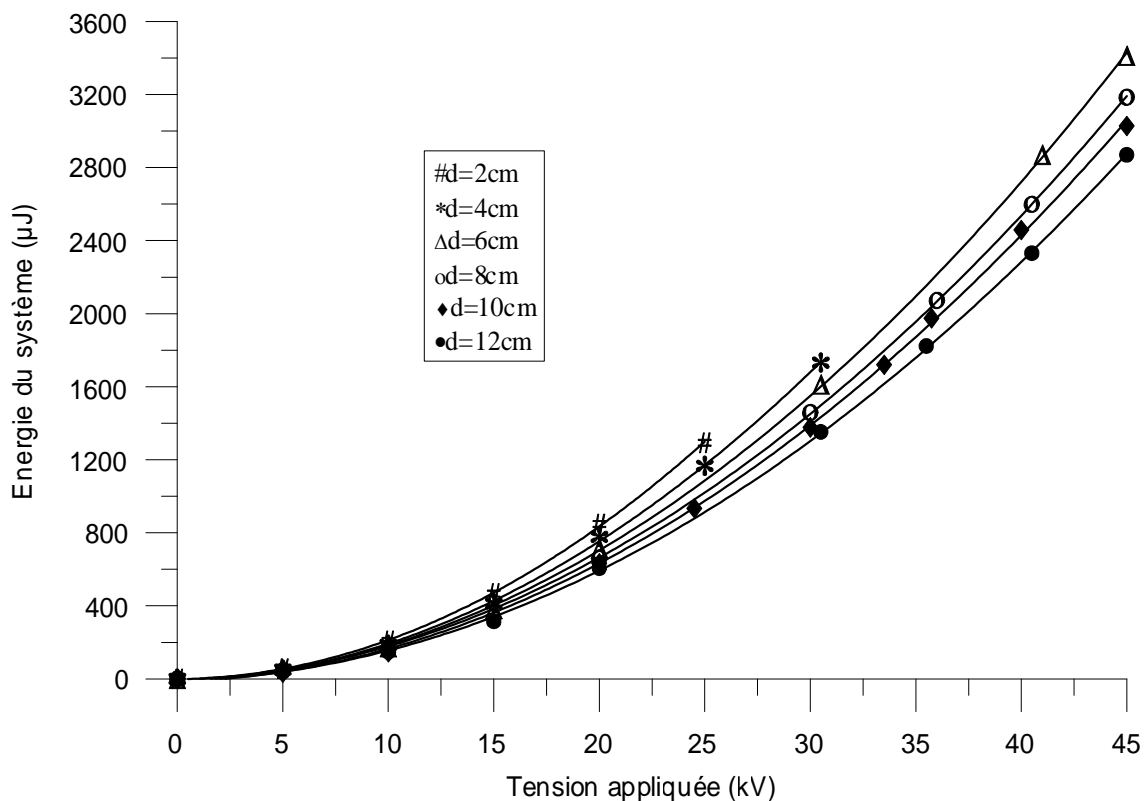


Figure III.87 : Variation de l'énergie du système en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=4\mu\text{m}$)

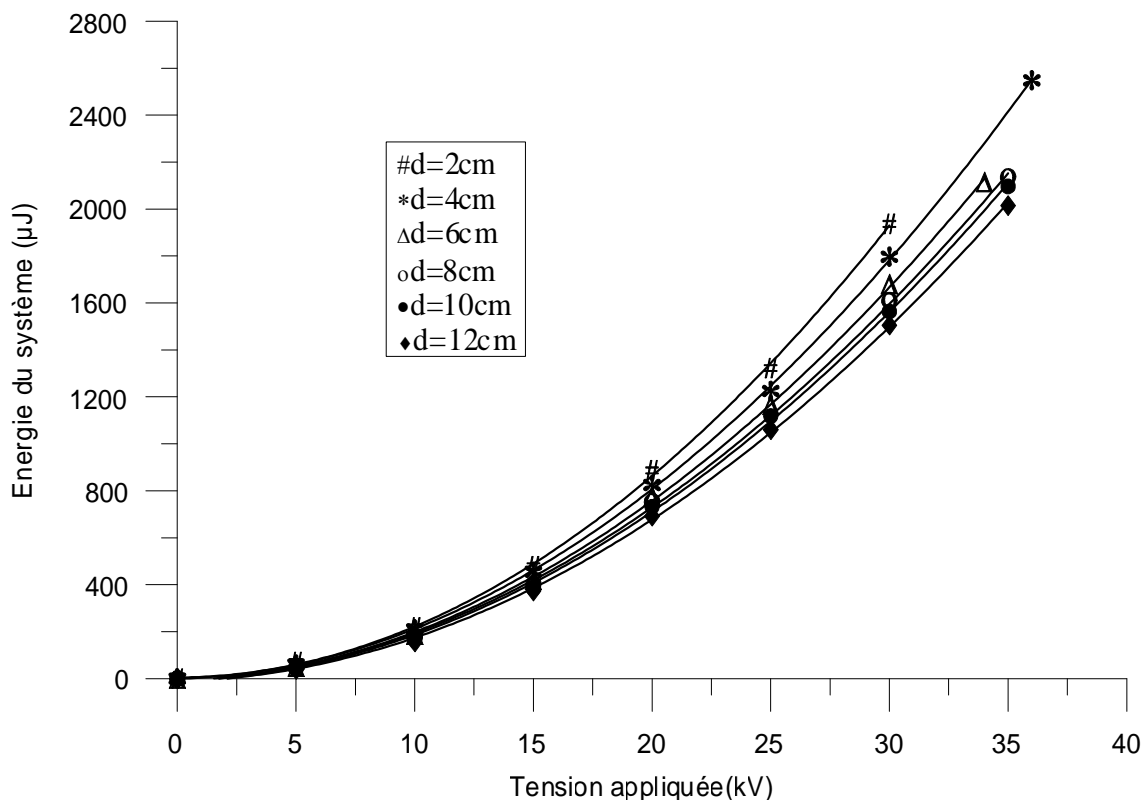


Figure III.88 : Variation de l'énergie du système en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=1\text{mm}$)

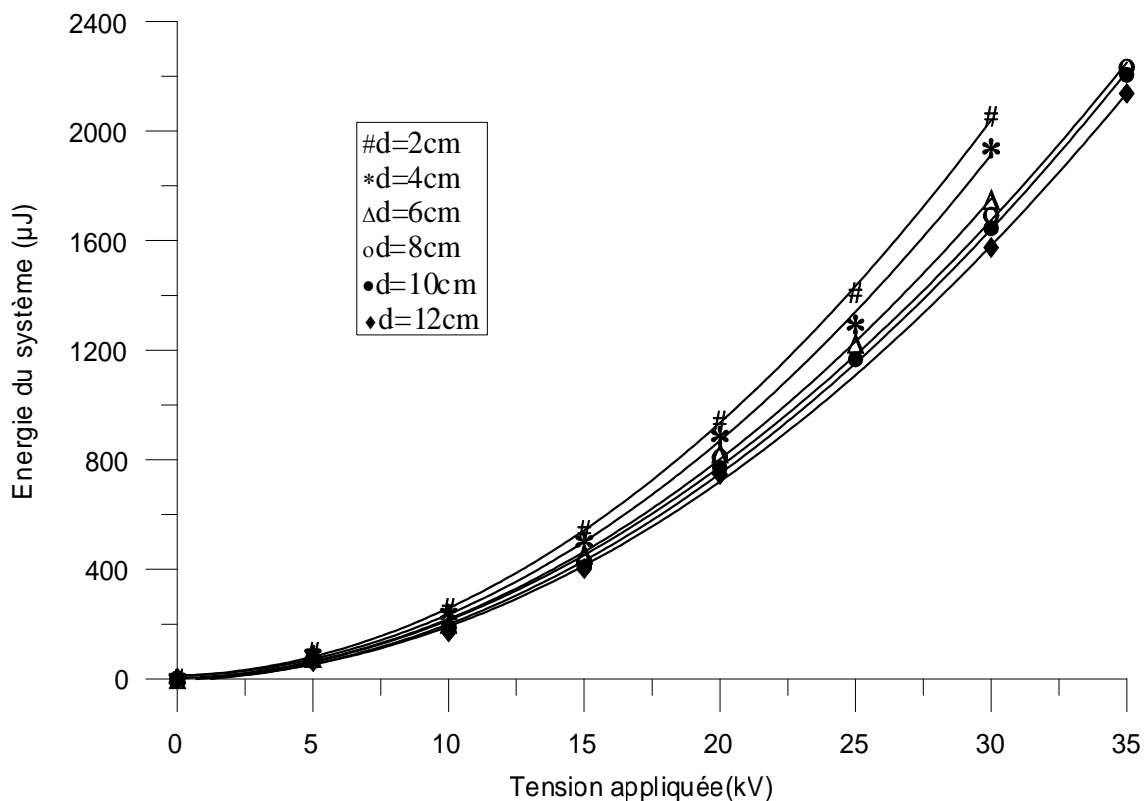


Figure III.89 : Variation de l'énergie du système en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=4\text{mm}$)

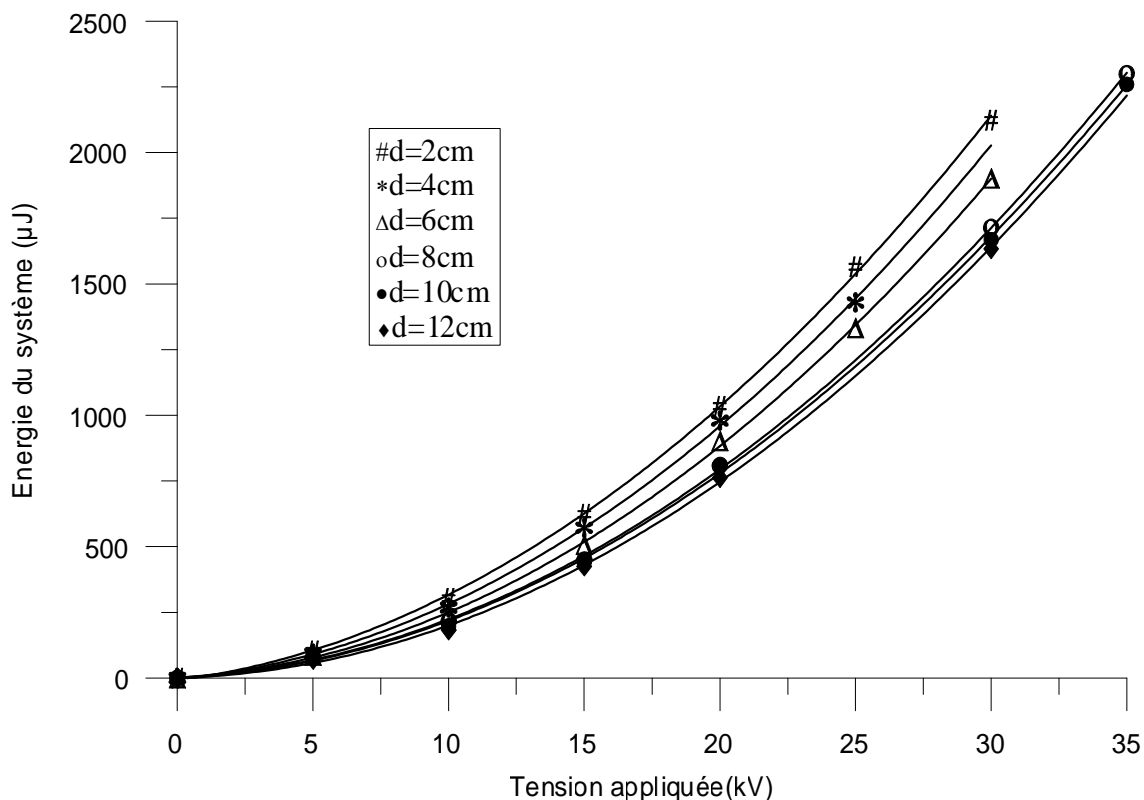


Figure III.90 : Variation de l'énergie du système en fonction de la tension appliquée, pour différentes distances inter-électrodes ($r_p=6\text{mm}$)

III.3.7.2. Effet de la distance inter-électrodes

A partir des figures représentant l'énergie électrique en fonction de la distance inter-électrodes (III.91 à III.94), nous déduisons que les énergies mises en jeu restent pratiquement invariantes en fonction de la distance inter-électrodes, pour une tension de 5 kV. A partir de 10 kV, nous constatons une diminution de l'énergie avec l'écart entre les électrodes. Cette diminution s'accroît avec l'augmentation de la tension appliquée.

