

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER



DEPARTEMENT de GENIE ELECTRIQUE

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Laboratoire de Haute Tension

Projet de Fin d'Etude

*Pour obtention du titre
d'ingénieur d'état en électrotechnique*

Spécialité : Génie Electrique
Présenté par

KADRI Farid & RAHALI Hilal

**INFLUENCE DES BARRIERES ISOLANTES SUR
LA TENSION DE DECHARGE DISRUPTIVE DES
INTERVALLES D'HUILE SOUS TENSION
ALTERNATIVE**

Rapporteurs: M: A. BOUBAKEUR
M^{me} : F.GUERBAS

Professeur à l'ENP
Chargée de cours, USTHB

juin 2008

10, Avenue Hassen Badi, BP 182, El-Harrach, Alger, Algérie.

ملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الحواجز العازلة على التوتر الإنفصامي لمجالات الزيوت تحت توتر متناوب ذو تردد صناعي 50 هرتز, في نظام نتوء – مستوي. تخضع الزيت المستعملة و المسماة "بوراق 22" إلى مختلف عوامل التأثير, كالمسافة الفاصلة بين الأقطاب, الوضعية النسبية للحاجز, وكذا نصف قطر قطب التوتر العالي. النتائج المتحصل عليها في بحثنا تؤدي في مجملها إلى تحسين تفسير الأعمال السابقة في نفس المجال و التي أجريت من قبل مخبر التوتر العالي للمدرسة الوطنية متعددة التقنيات في مجال صلابة مجالات الزيوت لأنظمة نتوء مستوي .

الكلمات المفاتيح : زيت المحولات, الحواجز العازلة, مجالات الزيوت, نظام نتوء – مستوي.

Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence des barrières isolantes sur la tension de décharge disruptive des intervalles d'huile 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 distance inter-électrodes, et la position de la barrière, le rayon de courbure de l'électrode haute tension. Les résultats obtenus ont analysés, interprétés et comparés avec ceux obtenues par d'autres chercheurs.

Les résultats de nos travaux contribuent à l'amélioration de l'interprétation des résultats d'investigations précédemment faites au Laboratoire de Haute Tension de l'ENP dans le domaine de la rigidité des intervalles d'huile pointe-plan.

Mots clés : huile de transformateurs, barrières isolantes, intervalles d'huile, système d'électrodes pointe – plan.

Abstract

The objective of our work is to study the influence of the insulating barriers on the disruptive discharge voltage of the oil gaps under alternating voltage at industrial frequency 50 Hz, in a point – plane electrodes system, The used oil called Borak 22, was studied for various parameters such as the distance inter-electrodes and the position of the barrier, the curvature radius of the high voltage electrode.

The results of our work contribute to the improvement of the interpretation of investigations results previously made at the Laboratory of High Voltage of the ENP in the field of the rigidity of the point-plan oil gaps.

Key words: transformer oil, insulating barriers, oil intervals, system of electrodes points – plane.

Remerciements

Nous remercions Allah de nous avoir prêté vie, santé et volonté pour achever ce travail.

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

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

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

Nous remercions Madame D. NAMANE, Chargée de cours à l'École Nationale Polytechnique d'Alger, d'avoir toujours été agréable avec nous et d'avoir bien voulu examiner notre Projet de Fin d'Études.

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

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

الإهداء

لك الحمد ربي على عظيم فضلك و كثير عطائك
انه لا يسعنا في هذه اللحظات التي لعلنا لا نمك أعلى منها أن نهدي ثمرة هذا العمل
المتواضع إلى:

√ فضاء المحبة و بحر الحنان، ريحانة الدنيا و بهجتها: أمي الغالية حفظها الله.
√ الذي علمني أن الحياة كفاح و نضال: أبي العزيز حفظه الله.
√ الأعمدة التي أظل ارتكز عليها للصمود، إخوتي: حمزة، بدرو، طارق، سعيد،
أسامة.

√ الأزهار الفتية و المبتهجة، أخواتي: فاطمة الزهراء، دنيا.
√ عصافير حياة العائلة: مريم، يوسف، ملوكة.
√ المعادلة التي ترسم منحنى حياتي: أصدقائي: هلال، نبيل، محمد، أيوب، عقبة،
عبد الباسط، يوسف.

√ من قضى زهرة شبابه في محراب العلم المقدس.
√ من حمل هذه الرسالة و تصفح أوراقها بعدي.

فريد

الإهداء

بسم الله الرحمن الرحيم

إلى التي ربت وتعبت و سهرت الليالي. إلى التي تألمت لأجل راحتي.
إلى أحب من في الوجود بعد الله و رسوله أمي الحبيبة.
إلى الذي كرس حياته و ماله في تربيتي و تعليمي أبي الغالي.
فأسأل الله طول العمر كي أرد جزءا من جميلهم.
إلى أخوتي: عبد الرزاق, عبد الجليل , ابتسام و محمد.
والى جميع أفراد عائلتي رحالي و سلماني.
إلى اعز أصدقائي في المدرسة فريد, سمير, الجلال ,
عبد الغاني, زكرياء, فاروق .
وبالأخص الزميلة الغالية لاميــــــــــــة.
إلى كل من ساهم في هذا العمل من قريب أو من بعيد.

Sommaire

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

Chapitre I

CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES

I.1 Introduction.....	4
I.2 Catégories de liquides isolants.....	5
I.2.1 Liquides de synthèse.....	5
I.2.2 Huiles végétales.....	6
I.2.3 Huiles minérales.....	7
I.3 Claquage des liquides isolants.....	7
I.3.1 Mécanisme électronique.....	8
I.3.2 Mécanisme de claquage faisant intervenir une phase gazeuse.....	10
I.3.2.1 Mécanisme thermique.....	11
I.3.2.2 Mécanisme de cavitation	12
I.3.2.2.1 Cavitation d'origine électrique.....	12
I.3.2.2.2 Cavitation électro-hydrodynamique	13
I.3.3 Mécanisme de claquage par pont.....	14
I.3.3.1 Origine des particules.....	14
I.3.3.2 Teneur des particules.....	15
I.3.3.3 Rôle des particules dans le claquage.....	15
I.3.4 Longues décharges dans les liquides.....	16
I.4 Facteurs influents sur la rigidité diélectrique des liquides.....	17
I.4.1 Paramètres électro géométriques.....	17
I.4.2 Pression hydrostatique	17
I.4.3 Température.....	18
I.4.4 Tension	18
I.4.5 Humidité	18
I.5 Conclusion.....	19

Chapitre II

CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES SOLIDES

II.1 Introduction	20
II.2 Rigidité diélectrique des isolants solides.....	21
II.2.1 Définitions et mécanismes de claquage	21
II.2.1.1 Définitions	21

II.2.1.2 Mécanismes de claquage.....	21
II.2.1.2.1 Claquage électronique	22
II.2.1.2.2 Claquage thermique	22
II.2.1.2.3 Claquage électromécanique	24
II.2.1.2.4 Autres mécanismes de claquage	24
Mécanisme des Streamers	24
Rupture par Arborescence	24
Rupture par Erosion	25
Rupture après Vieillessement.....	26
II.3 Mesure de la rigidité diélectrique	29
II.3.1 Rigidité intrinsèque	29
II.3.2 Rigidité pratique	30
II.4 Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique	30
II.4.1 Tension appliquée	30
II.4.2 Épaisseur et homogénéité de l'éprouvette	31
II.4.3 Température	31
II.4.4 Caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant	31
II.5 Conclusion	31

Chapitre III

INFLUENCE DES BARRIERES ISOLANTES DANS LES INTERVALLES D'AIR ET D'HUILE

III.1 Introduction	33
III.2 Influence d'une barrière isolante dans les intervalles d'air.....	34
III.2.1 Influence du type de tension	34
III.2.2 Influence de la polarité de l'électrode pointe	35
III.2.3 Influence de la position de la barrière	35
III.2.4 Influence de la largeur de la barrière	36
III.2.5 Influence de l'épaisseur et de la permittivité	36
III.2.6 Influence de la barrière trouée	36
III.2.7 Influence du matériau de la barrière	37
III.2.8 Formes des décharges observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante	37
III.2.8.1 Décharge directe	37
III.2.8.1.1 Cas où la décharge perce la barrière	38
III.2.8.1.2 Cas où la décharge contourne la barrière	38
III.2.8.2 Décharge par étapes	38
III.3 Influence d'une barrière isolante dans les intervalles d'huile.....	40
III.3.1 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'huile	40
III.3.2 Influence de la position de la barrière	42

III.3.3 Influence des dimensions et du nombre de barrières	42
III.3.4 Influence de la perforation de la barrière	43
III.3.5 Influence de la nature de la barrière	43
III.4 Conclusion	43

Chapitre VI

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1 Introduction	45
IV.2 Techniques expérimentales	45
IV.2.1 Station d'essai	46
IV.2.2 Cellule d'essais	48
IV.2.3 Les Paramètres utilisés.....	49
IV.2.4 Présentation de l'huile	50
IV.2.5 circuits de mesures de la tension de claquage	50
IV.3 Résultats et interprétations	51
IV.3.1 Essais sans barrière	51
IV.3.1.1 Effet de la distance inter-électrodes	51
IV.3.1.2 Effet du rayon de courbure	52
IV.3.2 Essais avec barrière	54
IV.3.2.1 Effet de l'insertion de la barrière	54
IV.3.2.2 Effet de la position de la barrière	55
IV.3.2.3 Influence des dimensions de la barrière.....	56
IV.3.2.3.1 Effet du diamètre de la barrière	56
IV.3.2.4.2 Effet de l'épaisseur de la barrière	58
IV.3.3 Equivalence géométrique	59
IV.4 Conclusion	61
 Conclusion générale	 62

Références bibliographiques

INTRODUCTION GENERALE

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

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

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

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

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

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

Notre travail comprend quatre chapitres.

Le premier chapitre présente des connaissances concernant le claquage des diélectriques liquides, les différents mécanismes ainsi que les facteurs influant sur le claquage des liquides.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le claquage des diélectriques solides, les différents mécanismes ainsi que les facteurs influant sur la tension de claquage des isolants solides.

Nous présentons par la suite, dans le troisième chapitre, une synthèse des travaux sur l'influence des barrières isolantes dans les moyens intervalles d'air, ainsi que

dans les liquides.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation des techniques expérimentales utilisées et des résultats obtenus relatifs aux variations des facteurs influant sur la tension de décharge disruptive de l'huile de transformateur.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES

I.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 [2].

Les liquides isolants sont utilisés comme imprégnants d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc.

Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas des transformateurs.

Les liquides sont également utilisés pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et, dans certains cas, pour améliorer la résistance au feu (transformateurs de distribution) [3].

Les volumes de liquides employés dans les appareils électriques varient de la fraction de litre (condensateurs) à plusieurs centaines de mètres cubes (transformateurs de puissance). 90 à 95 % du marché des liquides isolants est couvert par les huiles minérales. Cette prépondérance s'explique par le faible coût de ces produits, obtenus directement à partir des bruts pétroliers. Les liquides de synthèse les plus utilisés sont les alkybenzènes (plusieurs dizaines de milliers de tonnes par an), leur coût étant environ le double de celui des huiles minérales. L'emploi d'huiles végétales est apparu récemment en raison de leur image «verte».

Cependant, pour certaines applications, notamment l'emploi dans les transformateurs, les huiles végétales ne peuvent pas être utilisées seules mais avec des additifs « non verts ». Les consommations restent cependant encore très faibles (quelques centaines de tonnes/an) [4].

Les liquides sont généralement employés avec des isolants solides et, en cas de développement de produit nouveau, la compatibilité liquide-solide doit être vérifiée par de nombreux essais accélérés [3].

I.2 Catégories de liquides isolants

I.2.1 Liquides de synthèse

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

Il existe quatre types principaux de liquides de synthèse :

- Les hydrocarbures aromatiques : ces liquides peuvent être classés en deux groupes : les alkybenzènes et les autres hydrocarbures aromatiques.
- Les hydrocarbures aliphatiques tels les polyoléfines, qui sont des hydrocarbures insaturés à chaîne droite ou ramifiée, possédant une double liaison en bout de chaîne.

- Les esters issus de réaction d'acides organiques et d'alcools. Ces produits offrent d'excellentes propriétés lubrifiantes et des opérabilités aux températures extrêmes.
- Les silicones : ont été proposées comme liquides de remplacement des askarels pour transformateurs. Le produit le plus communément employé est le polydiméthylsiloxane.

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

Les polychlorobiphényles (ou polychlorodiphényles selon la nomenclature) sont également des liquides de synthèse et ont été utilisés largement pendant une trentaine d'années. Leur persistance dans l'environnement conduit à leur bannissement ; cependant, ils sont encore présents dans certains appareils âgés. Seuls des produits biodégradables sont maintenant acceptés [5].

I.2.2 Huiles végétales

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

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

I.2.3 Huiles minérales

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

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

L'amélioration progressive des procédés de raffinage des bruts a abouti à l'obtention d'huiles minérales de plus en plus performantes. Ces améliorations, associées aux évolutions technologiques, ont permis de réduire progressivement les volumes d'huiles dans les appareils [5].

I.3 Claquage des liquides isolants

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

Les connaissances acquises, surtout ces trois dernières décennies, n'ont pas permis d'établir une théorie unifiée capable d'expliquer le phénomène de claquage des milieux liquides dont les plus connus sont : le mécanisme de claquage électronique, basé sur un processus cumulatif d'ionisations et de collisions entre les électrons et les molécules du liquide, le mécanisme de claquage où la phase gazeuse joue le rôle de détonateur et le mécanisme de claquage dû à l'établissement d'un pont de particules entre les électrodes[6].

On distingue généralement le claquage électronique et le claquage thermique tout en notant que la distinction n'est pas forcément évidente car un claquage électronique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique et inversement. Un claquage thermique, est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique [5].

