

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et de L'Informatique
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **Réseaux Electriques**

Présenté par
Ouramdane BEN ALI AMER
Malek IZITOUNENE

Mémoire proposé par **Mr M.A.HANDALA** et dirigé par Melle **N.SAIM**

Thème

**Etude des décharges électriques au
niveau d'un point triple métal/gaz/solide
isolant**

Mémoire soutenu publiquement le 29 septembre 2014 devant le jury composé de :

Mr B. AIT MENGUELLET
Maitre assistant, UMMTO, Président

Mr M.A. HANDALA
Maitre de Conférence Classe A, UMMTO, Promoteur

Melle N. SAIM
Doctorante, UMMTO, Co-Promotrice

Mr E. BELHITECHE
Doctorant, UMMTO, Examineur

Melle N. KIRECHE
Maitre assistante, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à nos promoteurs **Mr Mohand Amokrane HANDALA**, maître de conférence classe A à l'Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, pour la confiance qu'il nous a accordé en nous proposant ce thème, et d'avoir accepté de nous encadrer et **Melle SAIM Nabila**, doctorante à l'Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, pour ses orientations, ses précieux conseils, ses encouragements, sa disponibilité et sa bonne humeur durant tout notre travail.*

*Nos sincères remerciements s'adressent à monsieur le président de jury **Mr AIT MENGUELLET Boukhalfa** de nous avoir fait l'honneur de président de jury.*

*Nous tenons également à remercier les membres de jury **Mr BELHITECHE El Hadi**, **Melle KIRECHE Nora** qui ont accepté de juger ce travail, ainsi que de leur honorable présence.*

Mes remerciements vont aussi aux membres de hall technologie d'Oued Aissi, membres de l'laboratoire de haute tension et toutes personnes qui ont participé de prêt ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

***Je dédie ce travail en guise de reconnaissance et
du respect :***

Avant tout à mes chers parents M^d Akli, Fatima et mon frère larbi.

A ma sœurs anissa et son mari djamel sans oublier sa famille.

***A ma sœur zaina et son mari azouaou, de même à leurs deux petits
anges Ines et Ilyasse.***

A ma chère épouse Dhrifa et sa famille.

Pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard.

A tous mes proches et tous mes amis

***A tous ceux qui me sont chers. A tous les enseignants qui m'ont suivi
durant tout mon cursus.***

Ouramdane

Dédicaces

Je dédie ce travail en guise de reconnaissance et

Du respect :

Avant tout à mes chers parents, mon grand père

Pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard.

A mes frères amis, nafaa, Lyes et tous mes proches.

A ma tante et sa famille, particulièrement sa fille fatma.

A tous mes amis.

***A tous ceux qui me sont chers. A tous les enseignants qui m'ont suivi
durant tout mon cursus.***

Malek

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
La problématique.....	02
Chapitre I : Généralités sur le point triple	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Point triple.....	03
I.2.1. Définition de point triple.....	03
I.2.2. Matériaux isolants constituant le point triple.....	03
I.2.2.1. Solide isolant.....	04
I.2.2.2. Gaz isolant.....	04
I.3. Décharges partielles dans le point triple	05
I.3.1. Définition de la décharge partielle	05
I.3.2. Classification des décharges partielles	05
I.3.2.1. Décharges internes	06
I.3.2.2. Décharges couronnes	06
I.3.2.3. Décharges surfaciques	06
I.3.2.4. Décharges en arborescence.....	06
I.3.3. Circuit équivalent à trois capacités	07
I.3.4. Conséquence des décharges partielles	08
I.3.5. Le vieillissement.....	09
I.3.5.1. Définition de vieillissement.....	09
I.3.5.2. Types De vieillissement.....	09
I.3.5.2.1. Vieillissement électrique.....	10
I.3.5.2.2. Vieillissement thermique.....	10
I.3.5.2.3. Vieillissement climatique.....	10
I.3.6. Méthodes de détection des décharges partielles.....	11
I.3.6.1. Méthode électrique	11
I.3.6.2. Méthode lumineuse.....	11
I.3.6.3. Méthode chimique	11
I.3.6.4. Méthode acoustique	12

I.3.7. Remèdes pour éviter les effets des décharges partielles.....	12
I.4. Calculs de la tension d'apparition des Décharges partielle.....	12
I.4.1. Méthode conventionnelle.....	12
I.4.1.1. Théorie de Townsend.....	13
I.4.1.2. Théorie des streamers.....	15
I.4.2. Méthode de Paschen.....	16
I.4.2.1. Courbe de Paschen.....	16
I.4.2.2. Signification physique de la loi de Paschen.....	18
I.5. Conclusion	18

Chapitre II : Dispositif expérimental

II.1. Introduction.....	19
II.2. Source haute tension.....	19
II.3. Choix du Systèmes d'électrodes	20
II.3.1. Le système d'électrodes utilisées dans l'étude.....	24
II.3.1.1. Electrode pointe.....	25
II.3.1.2. Electrode plane	26
II.4. Choix des matériaux utilisés comme isolant solide (échantillons)	26
II.4.1. Les porcelaines.....	27
II.4.1.1. Caractéristiques des porcelaines.....	27
II.4.1.1.1. Caractéristique électriques et diélectriques.....	27
à température ambiante et à 1MHz.	
II.4.1.1.2. Caractéristique mécanique et thermique.....	27
II.4.2. Les silicones.....	27
II.4.2.1. Caractéristiques des silicones.....	28

II.4.2.1.1. Propriétés électriques.....	28
II.4.2.1.2. Propriétés thermiques	28
II.4.2.1.3. Propriétés mécaniques	28
II.5. Préparation des échantillons.....	29
II.6. L'oscilloscope à mémoire.....	30
II.7. Montage expérimental.....	31
II.7.1. Dispositif expérimental.....	32
II.8. Présentation du logiciel utilisé	32
II.9. Mesure de courant de pré-claquage	34
II.10. Conclusion.....	34

Chapitre III : Résultats et Interprétation

III.1. Introduction.....	35
III.2. Courant de décharge.....	35
III.2.1. Essais préliminaires.....	35
III.2.2. Forme de courant de la décharge.....	36
III.2.2.1 Représentation graphique.....	36
III.2.2.2. Interprétation des résultats.....	39
III.2.3. Influence de la distance inter électrodes sur le courant maximum de décharge...39	
III.2.3.1. Résultats obtenus Pour la silicone.....	40
III.2.3.2. Résultats obtenus pour la porcelaine.....	40
III.2.3.3. Représentation graphique.....	40
III.2.3.4. Interpétation des résultats.....	41
III.2.4. Influence de la tension appliquée sur le courant de la décharge.....	42
III.2.4.1. Résultats obtenus Pour la silicone.....	42

III.2.4.2. Représentation graphique.....	43
III.2.4.3. Résultats obtenus pour la porcelaine.....	44
III.2.4.4.Représentation graphique.....	45
III.2.4.5. Interprétation des résultats.....	46
III.2.5. Influence de temps de vieillissement sur le courant maximum de la décharge...46	
III.2.5.1. Résultats obtenus pour la silicone.....	46
III.2.5.2 Résultats obtenus pour la porcelaine.....	47
III.2.5.3. Représentation graphique.....	47
III.2.5.4. Interprétation des résultats.....	48
III.3.Conclusion.....	48
Conclusion générale.....	49

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le point triple

Figure I.1 Type de décharges partielles.....	07
Figure I.2 Circuit équivalent à trois capacités.....	07
Figure I.3 Courbe de Paschen.....	17

Chapitre II : Dispositif expérimental

Figure II.1 Transformateur d'essais.....	20
Figure II.2 Configuration des différents types d'électrodes	22
Figure II.3 Electrode sphère – sphère.....	22
Figure II.4 Electrode sphère – plan.....	23
Figure II.5 Courbes donnant le facteur d'utilisation pour différentes configurations en fonction de p et q.....	23
Figure II.6 Electrode pointe – plan.....	24
Figure II.7 Système d'électrodes utilisées dans l'étude.....	25
Figure II.8 Electrode pointe.....	25
Figure II.9 Electrode plane.....	26
Figure II.10 Les isolateurs électriques en silicone et en porcelaine.....	29
Figure II.11 La coupe verticale d'un isolateur électrique en silicone.....	29
Figure II.12 La coupe horizontale d'un isolant électrique en silicone.....	30
Figure II.13 L'oscilloscope a mémoire.....	30
Figure II.14 Schéma du montage expérimental.....	31
Figure II.15 Dispositif expérimental utilisé dans l'étude.....	32
Figure II.16 Vue générale du logiciel SP107E version 2.9.....	33

Chapitre III : Résultats et interprétation

Figure III.1	Forme de la tension aux bornes de la source d'alimentation 220V.....	36
Figure III.2	Forme d'une impulsion négative de courant de décharge pour la porcelaine.....	37
Figure III.3	Forme d'une impulsion positive de courant de décharge pour la porcelaine.....	37
Figure III.4	Forme d'une impulsion négative de courant de décharge pour la silicone.....	38
Figure III.5	Forme d'une impulsion positive de courant de décharge pour la silicone.....	38
Figure III.6	Variation du courant maximum de la décharge en fonction de la distance.....	41
Figure III.7	Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour la silicone.....	43
Figure III.8	Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour la porcelaine...	45
Figure III.9	Variation du courant de décharge en fonction du temps de vieillissement pour les deux échantillons.....	47