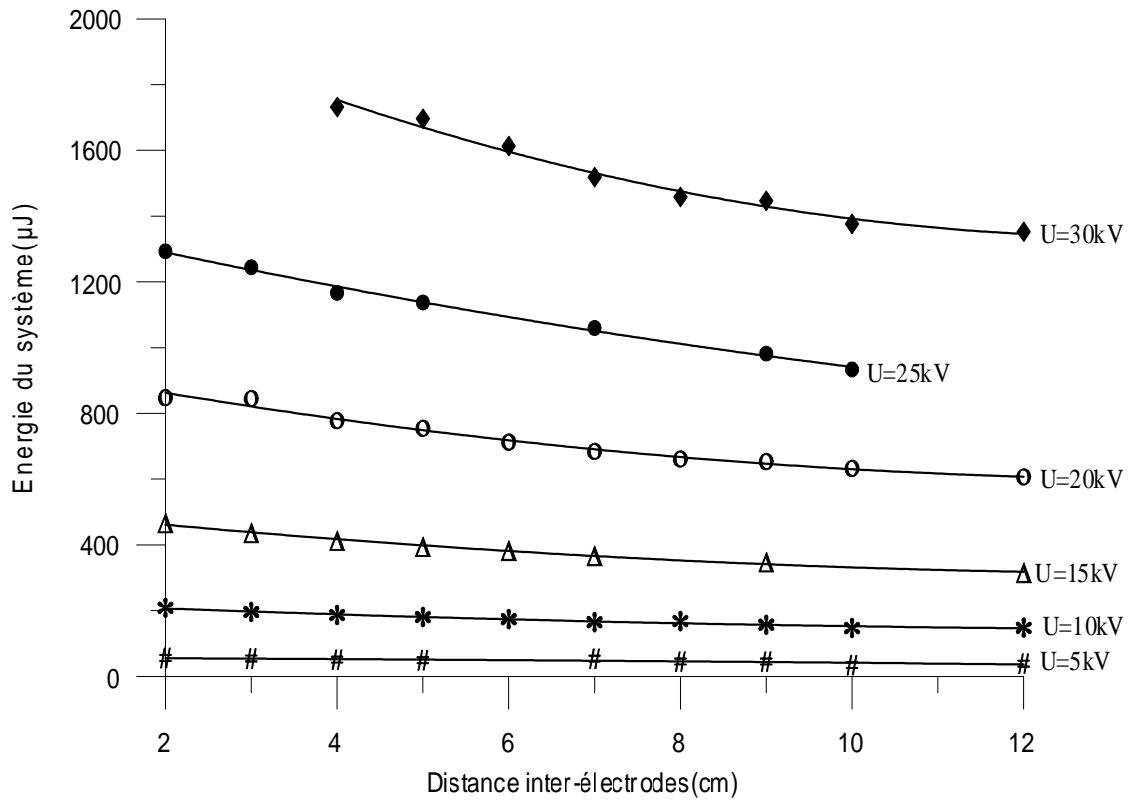


Figure III.91 : Variation de l'énergie du système en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=4\mu\text{m}$)

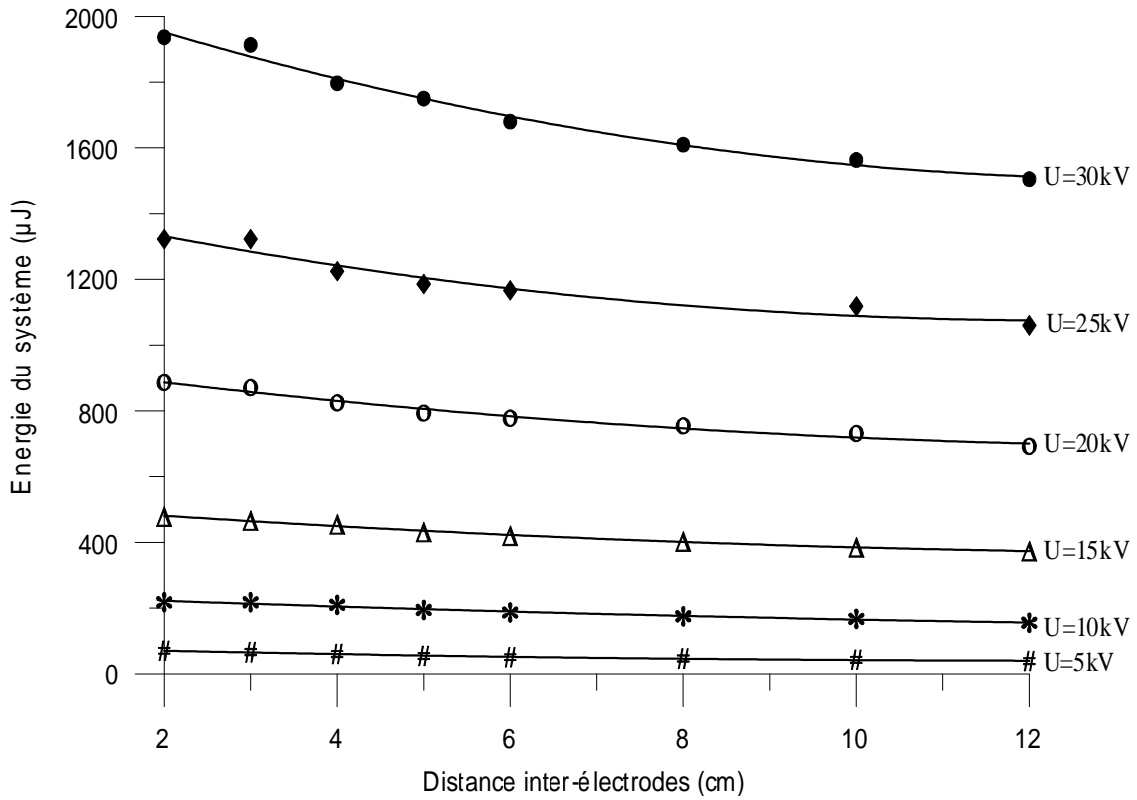


Figure III.92 : Variation de l'énergie du système en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=1\text{mm}$)

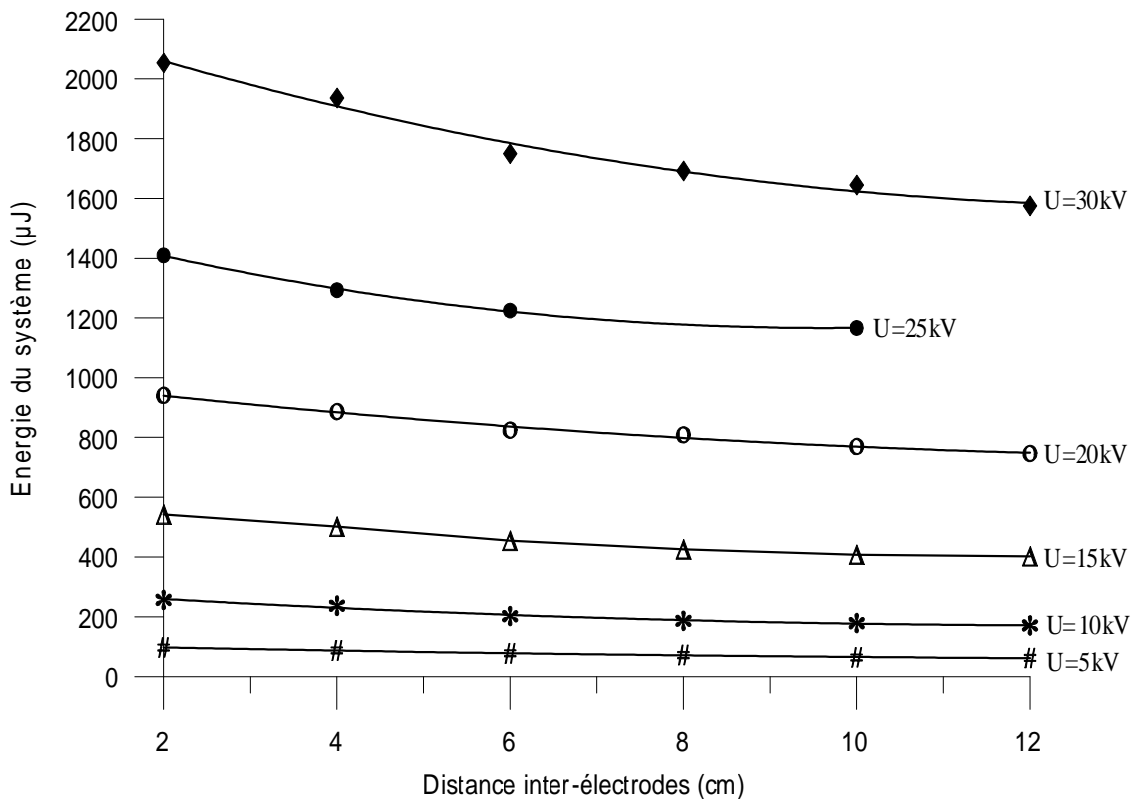


Figure III.93 : Variation de l'énergie du système en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=4\text{mm}$)

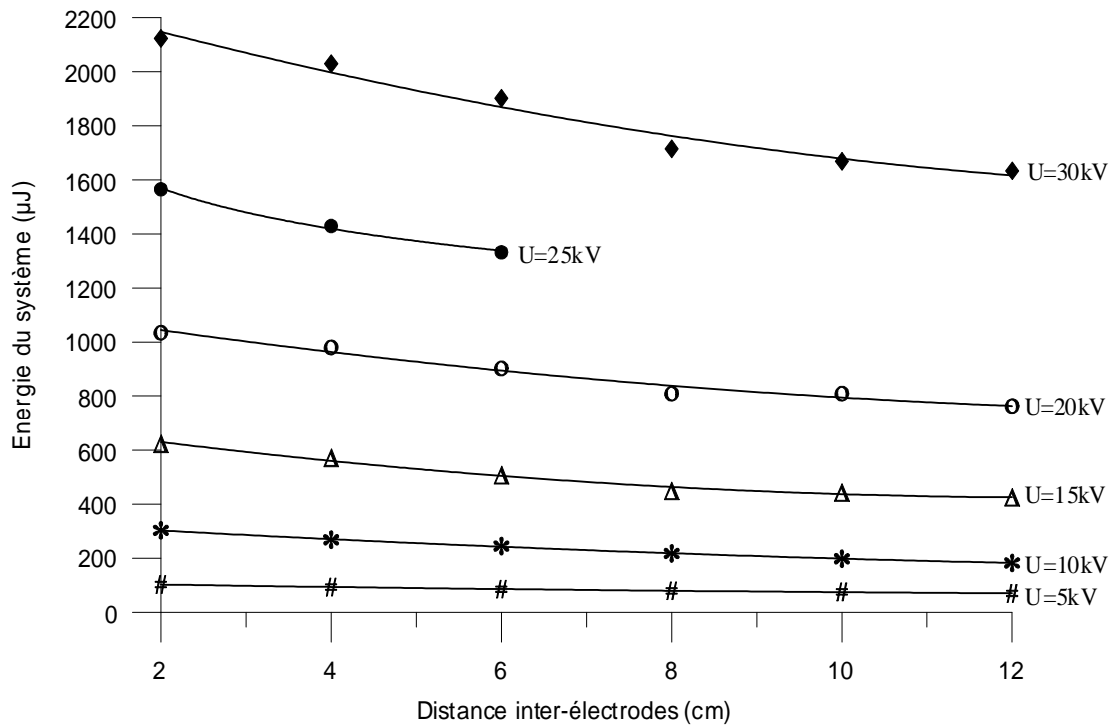


Figure III.94 : Variation de l'énergie du système en fonction de la distance inter-électrodes, pour différentes tensions appliquées ($r_p=6\text{mm}$)

III.3.7.3. Effet du rayon de courbure de la pointe

De même que le courant et la charge, les caractéristiques des figures (III.95 à III.106) montrent que l'énergie augmente légèrement pour des rayons compris entre 4 μm et 1 mm, puis fortement pour d'autres rayons utilisés.

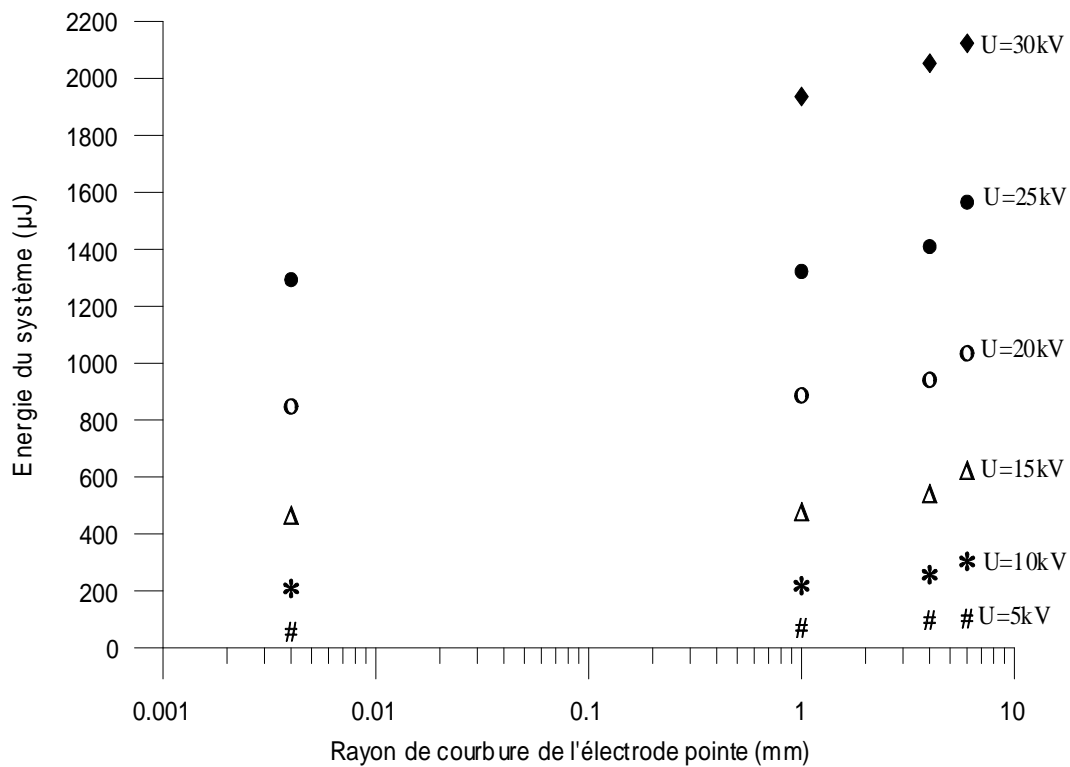


Figure III.95 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées ($d=2\text{cm}$)