Ces deux processus sont les principaux mécanismes qui peuvent être présentés en ce qui concerne le claquage des diélectriques liquides. Le troisième, peut être dû à la présence d'impuretés de diverses natures, en suspension dans le diélectrique liquide. Ce dernier mécanisme est le plus proche de celui concernant les huiles de transformateur soumises à différentes contraintes en exploitation, plus particulièrement au vieillissement électrique et au vieillissement thermique en présence d'impuretés de différentes natures [6].

I.3.1 Mécanisme électronique

Les premiers travaux proposaient d'adopter les résultats acquis dans les gaz, pour expliquer le claquage dans les diélectriques liquides. Ils supposèrent que des mécanismes d'ionisation de type α basés sur les vibrations électroniques et les électrons libres ou bien des émissions et multiplications électroniques, intervenaient dans le claquage des diélectriques liquides [7].

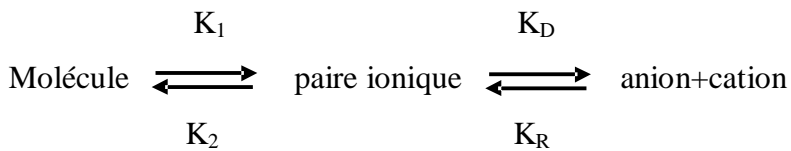
Le processus de multiplication électronique a été proposé à l'origine par Townsend, pour décrire les phénomènes d'amorçage dans les gaz. Ce processus est une conséquence de l'accélération d'un ou plusieurs électrons par le champ, sur une distance égale au libre parcours moyen. Le gain d'énergie acquis par ces charges permet l'ionisation à la suite de collisions, d'une ou plusieurs molécules [8].

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

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

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

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



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

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

L'application d'un champ électrique dans le liquide modifie les énergies d'interaction entre les ions dans le liquide. La théorie cinétique exacte du champ sur la dissociation des paires, est due à Onsager. Elle prévoit que K_D varie avec la valeur absolue du champ alors que K_R est indépendant du champ [8].

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 [9].

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

Plusieurs mécanismes de création d'ions peuvent être envisagés [9] :

§ Injection d'électrons par la cathode et capture des électrons : les liquides ne sont pas suffisamment purs dans leurs conditions d'utilisation, pour que leur conduction soit électronique et les électrons soient immédiatement piégés par des composés accepteurs d'électrons (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 :

§ 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.

I.3.2 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 [10]. Certains auteurs supposent que les cavités gazeuses existent à priori et considèrent uniquement la propagation de ces cavités [11].

I.3.2.1 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 [8]. 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 :

$$I = A V^n$$

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

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

$$W = cte E_c^n \tau$$

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 :

$$W = C_p (T_b - T_a) + L_v$$

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.

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:

- 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.

I.3.2.2 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.

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

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

I.3.2.2.1 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 inter-faciales 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 [8].

I.3.2.2 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 :

$$V_{EHD} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}$$

en un temps

$$t \cong \frac{\eta}{\varepsilon E_0^2}$$

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 :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_{EHD}^2$$

ρ : Masse volumique du liquide

V_{EHD} : Vitesse d'écoulement électrohydrodynamique.

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

I.3.3 Mécanisme de claquage par pont

Les grands volumes de liquides, utilisés dans l'industrie électrique, contiennent généralement des impuretés sous forme de particules en suspension : fibres, poussières, débris métalliques, gouttelettes d'eau, bulles de gaz,... Ces particules (isolantes ou conductrices) présentes dans le liquide, sont responsables d'une diminution significative de sa rigidité diélectrique. Sous l'action d'un champ électrique, les particules sont attirées vers les zones de champ intense pour former des ponts entre les électrodes, facilitant ainsi le claquage du liquide. Dans le cas des particules déformables (bulles de gaz, gouttelettes d'eau), le claquage peut intervenir suite à l'élongation de ces particules reliant ainsi les électrodes par un canal, après ionisation [2].

I.3.3.1 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 [11] :

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

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

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

I.3.3.2 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 carbonés tend à augmenter.

I.3.3.3 Rôle des particules dans le claquage

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

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

a) Particules isolantes

Les particules isolantes, ayant la permittivité plus grande que celle du liquide, seraient attirées sous l'action du champ électrique vers les régions de champ intense et formeraient des ponts entre les électrodes. La rupture, dans ce cas, serait le résultat soit de l'échauffement produit par effet joule dans le pont qui est plus conducteur que le liquide, soit par la grande intensité locale du champ qui apparaît juste avant l'achèvement du pont [8].

b) Particules conductrices

Les particules conductrices peuvent se charger facilement au contact d'une électrode et transporter leur charge sur l'autre électrode. Lorsque la distance entre la particule et

l'électrode ayant le signe opposé est très petite, le champ est si élevé qu'une microdécharge s'amorçant entre la particule et l'électrode déclencherait la rupture.

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

I.3.4 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 [10].

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

- Une phase de génération ou peuvent se manifester simultanément ou successivement des phénomènes de diverses natures (électrique, optique, hydraulique,...), caractérisée par un temps t_g dit de génération, pendant lequel apparaît au voisinage d'une électrode, une perturbation revêtant la forme d'arborescence dénommée « streamer » dans la formulation anglaise.

- Une phase de propagation durant laquelle se développe la perturbation précédemment créée. Cette phase a été de loin la plus étudiée et est caractérisée par un temps t_p dit de propagation.

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

I.4 Facteurs influant sur la rigidité diélectrique des liquides

I.4.1 Paramètres électro géométriques

L'augmentation de la distance inter-électrodes engendre la croissance de la tension de claquage (**Figure I.1**) [9]. Par ailleurs la rigidité diélectrique du liquide diminue avec l'accroissement de la distance inter-électrodes. En champ non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain niveau, une densité d'énergie sous forme d'impulsions est injectée à partir d'aspérités de la pointe. Le rayon de courbure de la pointe joue un rôle important sur la nature et la durée des phénomènes prédisruptifs, plus ce rayon est faible, plus l'intensité du champ électrique obtenu est considérable.

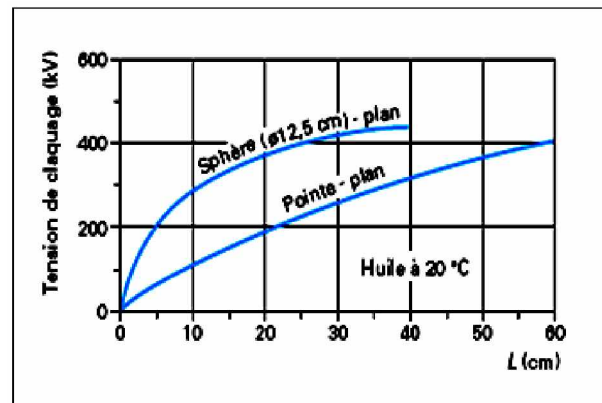


Figure I.1: Valeur efficace de la tension de claquage d'une huile minérale sous tension alternative en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan

I.4.2 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 [8].

I.4.3 Température

L'augmentation de la température entraîne la diminution de la rigidité diélectrique de l'huile. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent [8].

I.4.4 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 [8].

I.4.5 Humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier (**Figure I.2**). Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes, suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau-huile [12].

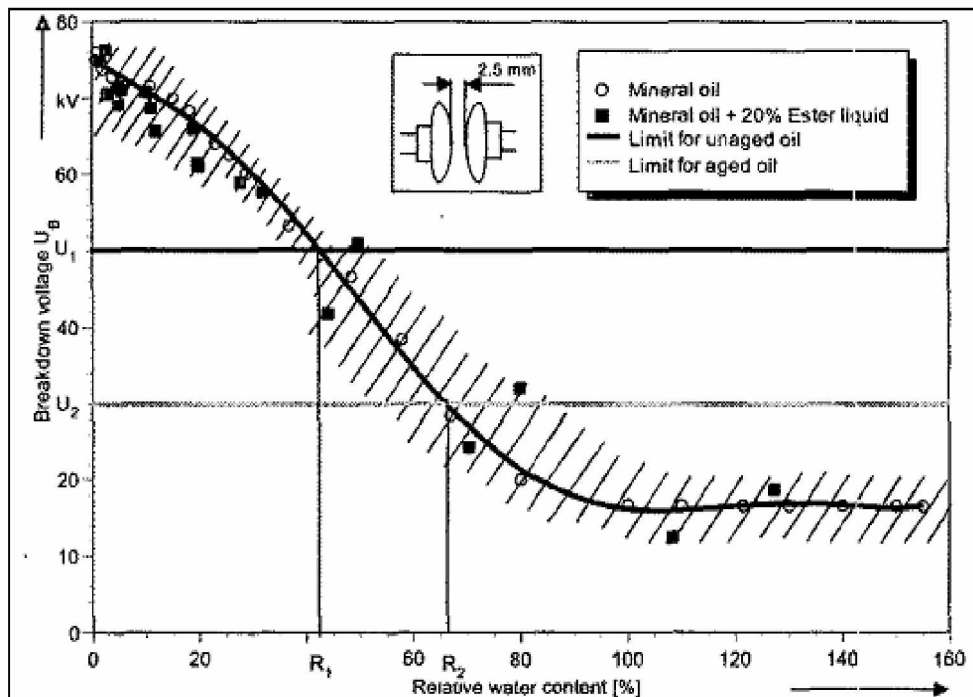


Figure I.2: Tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau, dans l'huile minérale et dans une solution composée de l'huile minérale avec 20% d'ester liquide.

I.5 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.

CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES SOLIDES

II.1 Introduction

Tout matériel électrique ou électronique est constitué d'un agencement judicieux de matériaux conducteurs qui servent à transporter l'énergie électrique (ou l'information) là où elle doit être utilisée et de matériaux isolants qui permettent d'empêcher celle-ci de se perdre en empruntant le plus « court » chemin d'un potentiel à un autre. Outre leur fonction première qui est de s'opposer au passage du courant entre conducteurs, les isolants solides ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées

Dans certains cas, la quantité de matériaux isolants solides utilisée est réduite à l'extrême: par exemple pour les lignes électriques aériennes en conducteurs nus.

Mais dès que l'on cherche à réduire l'encombrement d'un matériel (préoccupation permanente aujourd'hui), on est amené à rapprocher les conducteurs, et par conséquent à les maintenir rigidement en place pour éviter qu'ils ne viennent en contact sous l'effet de leur propre poids, de déformations, de forces extérieures au matériel ou des efforts électrodynamiques internes. Les matériaux isolants solides peuvent être employés seuls, en association de plusieurs solides (bobinage réalisé en fil émaillé imprégné de résine thermodurcissable) ou en association d'un solide et d'un liquide (isolation en papier imprégné d'huile minérale pour les transformateurs à haute tension). Dans ces deux derniers cas, on parle de système d'isolation.

Le rôle essentiel des isolants étant de servir de barrière, on s'intéressera en premier lieu à leurs propriétés électriques.

Aucun isolant n'étant parfait, on est tout d'abord conduit à étudier les mécanismes de conduction dans les isolants solides qui débouchent sur les notions de résistance d'isolement et de résistivités.

II.2 Rigidité diélectrique des isolants solides

II.2.1 Définitions et mécanismes de claquage

II.2.1.1 Définitions

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage ou perforation diélectrique rendant impossible une nouvelle application de la tension [13]. Le claquage est précédé par une augmentation importante du courant circulant dans le matériau avec des conséquences thermiques destructives : fusion, évaporation, décomposition, carbonisation, ...

En pratique, la rigidité diélectrique est le rapport entre la tension de claquage et la distance entre les électrodes auxquelles cette tension est appliquée dans des conditions d'essai spécifiées. Pour que cela soit tout à fait exact, il conviendrait que le champ soit uniforme, c'est-à-dire que les électrodes soient planes et parallèles avec des bords tels qu'ils ne provoquent en aucun point de renforcement du champ. On se contente de fait souvent d'électrodes dont le rayon de courbure est grand devant la distance inter électrodes.

Divers mécanismes peuvent conduire au claquage. Nous analyserons les principaux mécanismes invoqués actuellement.

II.2.1.2 Mécanismes de claquage

Le claquage est l'aboutissement d'une série de processus complexes et interactifs. Assez souvent, l'un des mécanismes est prédominant.

On distingue le claquage intrinsèque du matériau qui est lié à des phénomènes électroniques, thermiques ou mécaniques.

Les valeurs de rigidité diélectrique intrinsèque des matériaux isolants nobles atteignent plusieurs centaines de kV/mm, voire 1 MV/mm [13].

Le claquage intrinsèque du matériau est toujours extrêmement difficile à atteindre et ne présente généralement qu'un intérêt théorique.

II.2.1.2.1 Claquage électronique

Il existe plusieurs théories du claquage électronique, aucune d'elles ne permettant d'expliquer toutes les constatations expérimentales.

Chaque théorie est analysée en comparant ses prédictions théoriques aux effets constatés de certains paramètres tels que la température, l'épaisseur, le temps d'application de la tension ... etc.

Dans ces théories, on admet que le claquage est produit par les électrons présents dans le matériau dont l'origine peut être soit l'injection cathodique par effet tunnel, soit l'ionisation stimulée par l'effet Poole-Frenkel, ou encore les rayons cosmiques [13]. La distribution d'énergie de ces électrons augmente avec le champ appliqué, et à partir d'une valeur critique de ce champ (rigidité diélectrique), des électrons sont produits en nombre suffisant pour entraîner la destruction du réseau appelée claquage.

Deux grandes théories s'opposent dans le domaine du claquage électronique : les théories collectives et la théorie de l'avalanche.

Les théories collectives, non développées ici, sont dues initialement à Van Hippel et à Frölich. Elles font appel, d'une part, au transfert d'énergie du champ électrique au nuage électronique et, d'autre part, aux interactions électrons-réseau. Le claquage survient lorsque le transfert de l'énergie prise au champ est supérieur à celui des électrons vers le réseau du matériau.