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur le point triple

Tableau I.1 : Valeurs des coefficients A et B pour quelques gaz.....17

Tableau I.2 : Minimum de Paschen en fonction du gaz et du métal de la cathode.....18

Chapitre III : Résultats et interprétation

Tableau III.1 Variation de courant de décharge en fonction de la distance inter électrodes.....40

Tableau III.2 Variation de courant de décharge en fonction de la distance inter électrodes.....40

Tableau III.3 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.9\text{cm}$42

Tableau III.4 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.4\text{cm}$42

Tableau III.5 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=2.9\text{cm}$42

Tableau III.6 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=2.4\text{cm}$43

Tableau III.7 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=1.9\text{cm}$43

Tableau III.8 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.9\text{cm}$44

Tableau III.9 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.4\text{cm}$44

Tableau III.10 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=2.9\text{cm}$44

Tableau III.11 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=2.4\text{cm}$44

Tableau III.12 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=1.9\text{cm}$45

Tableau III.13 Variation du courant de la décharge en fonction du temps de vieillissement pour la silicone.....46

Tableau III.14 Variation du courant de la décharge en fonction du temps de vieillissement pour la porcelaine.....47

Introduction générale

L'ampleur du développement industriel crée un besoin énorme en matière d'énergie électrique. Néanmoins, elle est devenue un élément crucial dans tout développement socio-économique, comme elle est aussi un point de référence pour mesurer la croissance et la puissance d'un pays. En conséquence, les investissements dans la production de cette énergie se multiplient d'une façon phénoménale.

Malgré les efforts fournis dans ce domaine, l'énergie électrique reste un milieu de recherche et d'amélioration, car le processus de production, transport et distribution subissent plusieurs problèmes, parmi ces derniers l'isolation électrique. Sachant bien que l'isolation électrique est un élément critique dans les appareils fonctionnant sous haute tension et la durée de vie de ces appareils étant souvent liée à la durée de vie de son isolation.

Pour cela un bon système d'isolation est associé aux choix des matériaux isolants, ce choix dépend de différentes propriétés de ces matériaux, d'une manière qu'ils seront résistants à diverses contraintes. La contrainte électrique est un exemple particulier qui influence d'une manière directe sur l'isolant électrique, cela est dû au phénomène de la décharge électrique.

Vu de ce phénomène, beaucoup de travaux ont été réalisés sur ce dernier et ses différents mécanismes. Notre travail consiste à étudier la décharge électrique au niveau d'un point triple, métal / gaz / solide isolant.

Afin de bien mener cette étude, on commencera tout d'abord par poser la problématique et pour répondre à cette dernière, on divise notre travail en trois chapitres.

Le premier chapitre, consacré à l'étude bibliographique, contient la définition du point triple et de la décharge électrique. On présentera aussi les différentes méthodes de détection et de calcul de la décharge partielle. Des solutions ont été proposées en vue de parer à ce phénomène.

Dans le deuxième chapitre, on fera la présentation de notre dispositif, ainsi que le montage expérimentale qui nous a permis d'étudier la décharge partielle. On exposera aussi les différents échantillons et l'appareillage utilisés dans nos expériences.

Enfin, dans le dernier chapitre, on présentera les résultats obtenus dans nos expériences avec des interprétations.

On terminera notre étude avec une conclusion générale.

La problématique

Tout système électrique peut avoir des régions où le champ électrique est renforcé, parfois, dû au défaut dans l'isolation qui provoque l'apparition de phénomène de décharges partielles. Une zone de point triple est constituée de la rencontre de trois matériaux (isolant solide, isolant gazeux, électrode haute tension). Cette dernière résulte un problème d'accumulation de charge sur la surface d'isolant qui peut réduire sa tenue diélectrique lors d'une surtension.

La décharge au point triple représenté la base de départ de notre étude, dans laquelle nous avons essayé d'effectuer des essais sur des échantillons différents, mesurer et analyser les résultats afin de comprendre les phénomènes complexes qui peuvent apparaître sous la présence de la haute tension au niveau du point triple et de distinguer le matériau le plus résistant pour l'adopter dans le domaine industriel.



CHAPITRE I

**GENERALITES SUR
LE POINT TRIPLE**

I.1. Introduction

Pour transporter l'énergie électrique, il nous faut un bon système d'isolation des lignes et des postes électriques, c'est pour cette raison qu'on utilise les matériaux isolants, ces isolants sont classés selon leurs origines en trois catégories (solide, gaz, liquide). En appliquant une haute tension sur un système électrique, les isolants sont exposés aux différentes contraintes et parmi ces contraintes on trouve la contrainte électrique (décharges électriques), ont augmentant la tension d'application ces décharges électriques s'accumulent sur un point commun entre les isolants, ce point on l'appelle le point triple.

Ce chapitre est basé sur les différentes notions de point triple et les diverses décharges qui s'accumulent sur sa surface.

I.2. Point triple

Parmi les zones les plus exposées aux décharges partielles, on trouve la zone de point triple.

I.2.1. Définition de point triple [1]

Un point triple, souvent appelé jonction triple, est constitué aux endroits où trois matériaux différents sont présent, souvent la jonction gaz/ solide isolant/ métal. Les points triples constituent souvent un point faible de l'isolation, où le renforcement localisé du champ électrique dans le matériau le plus faible (gaz) peut induire l'apparition des décharges partielles.

I.2.2. Matériaux isolants constituant le point triple

Comme on a déjà dit le point triple est un point de jonction entre les trois milieux, dans notre cas on a les milieux isolants suivants :

I.2.2.1. Solide isolant

Le rôle principal des solides isolants est de s'opposer au passage du courant électrique, mais ils servent aussi à maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions bien déterminées (exemple: isolant placé à la tête d'une ligne).

Le taux d'utilisation de ces isolants varie selon les besoins, dans certain cas la quantité d'isolants solides utilisée est très réduite (lignes aériennes en conducteurs nus), mais la préoccupation de minimiser l'encombrement des systèmes électriques, emmène à rapprocher les conducteurs et par conséquent à augmenter leurs isolations et les maintenir rigidement en place pour éviter qu'ils se mettent en contact sous l'effet de leurs propres poids, des déformations, ou des forces extérieurs. Les isolants solides peuvent être employés seuls (câble à isolation synthétique extrudée), en association de plusieurs solides (bobinage réalisé en fil émaillé imprégné de résine thermodurcissable) ou en association d'un liquide (isolation en papier imprégné d'huile minérale pour les transformateurs à haute tension).

Afin d'assurer l'isolation des différents systèmes électriques, divers isolants sont utilisés (verre, porcelaine, silicone, matériaux composites...etc.).

I.2.2.2. Gaz isolant [2]

Tous les gaz sont isolants, ont la même constante diélectrique, il est impossible de connaître le comportement particulier d'une particule, mais la théorie cinétique des gaz permet de connaître, en raison même de leur grand nombre, leur comportement moyen. N'importe quel gaz, utilisé comme diélectrique doit posséder certaines caractéristiques pour le bon fonctionnement telles que :

- Grande résistivité ;
- pertes faible ;
- Rigidité diélectrique élevée ;
- Non inflammable ;
- Résistant aux effets thermiques et chimiques ;
- Maintenance pas chère et pratique ;
- Absence de toute toxicité ;

Les gaz ne sont pas généralement considérés comme des "matériaux", parce que la distance entre les molécules adjacentes est si grande et le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume est si petit, qu'ils ne sont pas capables de résister aux forces mécaniques. Cependant, les gaz sont des "diélectriques" dans le sens d'isolants électriques, et sont employés pour empêcher l'écoulement du courant.

I.3. Décharges partielles dans le point triple

I.3.1. Définition de la décharge partielle [3]

Le terme décharge partielle est défini par la norme IEC 60270 comme une décharge électrique localisée qui ne traverse que partiellement un isolant compris entre deux électrodes. En d'autres termes, elle ne court-circuite pas l'entièreté de cet isolant. Les décharges partielles surviennent au niveau des, diélectrique par exemple dans le cas d'une cavité, l'air qui règne claqué et perd ses propriétés isolantes lorsque le champ électrique est trop important.

Les décharges partielles sont donc dues à un processus d'ionisation, induit par le champ électrique extérieur. Ce processus s'interprète physiquement par un phénomène d'avalanche électronique. La physique qui se cache derrière ce phénomène est relativement complexe. Le champ électrique local doit excéder une valeur critique E_{critique} pour que le phénomène d'avalanche puisse s'enclencher.

En résumé, pour que le phénomène d'avalanche puisse avoir lieu, il faut que les deux conditions suivantes soient vérifiées.

- Un électron germe est disponible pour déclencher l'avalanche.
- Le champ électrique local dépasse un certain seuil critique.

I.3.2. Classification des décharges partielles

Les décharges partielles sont dues à des défauts d'isolation et sont classés en plusieurs types :

I.3.2.1. Décharges internes

Les décharges internes ont lieu à l'intérieur de l'isolant, par exemple lorsqu'il existe un défaut ou une bulle d'air dans la structure interne de l'isolant. La rigidité diélectrique du milieu est alors localement réduite.