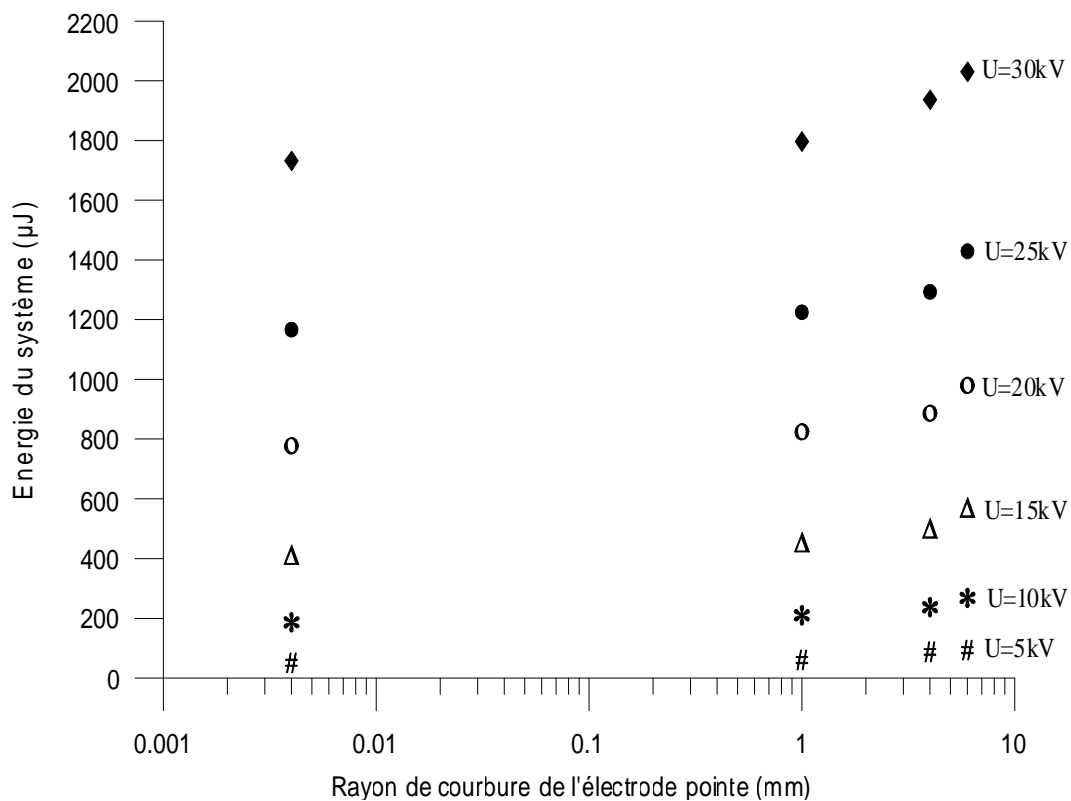


Figure III.96 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=4cm)

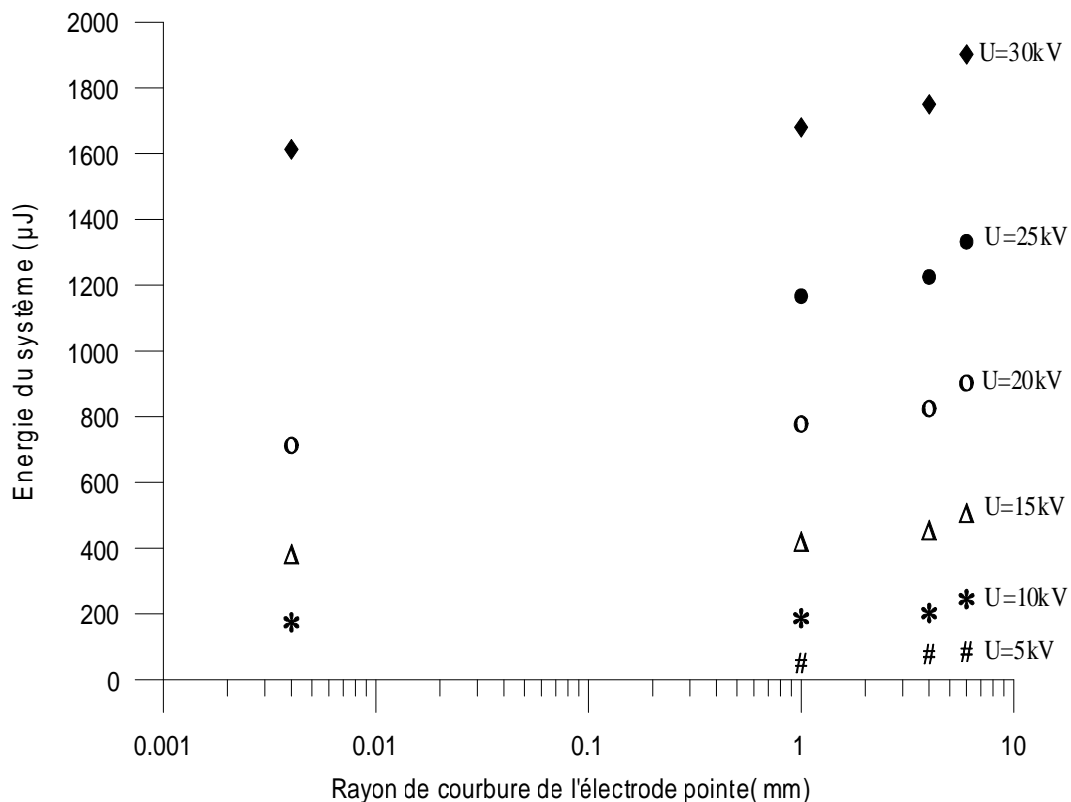


Figure III.97 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=6cm)

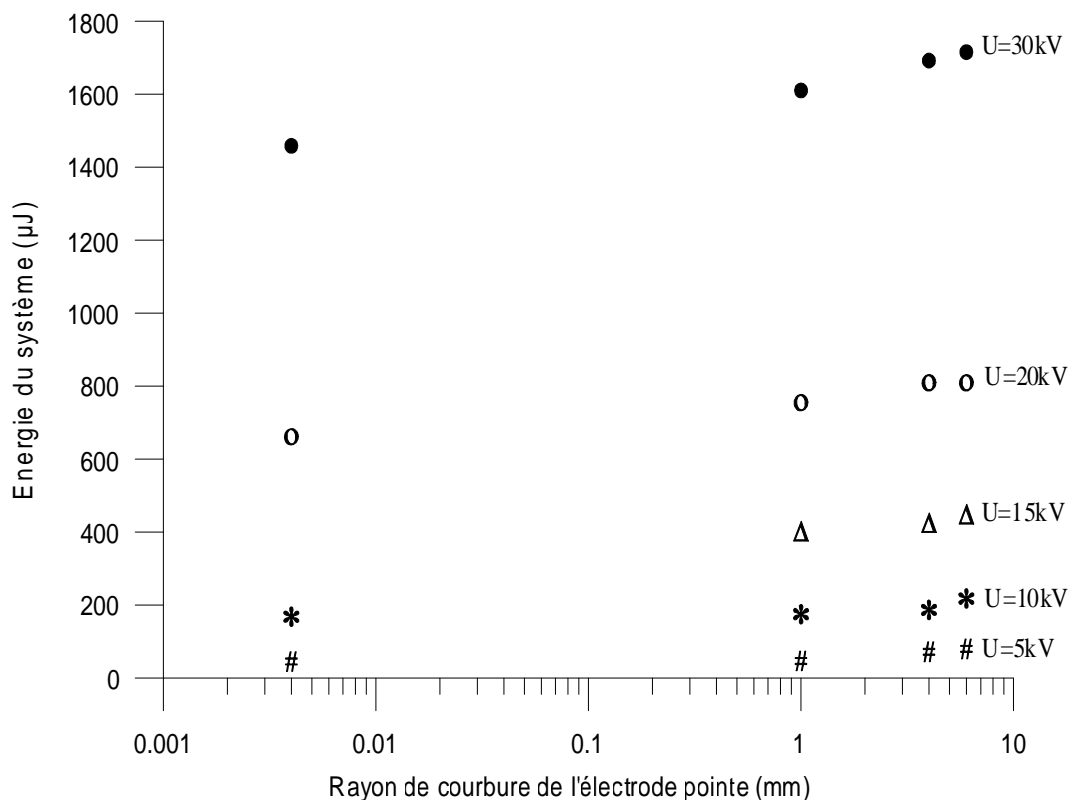


Figure III.98 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=8cm)

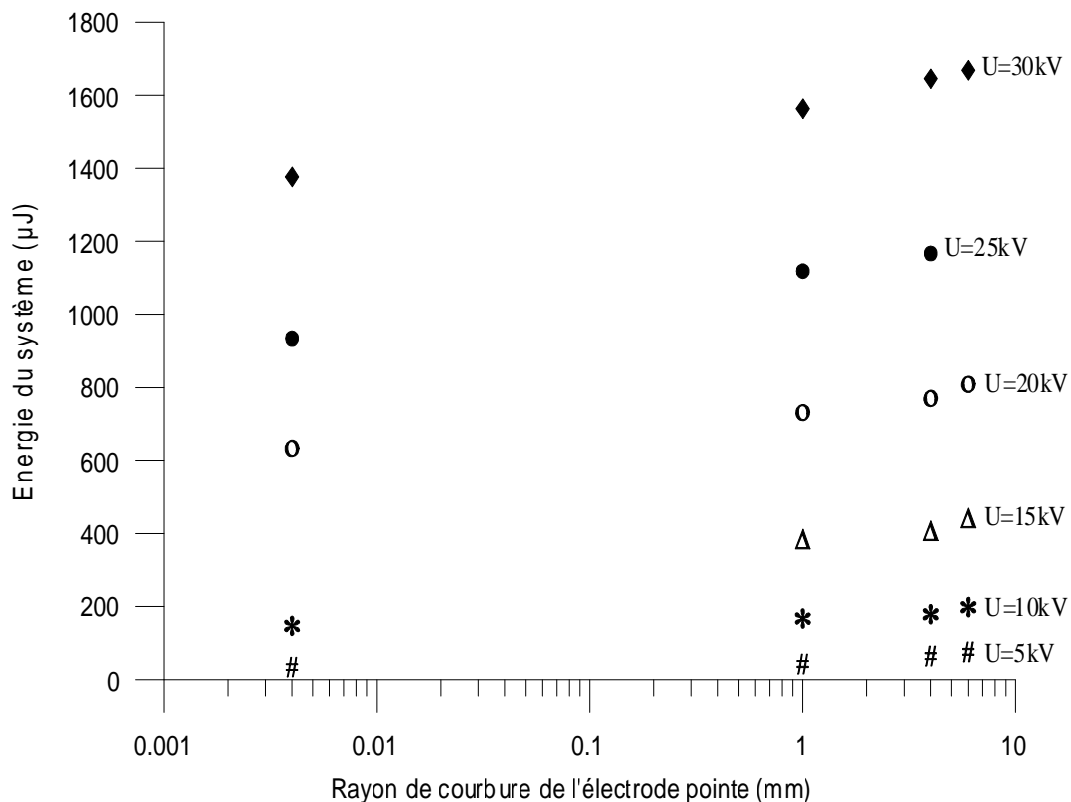


Figure III.99 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=10cm)

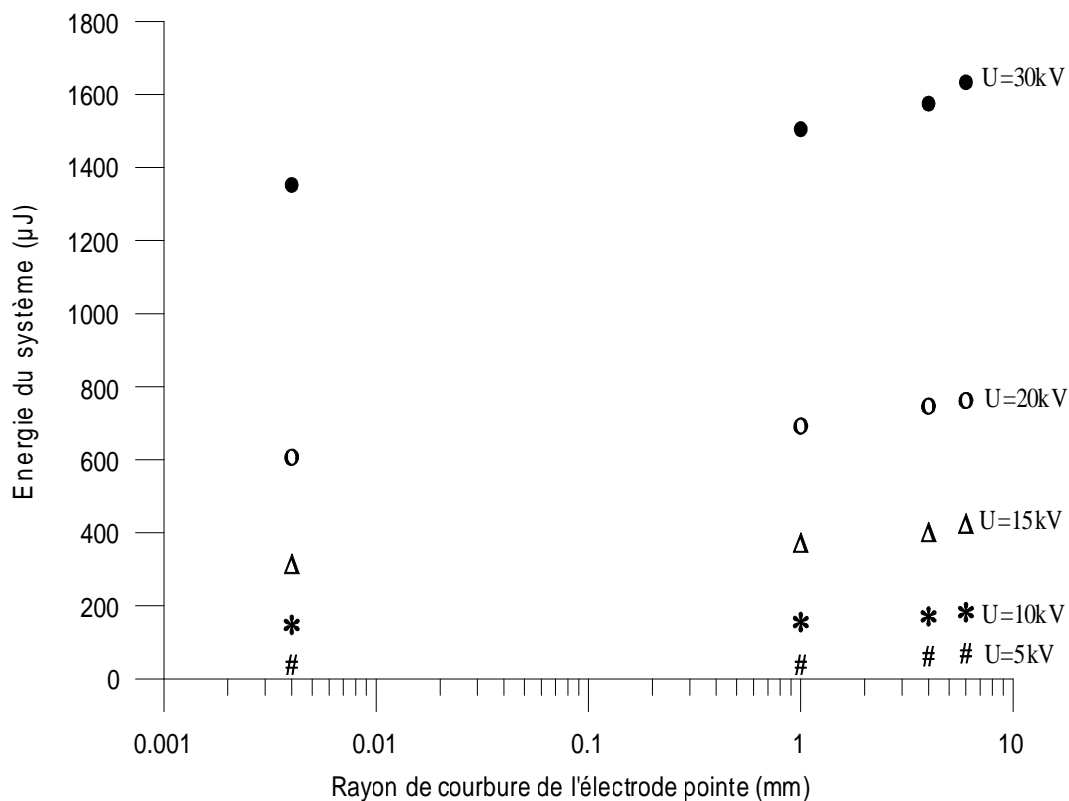


Figure III.100 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes tensions appliquées (d=12cm)