La théorie de l'avalanche a été développée initialement par Seitz [13]. Elle suppose qu'un électron est présent à l'origine dans le matériau (rayon cosmique par exemple). Cet électron produit une ionisation par collision qui entraîne une avalanche. On estime généralement le nombre d'électrons nécessaires pour produire une avalanche suffisamment destructive à 10^{12} , ce qui correspond à 40 générations de collisions (en effet $2^{40} \approx 10^{12}$) [13].

II.2.1.2.2 Claquage thermique

Lorsque l'on applique un champ électrique à un matériau isolant, on sait qu'un courant (généralement très faible) circule entre les électrodes.

En champ continu, ce courant est lié à la conduction, tandis qu'en champ alternatif, se superpose à ce courant de conduction, un courant de pertes diélectriques.

La circulation de ces courants dans le matériau a pour conséquence un transfert d'énergie qui chauffe le matériau. Cet échauffement doit être compensé par les pertes thermiques par conduction dans le matériau pour que l'équilibre soit conservé.

L'équilibre entre la dissipation thermique et l'énergie prise au champ est décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\sigma E^2 = \rho C_v [dT/dt - \text{div} [K \text{ grad } T]] \quad (\text{II.1})$$

Avec

C_v : Capacité thermique massique à volume constant ;

ρ : Masse volumique ;

T : Température ;

σ : Conductivité électrique ;

E : Champ électrique ;

K : Conductivité thermique ;

t : Temps.

La figure II.1 représente les solutions de cette équation pour différentes valeurs du champ appliqué E .

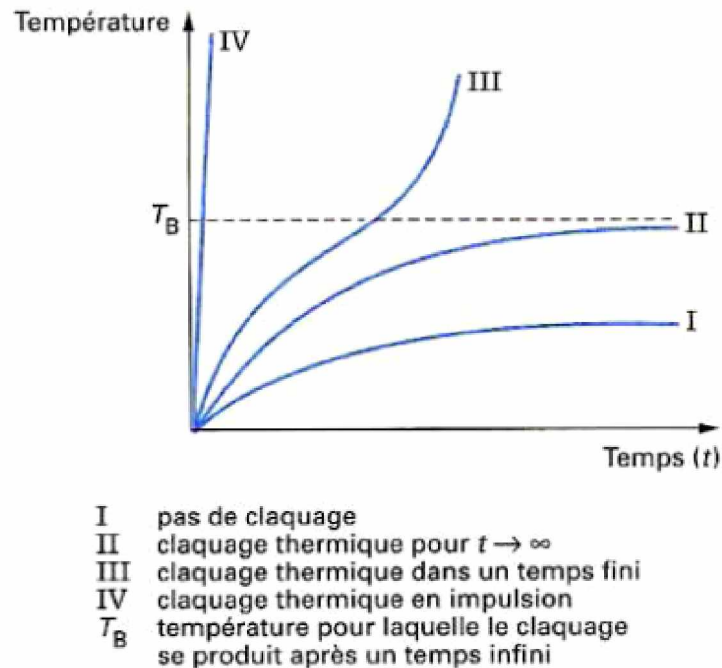


Figure II.1 : Représentation schématique des conditions de stabilité et d'instabilité pour le claquage thermique

II.2.1.2.3 Claquage électromécanique

Le claquage électromécanique des solides dépend de leurs caractéristiques mécaniques [6] et des contraintes électriques appliquées. En effet, lors de l'application d'un champ très élevé, le matériau subit une très grande pression électrostatique qui peut atteindre facilement une centaine de kg/cm^2 . Ceci peut engendrer une déformation mécanique considérable du matériau, particulièrement pour les matériaux amorphes, et conduire au claquage de l'isolant.

II.2.1.2.4 Autres mécanismes de claquage

Ø Mécanisme des Streamers

Dans certaines conditions, la rupture pourrait avoir lieu après le passage d'une avalanche [14]. L'avalanche peut progresser lorsque l'énergie gagnée par les électrons est supérieure à l'énergie d'ionisation du réseau cristallin (phénomène d'ionisation par choc similaire à celui observé dans le cas des gaz).

D'après Seitz, la rupture peut avoir lieu lorsque l'avalanche dépasse une certaine dimension.

Ø Rupture par Arborescence

L'arborescence est un phénomène de préclaquage électrique, qui se présente sous forme d'arbre (figures ci-dessous), et dont le développement est favorisé par la présence de défauts, ou d'impuretés au sein du matériau.

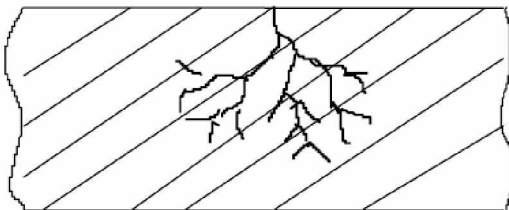


Figure II.2 : La forme d'une Arborescence électrique

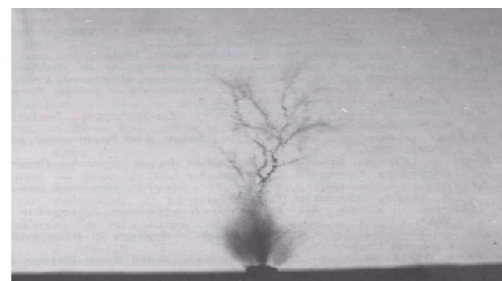


Figure II.3 : Arborescence électrique observée dans un câble HT

L'arborescence peut être révélatrice d'un stade relativement avancé de la dégradation du matériau, et reste considérée comme un phénomène précurseur de la rupture.

Les arborescences sont classées en deux principales catégories:

- les arborescences électriques
- les arborescences d'eau.

D'autres types particuliers d'arborescences peuvent être aussi observés telles que les arborescences appelées "chimiques".

Ces décharges sont surtout provoquées par les décharges apparaissant aux bords des électrodes, où le matériau isolant solide est en contact avec un autre matériau de permittivité généralement inférieure à la sienne (liquide ou gaz).

Dans le cas du système présenté à la figure ci-dessous, le champ E_1 dans le milieu 1 est donné par la formule suivante:

$$E_1 = U / [\varepsilon_1 \cdot (d_1/\varepsilon_1 + d_2/\varepsilon_2)]$$

E_1 : le champ E_1 dans le milieu 1 ;

ε_1 : la permittivité du milieu 1 ;

ε_2 : la permittivité du milieu 2 ;

d_1 : l'épaisseur moyen du milieu 1;

d_2 : l'épaisseur du milieu 2.

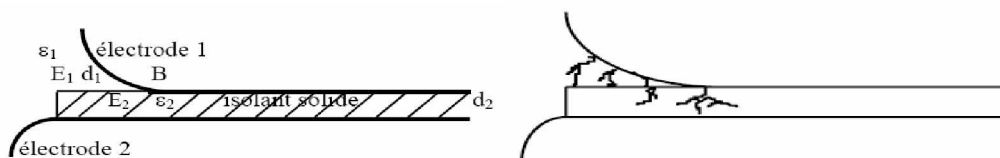


Figure II.4 : La rupture par arborescence

Quand d_1 diminue, le champ E_1 augmente, et est maximum au point B. Ce champ peut atteindre des niveaux relativement grands (environ 10MV/cm) qui risquent de dépasser la valeur correspondant à la rigidité intrinsèque du matériau. Nous aurons dans ce cas une rupture locale suivie de la formation de plusieurs canaux en branches conduisant à la rupture totale de l'isolant solide.

Ø Rupture par Erosion

Les décharges partielles peuvent être internes ou externes. Dans le premier cas, elles se produisent à l'intérieur du matériau, et dans le second, à la surface de séparation du matériau solide avec d'autres milieux [14]. Dans ce dernier cas, nous sommes en présence de décharges superficielles. Le terme de décharges partielles externes est très rarement utilisé pour désigner des décharges incomplètes dans les gaz (on préfère: "effet de couronne", aigrettes, streamers...).

Lorsque les décharges partielles apparaissent dans les vacuoles de gaz présentes accidentellement dans le volume de l'isolant solide, la température du gaz augmente. Cette augmentation de température est suivie d'une augmentation de la pression du gaz risquant d'engendrer l'érosion du matériau, qui conduirait de proche en proche, à la rupture totale du diélectrique.

Ø Rupture après Vieillessement

Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, les isolants vieillissent. Le vieillissement est caractérisé par une altération partielle des propriétés diélectriques de ces isolants [14].

Les principaux types de vieillissement sont:

- le vieillissement thermique: provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique
- le vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles): résultant des décharges dans les espaces, surtout gazeux, enfermés dans les diélectriques.

Les vieillissements sont caractérisés surtout par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques (par exemple: augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité) Très souvent différents mécanismes apparaissent en même temps et influent mutuellement l'un sur l'autre

a) Vieillessement thermique

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. D'après J.Fabre [14], les principaux processus de vieillissement thermique sont:

- la rupture des chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques,
- le dégagement de gaz à faible poids moléculaire,
- l'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques.

Loi général du vieillissement thermique

La durée de vie de l'isolation est définie par le temps, après lequel les propriétés de l'isolant sont modifiées jusqu'à un niveau défini.

La loi générale de vieillissement consiste à étudier les variations d'une grandeur physique "G" (rigidité diélectrique, rigidité mécanique...), en fonction de la concentration "C" d'un composant élémentaire, lorsque la température varie.

La durée de vie "t" est définie par:

$$t = A.e^{B/T} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

A et B : Constantes relatives au type de matériau.

T : la température.

Loi de Montsinger

W.M.Montsinger a établi la relation liant la durée de vie "t" de l'isolation à base de cellulose en fonction de la température:

$$t = t_0 . e^{-m.T} \quad (\text{II.3})$$

Avec:

t_0 : temps caractéristique par type d'isolation donné,

m: constante de Montsinger ($m=0,0865 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

T : la température.

D'après cette loi, quand la température T augmente de 8°C, la durée de vie diminue de moitié (règle des 8°C). Cette loi est valable pour les températures comprises entre 100°C et 130°C. Elle n'est pas toujours vérifiée, car la réduction de la durée de vie, dépend surtout du degré de polymérisation à partir duquel l'isolation n'est plus utilisable. Par exemple, le degré de polymérisation initial de la cellulose dans le papier, est de l'ordre de 1200-1300. Le degré final est d'environ 150. A ce dernier degré, le papier n'a pratiquement aucune rigidité

mécanique. Ainsi, il a été constaté par J.Fabre, qu'une augmentation de T de 5,5°C, engendrait une réduction considérable de la durée de vie.

En plus de la température, les principaux facteurs qui accélèrent le vieillissement thermique sont l'humidité et l'oxygène.

b) Vieillessement Electrique

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée. Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau.

La dégradation est particulièrement accentuée par la présence d'impuretés de différentes natures, plus particulièrement des vacuoles de gaz au sein du diélectrique. Ces impuretés sont en général le siège de décharges partielles qui peuvent engendrer après un temps relativement long l'érosion du matériau et finalement la rupture diélectrique.

En pratique, on définit la tension seuil d'apparition des décharges partielles. Elle correspond à la tension appliquée au matériau à partir de laquelle la charge apparente fournie par le réseau est égale à un seuil donné (exemple: 1pC dans le cas des câbles isolés au PRC fabriqué par ENICAB/Biskra [10]). La tension seuil d'apparition des décharges partielles risque de diminuer en fonction du temps de vieillissement pour les champs appliqués relativement intense. La tension seuil d'apparition des décharges partielles diminue aussi dans le cas du vieillissement thermique (application de fortes températures sur de longues périodes).

L'énergie des décharges partielles constitue une grandeur très significative sur le niveau de dégradations causées au matériau.

L'énergie que fournit la source d'alimentation à l'objet d'essai siège de décharges partielles s'exprime par:

$$W_t = \sum (U_i \cdot q_i) \quad (II.4)$$

avec:

- W_t : énergie fournie par la source pendant le temps "t" durant lequel N décharges se sont produites dans l'objet d'essai.

- q_i et U_i : charge apparente de la $i^{\text{ème}}$ décharge et tension instantanée aux bornes de l'objet à l'instant même où elle se produit.

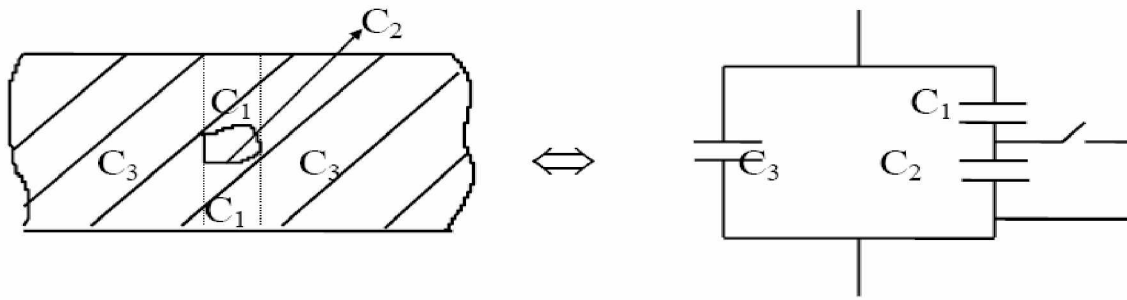


Figure II.5 : Schéma d'une isolation avec décharges partielles

II.3 Mesure de la rigidité diélectrique

II.3.1 Rigidité intrinsèque

Pour approcher la rigidité diélectrique intrinsèque d'un matériau, il importe de travailler en champ électrique le plus uniforme possible tout en évitant les effets de bord, de réduire le nombre de défauts présents dans le volume de matériau soumis au champ et d'éviter tout défaut aux interfaces électrodes-matériau. De telles conditions sont extrêmement difficiles à réunir [13].

La figure II.6 représente une géométrie d'échantillon couramment utilisée pour les déterminations de la rigidité intrinsèque.

La quasi-uniformité du champ est obtenue par le rapport élevé entre le diamètre de la sphère et l'épaisseur du matériau dans la zone soumise au champ. La réduction du nombre de défauts est obtenue en travaillant sur une épaisseur extrêmement fine et la qualité des interfaces électrode-matériau découle de la métallisation directe des surfaces.