I.3.2.2. Décharges couronnes

Les décharges couronnes prennent naissance au niveau des points où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone très réduite entourant la pointe.

I.3.2.3. Décharges surfaciques

Les décharges surfaciques ce sont des décharges prenant naissance au point triple, métal / isolant solide / air, lorsqu'il y a un défaut (goutte d'eau, pollution, poussière.....) et se développant en surface de l'isolant. Les experts ont constaté que les problèmes précoces de dégradation des isolants sont souvent liés à la présence d'eau.

I.3.2.4. Décharges en arborescence

Les décharges en arborescence se produisent à cause d'un défaut dans l'isolation. Une croissance des différentes branches de l'arborescence produira des conditions propices pour l'apparition d'autres décharges.

La figure suivante montre les différentes décharges partielles :

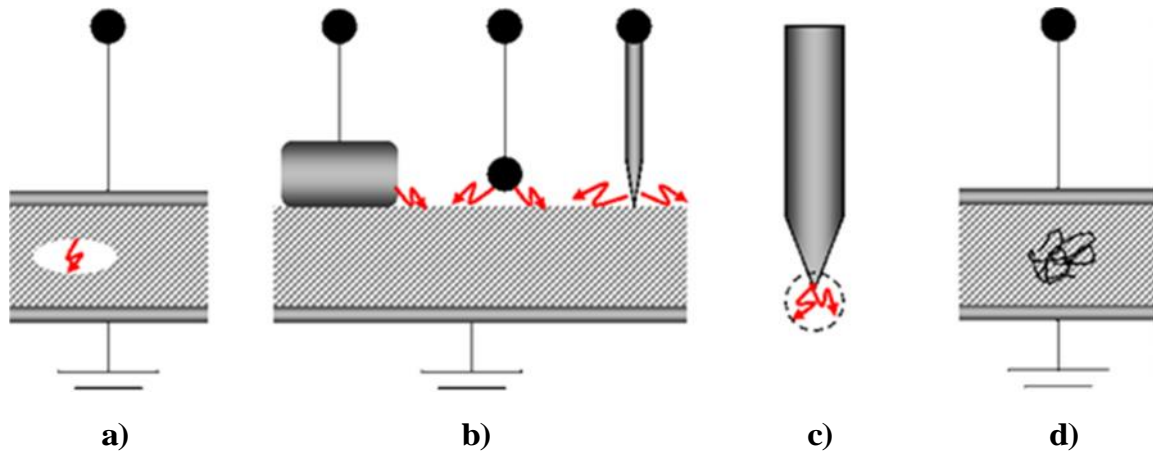


Figure I.1 : Types de décharges partielles

I.1.a) internes

I.1.b) de surface

I.1.c) couronne

I.1.d) en arborescence

I.3.3. Circuit équivalent à trois capacités [1]

Le circuit équivalent simple à trois capacités est souvent utilisé pour modéliser les décharges partielles du point de vue électrique.

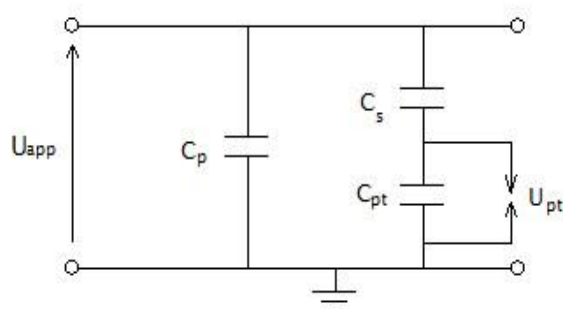


Figure I.2 : Circuit équivalent à trois capacités

C_{pt} : la capacité de la zone où les décharges partielles apparaissent.

C_s : la capacité du diélectrique en série avec la zone de décharge.

C_p : la capacité équivalente de l'isolant en parallèle avec C_{pt} + C_s.

U_{pt} : la différence de potentielle apparaissant dans la zone de décharge (point triple).

U_{app} : la tension appliquée (tension apparente).

Par un calcul de la division capacitive présente dans le circuit de la figure I.2

$$U_{pt} = \frac{U_{app}}{1 + \frac{d_s}{\epsilon_s d_g}} \quad (I.1)$$

Avec :

d_s : l'épaisseur de l'isolant placé en série avec la décharge partielle ;

ε_s : la permittivité de l'isolant en série avec la décharge partielle ;

d_g : épaisseur du gaz dans la zone de la décharge partielle ;

I.3.4. Conséquence des décharges partielles [5]

Les décharges partielles conduisent à une dégradation des matériels sous l'action de diverses contraintes :

- Contrainte thermique générée localement par la décharge qui peut entraîner un farinage puis une carbonisation de l'isolant.
- Contrainte chimique due aux produits de dégradation générée par la décharge (ozone, oxyde d'azote, acide nitrique notamment).

- Erosion mécanique due au bombardement par des espèces chargées et aux attaques acides.

Ces contraintes provoquent une dégradation du matériau isolant les parties sous tension. Lorsque l'isolant est trop abimé, un arc électrique se produit entre deux phases ou entre une phase et le neutre, on dit alors qu'il y a un amorçage. En général, cet amorçage conduit à la mort du matériel.

I.3.5 Le vieillissement

Parmi les conséquences néfastes des décharges électriques et le phénomène le plus influençant sur les propriétés diélectriques des isolants, on trouve le vieillissement.

I.3.5.1. Définition de vieillissement

Le vieillissement électrique est défini comme tout changement des propriétés du matériau qui affecte ses fonctions d'isolation. Il peut donc s'agir d'une modification de nature chimique ou physique induisant une modification des propriétés électriques dans un sens défavorable pour la pérennité des fonctions isolantes [6].

D'après le CEI (Comité d'Electrotechnique International) le vieillissement est une détérioration irréversible des caractéristiques d'un système isolant, mettant en jeu son bon fonctionnement. Ces changements des caractéristiques sont tels qu'ils soumettent l'isolation à un risque de rupture prématuré dans le temps.

I.3.5.2. Types de vieillissement

Il existe plusieurs types de vieillissement selon la cause qu'il le engendre, parmi eux on trouve :

I.3.5.2.1. Vieillessement électrique

Le matériau est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation des canaux conducteurs microscopique, cette phase est généralement précédée par une période de croissance de défaut à l'échelle microscopique telle que la formation ou l'extension de cavités microscopique. Il s'ensuit après d'une dégradation généralisé ou localisé sous forme d'arborescences électriques [6].

I.3.5.2.2. Vieillessement thermique [7]

Le vieillissement thermique est l'effet de la température sur les isolants solides. Il a été constaté en 1930 par Montsinger qui a présenté une formule empirique décrivant la réduction de la durée de vie par un accroissement de 8°C de la température de papier utilisé comme isolant dans les transformateurs.

L'effet de la température peut avoir plusieurs conséquences sur les polymères, elle permet la modification de la structure du matériau, un rétrécissement et un changement de la couleur ainsi qu'une perte de masse. Comme nous pouvons assister à des réactions chimiques telles que l'oxydation, l'hydrolyse, les ruptures de chaînes, qui peuvent influencer sur la plus part des propriétés du polymère (conductivité, rigidité diélectrique,...etc.)

I.3.5.2.3. Vieillessement climatique [7]

La durée de vie de service de la plupart des isolants est liée au vieillissement naturel comme résultat du rayonnement solaire, l'humidité relative ambiante et les éléments chimique contenus dans l'air.

Il est évident que le vieillissement naturel d'un matériau est difficile à prévoir, il dépend :

- de la zone climatique
- de l'environnement
- des contraintes qui lui sont appliquées

I.3.6. Méthodes de détection des décharges partielles [5]

Les décharges partielles sont souvent accompagnées d'une émission de son, de lumière, d'énergie et de réactions chimiques. Il est donc possible de détecter ces décharges partielles de plusieurs manières.

I.3.6.1. Méthode électrique

Cette méthode consiste à mesurer une charge globale qui circule dans le circuit et qui est due aux décharges partielles. Cela nécessite le branchement d'un appareil de mesure sur le circuit électrique du transformateur sous test. Cette intervention nécessite également la mise hors tension de ce dernier. Ces mesures sont très délicates et doivent se faire en laboratoire. Cependant, c'est la seule méthode connue qui donne un diagnostic sûr et précis.

I.3.6.2. Méthode lumineuse

Elle consiste à obtenir une image dans l'ultraviolet et le visible des décharges partielles surfaciques ou à effets couronnes. Cela impose la vision du phénomène de décharges partielles se produisant sur l'isolation.

I.3.6.3. Méthode chimique

On observe que différents régimes de décharge sont traversés au cours du temps, marqués par la formation d'ozone, puis sa destruction, et enfin par l'apparition d'oxydes d'azote, preuve de la montée en température du milieu et de l'imminence d'un claquage (passage à l'arc). Il est postulé qu'un défaut d'isolement induit un tel changement de régime, détectable par l'apparition quasi-simultanée d'oxydes d'azote type NO et NO₂. Ces oxydes d'azote réagissent avec l'eau présente dans l'air et donnent de l'acide nitrique [12].