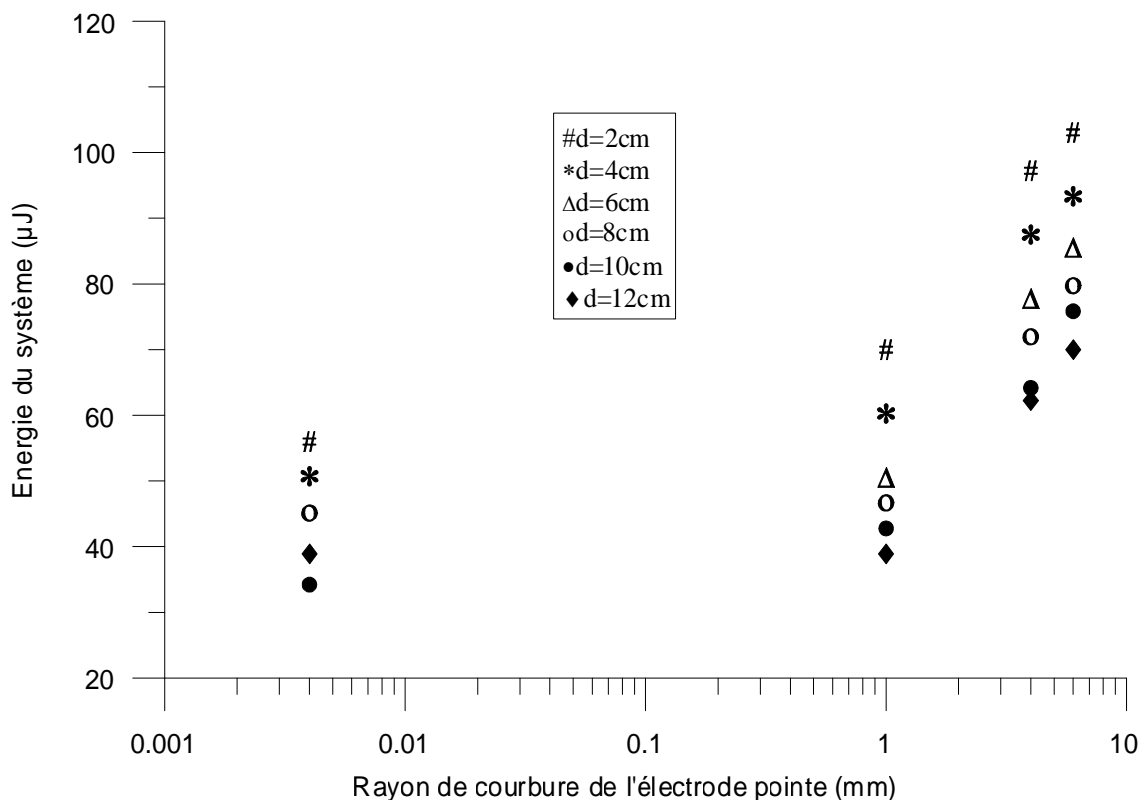


Figure III.101 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=5kV)

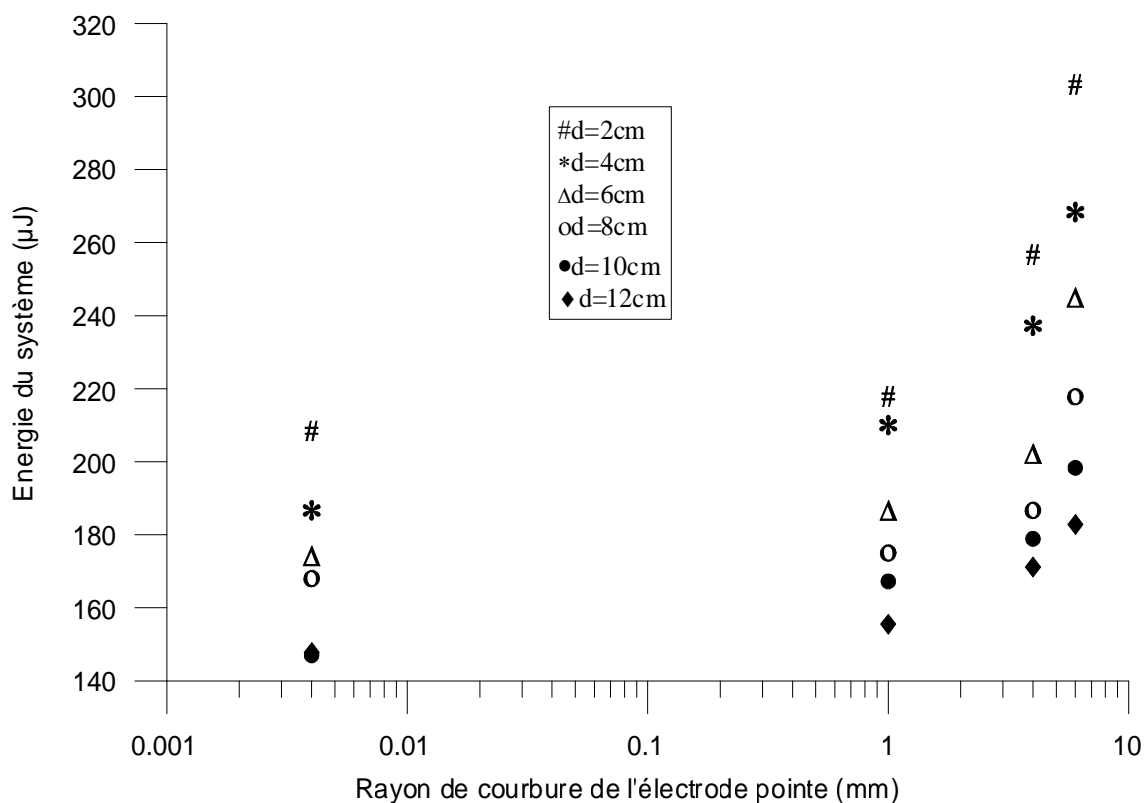


Figure III.102 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=10kV)

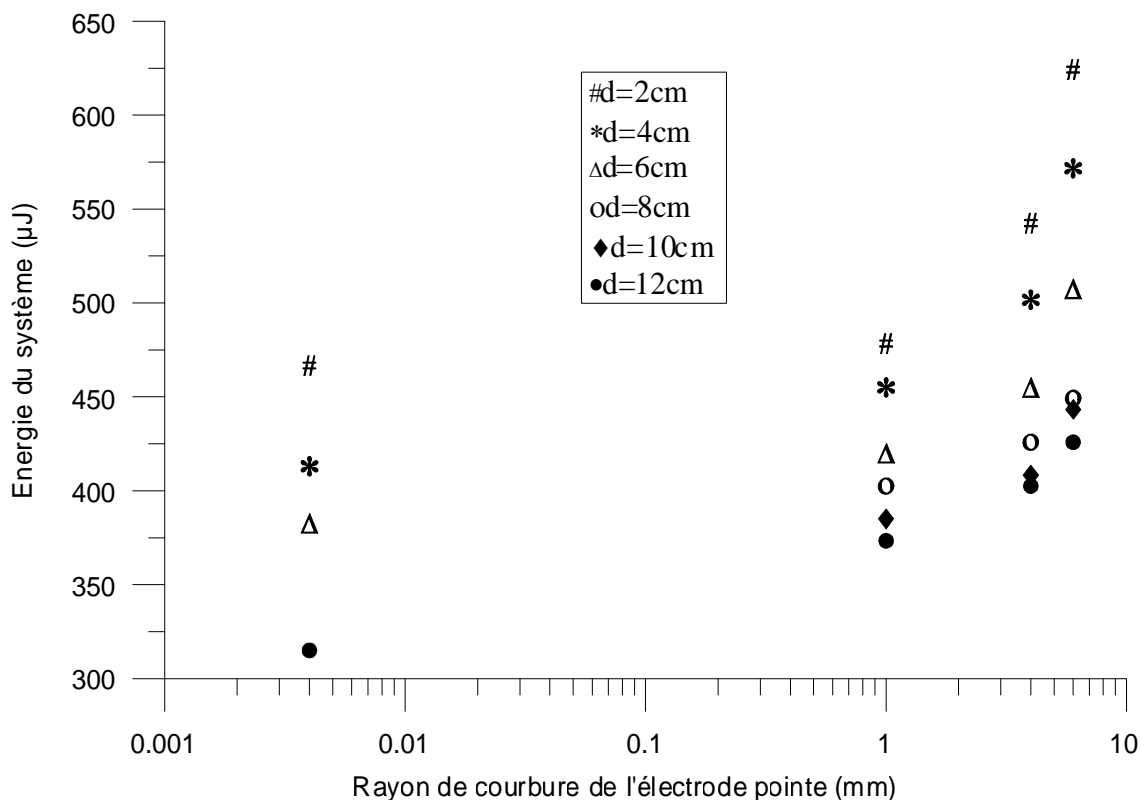


Figure III.103 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=15kV)

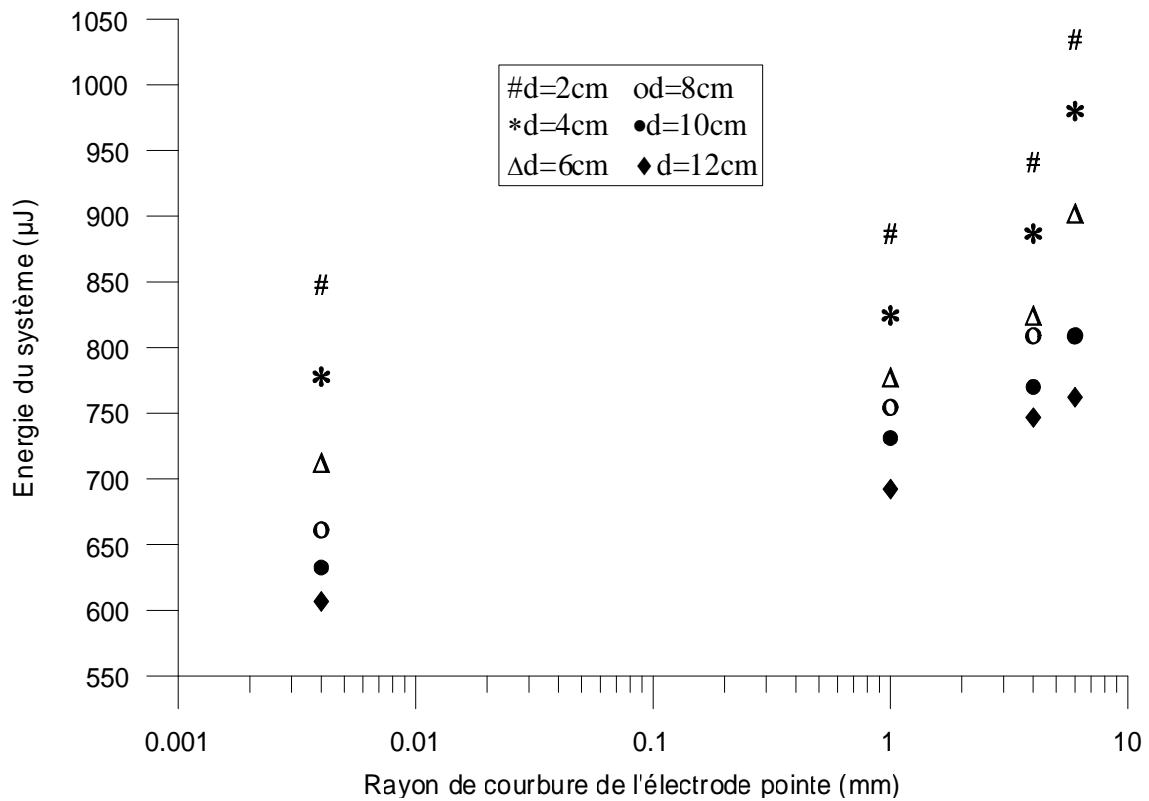


Figure III.104 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=20kV)

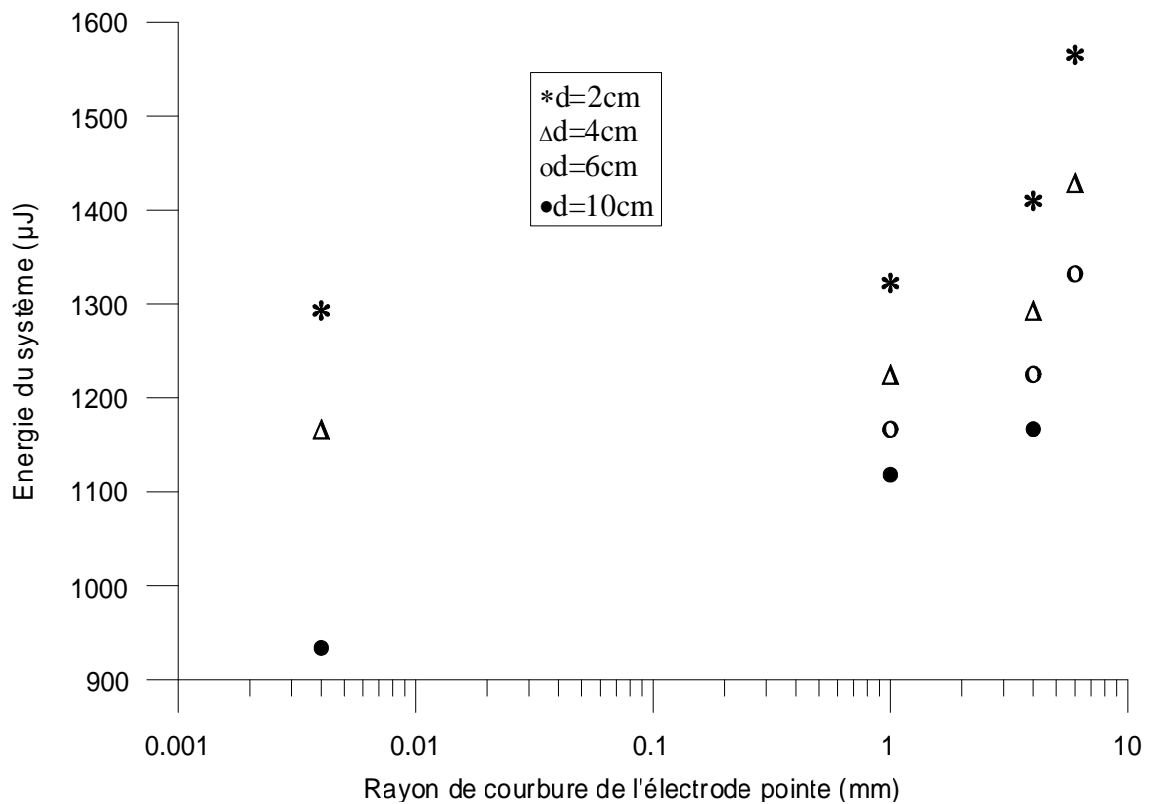


Figure III.105 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes (U=25kV)