Dans de telles conditions, la rigidité diélectrique obtenue pour les meilleurs polymères est comprise entre 500 et 1 000 kV/mm.

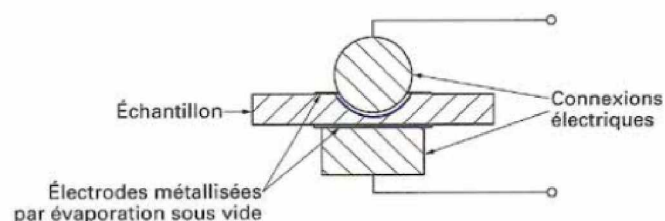


Figure II.6 : Exemple d'échantillon pour la détermination de la rigidité diélectrique intrinsèque

II.3.2 Rigidité pratique

D'un intérêt beaucoup plus important pour les applications industrielles, la rigidité diélectrique pratique est généralement obtenue en appliquant la procédure décrite dans la norme CEI 243[19].

Cette norme comporte trois parties qui sont à appliquer respectivement selon que l'on s'intéresse à la rigidité en tension alternative (partie 1), en tension continue (partie 2) ou en onde de choc (partie 3).

La rigidité diélectrique en tension alternative est la plus fréquemment déterminée [13]. La norme CEI 243 décrit deux grandes familles de méthodes d'essai, selon que le champ électrique est appliqué perpendiculairement à la surface (ou aux strates) du matériau (on parle alors de rigidité diélectrique transversale) ou parallèlement à cette surface (rigidité diélectrique longitudinale).

II.4 Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique

Un très grand nombre de paramètres influent sur le résultat d'un essai de rigidité diélectrique. Nous n'en citerons ici que quelques-uns.

II.4.1 Tension appliquée

La tension appliquée influe en premier lieu suivant sa fréquence et sa forme d'onde. À titre purement indicatif, on retiendra que la rigidité diélectrique en tension continue est souvent proche de celle en tension alternative (valeur efficace) multipliée par $\sqrt{2}$. Toujours à titre indicatif, on constate que le rapport entre la rigidité diélectrique en onde de choc de foudre (1,2 /50 μ s) et celle mesurée en tension continue est de l'ordre de 2 [13]. Mais ces valeurs sont à prendre avec prudence et doivent être vérifiées sur le matériau considéré. On constate expérimentalement que l'augmentation de la vitesse d'application de la tension augmente la tension de claquage.

II.4.2 Épaisseur et homogénéité de l'éprouvette

Comme cela a déjà été indiqué, l'augmentation de la densité de défauts dans le volume soumis au champ réduit considérablement la valeur de la rigidité diélectrique.

C'est pour cette raison que l'augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette réduit la valeur de la rigidité diélectrique. On constate que la tension de claquage est généralement proportionnelle à l'épaisseur à la puissance n (avec n souvent voisin de 0,7). Il est donc indispensable de donner, avec toute valeur de rigidité diélectrique, l'épaisseur des éprouvettes d'essai [13].

II.4.3 Température

La grande diversité des matériaux utilisés comme isolants solides ne permet pas de dégager une loi générale sur leurs comportements en température.

Pour les polymères, les rigidités diélectriques en courant continu sont de l'ordre de 1 à 9 MV/cm à 20°C [13].

C'est aux basses températures que l'on trouve les valeurs maximales, de l'ordre de 10 MV/cm pour les composées polaires. Aux températures élevées, elles décroissent rapidement.

Dans la très large majorité des cas, lorsqu'on l'augmente la température, la rigidité diélectrique est diminuée [13].

II.4.4 Caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant

Ces caractéristiques interviennent par le biais des décharges superficielles qui peuvent se produire dans ce milieu, et en particulier dans l'air, et réduisent la tension de claquage. La permittivité et la résistivité du milieu ambiant ont également une très grande influence en modifiant la répartition du champ électrique. Une augmentation de la permittivité et /ou une diminution de la résistivité du milieu ambiant augmentent généralement la tension de claquage de l'éprouvette. Dans la pratique, on effectue souvent les déterminations de rigidité diélectrique des isolants solides dans de l'huile minérale pour transformateur [13].

II.5 Conclusion

L'application d'un champ électrique élevé sur un isolant conduit au claquage instantané du matériau. Cependant, l'application d'un champ électrique inférieur au champ disruptif peut entraîner une dégradation progressive du matériau qui se termine généralement par un amorçage destructif et irréversible.

Divers types de dégradation peuvent se présenter suivant les conditions d'environnement et les directions relatives du champ électrique et de la surface du matériau.

INFLUENCE DES BARRIERES ISOLANTES DANS LES INTERVALLES D'AIR ET D'HUILE

III.1 Introduction

Pour les intervalles relativement petits, l'insertion d'une barrière augmente la rigidité diélectrique. Cette idée est déjà ancienne, elle fut remarquée vers les années 1920 par C. P. Steinmetz [1]. D'après les études qui ont été faites, cet emploi doit tenir compte de plusieurs paramètres dont les plus importants sont: la polarité et le genre de tension appliquée, la position de l'écran ainsi que ses dimensions, sa constante diélectrique et sa résistivité superficielle. Vers les années 1930 E. Marx [1] montra que la présence d'une barrière isolante modifie la répartition du champ électrique, et provoque une amélioration notable quand l'écran est placé près de la pointe positive. Quand à la pointe négative, la présence de l'écran est pratiquement sans effet.

Ces résultats ont été confirmés par H. Roser [1] qui explique que l'augmentation de la tension disruptive est surtout due à l'uniformisation du champ électrique entre la barrière et le plan. D'après cet auteur, l'amélioration ne sera bonne que lorsque les charges déposées sur la barrière auront la même polarité que la pointe, ceci est toujours vérifié pour la pointe positive.

Dans le cas d'une pointe négative, ceci n'est vérifié que lorsque la barrière est proche de la pointe. Cette constatation a été confirmée par N. F. Wolochtchenko et M. P. Verma [1].

Selon J. M. Meek et M. M. C. Collins [1] la barrière entraîne une modification de l'intensité du champ électrique.

Les études qui ont été faites, après celles de Marx et Roser, ont été orientées vers l'influence de la forme des électrodes sur la rigidité diélectrique de l'air, la distribution du champ électrique dans l'arrangement pointe-barrière-plan, et les types de décharges, ainsi que la géométrie et la nature de la barrière.

III.2 Influence d'une barrière isolante sur les intervalles d'air

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

En pratique, la majorité des configurations des électrodes peut être caractérisée par les géométries à champ électrique non uniforme: pointe-pointe ou pointe-plan ou par celle qui possède la rigidité électrique intermédiaire. De toutes ces configurations, seule la géométrie pointe-plan est la plus défavorable en ce qui concerne la rupture diélectrique de l'air qui se manifeste dans ce cas aux plus faibles tensions quand la polarité de la pointe est positive.

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

III.2.1 Influence du type de tension

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

Dans le cas des petits intervalles d'air (inférieurs à 1m), beaucoup de travaux de recherches ont été effectués aussi bien sous tension continue, que sous tension alternative ou de choc de foudre [1]. En ce qui concerne les longs intervalles d'air, les travaux ont été surtout effectués sous la contrainte de tension la plus défavorable, représentée par les chocs positifs de manœuvres à durée de front relativement longue [15,1].

III.2.2 Influence de la polarité de l'électrode pointe

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

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

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

III.2.3 Influence de la position de la barrière

La tension disruptive des petits intervalles d'air allant jusqu'à 40 cm varie essentiellement en fonction de la position de la barrière [16]. Cette tension passe par un maximum quand la barrière est près de la pointe.

Certain travaux [1,15, 16] ont montré que pour des intervalles d'air «d'» de 15 à 30 cm, le maximum de tension est obtenu en position où la barrière est colée avec la pointe ($a/d=0\%$; a : distance entre la pointe et la barrière, d : longueur de l'intervalle inter électrodes).

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

Pour les moyens intervalles d'air de 40 cm à 200 cm, l'introduction d'une barrière isolante à surfaces propres conduit à une augmentation considérable de la tension disruptive du système quand elle est située particulièrement à 20% de l'intervalle à partir de la pointe [1,15].

III.2.4 Influence de la largeur de la barrière

Quand la largeur de la barrière n'est pas suffisamment grande par rapport à la distance inter-électrodes, la rigidité diélectrique de l'arrangement (pointe-barrière-

plan) dépend de la largeur du canal de décharge. Géométriquement, cette longueur est approximativement égale à la distance pointe-bord de la barrière-plan.

L'augmentation maximale de la tension disruptive, dans ce cas, est obtenue quand la barrière est pratiquement en contact avec l'électrode pointue [15].

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

III.2.5 Influence de l'épaisseur et de la permittivité

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

III.2.6 Influence de la barrière trouée

A. Boubakeur [15] a travaillé sur des barrières trouées en leur centre. Il a remarqué que la barrière a un rôle d'obstacle géométrique au développement direct de la décharge et que la charge d'espace sur la barrière joue le rôle d'obstacle électrostatique en ce qui concerne la position des trous sur la barrière. En effet, la décharge ne tend pas à passer par un trou de faible diamètre ($\varphi < 20\text{mm}$), probablement à cause de la forte concentration de la charge d'espace au centre de la barrière. Ainsi la décharge contourne la barrière au lieu de suivre le plus court chemin, passant par le trou.

III.2.7 Influence du matériau de la barrière

M. V. Sokolova [1] a effectué des mesures des courants de décharges pour des intervalles d'air avec différents matériaux de la barrière. L'analyse des oscillogrammes a montré que chaque impulsion de courant a une structure complexe avec un caractère irrégulier. Ceci reflète le processus de décharge, la décharge se fait

sous forme de micro impulsions consécutives. Les deux matériaux utilisés ont la même épaisseur et la même permittivité, mais ils produisent des effets différents sur la rigidité diélectrique de l'intervalle.

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

III.2.8 Formes des décharges observées dans le système pointe-plan avec barrière isolante

L'évolution et la forme des décharges [15, 17] peuvent être classées en deux types différents :

- Décharge directe
- Décharge par étapes.

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

III.2.8.1 Décharge directe

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

III.2.8.1.1 Cas où la décharge perce la barrière

Ce cas est rencontré surtout quand la barrière est très large, assez mince et située à une distance proche de la pointe (électrode près de laquelle le champ est très intense) [1,15].

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

III.2.8.1.2 Cas où la décharge contourne la barrière

Pour un système pointe positive-plan avec barrière, les streamers [15] partant de la pointe suivent le trajet : « pointe-bord de la barrière- plan ». Ceci est constaté quand l'écran n'est pas suffisamment large ou quand une importante concentration de charges électriques de signes positifs se trouve répartie sur la surface de la barrière. Dans ce dernier cas, la décharge se voit déviée vers le bord de l'écran à cause de l'existence de forces électriques répulsives [15]. (Figure III.1-a)

La mise en évidence de cette forme de décharge a été observée grâce à l'utilisation de trous au milieu de la barrière. Jusqu'à certains diamètres, le trou n'a aucune influence sur le trajet de la décharge qui reste toujours le même: « pointe-bord de la barrière-plan ». Ainsi, il a été observé que l'existence d'une décharge directe pour des barrières relativement larges est liée surtout à la polarité de la pointe ainsi qu'à la présence de forces électrostatiques à la surface de séparation de deux milieux isolants (air-barrière) [1,15].

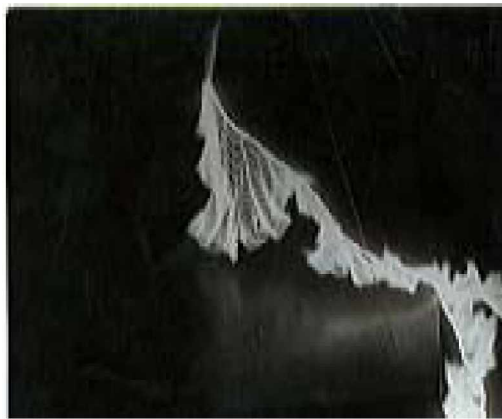
III.2.8.2 Décharge par étapes

Cette forme de décharge se rencontre quand la barrière est très large et n'est pas trouée. L'amorçage s'effectue en trois étapes quand la pointe est positive [15].

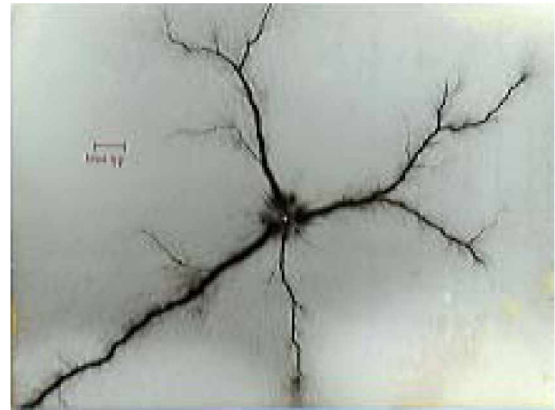
En premier lieu, on distingue l'effet couronne suivi de la décharge pointe-barrière qui constitue la première étape de l'amorçage.

Ensuite, pour un niveau de tension supérieur, on arrive à la seconde étape qui est le contournement de la barrière par les décharges glissantes (Figure III.1-b), et finalement, la troisième et dernière étape est atteinte quand la décharge s'effectue du bord de la barrière vers le plan (figure III.1-c).