I.3.6.4. Méthode acoustique

La méthode acoustique consiste à mesurer les émissions acoustiques des décharges partielles par voie aérienne ou par voie solide dans le domaine ultrasonore. Cette méthode a l'avantage d'éviter la mise hors tension du transformateur par exemple, et d'être non intrusive.

I.3.7. Remèdes pour éviter les effets des décharges partielles

- ✓ Pour éviter la destruction des appareils électriques nous devons utiliser l'analyse de décharges partielles et des dispositifs de surveillance.
- ✓ Décharge partielle peut également être évitée grâce à une conception approfondie et minutieuse sélection de matériaux.
- ✓ Les fabricants devront utiliser des détecteurs de décharges partielles dans toutes les étapes de production.
- ✓ Bilans périodiques sont également importants lorsqu'il s'agit d'éviter toute surprise désagréable.
- ✓ Pour assurer que l'équipement haut tension va fonctionner parfaitement sur le long terme, l'analyse approfondie de décharge partielle est la seule solution fiable.

I.4. Calculs de la tension d'apparition des Décharges partielles

I.4.1 Méthode conventionnelle [1]

Habituellement, la condition de décharge dans le voisinage du Point tripe se base sur le critère de décharge de Townsend :

$$\int_0^d \bar{\alpha} dx K (\approx 20) \quad (\text{I.2})$$

$\bar{\alpha}$: coefficient d'ionisation effectif (coefficient net d'ionisation)

Lorsque les processus d'ionisation et d'attachement coexistent, il est difficile de déterminer séparément les deux coefficients. Le coefficient d'ionisation effectif est donné par la relation suivante : $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$

α : coefficient d'ionisation

Lorsque l'énergie des électrons est suffisamment grande, ils peuvent ioniser les molécules du gaz. Pour caractériser ce processus on introduit une grandeur appelée coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Ce coefficient représente le nombre de paires ions électrons créés par centimètre de parcours dans la direction de l'accélération.

 η : coefficient d'attachement :

Le coefficient d'attachement caractérise le nombre d'électrons qui disparaissent par unité de longueur par suite des processus d'attachement.

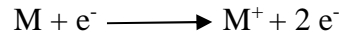
Dans cette méthode conventionnelle, trois difficultés apparaissent :

- La valeur du champ électrique dans le gaz, près du Point triple est élevée. Pour ces valeurs il n'existe pas de données expérimentales de $\bar{\alpha}/p=f(E/p)$, où E est le champ électrique et p est la pression. Des extrapolations doivent être réalisées à partir des valeurs du champ inférieures.
- le choix de la valeur de constante K est empirique (20), proposé par Reather, Meek and Loeb, mais, ensuite, Davies et Pedersen ont proposé d'autres algorithmes de calcul de ce critère de claquage. Il varie, donc, en fonction des auteurs.
- A chaque pression, quand on varie la tension appliquée (c'est-à-dire le champ dans la zone étudiée), le calcul doit être refait.

I.4.1.1. Théorie de Townsend

L'énergie cinétique d'un électron détermine sa capacité à exciter ou à dissocier les molécules du gaz plasmagène. L'énergie acquise par un électron placé entre deux électrodes dépend de son libre parcours moyen et du champ électrique auquel il est soumis ($E=V/d$) dans le cas d'un champ uniforme, V étant la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes tandis que (d représente la distance inter-électrodes). L'obtention d'un nombre

d'électrons suffisant pour exciter le gaz de façon significative exige un mécanisme de multiplication. Si l'énergie d'un électron est supérieure à l'énergie d'ionisation d'une molécule M , alors un choc inélastique est susceptible de libérer un électron, ce que traduit l'expression suivante :



Les deux électrons obtenus par ionisation sont alors accélérés par le champ électrique et peuvent à leur tour ioniser de nouvelles molécules. Townsend a proposé en 1914 l'introduction d'un coefficient d'ionisation (appelé premier coefficient de Townsend), ce coefficient dépend du champ réduit E/N (avec N désignant la densité du gaz) et son inverse $1/\alpha$ représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de $e^{\alpha d}$ électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé « avalanche électronique ».

La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha d} \quad (I.3)$$

Avec I : courant (A)

I_0 : courant initial dû aux électrons primaires (A)

d : distance inter-électrode (m)

α : premier coefficient de Townsend (m^{-1})

La probabilité de produire des électrons secondaire se traduit par l'introduction d'un second coefficient de Townsend β . Le critère d'auto-entretien de la décharge (nombre adimensionnel) s'écrit alors :

$$\alpha \cdot (\beta - 1) = 1 \quad (I.4)$$

C'est le critère de Townsend [8].

Dans le cas d'intervalles inter-électrodes de plus d'un centimètre et des pressions proches de la pression atmosphérique, la théorie de Townsend ne peut pas expliquer les temps de développement de la décharge mesurée (10^{-9} à 10^{-7} s). Ces temps étant beaucoup

plus courts que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode. Cette théorie ne peut également pas expliquer le fait que la tension de claquage ne dépende pas du matériau de la cathode qui doit intervenir par l'intermédiaire du coefficient d'émissions secondaires [9].

I.4.1.2 théorie des streamers [9]

Vers 1940, Craggs, Meek et Raether ont établi une théorie des streamers (ou théorie des décharges filamenteuses) complétée après par de nombreuses approches à caractères essentiellement expérimental.

Une avalanche initiée par un électron multiplie exponentiellement le nombre d'électrons en tête de cette d'avalanche. Ces électrons diffusent et la longueur de l'avalanche s'étend, entraînant une croissance du champ électrique induit par la charge d'espace. Pour une certaine valeur critique de cette longueur, le champ électrique induit devient comparable au champ électrique extérieurement appliqué. Dès lors, l'avalanche électronique se transforme en streamer.

Les mécanismes de base de cette théorie sont :

- La création d'une avalanche primaire de type Townsend par un électron germe ;
- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la 1^{ère} avalanche ;
- La transition avalanche-streamer lorsque le champ de charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué.

Phase 1

Un électron primaire se trouvant près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire. La vitesse des électrons étant 100 fois plus environ supérieur à celle des ions, l'avalanche se développe comme un nuage d'électrons laissant derrière elle une charge d'espace positive.

Les électrons sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs forment dans le gaz une charge d'espace positive.

Phase 2

Des électrons secondaires sont créés par photo ionisation autour de la charge d'espace. Ces électrons provoquent en tête d'avalanche et la cathode et crée également une composant radiale.

- **Origine des électrons secondaires**

La tête d'avalanche est le siège d'une importante activité (collisions entre électrons et ions positifs) qui est une source de photons qui sont absorbés par le gaz environnant. En particulier, les molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons ayant une énergie supérieure à 13 eV qui est suffisante pour ioniser les molécules d'O₂ dont l'énergie d'ionisation n'est que 12,2 eV.

Phase 3

La charge d'espace augmente en volume et devient un streamer. De nouvelles avalanches secondaires viennent s'ajouter à l'avalanche primaire et le streamer progresse. Quand il touche la cathode, à ce moment se produit le claquage.

I.4.2. Méthode de Paschen [1]

En vue des difficultés de la première méthode, il existe une autre méthode de calcul et quelle s'agit de la méthode de Paschen. Cette méthode est particulièrement adaptée pour l'étude des décharges partielles, puisque dans la zone autour du point triple, le champ électrique le long de chaque ligne de champ est quasi-uniforme. Le champ électrique sera calculé à l'aide des logiciels de calcul de champ (FEMM ou Quick Field) et les tensions d'apparition de la première décharge partielle et la position de cette dernière seront calculées à l'aide de la courbe de Paschen.

I.4.2.1. Courbe de Paschen[11]

Les courbes de Paschen sont obtenues grâce à l'équation suivante:

$$V_{\text{claquage}} = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

$$C = \ln \left(\frac{A}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right) \quad (\text{I.6})$$

A et B sont des constantes mesurées expérimentalement. A s'exprime en $\text{Torr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ et B en $\text{V.Torr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$. est le second coefficient de Townsend, qui dépend de la nature des électrodes.

Torr : unité de pression ($1\text{Torr} = 1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$).

Gaz	A ($\text{Torr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$)	B ($\text{V.Torr}^{-1}.\text{cm}^{-1}$)
H ₂	5	130
N ₂	12	342
Air	15	365

Tableau I.1 : Valeurs des coefficients A et B pour quelques gaz

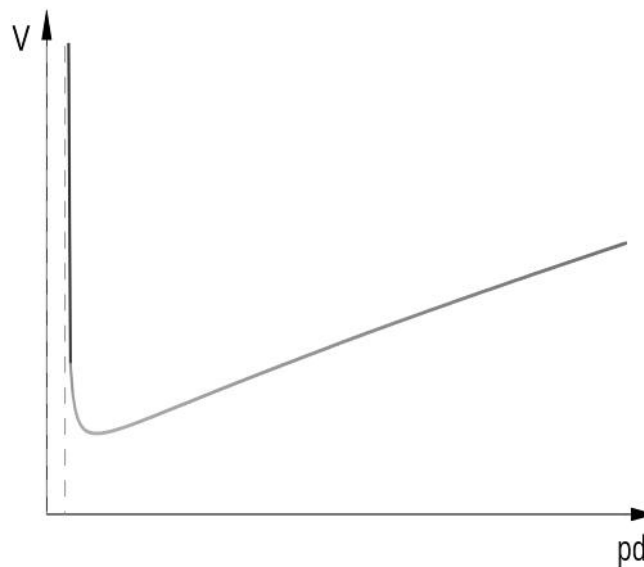


Figure I.3 : Courbe de Paschen

Le tableau suivant montre le minimum de Paschen en fonction du gaz et du métal de la cathode.