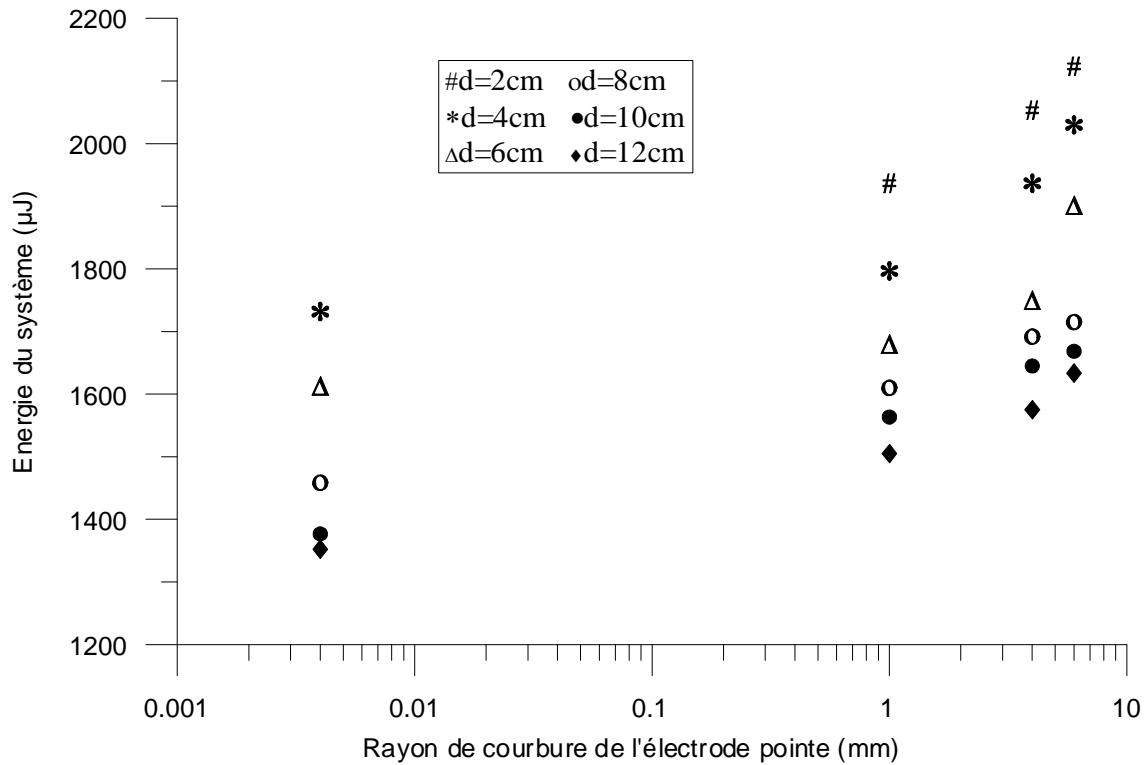


Figure III.106 : Variation de l'énergie du système en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe, pour différentes distances inter-électrodes ($U=30\text{kV}$)

III.3.8. Effet de la position de la barrière isolante sur la tenue diélectrique du système

Il est connu depuis longtemps que l'insertion de barrières isolantes dans les intervalles d'huiles augmente significativement la rigidité diélectrique du système. Cet effet bénéfique est largement utilisé lors du dimensionnement des structures isolantes [51, 52].

A fin d'examiner l'effet de la barrière isolante sur le comportement d'un système d'électrodes à champ divergent, nous procédons à l'insertion d'une barrière circulaire en papier Presspahn ($\epsilon_r=3$) d'épaisseur de 2 mm et de rayon de 14 cm. Cet écran isolant est réalisé de telle manière qu'il s'accroche sur les parois supérieures du bac d'une façon perpendiculaire, et se déplace facilement le long de ces parois.

La distance entre les électrodes étant maintenue constante égale à 13 cm, pour les différentes positions de la barrière, nous relevons la tension de claquage correspondante.

La figure (IV.107) représente la caractéristique de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière. Il apparaît que l'insertion de la barrière isolante dans l'intervalle inter-électrodes améliore la rigidité diélectrique de l'huile. Cette efficacité est beaucoup plus importante que la barrière est proche de la pointe [51, 52]. En effet, notre caractéristique met en évidence un maximum de tension de claquage, pour une distance égale 1 cm de la pointe. A titre d'illustration, les résultats obtenus montrent que l'insertion de la barrière à cette distance fait augmenter la tension de claquage de 120 kV à 164 kV. En éloignant progressivement la barrière de la pointe, son effet diminue. Quand celle-ci est au voisinage du plan, son influence devient négligeable et la tension de claquage correspond approximativement à celle obtenue dans le système pointe-plan sans barrière.

L'introduction d'une barrière isolante conduit à subdiviser notre système en deux, un système pointe-plan et un deuxième plan-plan dont la barrière est l'électrode commune. Le champ électrique dans ce dernier est quasi uniforme [52, 53]. Plus la distance pointe-barrière est faible, plus la tension de claquage est élevée. Les barrières isolantes jouent un rôle d'obstacles géométriques aux décharges directes. 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. Ainsi la barrière placée au voisinage de l'électrode pointe se comporte comme une électrode plane. Or, la tenue diélectrique d'un système d'électrodes plan-plan est meilleure que celle d'un système divergent.

L'insertion des barrières isolantes dans les volumes d'huiles augmentent considérablement le temps de retard au claquage. Cette augmentation dépend principalement de la position de la barrière entre les électrodes. En effet, des travaux d'investigations d'autres auteurs [56], ont montré que le temps de retard au claquage quand la barrière est au voisinage du plan est six fois plus petit que lorsque celle-ci est placée au voisinage de la pointe.

Nous pouvons conclure que l'introduction d'une barrière isolante dans un intervalle pointe-plan augmente la rigidité diélectrique du système, en modifiant la distribution du champ électrique dans l'intervalle d'huile en général et sur le plan en particulier. Une remarque analogue a été observée dans l'air [49, 50, 53].

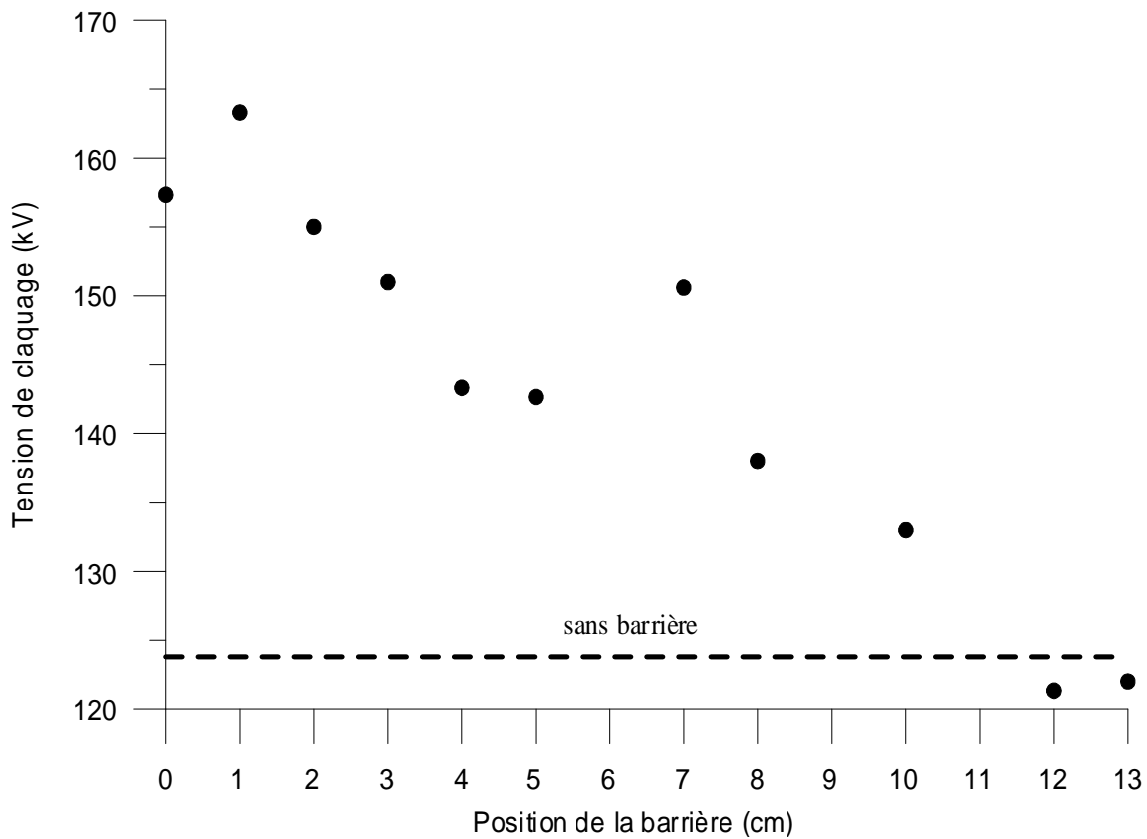


Figure III.107 : Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière ($r_p=4\mu\text{m}$)

III.4. Conclusion

Ce travail nous a permis d'apporter une contribution qualitative à propos de l'influence de certains paramètres électrogéométriques sur la tenue diélectrique de l'huile de transformateur, dans une configuration pointe-plan divergente sous tension alternative 50Hz.

Les essais effectués ont permis d'une part de visualiser les formes des signaux courant et charge durant la phase de préclaquage, d'autre part de suivre l'évolution des caractéristiques du courant, charge électrique, impédance vue des électrodes et de l'énergie en fonction de la tension appliquée, la distance inter-électrodes et le rayon de courbure de l'électrode acérée.

L'introduction de la barrière isolante dans le volume de l'huile fait augmenter la tension de claquage. La position optimale de la barrière est obtenue à une distance de 1 cm à partir de l'électrode haute tension.

CHAPITRE IV

Analyses physico-chimiques

IV.1. Introduction

Afin de mettre en évidence l'influence du vieillissement électrique sur l'altérabilité de l'huile en service et ses répercussions sur les performances d'un transformateur, nous avons procédé aux analyses physico-chimiques et diélectriques des différentes propriétés de l'huile isolante en fonction du nombre de claquages, selon des normes internationales [57, 58, 59, 60]. Par ailleurs, pour suivre l'évolution de ces propriétés, nous avons eu recours à la manipulation des différents appareils de mesure du laboratoire des analyses des huiles de transformateurs de Sharikat Khadamet Mouhaouilat Kahrabaia (SKMK) de Blida.

IV.2. Mesure de la viscosité cinématique à 20°C

Les mesures de la viscosité cinématique ont été réalisées à l'aide d'un viscosimètre de type TAMSON (PMT), conformément aux recommandations de la norme ISO 03104 [57]. L'appareil (Figure IV.1) est muni d'un éclairage, d'un bain d'huile, d'un thermomètre et d'un régulateur de température. On remplit le viscosimètre à capillaires en verres avec le volume d'huile à examiner et pour une température de 20°C, il est aspiré à l'aide d'un aspirateur de l'huile dans le tube capillaire jusqu'au niveau supérieure. A l'aide d'un chronomètre, on mesure le temps (t) nécessaire à l'écoulement du produit entre les deux traits repères. La valeur de la viscosité cinématique est le produit du temps mesuré précédemment en secondes par la constante d'étalonnage de l'appareil.



Figure IV.1 : Viscosimètre TAMSON (PMT) utilisé dans la mesure de la viscosité

La viscosité d'une huile est un paramètre important pour le refroidissement du transformateur. Plus la viscosité est faible, meilleure est le refroidissement [22].

L'analyse des différents échantillons d'huile montre que la viscosité cinématique est légèrement augmentée en fonction du nombre de claquages (Figure IV.2). Ceci peut être le résultat de la pollution de l'huile par des particules solides dissoutes au sein des échantillons, ou encore conséquence de produits d'oxydation.

L'utilisation d'une telle huile induira donc des températures de fonctionnement plus élevées et des pertes plus importantes qui provoquent une détérioration plus rapide de celle-ci.