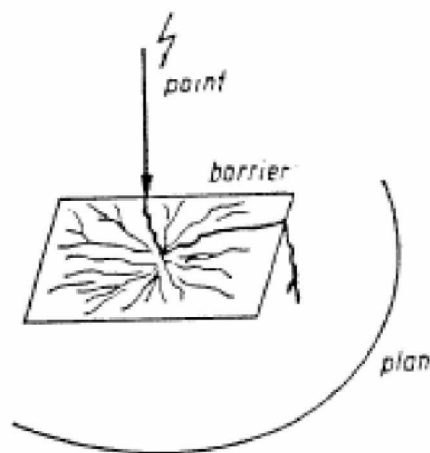
Pour une pointe négative, il existe quatre étapes [15], la décharge s'effectue de la pointe vers la barrière. Pour un niveau de tension supérieur, on a le contournement de la barrière par les décharges glissantes. D'autre part, à partir de l'électrode plane apparaît une décharge se dirigeant vers l'autre surface de la barrière et finalement le claquage s'effectue après la rencontre des deux décharges venant de part et d'autre de la barrière (figures III.1-d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.1 : Décharge directe et par étapes (décharge glissante)

(a): décharge directe à 50Hz (intervalle de 1m)

(b): Décharge glissante sous tension de choc de foudre, photographie de contact

(c): Décharge par étapes

(d): Décharge par étapes dans le cas de la pointe sous tension de choc négatif

III.3 Influence d'une barrière isolante dans les intervalles d'huile

III.3.1 Influence de l'insertion d'une barrière isolante dans des intervalles d'huile

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.

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 [8].

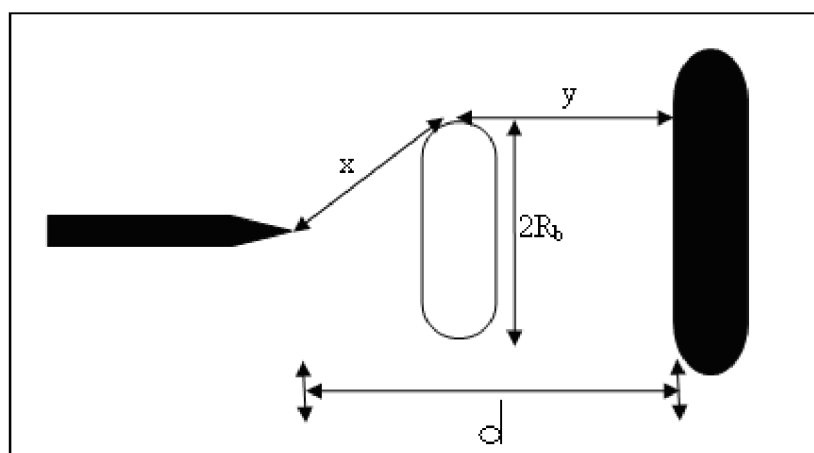


Figure III.2: Représentation schématique de la longueur de fuite minimale de la décharge dans l'huile minérale

A. Boubakeur a montré dans l'air que la barrière est à la fois un obstacle électrostatique et géométrique [15,16]. 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 a montré qu'une barrière montée perpendiculairement aux lignes du champ augmente significativement la rigidité du système [6]. Cependant, lorsque la barrière est montée en parallèle avec les lignes du champ, elle facilite le déplacement de la décharge et provoque des claquages à des tensions plus basses inférieures à celles du système sans barrière.

III.3.2 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 [6]. Les niveaux de tensions de claquages supérieurs sont obtenus dans l'huile minérale, quand la barrière est au voisinage de la pointe. 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. Cette augmentation est due à l'allongement du canal de la décharge [6].

III.3.3 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 [6]. 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 [6].

La rigidité diélectrique de l'arrangement pointe-barrière-plan augmente significativement avec la largeur de la barrière. 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.

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 [6], ceci peut être dû 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 [6].

III.3.4 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 [6]. Cette diminution est fonction de la position de la barrière et du rayon de l'ouverture. L'importance du rayon du trou est significative uniquement lorsque la barrière est placée au voisinage de la pointe. En effet, au-delà de cette position son influence devient négligeable [3].

III.3.5 Influence de la nature de la barrière

L'efficacité de la barrière dépend également de sa nature, sous tension de choc, il a été observé que pour des distances $d < 50\text{cm}$, en polarité négative comme en polarité positive, une barrière en bakélite est plus efficace qu'une barrière en polyéthylène [6].

Il est intéressant de noter que lorsqu'en augmente la distance inter électrode une barrière en polyéthylène est plus efficace qu'une barrière en bakélite [6].

La différence entre une barrière en bakélite et en autre en polyéthylène réside, en plus des valeurs de leur permittivité et des pertes diélectriques, dans la résistance mécanique aux chocs de chaque matériau.

III.4 Conclusion

A partir des résultats des travaux effectués précédemment, 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.

Nous pouvons conclure aussi que quelque soient la nature, les dimensions, et la position de la barrière dans l'intervalle inter électrodes, une barrière montée perpendiculairement aux lignes du champ augmente significativement la rigidité du système; Car la barrière joue le rôle d'obstacle géométrique à la décharge direct, de même qu'elle altère la distribution du champ électrique.

L'efficacité de la barrière (le rapport de la tension de claquage des systèmes en présence de la barrière a celle d'une configuration sans barrière) dépend de la position, des dimensions et de la nature de la barrière, de la polarité de la tension et de la distance inter électrodes.

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.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, en présence d'une barrière isolante. Nous nous sommes intéressés durant nos essais à :

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

IV.2 Techniques expérimentales

Le circuit d'essais (**Figure IV.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.

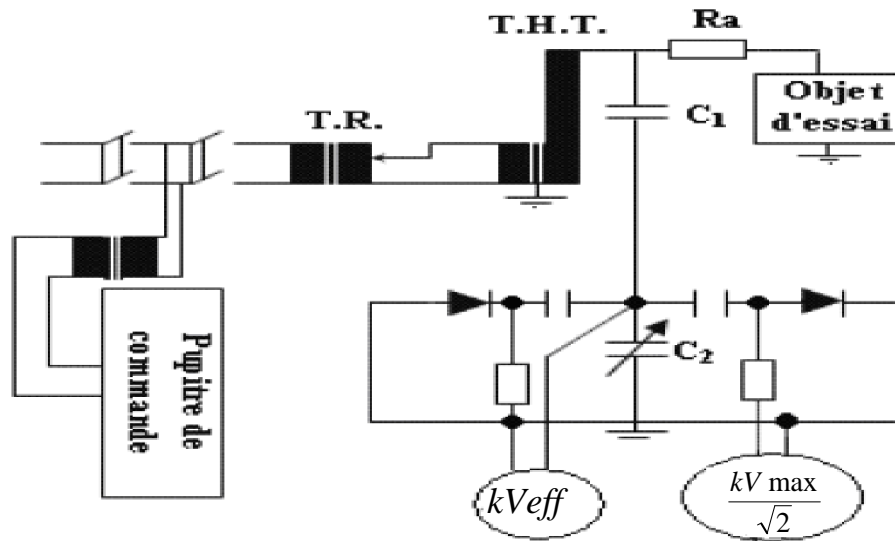


Figure IV.1 : Dispositif expérimental

IV.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 $U_{1n}=0.5$ kV (50Hz).
- Tension secondaire nominale : $U_n=300$ kV.
- Puissance apparente nominale : $S_n=50$ kVA.
- Tension de court-circuit : $U_{cc}= 5.46$ %.
- Résistance d'amortissement : $R_a \cong 30 \Omega$ /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 ($C_1 = 400$ 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.

IV.2.2 Cellule d'essais

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

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



Figure IV.2 : Cellule d'essais

IV.2.3 Les Paramètres utilisés

d : la distance inter électrodes.

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

D : le diamètre de la barrière

a/d : la position relative de la barrière.

e : l'épaisseur de la barrière.

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

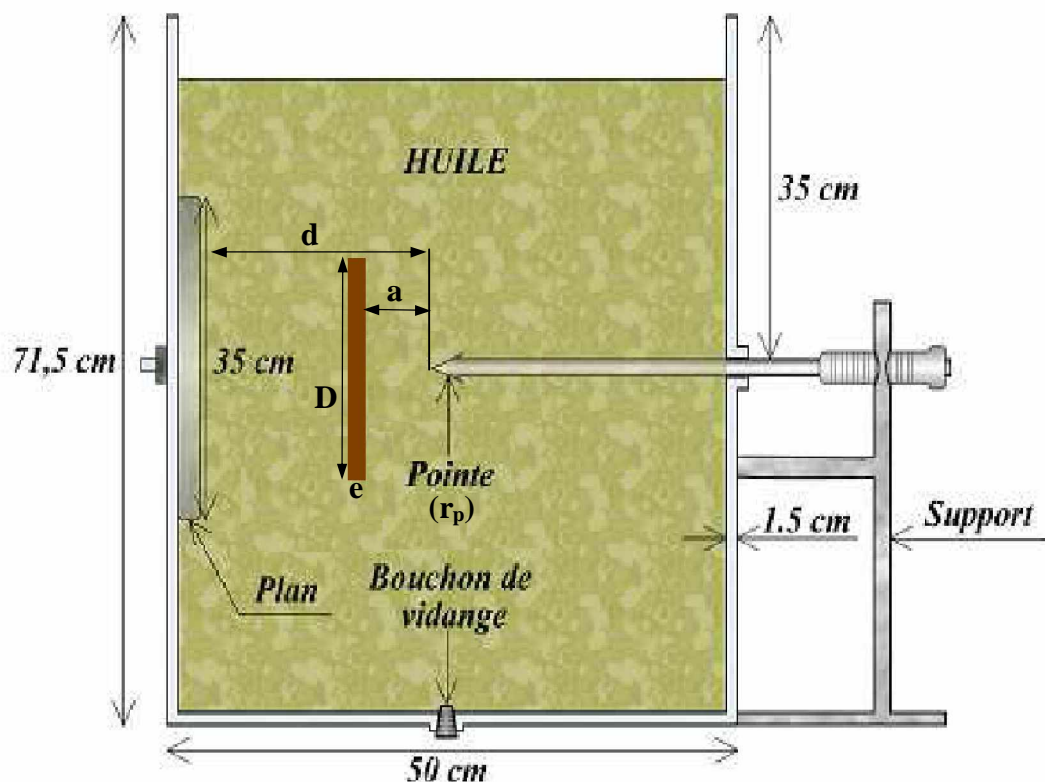


Figure IV.3 : Schéma de la cellule d'essais

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

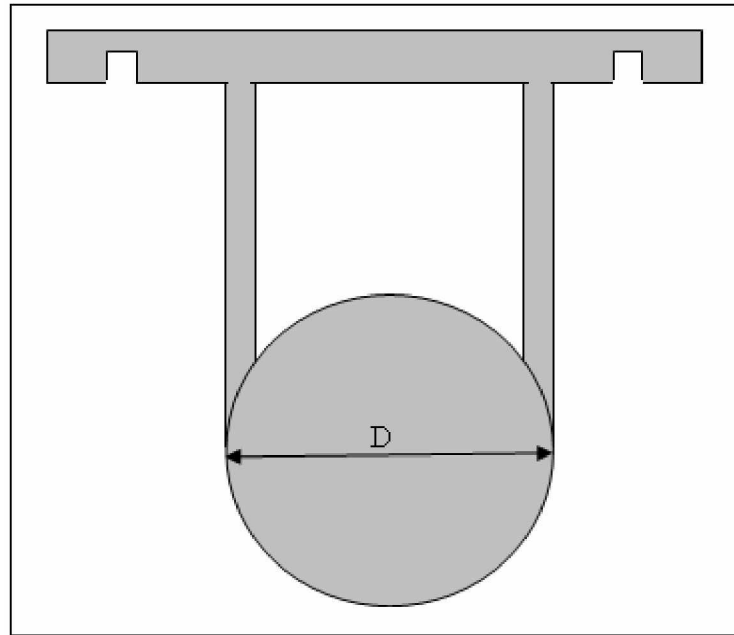


Figure IV.4 : Forme de la barrière utilisée

IV.2.4 Présentation de l'huile

L'huile minérale dénommée « Borak 22 » est de type naphthénique. Celle-ci obéit à des conditions de stockage rigoureuses dans des fûts étanches, en 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).

IV.2.5 Circuit de mesure de la tension de claquage

La mesure de la tension de claquage a été effectuée pour chaque configuration à l'aide d'un 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.

IV.3. Résultats et interprétations

IV.3.1 Essais sans barrière

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

IV.3.1.1 Effet de la distance inter-électrodes

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

Pour un rayon de courbure de l'électrode pointe donnée, nous constatons que l'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne un accroissement de la tension de claquage (**Figure IV.5**).

Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux trouvés par d'autres auteurs, sous tension alternative [4, 8, 9] et impulsionnelle en polarité positive [6].

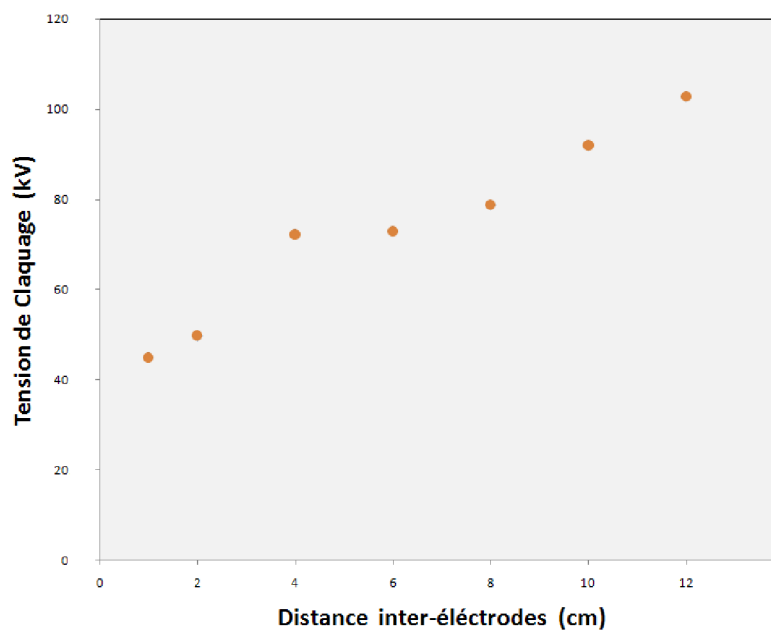


Figure IV.5 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes
Pour un rayon égal à 6 mm

IV.3.1.2 Effet du rayon de courbure de l'électrode pointe

Dans cet essai, nous avons étudié la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes. Pour différents rayons de courbure de la pointe (**Figure IV.6**).