Matériaux		Minimum de Paschen	
Gaz	Cathode	$(U_d)_{\min} \text{ (V)}$	$(P.d)_{\min} \text{ (mm.Hg.cm)}$
Air	Fe	330	0, 57
N ₂	Fe	275	0, 75
O ₂	Fe	450	0, 70

Tableau I.2 : Minimum de Paschen en fonction du gaz et du métal de la cathode [9]

I.4.2.2. Signification physique de la loi de Paschen

La signification physique de cette loi peut être aisément compréhensive. En effet, si l'on diminue progressivement la pression P , les électrons effectuent de moins en moins de collisions. Si l'on veut maintenir les valeurs de $\bar{\alpha}$ suffisamment élevées de manière à ce que la condition de criticité soit préservée, le nombre de collisions ionisantes doit être augmenté. Dans ces conditions U_C doit être progressivement augmenté à mesure que la pression diminue. Par ailleurs, si le produit Pd croît, un électron accéléré par le champ électrique aura une probabilité plus grande de rencontrer une molécule du gaz, mais l'énergie moyenne acquise entre deux collisions étant plus faible, la probabilité d'obtenir une collision ionisante est relativement faible à moins d'augmenter la tension. Il s'ensuit que la courbe de Paschen doit nécessairement passer par un minimum [10].

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini les différentes notions sur le point triple et ces paramètres, et nous avons présenté les phénomènes qui se produisent, lors de l'application d'une haute tension, spécifiquement les décharges partielles, qui s'accumulent sur cette zone.

En fin nous avons déterminé les différentes procédures à apprendre pour détecter et éliminer ces décharges, cela nous a permis d'approvisionner et de réaliser des essais expérimentaux, pour ces décharges sur cette surface du point triple.

A decorative scroll graphic with a black outline and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved. There are two grey, semi-circular elements on the left side, one at the top and one at the bottom, resembling the ends of a scroll.

CHAPITRE II

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

II.1. Introduction

Tout matériau électrique est susceptible de subir plusieurs contraintes, il en résulte la dégradation et par fois la détérioration des propriétés de ce matériau (électrique, thermique, chimique...), pour ces raisons dans chaque étude d'une installation électrique le choix et la détermination des paramètres des dispositifs (appareillages, matériaux,.....) et leurs propriétés électriques est indispensable.

Ce chapitre est consacré à la présentation de notre dispositif expérimental et des appareillages électriques utilisés pour mesurer les différents courants de décharges ainsi que les matériaux utilisés comme des isolants pour réaliser les différents essais électriques.

Afin d'assurer un bon isolement électrique et contrôler ses qualités, on doit recourir à des études théoriques sur la base de modèle et, d'autre part à la détermination expérimentale de paramètres en laboratoire haute tension.

Les travaux présentés dans ce projet ont été réalisés au sein du laboratoire haute tension de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

II.2. Source haute tension

Une source de tension est utilisée : Transformateur haute tension monophasé.

Les générateurs de haute tension alternative 50 Hz, sont du type transformateur destinés à effectuer des essais diélectriques sur les isolants.

Dans notre essai l'alimentation est assurée par un transformateur monophasé qui a les caractéristiques suivantes : 100kV, 10kVA, 50Hz placé dans la cage de Faraday, comme il est présenté sur la figure II.1.



Figure II.1 Transformateur d'essais

La variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur se trouvant au niveau d'un pupitre de commande.

II.3. Choix du Systèmes d'électrodes

Dans la plupart des systèmes utilisés en haute tension, le champ électrique est loin d'être uniforme : généralement, il est maximum au voisinage de l'électrode sous tension et diminue vers la partie à la masse. C'est le cas des structures tige-plan, conducteur-sol, conducteur- pylône, etc.

Les systèmes d'électrodes qu'on peut utiliser sont : pointe - plan, sphère -plan, sphère- sphère et plan - plan. L'état de surface et les rayons de courbure des électrodes sont contrôlés.

La configuration pointe - plan (figure II.2) est utilisée pour se placer dans les conditions de champs non uniformes.

L'expression du champ axiale (suivant l'axe Z de la pointe) en approximation hyperboloïde est donnée par l'expression :

$$\mathbf{E}_z = \frac{2U}{(R+z)\ln(4d/R)} \quad (\text{II.1})$$

U représente la tension appliquée aux électrodes, d la distance inter électrodes et R le rayon de courbure de la pointe. Plus R est faible, plus le champ local à la pointe est élevé et sa distribution inhomogène. Cette inhomogénéité est caractérisée par le facteur de non uniformité β ou son inverse appelé « facteur d'utilisation du champ » et noté η appelé aussi facteur de forme de Schweiger; ce dernier est défini comme étant le rapport entre le champ moyen dans l'espace inter électrodes et le champ maximal (c'est-à-dire le champ au niveau de l'électrode acérée (électrode de plus faible rayon de courbure). Si E est la valeur maximale du champ dans l'intervalle, le facteur d'utilisation du champ (noté) est égal à :

$$\eta = \frac{E_{moy}}{E_{max}} = \frac{U/d}{E_{max}} = \frac{U}{E_{max}d} \quad (\text{II.2})$$

$$\eta = 1/\beta$$

η est compris entre 0 et 1. Plus η est proche de 1, plus le champ sera uniforme. C'est ce vers quoi essaye de tendre l'industriel.

Lorsque le champ est suffisamment hétérogène, une décharge de type couronne apparaît. Par convention, on appelle situation à champ non homogène les configurations pour lesquelles, sous certaines conditions de pression, un effet couronne est susceptible d'apparaître. En revanche, les situations pour lesquelles le claquage apparaît directement, sans effet couronne, sont appelées configurations à champ quasi homogène. Ces configurations dépendent non seulement du facteur d'utilisation du champ, mais aussi de la nature du gaz isolant lui-même.

Lorsque le facteur d'utilisation du champ est suffisamment bas, le champ électrique au voisinage de l'électrode acérée est très grand. L'amplification de l'avalanche critique peut devenir très importante et, contrairement au cas d'un champ uniforme, une propagation de la décharge par un mécanisme de type streamers peut se manifester même en l'absence de surtension. La zone dans laquelle le champ électrique est élevé (et où une très forte multiplication des électrons se produit) coexiste la plupart du temps (géométries pointe - plan, fil - cylindre, etc.) avec une zone dans laquelle le champ électrique est très faible où les différentes particules chargées dérivent lentement soit vers l'électrode la plus proche, soit vers la zone de multiplication. La nature très différente des phénomènes physiques qui apparaissent dans l'une ou l'autre zone conditionne en grande partie la structure des décharges qui sont susceptibles d'apparaître.

Dans chaque configuration, les deux électrodes en regard sont axisymétriques. La figure II.2 illustre les différentes configurations d'électrodes.

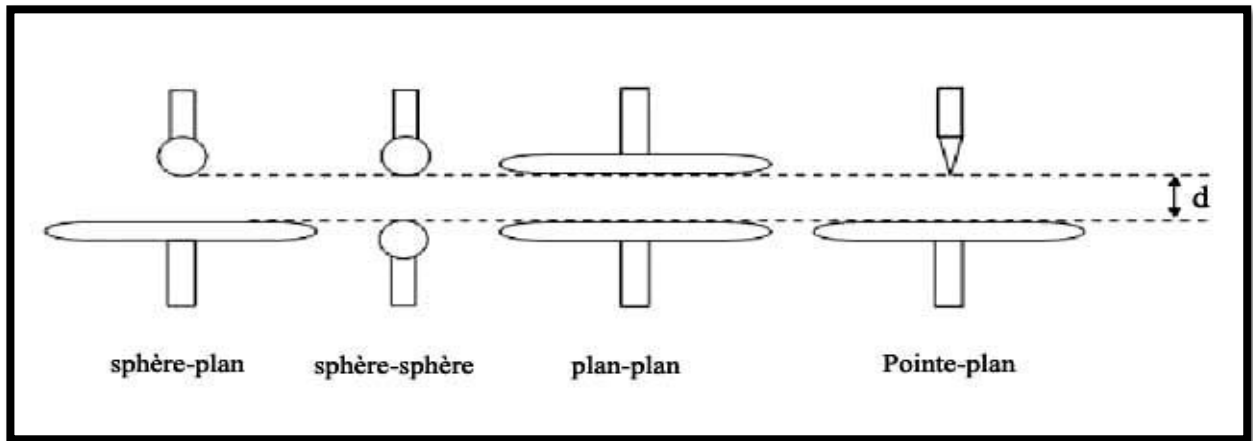


Figure II.2 Configurations des différents types d'électrodes

Pour le calcul du champ dans un système asymétrique d'électrodes sphère – sphère (figure II.3) de même diamètre (une des électrodes connectée à la masse) comme dans notre, on introduit le facteur p :

$$P = \frac{d+r}{r} \quad (\text{II.3})$$

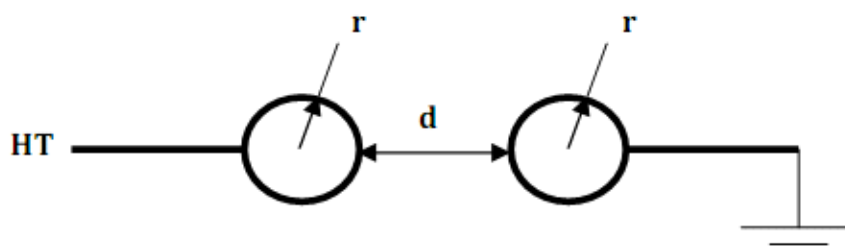


Figure II.3 Electrode sphère - sphère

La valeur de p nous permet de déterminer sur un abaque le coefficient d'utilisation du champ pour chaque distance. Par exemple pour :