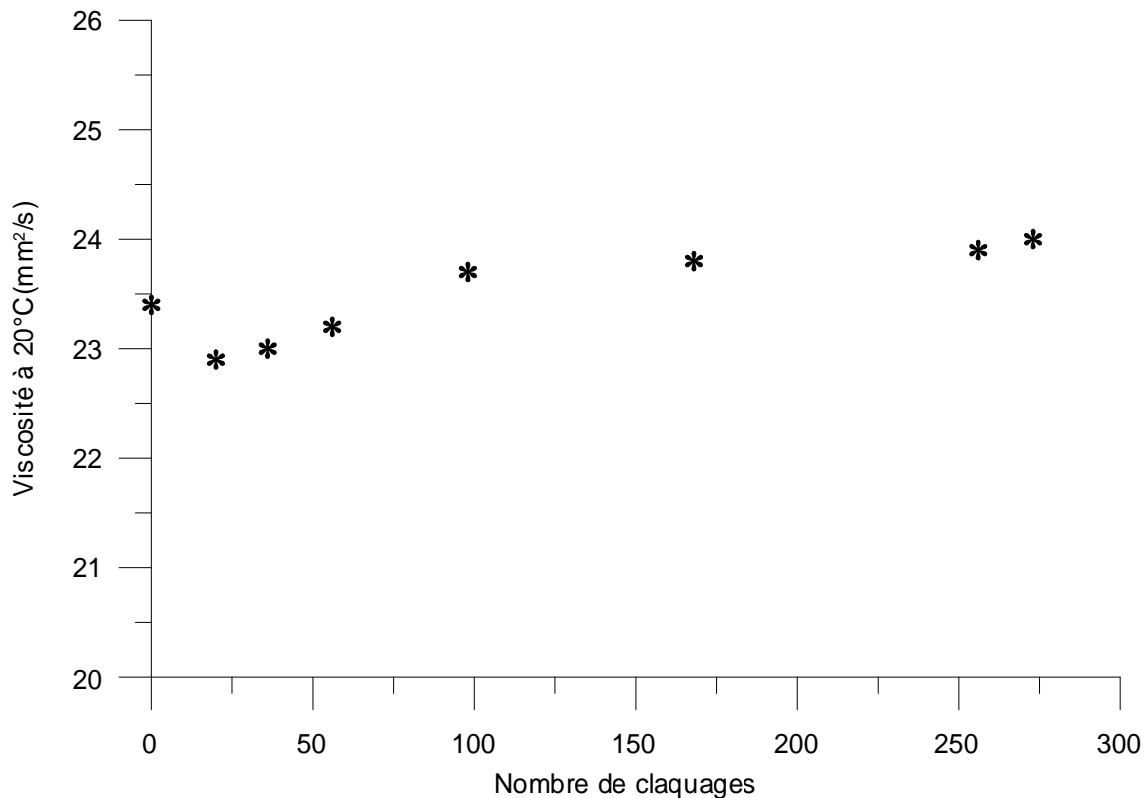


Figure IV.2 : Variation de la viscosité cinématique en fonction du nombre de claquages

IV.3. Mesure de l'indice de couleur

La mesure de l'indice de couleur d'une huile isolante est déterminée à l'aide d'un colorimètre (Figure IV.3) ayant pour étalons des verres colorés.

La détermination de l'indice de couleur est évaluée par comparaison optique (lumière transmise) à ces verres normalisés, qui donnent la même teinte que l'échantillon ou celui dont la couleur est juste supérieure.

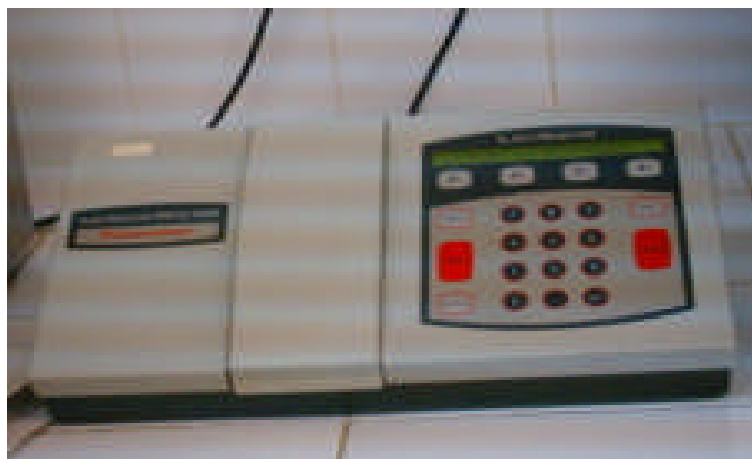


Figure IV.3 : Colorimètre utilisé dans la mesure de l'indice de couleur

L'augmentation de nombre de claquages entraîne la croissance de l'indice de couleur (Figure IV.4). En effet, cette élévation est due à l'oxydation de l'huile, qui a pour conséquence la formation de produits acides [29]. En outre, une mauvaise odeur se dégageait de l'huile au sein du laboratoire durant nos essais d'amorçages électriques. La couleur sombre de l'huile usagée est un signe de dégradation. Cet élément est le premier indice de formation de boues. L'aspect d'une huile peut indiquer la présence d'eau libre et d'impuretés telles que les fibres ou particules de cellulose.

La détermination de l'indice de couleur pour l'huile neuve permet d'apprécier sa qualité. Par ailleurs, pour l'huile en service, sa détermination constitue un moyen efficace pour suivre son oxydation.

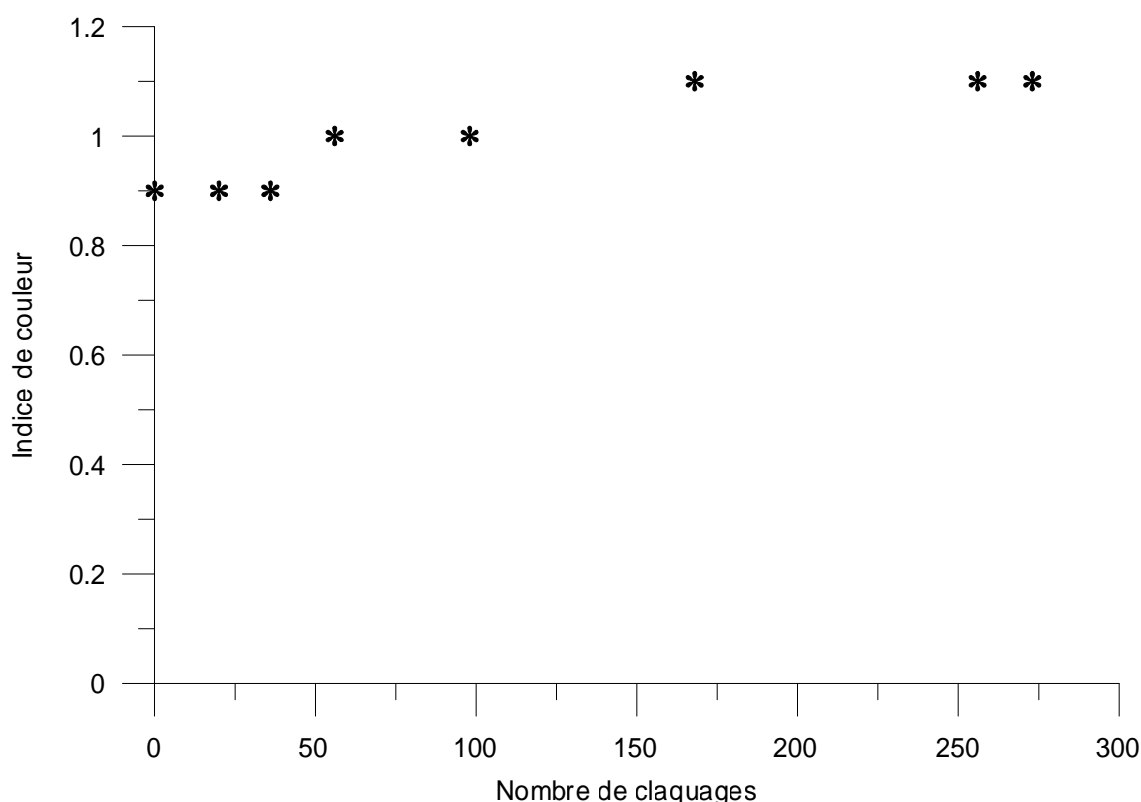


Figure IV.4 : Variation de l'indice de couleur en fonction du nombre de claquages

IV.4. Mesure du point d'éclair

Le point d'éclair a été déterminé par la méthode en coupe fermée. Pour cela, nous avons eu recours à un appareil auto flash de marque GALLENKAMP (Figure IV.5), conformément aux recommandations de la norme ISO 2719 [58]. Dès que la concentration des vapeurs émises par le chauffage progressif du liquide devient suffisante, pour former un mélange inflammable dans l'air, celui-ci brûle à l'approche d'une flamme, le système se déclenche automatiquement et la température affichée correspond au point d'éclair.



Figure IV.5 : Auto flash GALLEKAMP utilisé dans la mesure du point d'éclair

La détermination du point d'éclair nous renseigne quant à la présence d'hydrocarbures gazeux dissous dans l'huile, par suite de défauts électriques ou thermiques.

Le nombre de claquages n'a pratiquement pas d'effet sur le point d'éclair (Figure IV.6), d'où la non formation d'hydrocarbures gazeux.

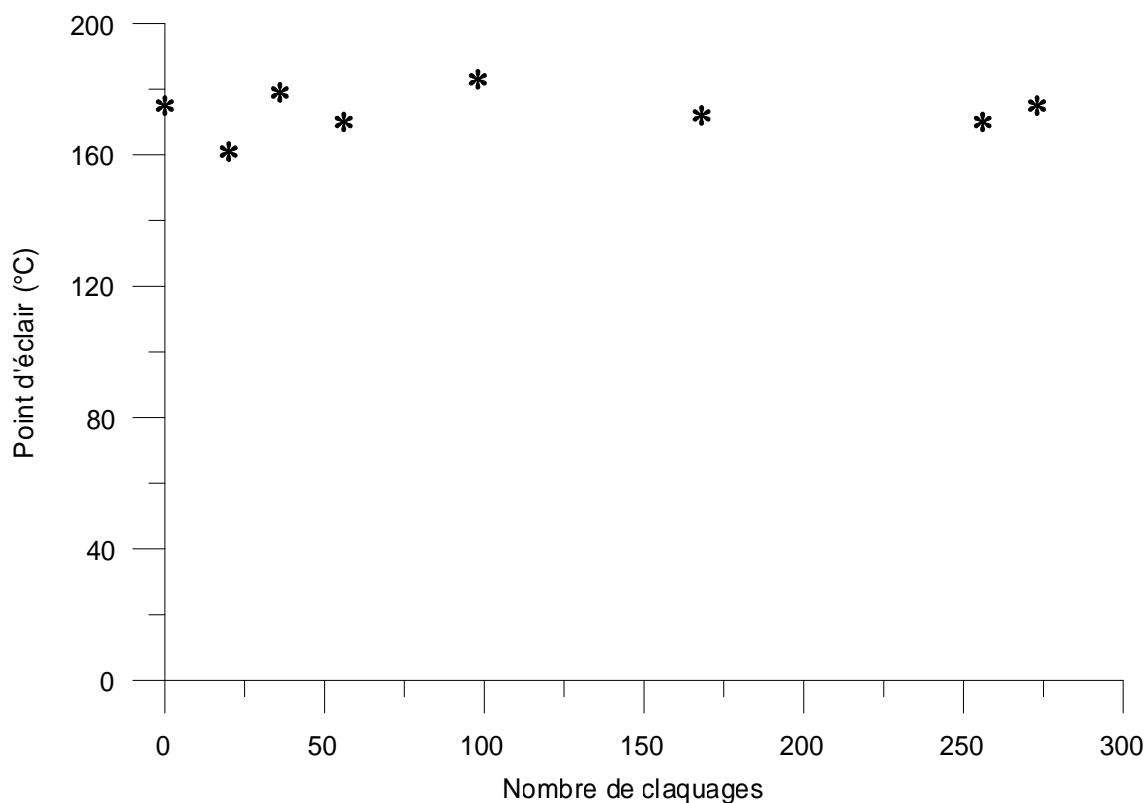


Figure IV.6 : Variation du point d'éclair en fonction du nombre de claquages

IV.5. Mesure de l'indice de réfraction

On appelle réfraction, le changement de direction que subit un rayon lumineux en passant d'un milieu optique donné à un autre. Ce changement est dû à une modification de la vitesse de propagation à partir du point, appelé point d'incidence, où le rayon lumineux incident frappe l'interface. L'indice de réfraction d'une huile isolante dépend en partie de sa composition chimique. Pour la mesure de l'indice de réfraction, nous avons eu recours à un réfractomètre (Figure IV.7) de type CONVEX.



Figure IV.7 : Réfractomètre utilisé dans la mesure de l'indice de réfraction

L'indice de réfraction reste constant pour tous les échantillons d'huiles étudiées (Figure IV.8). Ce paramètre est une caractéristique de l'huile qui sert à identifier sa tendance naphténiqne, paraffinique ou aromatique.

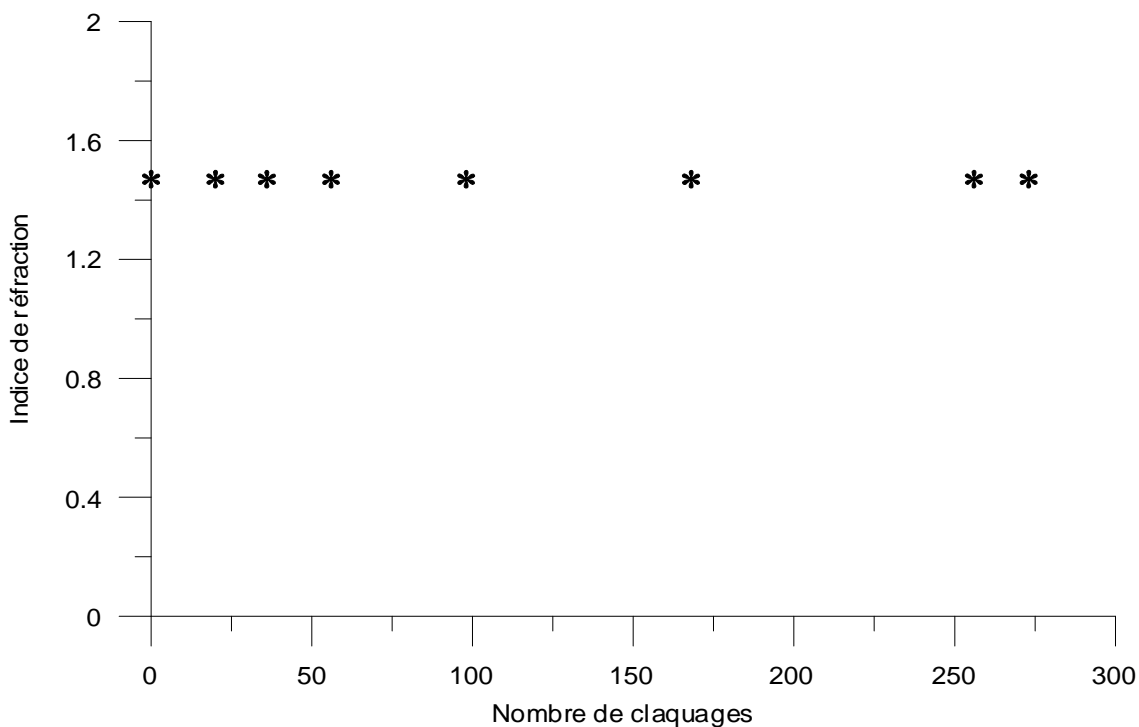


Figure IV.8 : Variation de l'indice de réfraction en fonction du nombre de claquages

IV.6. Mesure de l'indice d'acidité

La mesure de l'indice d'acidité a été réalisée par le procédé chimique simple : la neutralisation, conformément aux recommandations de la norme CEI 296 [59].