Nous observons que la tension de claquage dépend du rayon de courbure de la pointe. Il ressort de cette courbe (**Figures IV.7, 8**), que l'influence du rayon de courbure est remarquable pour les petites distances inter électrodes. Par contre cette influence est presque négligeable pour les grandes distances inter électrodes. Cela veut dire que l'augmentation du rayon de courbure de la pointe accroît l'uniformité du champ dans l'intervalle.

Pour le reste des essais, nous utiliserons une électrode pointe de rayon de courbure égale à 6mm.

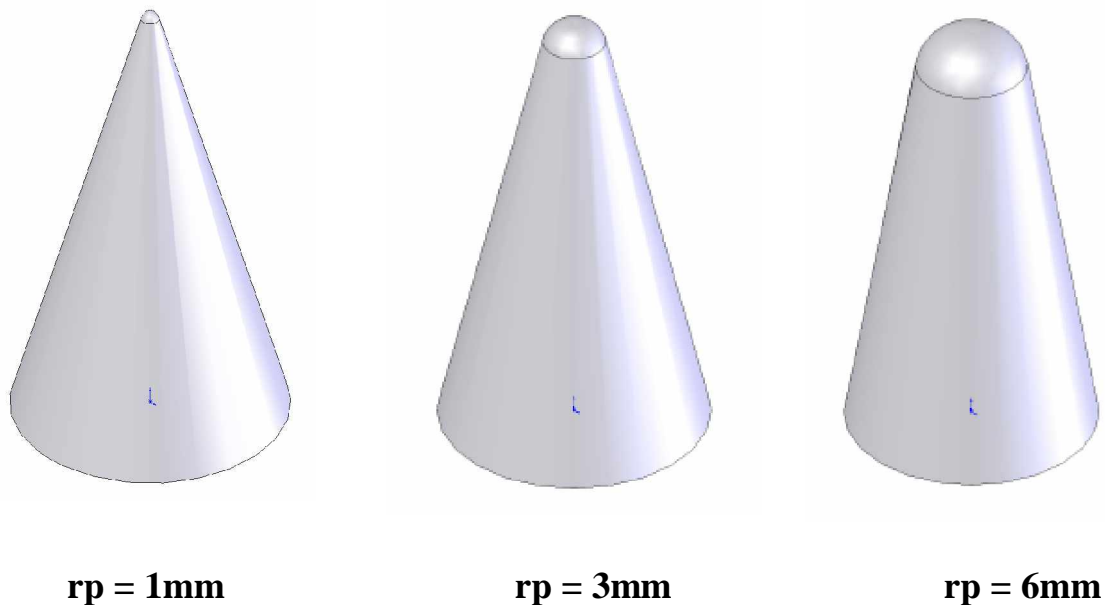


Figure IV.6: Echantillon des électrodes pointes utilisées

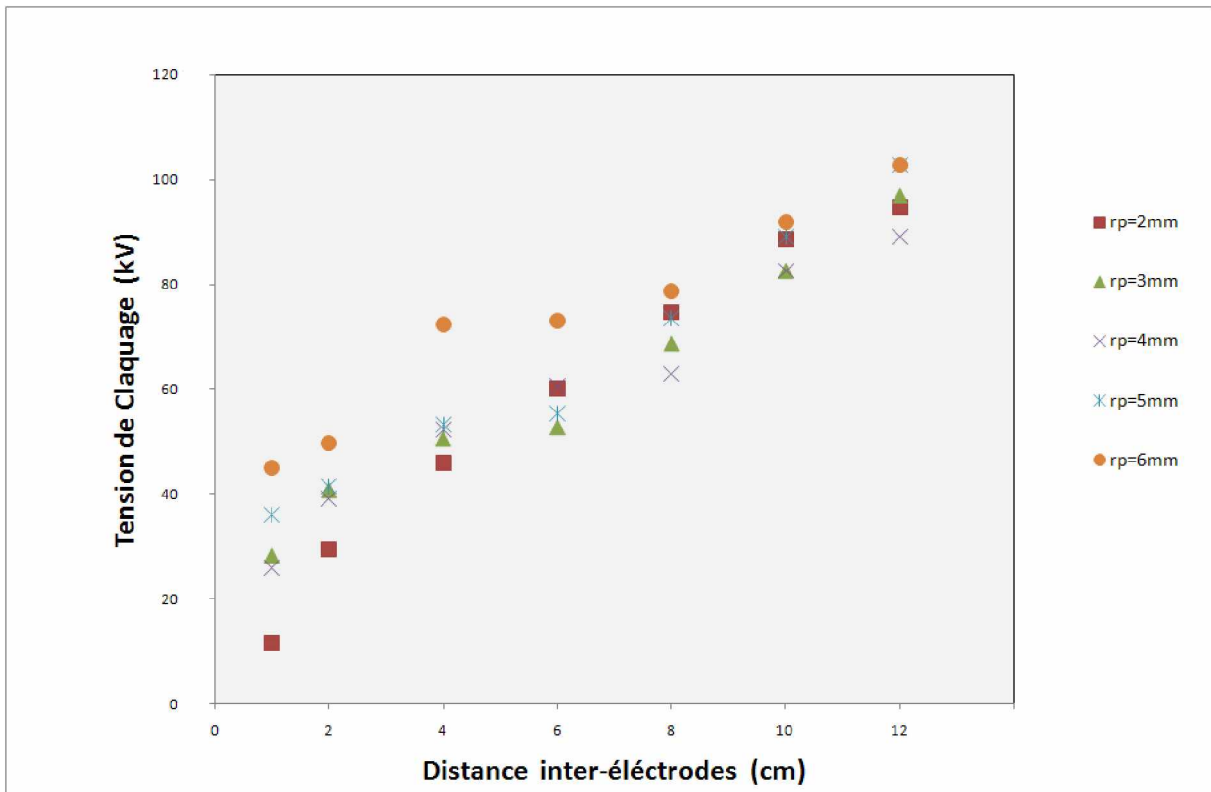


Figure IV.7: Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter électrodes, pour différents rayon de courbure de la pointe

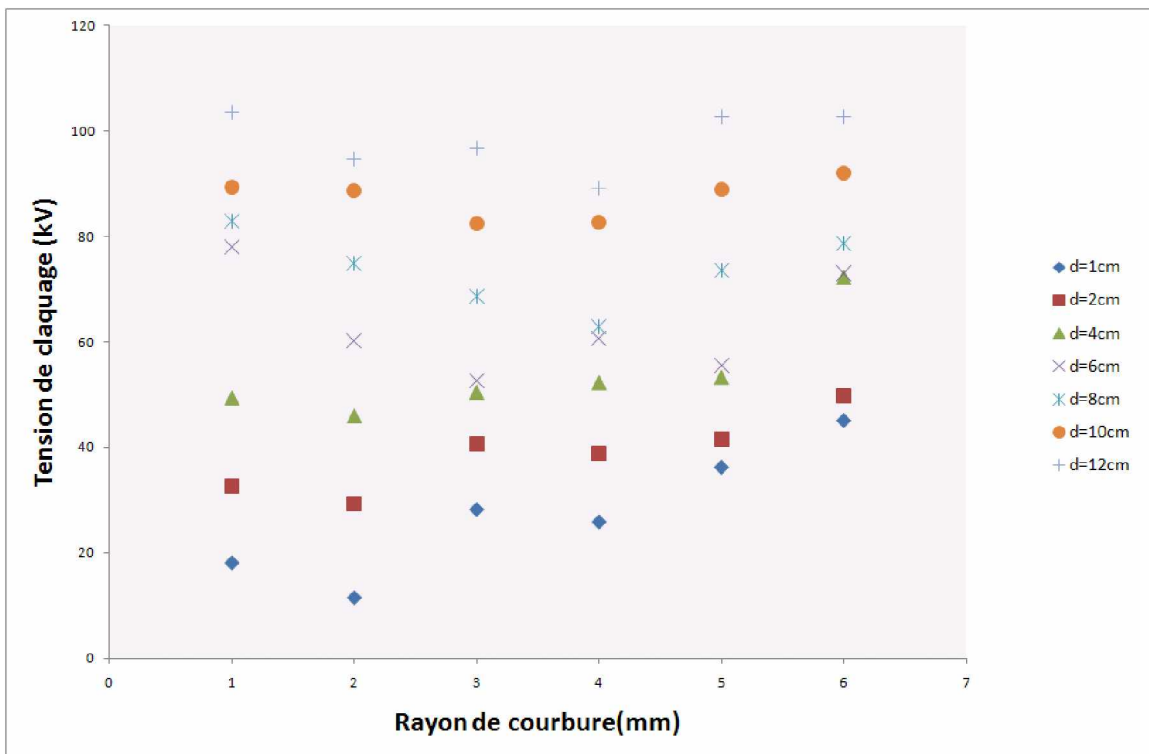


Figure IV.8: Variation de la tension de claquage en fonction du rayon de courbure de la pointe, pour différents distances inter électrodes

IV.3.2 Essais avec barrière

IV.3.2.1 Effet de l'insertion de la barrière

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

D'après les résultats obtenus (**Figure IV.9**), nous constatons que l'insertion de la barrière isolante augmente d'une façon considérable la tension de claquage. Cette augmentation est de l'ordre de 50% pour la distance 10cm et l'ordre de 15% pour la distance de 4cm. Ceci est dû, d'une part, au fait que la barrière présente un obstacle géométrique, et d'autre part, la présence de la barrière crée une zone entre la barrière et le plan où le champ est uniforme. Donc le système pointe-plan en présence de la barrière, se compose de deux sous systèmes, l'un pointe - barrière et l'autre barrière – plan. Ce dernier est considéré comme un système plan-plan, qui est le système le plus rigide. Nos résultats coïncident avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [6,15].

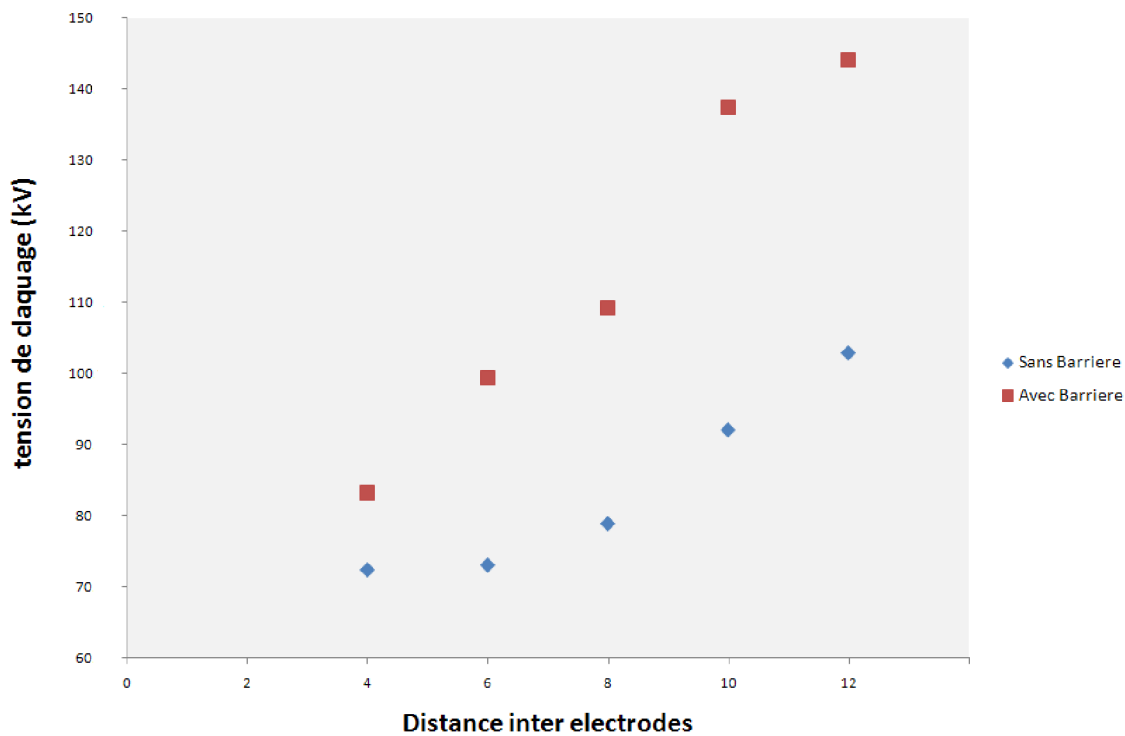


Figure IV.9: Variation de la tension de claquage en fonction de la présence de la barrière
(Pour une barrière $D=20\text{cm}$, $e=2\text{mm}$, $a=0.2 d$)

IV.3.2.2 Effet de la position de la barrière

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

Il ressort des résultats obtenus (**Figures IV.10.11**), que l'influence de la barrière est d'autant plus importante que la barrière est proche de la pointe. Ceci est dû au fait que l'insertion de la barrière conduit à uniformiser le champ entre la barrière et le plan. Cependant, lorsque la position relative de la barrière augmente, la longueur minimale de fuite de la décharge diminue ainsi que la tension de claquage