- $d = 5 \text{ mm}$, $\eta = 0,65$
- $d = 10 \text{ mm}$, $\eta = 0,42$
- $d = 20 \text{ mm}$, $\eta = 0,25$

Dans un système d'électrodes sphère - plan (figure II.4), le calcul se fait de la même manière que précédemment.

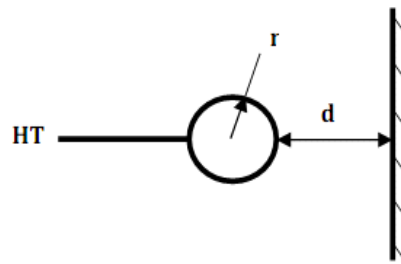


Figure II.4 Electrode sphère – plan

Les valeurs de η étant calculées à l'aide de graphes donnant le coefficient d'utilisation du champ en fonction des valeurs de p , les résultats obtenus sont des valeurs approximatives.

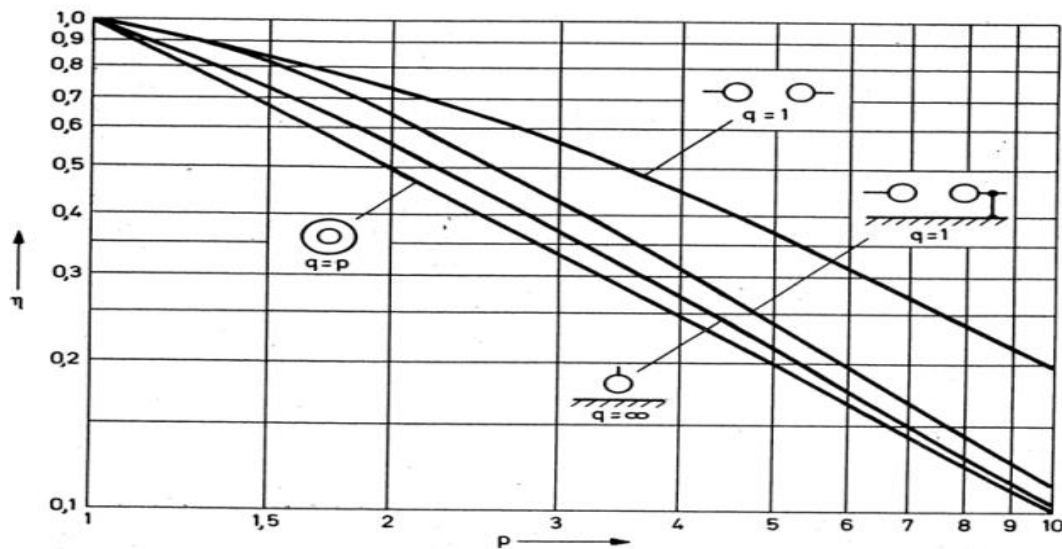


Figure II.5 Courbes donnant le facteur d'utilisation pour différentes configurations en fonction de p et q

Pour les configurations sphère - sphère et sphère - plan, la figure II.5 permet de déterminer les valeurs du facteur d'utilisation du champ à l'aide de p .

Dans le cas d'un système pointe - plan (figure II.6), le coefficient d'utilisation en approximation hyperboloïde est calculé à partir de la relation suivante:

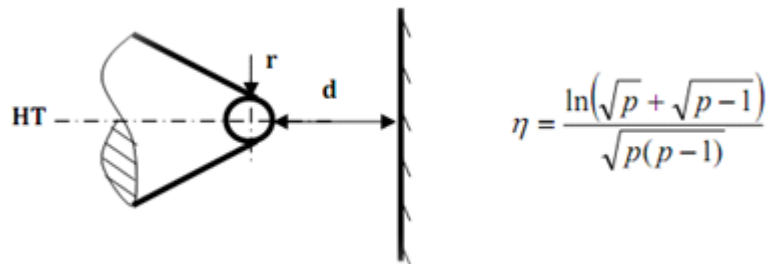


Figure II.6 Electrode pointe – plan

p se calcule de la même manière que dans les autres cas.

II.3.1. Le système d'électrodes utilisées dans l'étude

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes.

Toutes : les configurations des différentes électrodes peuvent être ramenées à la configuration pointe- pointe ou pointe – plan

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Cela est dû à l'effet de pointe, qui permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des pointes et des angles métalliques). Ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz.

Dans notre travail on a utilisé une configuration (pointe-plan) c'est le cas d'un champ électrique non uniforme, notre système d'électrode est constitué de deux électrodes :

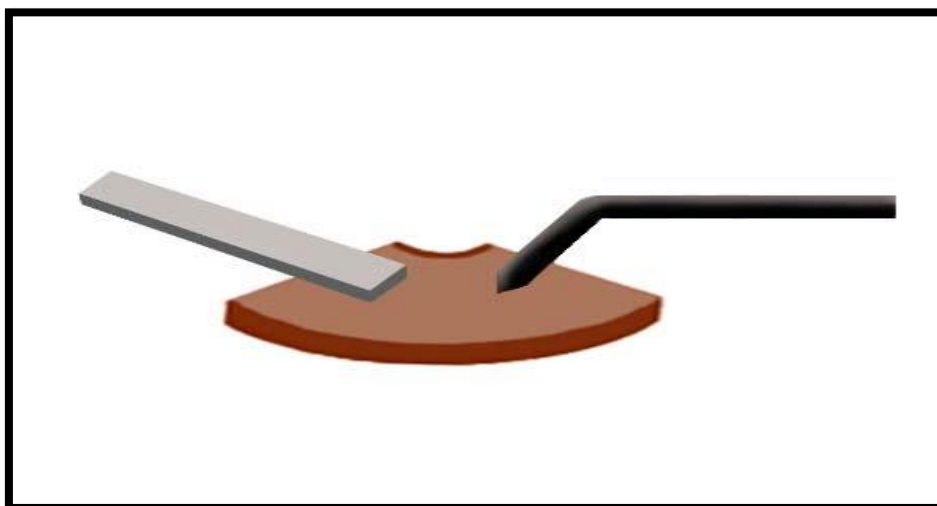


Figure II.7 Système d'électrodes utilisées dans l'étude

II.3.1.1. Electrode pointe

C'est une électrode métallique d'une longueur de 19 cm, d'un diamètre de 0,6 cm, elle a une partie droite de 12 cm et l'autre partie de 7 cm inclinée avec un angle de 135° , Elle se termine par une pointe de rayon de courbure de 0,1 mm et un angle solide de 22° .

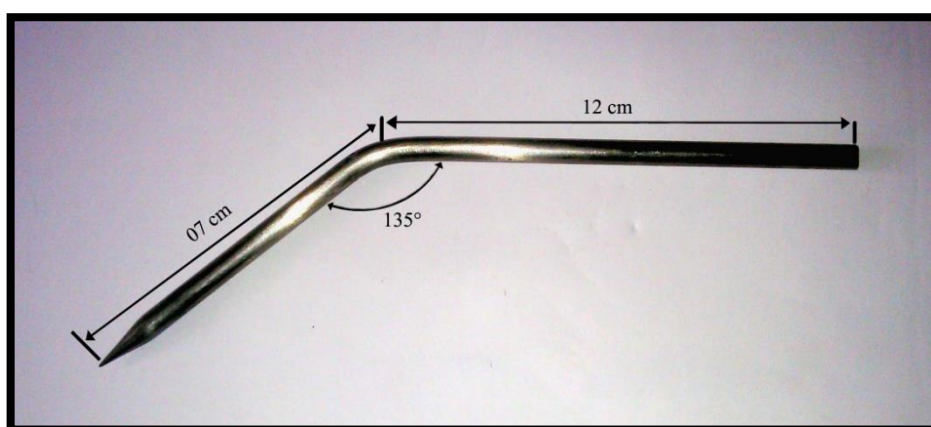


Figure II.8 Electrode pointe

II.3.1.2. Electrode plane

Elle est de forme rectangulaire avec une longueur de 10,4 cm, une largeur de 0,7 cm et une hauteur de 0,16 cm pour canaliser le champ dans une seule direction.