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

L'indice d'acidité est calculé au moyen de l'expression :

$$IA = 0.1 M V / m \quad (\text{III.18})$$

où :

0.1 : normalité de la solution KOH (g/l).

M : masse moléculaire de la solution KOH (56.1 g/moles).

M : masse de l'huile (g).

V : volume en ml de KOH nécessaire, pour avoir le virage du mélange (huile+solvant) neutralisé.

L'indice d'acidité d'une huile est une mesure de constituants ou agents contaminants, acides minéraux et/ou organiques, formés au cours de vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de l'huile.

Les résultats obtenus (Figure IV.9) indiquent une augmentation de l'indice d'acidité au début des claquages. Celui-ci se stabilise pour des claquages intermédiaires, pour qu'il croisse de nouveau dans les derniers claquages. A titre d'illustration, l'indice d'acidité passe de 0.016 (mg KOH/g) pour une huile neuve après stockage à 0.052 (mg KOH/g) après 273 claquages.

L'augmentation de l'indice d'acidité semble résulter des produits d'oxydation en présence, conséquence probable de l'existence de l'eau et du contact avec l'air. Cette élévation de l'indice d'acidité nous permet de faire l'hypothèse quant à l'existence de particules conductrices, conséquence de corrosion. En effet, le fer est un composé qui peut se présenter sous forme dissoute, jouant le rôle de catalyseur, en activant la réaction d'oxydation. Ces réactions donnent naissance à des proportions de produits acides.

L'effet de la température joue un rôle prépondérant dans la réaction d'oxydation. La formation de grandes proportions d'acides a été constatée en vieillissement thermique dans des travaux antérieurs [24].

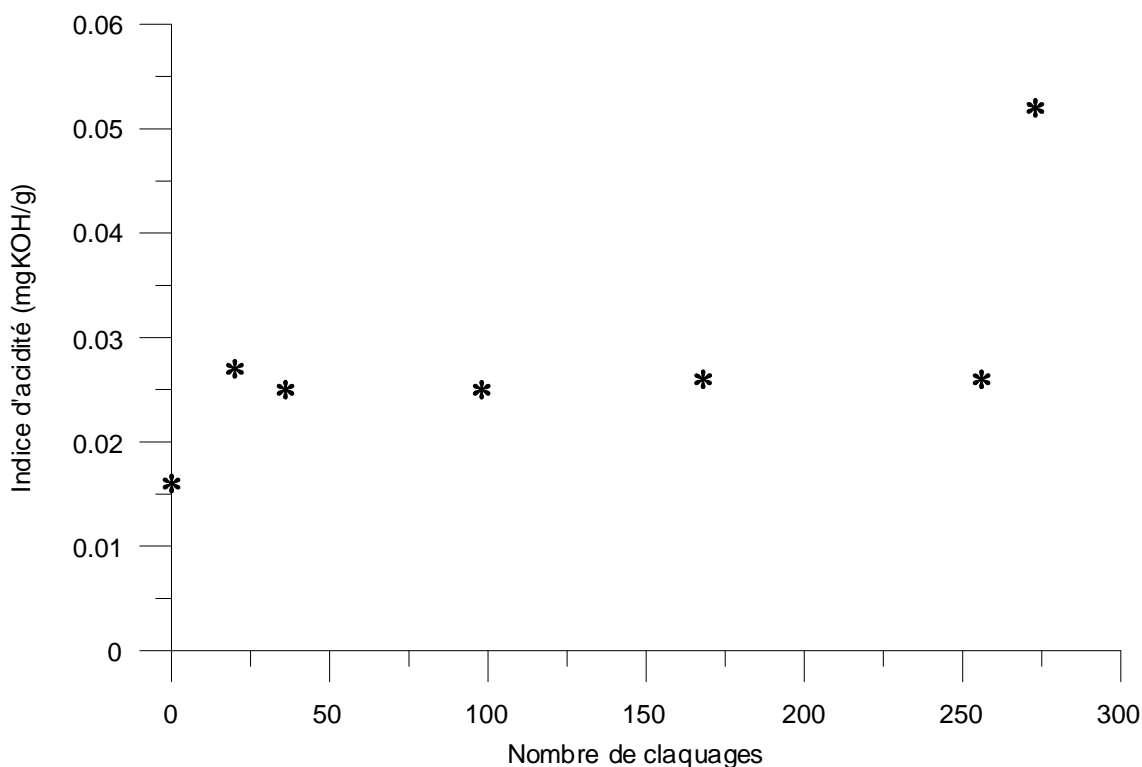


Figure IV.9 : Variation de l'indice d'acidité en fonction du nombre de claquages

IV.7. Mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité à 90°C

Le facteur de pertes diélectrique ($\text{tg } \delta$) et la permittivité relative (ϵ_r) ont été mesurés à l'aide d'un pont de Schering de type Dieltest DLT (Figure IV.10), selon la norme CEI 247 [60]. La cellule d'essais contenant l'échantillon d'huile est constituée de deux cylindres coaxiaux de distance inter-électrodes de 5 mm. Le principe consiste à remplir la cellule de l'huile, puis la chauffer jusqu'à 90° C sous une tension de 2 kV. Les résultats d'essais sont affichés et imprimés automatiquement.



Figure IV.10 : Dieltest DLT utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique et la permittivité relative

IV.7.1. Permittivité relative

Les résultats obtenus (Figure IV.11) montrent que la permittivité relative reste pratiquement inchangée au nombre de claquages. En effet, ce paramètre non affecté par l'usage est une caractéristique de contribution du liquide. Ce résultat s'accorde avec ceux trouvés par d'autres auteurs en vieillissement thermique [12, 24, 29] et en vieillissement en service [22].

Notons que les faibles valeurs de la permittivité de l'huile obtenues à 20°C sont caractéristiques de l'huile minérale. En effet, les huiles minérales pour transformateurs sont considérées comme liquides non polaires, c'est-à-dire elles ne possèdent pas de moments dipolaires permanents et dont la permittivité relative est inférieure à 2,5.

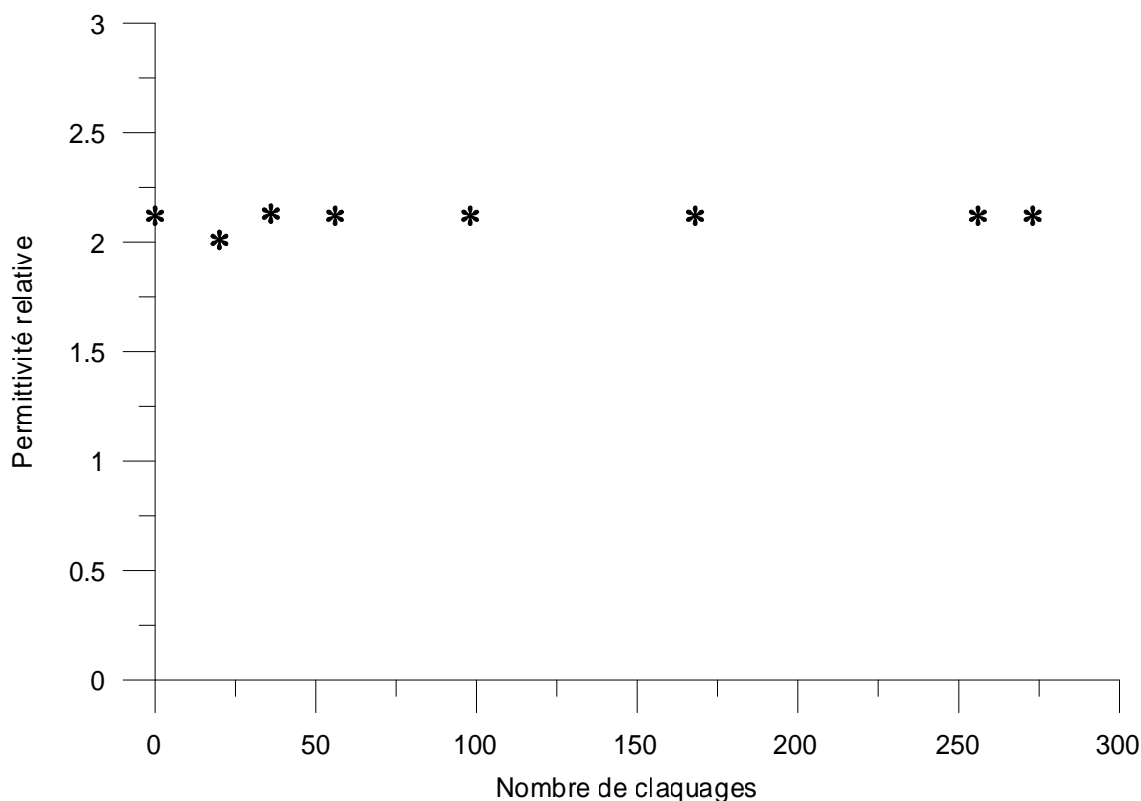


Figure IV.11 : Variation de la permittivité relative en fonction de nombre de claquages

IV.7.2. Facteur de pertes diélectriques

La caractéristique représentée à la figure (IV.12) montre que le facteur de pertes diélectriques augmente avec la dégradation de l'huile. La croissance des pertes diélectriques peut se justifier par la création de porteurs de charges divers. Nous citons les ions formés par des molécules d'huile isolante, les composés d'oxydation polaires et l'existence de gènes extérieurs telles que les impuretés polarisables.

L'augmentation du facteur de dissipation électrique résulte de ces multiples facteurs. Souvent les traitements de filtrage et de déshydratation, ont une action bénéfique sur le facteur de dissipation [29].

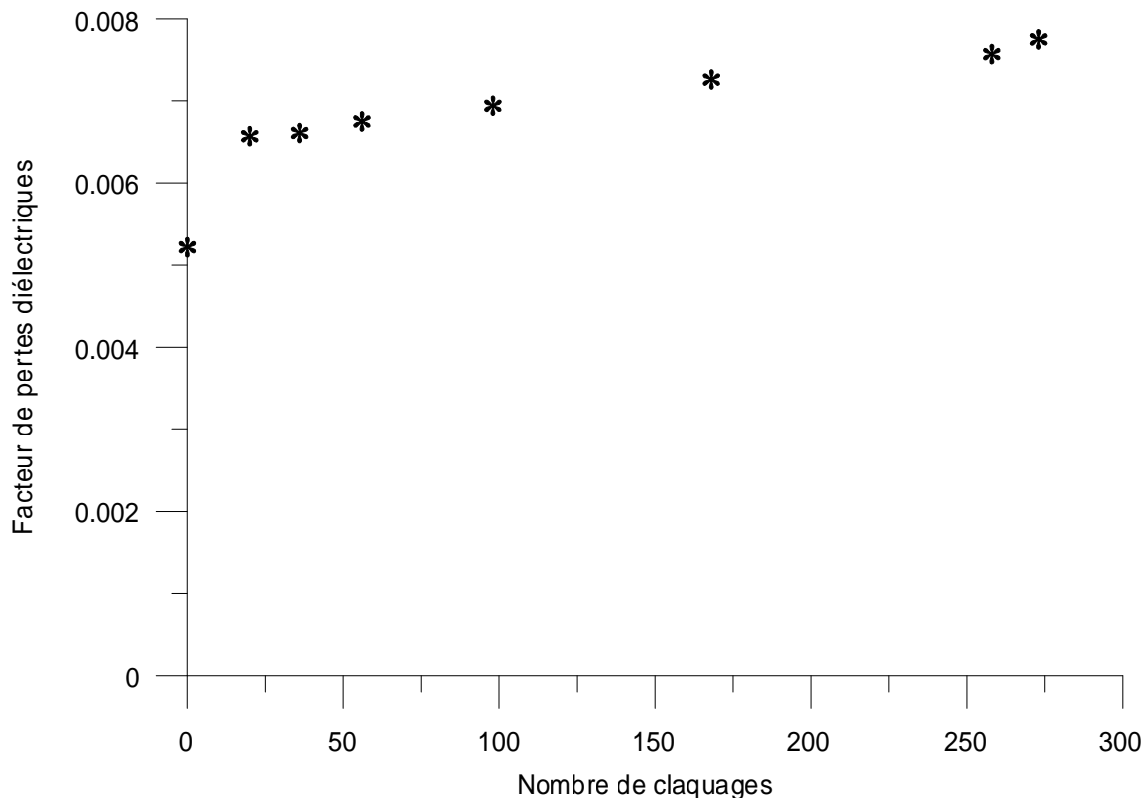


Figure IV.12 : Variation du facteur de pertes diélectriques à 90°C en fonction du nombre de claquages

IV.8. Conclusion

Les résultats d'analyses des différents échantillons de l'huile minérale isolante, neuve et usagée sont conformes aux recommandations des normes utilisées. Ces résultats confirment uniquement une variation de quelques caractéristiques physico-chimiques et diélectriques durant le vieillissement électrique. En effet, nous avons pu tirer les constatations suivantes :

- La permittivité relative reste inchangée au nombre de claquages. Contrairement au facteur de pertes diélectriques qui augmente durant le vieillissement électrique.
- L'indice d'acidité et de couleur augmentent en fonction du nombre de claquages, conséquence de produits d'oxydation en présence.
- La viscosité cinématique croît légèrement. Cela s'explique par l'évolution du temps d'écoulement de cette huile polluée.
- Le point d'éclair et l'indice de réfraction semblent être peu sensibles au nombre de claquages.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La recherche bibliographique répartie sur les deux premiers chapitres nous a permis d'acquérir des connaissances sur les huiles insolantes en général, de l'huile minérale pour transformateur en particulier, et d'approfondir la compréhension des mécanismes conduisant aux claquages des diélectriques liquides.