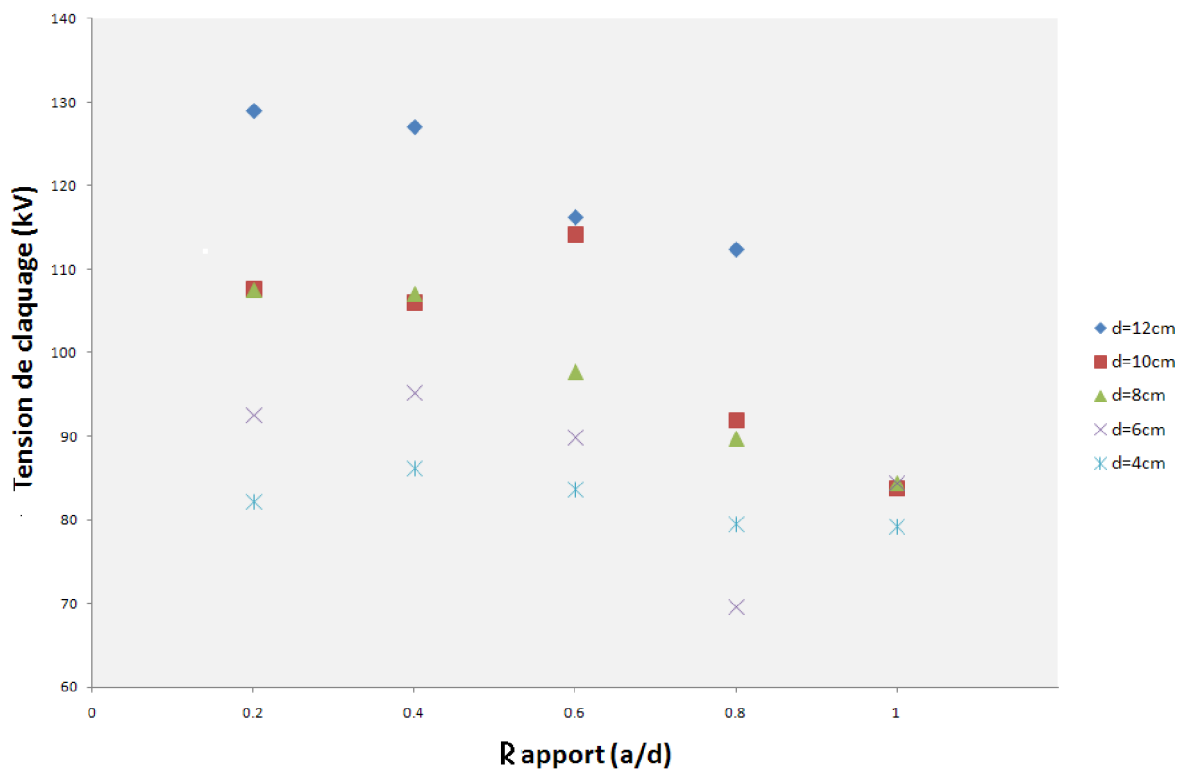


Figure IV.10: Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière ($e=2\text{mm}$ $D=10\text{cm}$)

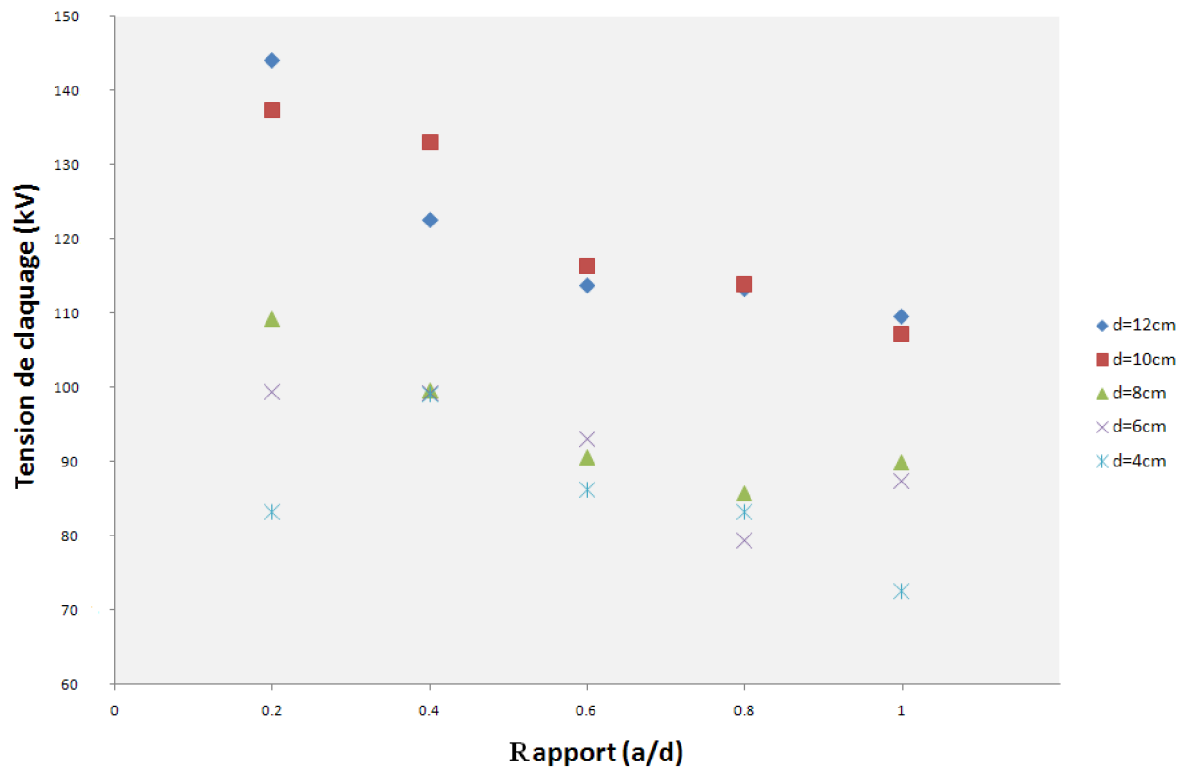


Figure IV.11: Variation de la tension de claquage en fonction de la position de la barrière ($e=2\text{mm}$ et $D=14\text{cm}$)

IV.3.2.3 Influence des dimensions de la barrière

IV.3.2.3.1 Effet du diamètre de la barrière

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

Nous observons sur les figures IV.12. 13, que la tension de claquage augmente avec l'augmentation du rayon de la barrière. En effet, cette augmentation est due à l'augmentation de la longueur minimale de fuite de la décharge définie par la somme des distances pointe-bord de la barrière, épaisseur de la barrière et distance entre la barrière et le plan (**Figure IV.16**). Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux obtenus par d'autres chercheurs [6,15].

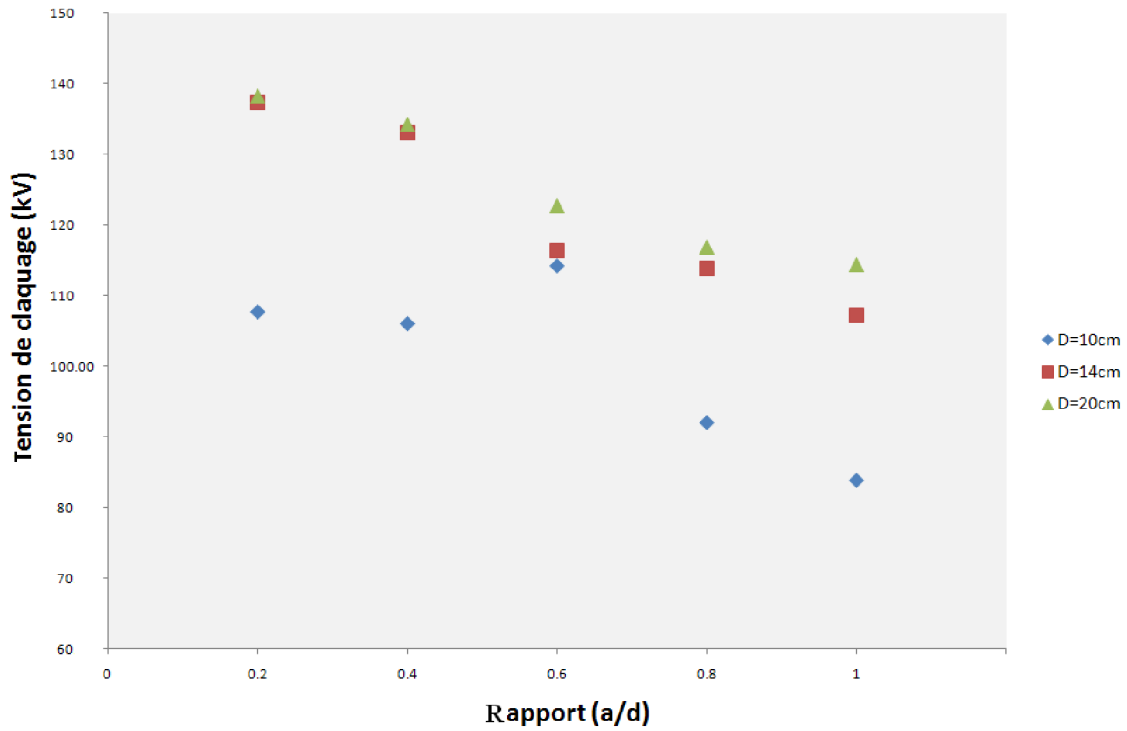


Figure IV.12: Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière pour différents positions de barrière (e=2mm d=10cm)

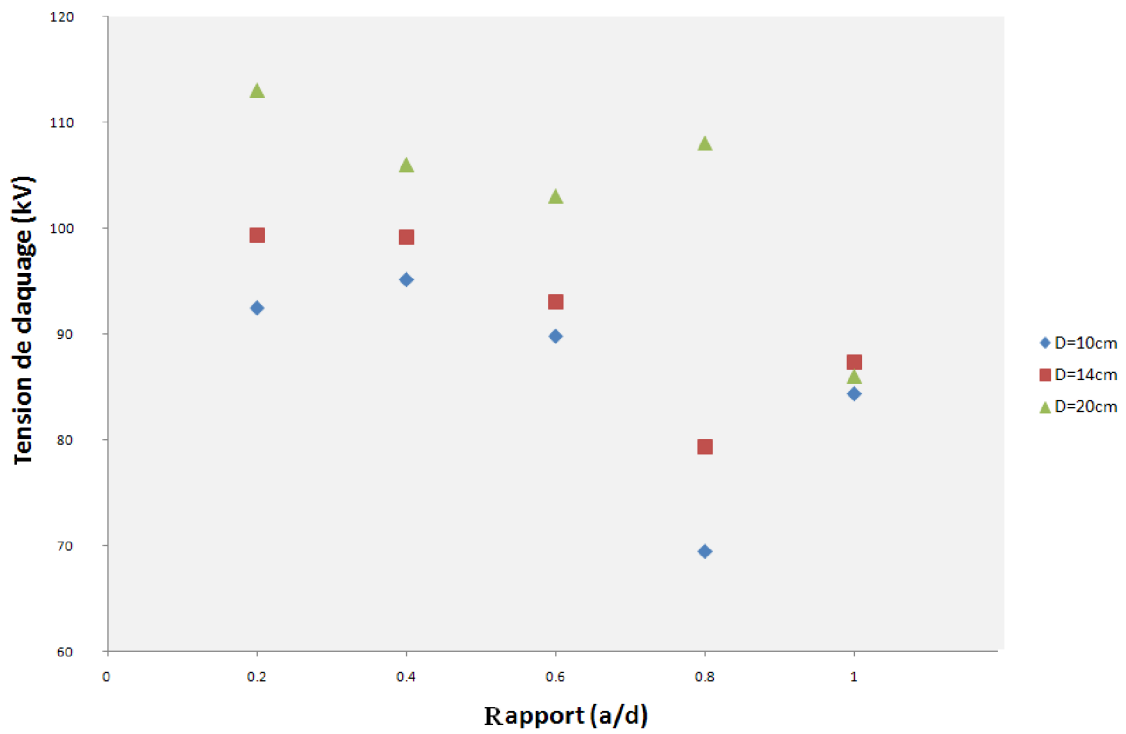


Figure IV.13: Variation de la tension de claquage en fonction du diamètre de la barrière pour différents positions de barrière (e=2mm et d=6cm)

IV.3.2.3.2 Effet de l'épaisseur de la barrière

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

D'après nos résultats présentés ci dessous (**Figures IV.14, 15**), nous constatons que l'épaisseur n'a pratiquement pas d'effet, aussi bien pour les grandes distances que pour les petites distances, pour les deux épaisseurs choisies 2 et 4mm. Ce résultat à été confirmé par d'autres chercheurs [18]. Par contre, d'autres chercheurs [3] ont trouvé que l'augmentation de l'épaisseur de la barrière entraine une augmentation de la tension de claquage quelles que soient sa position entre les électrodes.