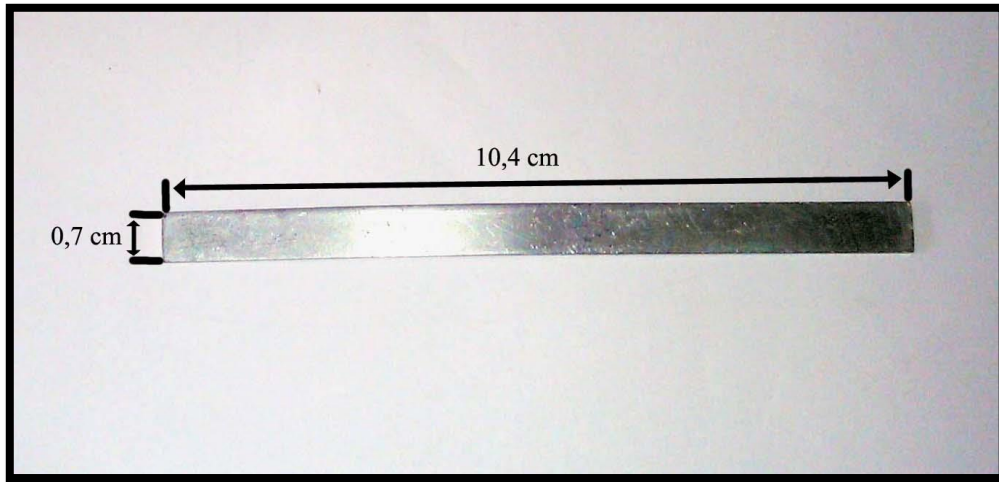


Figure II.9 Electrode plane

II.4. Choix des matériaux utilisés comme isolant solide (échantillons)

Les propriétés des conducteurs et des isolants jouent un rôle crucial dans la construction des appareils électriques. Dans cette partie nous présentons les matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés. Ces matériaux, ont pour la plupart été choisis pour leurs bonnes propriétés diélectriques. Parmi ceux-ci, les polymères isolants.

La grande diversité des polymères, ainsi que leurs bonnes propriétés diélectriques mécaniques et thermiques en font un matériau de choix dans les isolations hautes tensions.

Dans notre travail on a opté pour deux différents matériaux isolants comme échantillons, qui sont très répandus dans le domaine de l'électrotechnique. Il s'agit de silicone et de la porcelaine.

II.4.1. Les porcelaines

On peut décrire les porcelaines comme des matériaux céramiques poly cristallins contenant une proportion de phase vitreuse supérieure à 10% en volume. Cette phase vitreuse joue un rôle actif lors de la densification. De sa nature dépendent nombre de propriétés, en particulier les propriétés mécaniques, électriques et diélectriques [13].

La pâte de la porcelaine dure est préparée à partir de kaolin ou d'argile très blanche, de quartz et de feldspath. La phase cristalline liée par un verre est formée essentiellement de mullite ($2\text{SiO}_2, 3\text{Al}_2\text{O}_3$) et de l'excès de quartz non dissous.

II.4.1.1 Caractéristiques des porcelaines [13]

II.4.1.1.1. Caractéristique électriques et diélectriques à température ambiante et à 1MHz

- Le facteur de dissipation diélectrique T_{gs} est entre 0,8 et 2 %
- La constante diélectrique est entre 5 et 6,5
- La rigidité diélectrique est entre 6,1 et 13 V/ μm
- La résistivité est de $10^{14} \Omega\cdot\text{cm}$

II.4.1.1.2. Caractéristique mécanique et thermique :

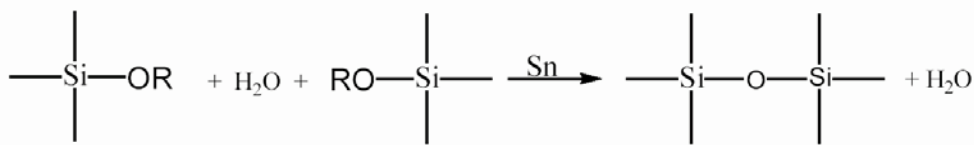
- La densité est de 2,4
- La conductivité thermique est de $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- La dilatation thermique est de $6 \cdot 10^{-8} \cdot \text{C}^{-1}$
- La résistance à la traction est de 48 MPA
- La résistance à la flexion est de 83 MPA
- La résistance à la compression est de 352 MPA

II.4.2. Les silicones [14]

Les silicones ou (polyorganosiloxane) ont une structure chimique basée sur une alternance d'atomes de silicium et d'oxygène. C'est par la présence de silicium et par l'existence de la liaison Si-O que les silicones se distinguent des autres polymères organiques. Cette liaison est à l'origine de leur nom : silicones, contraction silicon ketones, par analogie avec les cétones. Les liaisons covalentes que le silicium crée avec l'oxygène pour former le squelette des macromolécules sont exceptionnellement stables. Ceci conduit pour les polydiméthylsiloxanes (PDMS) à des propriétés de résistance aux hautes températures, de fortes tenues aux rayons UV, IR et à de nombreuses agressions extérieures, combinées à un

remarquable pouvoir d'étalement. Leur point faible réside dans leurs propriétés mécaniques moins bonnes que celles des polymères organiques.

Nous, nous nous intéressons beaucoup plus aux élastomères silicones qui sont principalement constitués de chaînes PDMS linéaires avec des bloqueurs réactifs pour former des réseaux élastométriques. Parmi ces derniers l'élastomère vulcanisable à froid (EVF) le plus utilisé généralement dans l'électrotechnique et surtout dans l'isolation électrique, sa formule chimique monocomposant est la suivante :



Elastomère vulcanisable à froid monocomposant (EVF)

II.4.2.1 Caractéristiques des silicones [13]

II.4.2.1.1. Propriétés électriques

- La rigidité diélectrique est de 10 kV /mm

II.4.2.1.2. Propriétés thermiques

- La température d'opération est de 250 °C
- La conductivité thermique est de 0,3 W/(m.°C)

II.4.2.1.3. Propriétés mécaniques

- La masse volumique est entre 1800 et 2800 Kg/m³
- La résistance à la déchirure est d'environ 15 N/mm
- La résistance à la rupture en traction est entre 5 et 9 MPa
- L'allongement à la rupture est entre 200 et 1000 %

II.5. Préparation des échantillons

Pour avoir ces échantillons, on a pris deux isolants solides utilisés dans l'isolation extérieure des lignes de haute tension, l'un est en silicone et l'autre en porcelaine comme on le voit sur la figure ci-dessous :



Figure II.10 Les isolateurs électriques en silicone et en porcelaine

On a fait deux coupes verticales dans chaque isolateur, afin d'obtenir quatre parties symétriques de silicone et de porcelaine aussi, comme nous le montre la figure ci-dessous :

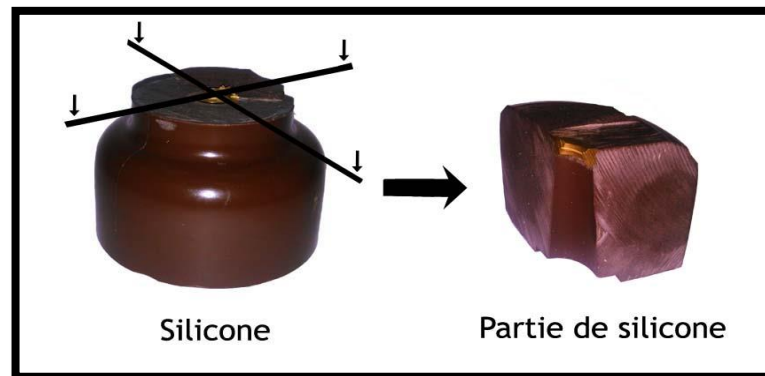


Figure II.11 La coupe verticale d'un isolateur électrique en silicone

Ensuite, on a pris une partie parmi les quatre, afin de réaliser deux autres coupes horizontales pour acquérir trois échantillons comme on le voit sur la figure ci-dessous :

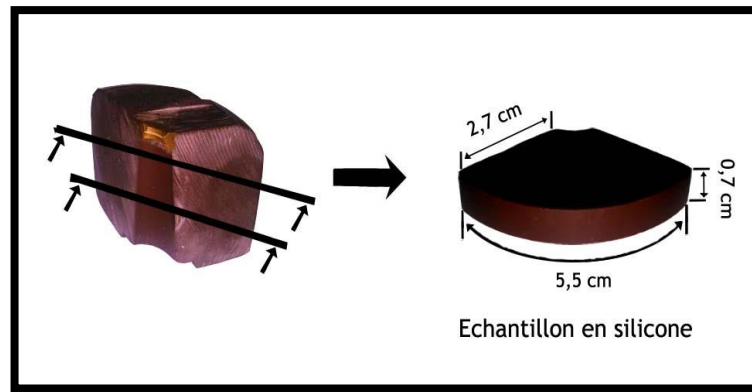


Figure II.12 La coupe horizontale d'un isolant électrique en silicone

Enfin, on a pansé notre échantillon avec du papier verre 1000, 2000 et 3000 pour avoir une surface très lisse sans défaut, puis on l'a nettoyée, lavée à l'eau savonneuse, rincé avec de l'eau et laissée sécher.