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). Nous l'avons appuyé par des analyses physico-chimiques des échantillons de l'huile, après chaque série de claquages.

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

- La tenue diélectrique de l'huile minérale est corrélée aux paramètres électrogéométriques du système. En effet l'accroissement de la distance inter-électrodes et du rayon de courbure de l'électrode pointe entraîne l'augmentation de la tension de claquage. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que la rigidité diélectrique décroît en augmentant l'écart entre les électrodes et augmente avec le rayon de courbure de l'électrode haute tension. Il faut aussi noter qu'après 30 s, le temps de repos entre deux claquages successifs n'a pratiquement aucune influence sur la tension de claquage. Cette durée est suffisante pour que l'huile retrouve son équilibre.

- La forme d'onde du signal courant est périodique et présente des déformations au niveau de la valeur crête dans les deux alternances (positive et négative). Le courant évolue dans le même sens que la tension appliquée et le rayon de courbure de l'électrode acérée et diminue avec l'accroissement la distance entre les électrodes. La visualisation simultanée des deux signaux, tension et courant, semble indiquer que ce dernier à un caractère purement capacitif. Au delà d'un certain seuil de tension, l'effet résistif apparaît et le déphasage se stabilise au voisinage de 70° .

- Les caractéristiques représentant la variation de l'impédance vu des électrodes en fonction de la tension appliquée confirment le changement d'état du liquide, pour des tensions allant de 5 à 10 kV. En effet, l'augmentation de l'impédance dans l'intervalle précédent est imputée à la variation de la capacité. Ce fait est dû à la diminution de la permittivité du liquide, suite à un fort apport local d'énergie. L'impédance équivalente augmente légèrement avec la distance inter-électrodes. Cependant, elle diminue en fonction du rayon de courbure de l'électrode acérée.

- Le signal de la charge électrique obtenue est également périodique et présente des déformations. Les résultats d'essais révèlent que la charge électrique, ainsi que l'énergie mise en jeu augmentent en fonction de la tension appliquée et du rayon de courbure de l'électrode haute tension. Toutefois, l'énergie et la charge diminuent avec l'augmentation de la distance pointe-plan.

- L'insertion d'une barrière isolante dans le volume d'huile améliore significativement la tension de claquage. La position optimale de cet écran est obtenue dans notre cas à une distance de 1 cm de la pointe. La barrière isolante est à la fois un obstacle géométrique et électrostatique.

- Après le nombre de claquages effectués, la combinaison des résultats d'analyses physico-chimiques de l'huile utilisée, nous enmène à déduire une faible détérioration de ses différentes propriétés.

- Pour les travaux de recherche futurs et en perspective à notre travail, nous proposons :
 - Une analyse chromatographique plus particulièrement au moment de claquage, afin de déterminer la teneur en gaz dissous.
 - Introduction dans le volume de l'huile de barrières isolantes de différentes natures. Nous souhaitons qu'une attention soit accordée au rayon de la barrière, son épaisseur, son positionnement (parallèle ou perpendiculaire). L'étude serait d'une importance capitale en étudiant les barrières perforées, ainsi que l'effet de barrières en chaîne.
 - En dernier lieu, nous jugeons intéressant d'élargir l'étude à d'autres formes de tensions comme les tensions, impulsionnelle (onde de foudre par exemple) et continue.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **H.N.V. Temperley, D.H. Trevena**, « Les liquides et leurs propriétés » Edition Ellis Horwood, 1978.
- [2] **Ignoc Adamczeski**, « Les phénomènes d'ionisation et de conduction dans les diélectriques liquides », Edition Masson et Cie, Paris 1968.
- [3] **S. Bouazabia**, « Etude des phénomènes de génération des streamers dans les diélectrique liquides », Thèse de Doctorat d'Etat, ENP Alger, 2006.
- [4] **R. Tobazéon**, « Prebreakdown Phenoména in Dielectric Liquids », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N°.6, pp. 1132-1147, December 1994.
- [5] **D. Linhjell, L. Lundgaard and G. Berg**, « Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps », IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.1, N°. 3, pp. 447-458, June 1994.
- [6] **H. Moulai**, « Etude des courants de préclaquages dans les diélectriques liquides », Thèse de Doctorat d'Etat, ENP Alger, 2001.
- [7] **O. Lesaint, P. Gournay, A. Saker, R. Tobazéon, J. Aubin, M. Mailhot**, « Streamer propagation and breakdown under AC in mineral oil for gaps up to 80 cm », Conference Record of the ICDL 96 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, pp. 251-254, Roma, Italy, july 15-19, 1996.
- [8] **A. Beroual et R. Tobazeon**, « Propagation et génération des streamers dans les diélectriques liquides », Revue Phys. Appl. 22, pp.1117-1123, 1987.
- [9] **O. Lesaint and R. Tobazéon**, « Streamer Generation and Propagation in Transformer Oil under ac Divergent Field Conditions », IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.23, N°.6, pp. 941-954, December 1988.
- [10] **P.E. Frayssines, O. Lessaint, N. Bonifaci, A. Denat, S. Lelaidier and F. Devaux**, « Prebreakdown phenomena at high voltage in liquid nitrogen and comparison with mineral oil », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, N°. 6, pp. 899-909, December 2002.
- [11] **F.M.J. McCluskey, A. Denat and O. Lesaint**, « Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids under positive impulse voltage », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N°. 3, pp. 377-382, June 1994.
- [12] **A. Hamimi**, « Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans une huile de transformateur sous champ alternatif divergent », Thèse de Magister, ENP Alger, 1997.
- [13] **P. Rain and O. Lesaint**, « Prebreakdown phenomena in mineral oil under step and ac voltage in large gap divergent fields », IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulations Vol.1, N°. 4, pp. 692-701, August 1994.

- [14] **F.M.J. McCluskey and A. Denat**, « Bubbles formation in synthetic insulating liquids in a pulsed divergent electric field », IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulations Vol.1, N°. 4, pp. 672-679, August 1994.
- [15] **F. Bitam, S. Bouazabia et M. Megherbi** « Modèle phénoménologique du processus de préclaquage dans les diélectriques liquides », 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.162-166, Tizi-Ouzou, 17.18 et 19 Novembre 1997.
- [16] **H. Moulai et A. Beroual**, « Analyse des courants et charges des streamers dans les diélectriques liquides sous tension continue, dans un système d'électrodes pointe cathode-plan », 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.71-74, Tizi Ouzou, 17.18 et 19 novembre 1997.
- [17] **J.P Gosse**, « Conduction électrique et phénomènes prédisruptifs dans les liquides » 3^{èmes} Journées Maghrébines des Sciences des Matériaux, Vol.1, pp.115-119, Alger 27-29 avril 1992.
- [18] **N. Berger**, « Liquides isolants en électrotechnique : caractéristiques des produits » Technique de l'Ingénieur, D2471, 2002.
- [19] **N. Berger**, « Liquides isolants en électrotechnique : présentation générale » Technique de l'Ingénieur, D2470, 2002.
- [20] **P.J. Vuarchex**, « Diélectriques liquides de remplacement des PCB », RGE, N° 8, septembre 1987.
- [21] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechnique : Essai, Mécanismes de dégradation, Applications industrielles », Edition Eyrolles, Paris, 1990.
- [22] **F. Mohellebi**, « Analyse et régénération des huiles usagées », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2000.
- [23] **S. E. Chitour**, « Raffinage du pétrole », Tome 01, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, OPU 1983.
- [24] **S. Abdi**, « Influence du vieillissement thermique sur des propriétés de l'huile de transformateur », Mémoire de Magister, ENP Alger, 2002.
- [25] **S. Boudraa**, « Analyse de gaz dissous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [26] **D. Kind et H. Karner**, « High voltage insulating technology », Friedr. Vieweg and Sohn, Branschweig/ Wiesbaden, 1985.
- [27] **A. Labbaci**, « Contribution à l'étude de la régénération des huiles minérales isolantes », Thèse de Magister, ENP, Décembre 1991.
- [28] **W. H. Vandeschueren**, « Liquides diélectriques », Techniques de l'Ingénieur, D227, 1974.
- [29] **L. Mokhnache**, « Application des réseaux de neurones dans le diagnostic et la prédiction des isolants de haute tension », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 2004.
- [30] **P. Vuarchex**, « Huiles minérales isolantes », Techniques de l'Ingénieur, D231, 1986.
- [31] Recommandations **CEI 268**, Gassing des isolants liquides sous contrainte électrique et ionisation, 1985.
- [32] **F. Viale**, « Les huiles isolantes », Techniques de l'Ingénieur, D230, 1968.

- [33] **M. Nemamcha**, « Décharges électriques dans différentes structures d'isolation imprégnée », Thèse de Doctorat d'Etat es-Sciences, ENP, 1993.
- [34] **R. Fournié**, « Les isolants en électrotechniques: concepts et théories », Edition Eyrolles, Paris, 1986.
- [35] **Z. Djemai**, « Détermination de la dimension fractale des décharges électriques radiales sur les surfaces isolantes », Thèse de Doctorat, ENP Alger, 1998.
- [36] **A. Bérroual**, « Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension », Thèse d'Etat es Sciences Physiques. INPG, Grenoble, 1987.
- [37] **J. P. Gosse, B. Gosse, A. Denat**, « La conduction électrique des liquides diélectriques », Revue RGE, Vol N°10, 1985, pp733-744.
- [38] **R. Tobazéon**, « Préclaquage et claquage des diélectriques liquides », Technique de l'Ingénieur, D2450, 1997.
- [39] **R. Coelho**, « Conduction électrique dans les liquides : Interprétation des phénomènes », Technique de l'ingénieur, D227, 1986.
- [40] **A. Saker, N. Giao Trinh**, « Interpretation of the direct breakdown mechanism in long gaps in transformer oil », 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montréal, Québec, Canada, August 25-29, 1997.
- [41] **L. Herous et M. Nemamcha**, « Etude comparative de la conduction électrique liquides dans différents diélectriques », Troisième Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp. 28-32, Guelma 16-17 Novembre 1999.
- [42] **A. Badent, K. Kist and A. J. Schwab, A. Beroual, W. G. Chadband, M. Danikas, A. B. Sierota, Y. Torshin, M. Zahn**, « Preliminary report for the IEEE deis liquid dielectrics committee international study group on streamer propagation in liquids » Conference Record of the ICDL 96 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectrics Liquids, pp 375-378, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [43] **R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci**, « Formation of vapor bubbles in non-polar liquids initiated by current pulses » IEEE Transaction on Electrical Insulations Vol. 26, N°. 4, pp. 656-662, August 1991.
- [44] **F. Guerbas, S. Bouazabia, A. Beroual**, « Transition d'une bulle gazeuse au streamer », Troisième Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp. 33-36, Guelma 16-17 Novembre 1999.
- [45] **S. Bouazabia, F. Bitam, F. Guerbas et A. Beroual**, « Identification de la perturbation générée dans les diélectriques liquides », 2^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.167-169, Tizi-Ouzou, 17.18 et 19 Novembre 1997.
- [46] **T.Aka-Ngnui, A. Beroual**, « Bubbles instabilities and transition to streamers in liquid dielectrics », Ecole Centrale de Lyon / CEGELY-UPRESA CNRS 5005, IEEE, 1998.
- [47] **I. Fofana, H. Borsi and E. Gockenbach**, « Fundamental Investigations on Some Transformer Liquids under Various Outdoor Conditions », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, N°.6, pp. 1040-1047, December 2001.

- [48] **R. Tobazéon**, « Conduction électrique dans les liquides », Technique de l'Ingénieur, D2430, 2003.
- [49] **L. Mokhnache**, « Contribution à l'étude de l'influence des barrières dans les intervalles d'air pointe-plan par le calcul numérique du champ à l'aide de la méthode des éléments finis avec et sans charge d'espace », Thèse de Magister, Université de Batna, 1997.
- [50] **A. Boubakeur**, « Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan », Thèse de Doctorat, EP. Varsovie, Pologne 1979.
- [51] **A. Zouaghi**, « Etude de l'influence des barrières isolantes sur la tenue diélectrique d'intervalles d'huile en chocs de foudre et en continu », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1997.
- [52] **A. Beroual and A. Zouaghi**, « Barrier effect on the prebreakdown and breakdown phenomena in long oil gaps », Conference Record of the ICDL 96 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquid, pp. 300-303, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [53] **B. Boubekki**, « Mesure du champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre », Mémoire de Magister, ENP Alger, 2006.
- [54] **H. Moulai, A. Beroual**, « Courants de streamers dans l'huile minérale pour transformateurs sous tension alternative- transition au claquage », 3^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, pp.45-48, Guelma, 16 et 17 Novembre 1999.
- [55] **F. Guerbas**, « Etude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition en streamers », Thèse de Magister, ENP Alger, 1994.
- [56] **A. Zouaghi and A. Beroual**, «Barrier effect on the time lag to breakdown of transformer oil gaps under lightning impulse voltage», Ecole Centrale de Lyon / CEGELY-UPRESA CNRS 5005, IEEE, 1998.
- [57] Norme Internationale **ISO 3104**, Produits pétroliers, liquides opaques et transparents détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique, 1994.
- [58] Norme Internationale **ISO 2719**, Détermination du point d'éclair- Méthode Pensky Martens en vas clos, Méthode A, troisième édition 2002.
- [59] Norme Internationale **CEI 296**, Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion, deuxième édition, 1982.
- [60] Norme Internationale **CEI 247**, Liquides isolants - Mesure de la permittivité relative, du facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$) et de la résistivité en courant continu, troisième édition, 2004.