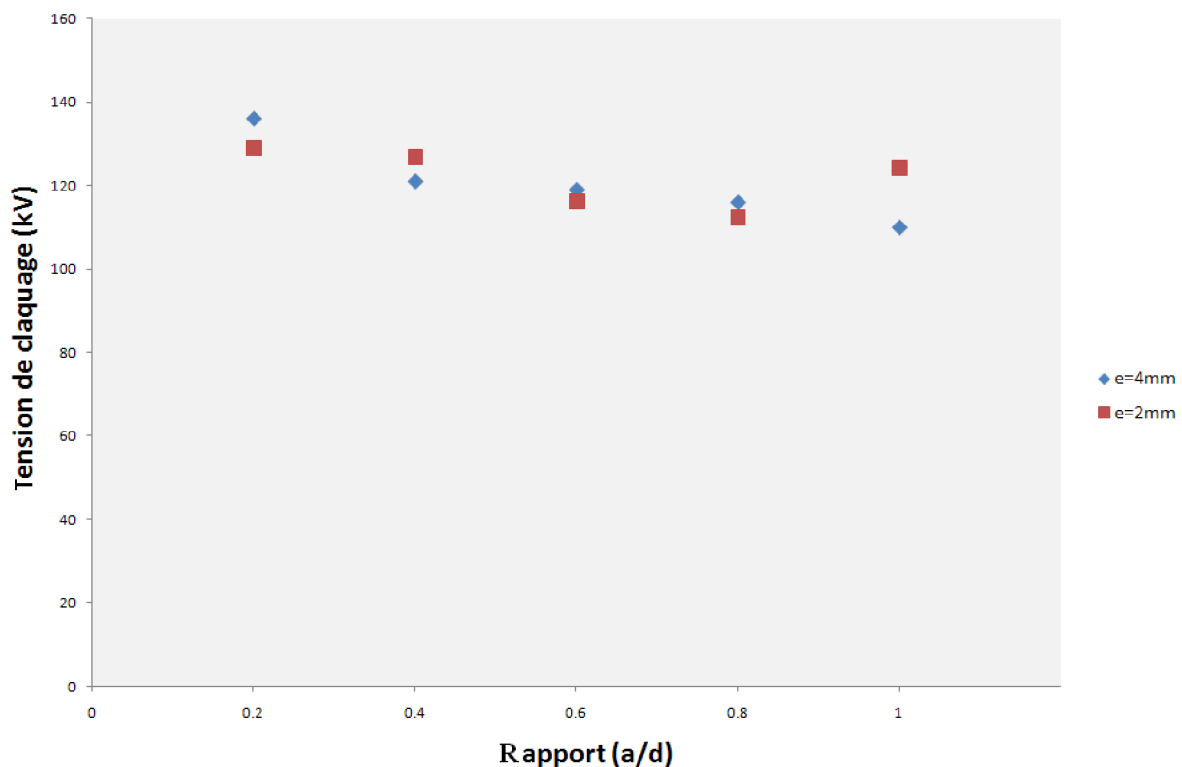


Figure IV.14: Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière (D=10mm et d=12cm)

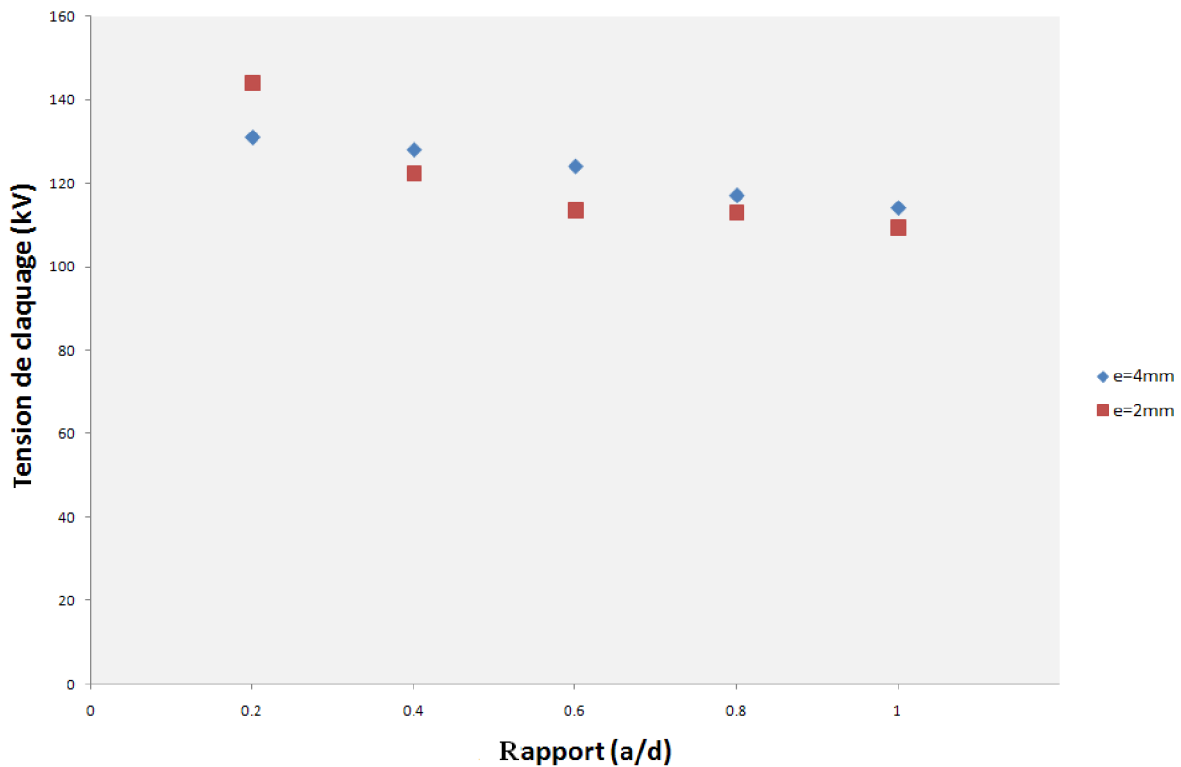


Figure IV.15: Variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur de la barrière (D=14mm et d=12cm)

IV.3.3 Équivalence géométrique

L'amélioration de la tenue diélectrique d'un système d'isolation en présence d'une barrière isolante est due au fait que celle-ci constitue un obstacle géométrique à la décharge directe. En effet, nous avons observé que la décharge se propage généralement de la pointe vers le bord de la barrière ensuite vers le plan.

La longueur de fuite minimale « d' » de la décharge est la somme des distances « x » entre la pointe et le bord de la barrière et « y » entre ce dernier et l'électrode plane, $d' = \sqrt{a^2 + R_b^2} + y$. (**Figure IV.16**).

Ceci nous a conduit à établir une équivalence entre un système avec barrière et un système sans barrière avec une distance inter électrode équivalente « d' ». En effet, si les tensions de claquage correspondant aux deux configurations sont les mêmes, nous pouvons conclure, dans ce cas, que l'augmentation de la tenue diélectrique du système en présence d'une barrière est due à l'augmentation de la longueur de fuite minimale de la décharge.

L'analyse des résultats représentés sur la figure IV.17, montre qu'une telle équivalence est possible.

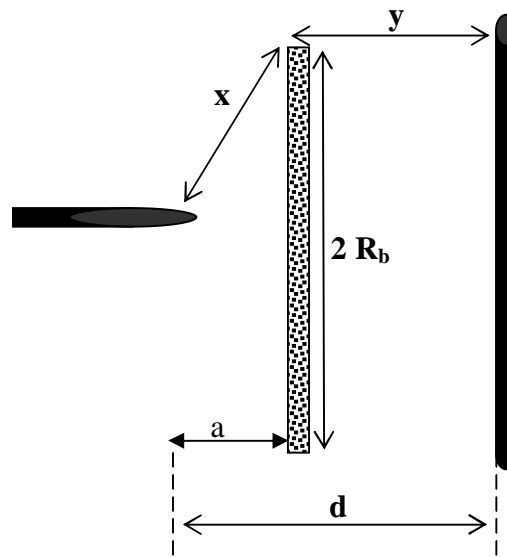


Figure IV.16: Représentation schématique de la longueur de fuite minimale de la décharge

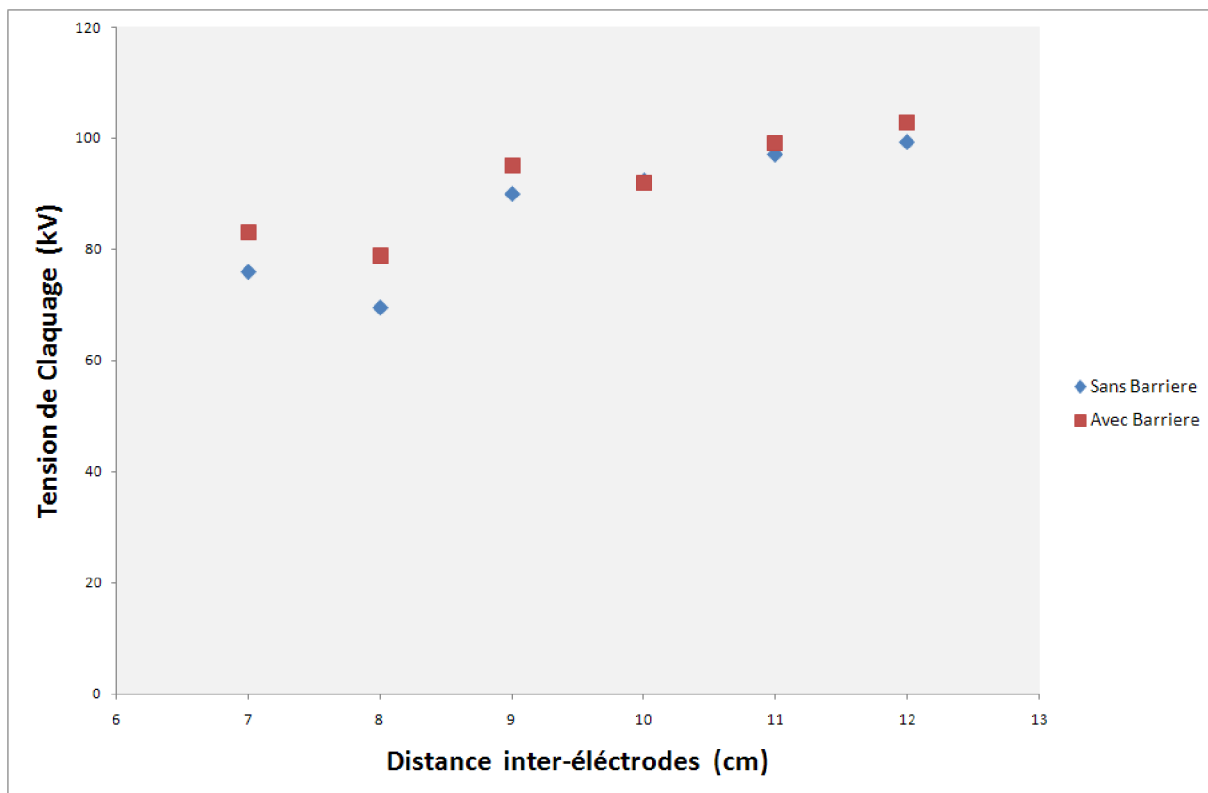


Figure IV.17: Variation de la tension de claquage dans les deux systèmes, avec et sans barrière (e=2mm et D=7cm)

IV.4 Conclusion

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

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

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

CONCLUSION GENERALE

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

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

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

- 1- Dans les intervalles d'huile « pointe – plan », pour une tension alternative à fréquence industrielle, la barrière isolante à surface propre joue en premier lieu le rôle d'obstacle géométrique provoquant l'allongement de la décharge disruptive et en conséquence l'augmentation de la tension disruptive. Le trajet suivi par la décharge correspond à la distance entre la pointe, le bord de la barrière et le plan.
- 2- L'efficacité de la barrière dépend principalement de sa position entre les électrodes, et de la distance inter électrodes. Cependant, la caractéristique de la tension de calquage en fonction de la position relative de la barrière (a/d) a une allure décroissante ; elle a

un maximum lorsque la barrière est placée au voisinage de l'électrode pointe. Cela est dû au fait que la barrière uniformise la distribution du champ électrique entre la barrière et le plan. D'autre part, la barrière joue le rôle d'obstacle géométrique à la décharge directe. En effet, nous avons observé expérimentalement qu'en présence d'une barrière isolante, la décharge se propage de la pointe vers le bord de la barrière, et ensuite vers l'électrode plane.

- 3- L'efficacité de la barrière dépend aussi de ses dimensions (diamètre et épaisseur), les résultats présentés dans le chapitre IV montrent que plus le diamètre de la barrière est grand, plus le système d'isolation est rigide. Cependant nous avons trouvé que l'épaisseur n'a pratiquement pas d'influence.
- 4- La comparaison des tensions de claquage d'un système avec barrière et d'un autre sans barrière avec une distance inter électrodes d` égale à la somme des distances pointe-bord de la barrière, épaisseur de la barrière et distance entre la barrière et la plan, montre une certaine équivalence entre les deux configurations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. Boubekki, « Mesure du champ électrique dans un système pointe-plan avec barrière isolante sous tension de choc de foudre », Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2006.
- [2] R. Fournié, « Les isolants en électrotechniques: concepts et théories», Edition Eyrolles, Paris, 1986.
- [3] N. Berger, « Liquides isolants en électrotechnique : caractéristiques des produits » Technique de l'Ingénieur, D2471, 2002.
- [4] N. Berger, « Liquides isolants en électrotechnique : présentation générale » Technique de l'Ingénieur, D2470, 2002.
- [5] D. Khelil et S.Zoutat, «étude des phénomènes de décharge électrique dans la Borak 22 sous tension alternative», Projet de Fin d'Études, École nationale polytechnique d'Alger, 2006.
- [6] 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.
- [7] S. Bouazabia, « Claquage dans les diélectriques liquides : Génération et propagation des décharges dans les diélectriques liquides », Cours poste graduation, Département de l'Electrotechnique, Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene, Alger, 2006.
- [8] B. Moula, « Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22 » sous tension alternative 50 Hz», Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2007.
- [9] R. Tobazéon, « Préclaquage et claquage des diélectriques liquides », Technique de l'Ingénieur, D2450, 1997.
- [10] A. Boubakeur, « Claquage des diélectriques liquides », cours quatrième année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.

- [11] S. Abdi, « Influence du vieillissement thermique sur des propriétés de l'huile de transformateur », Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger, 2002.
- [12] R. Tobazéon, « Conduction électrique dans les liquides », Technique de l'Ingénieur, D2430, 2003.
- [13] C. Menguy, « Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides » Technique de l'Ingénieur, D2310, 2002.
- [14] A. Boubakeur, « Claquage des diélectriques solides », cours quatrième année, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.
- [15] A. Boubakeur, « Influence des barrières sur la tension de décharge disruptive des moyens intervalles d'air pointe-plan », Thèse de Doctorat, ENP. Varsovie, Pologne 1979.
- [16] A. Boubakeur, « Influence des barrières sur l'amorçage des moyens intervalles d'air pointe –plan ». Rozprawy Electrotechniczne (Académie Polonaise des Sciences), Vol.27, N°3, Varsovie, Pologne, 1981, pp 729-744.
- [17] J. L. Jakubowski, A. Boubakeur, « Rigidité diélectrique des moyens intervalles d'air dans les systèmes isolants pointe-plan avec barrière ». Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, 10 séries des sciences, volume 28, N°9-10, 1980, pp.141-146.
- [18] F.V.Topalis et I.A.Stathopoulos, « Barrier effect in small and medium air gaps », The International symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 1991.
- [19] CEI 243 Méthodes d'essai pour la détermination de la rigidité diélectrique des matériaux isolants solides, 1888.