II.6. L'oscilloscope à mémoire

L'oscilloscope n'est pas un appareil destiné pour la mesure en HT, mais il permet d'enregistrer les tensions très brèves comme les ondes de choc. Il est généralement utilisé dans les expériences brusques et brèves, tel que le contournement ou le claquage. Il offre l'avantage de visualiser l'allure de la tension et de donner que la valeur de crête de la tension. Il nous permet l'examen de certains phénomènes électriques : étude de la sinusoïde du courant alternatif ; étude de déphasage, étude de la forme des signaux d'impulsion et mesure du temps de monté.

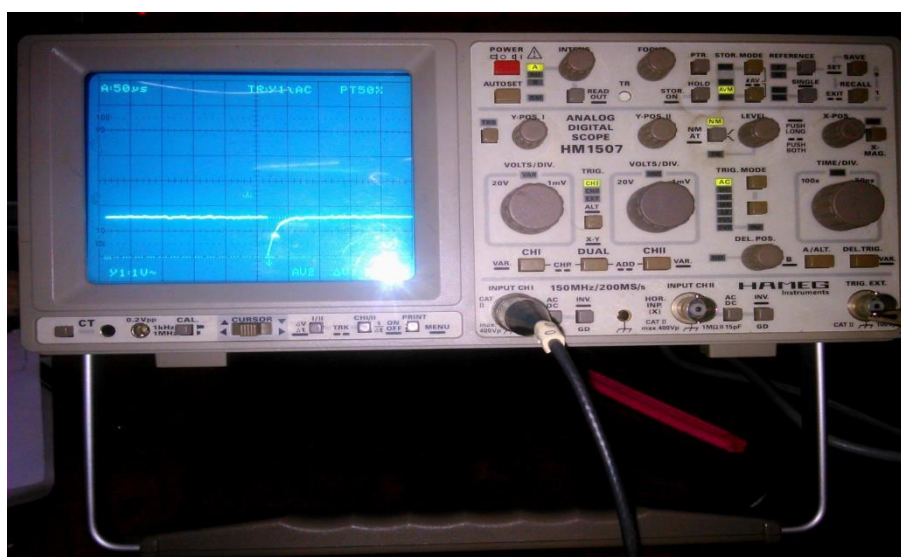


Figure II.13 L'oscilloscope a mémoire

II.7. Montage expérimental

Le montage expérimental utilisé dans notre étude est montré dans la figure (II.14). L'alimentation haute tension est assurée par un transformateur d'essai monophasé placé dans une cage de faraday dont les caractéristiques sont : $U=100\text{kV}$, $f=50\text{Hz}$, $S=10\text{kVA}$. La variation de la tension se fait à l'aide d'un variateur de tension qui se trouve au niveau du pupitre de commande. Les décharges électriques sont obtenues à l'aide de deux systèmes d'électrodes (électrode pointe-contre électrode). L'électrode pointe est reliée à la borne de haute tension du transformateur d'essai, et la contre électrode à la terre, l'ensemble est placé sur un support en plexiglas.

Toutes les masses sont mises à la terre avec des câbles coaxiaux pour éviter les parasites qui peuvent influencer les mesures.

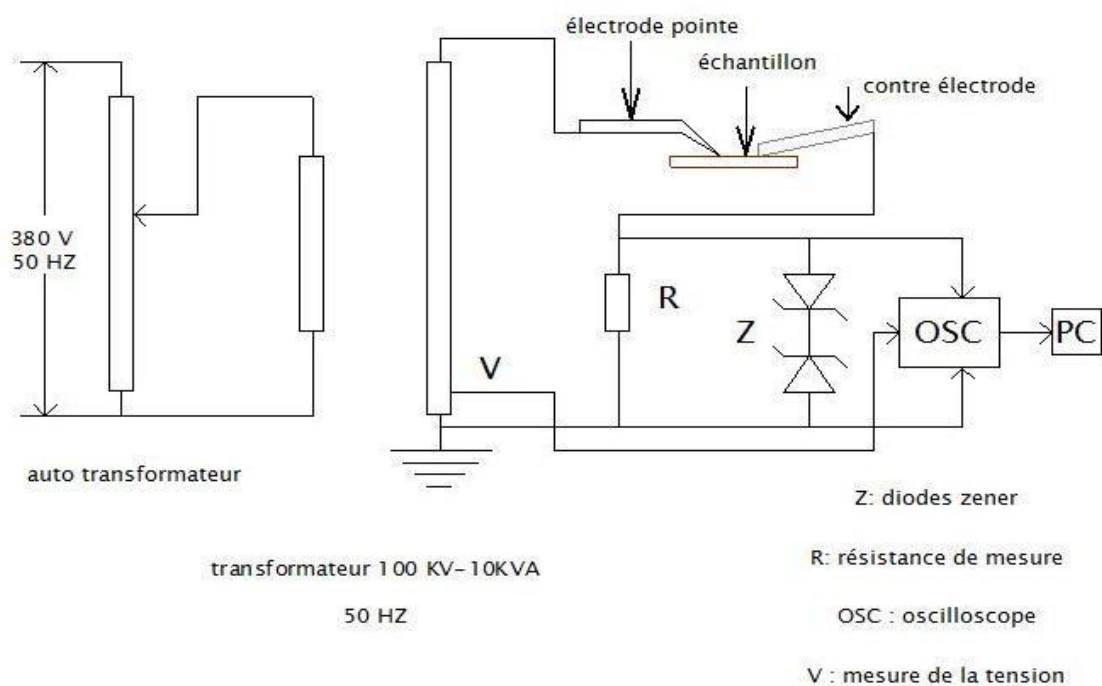


Figure II.14 Schéma du montage expérimental

II.7.1. Dispositif expérimental

Pour élaborer nos expériences sur les différents échantillons avec précision, on a construit un dispositif qui nous permet de fixer et de varier la distance inter-électrodes et aussi que la position de l'échantillon. Ce dispositif est construit à base de matériaux isolants : le PMMA (polyméthylméthacrylate) connu sous son nom commercial « plexiglas » et la Bakélite.



Figure II.15 Dispositif expérimental utilisé dans l'étude

II.8 Présentation du logiciel utilisé pour tracer sur ordinateur les valeurs mesurées

Nous possédons la version 2.19 du logiciel appelé SP107E, qui sert à importer et analyser (décomposition du signal en série de fourrier) les mesures de l'oscilloscope dans un ordinateur.

La figure II.16 présente une vue général de ce logiciel.

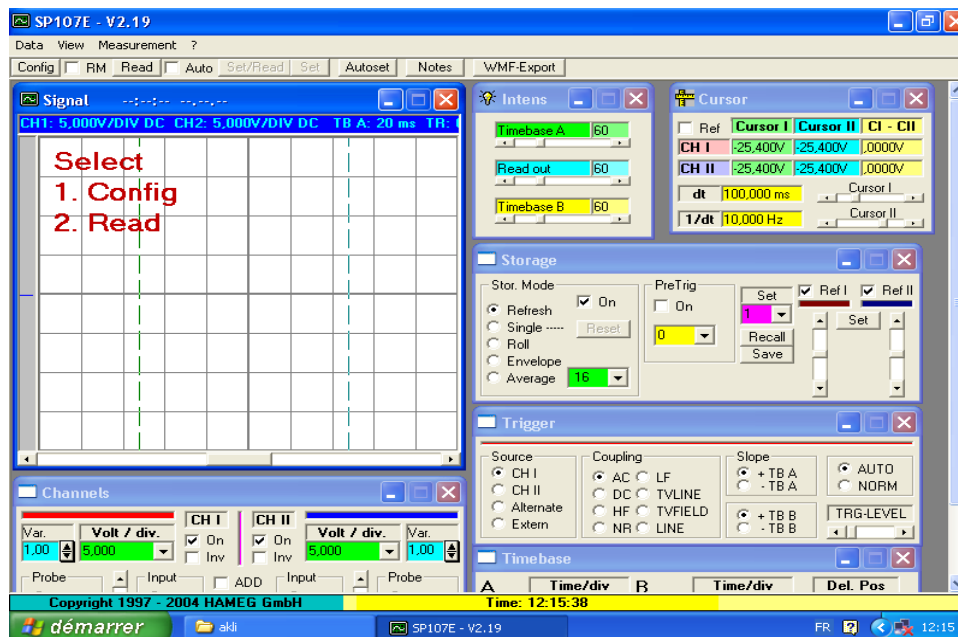


Figure II.16 Vue générale du logiciel SP107E version 2.9

Comme vous le constater le logiciel dispose de 7 fenêtres qui sont :

Signal : Sur cette fenêtre on visualise le signal mesuré tel qu'il est vue sur l'oscilloscope

Channels : Cette fenêtre indique les canaux importés et leurs calibres lors de la lecture

Cursor : Cette fenêtre indique la tension a chaque point du graphe lorsque vous passez le curseur de la souris par celui-ci

Intensity : Cette fenêtre indique l'intensité de la luminosité de la courbe.

Storage : Indique quelque option d'enregistrement des données (nous n'allons pas utiliser cette fenêtre pour enregistrer nos résultats)

Trigger : Indique les options de base de l'oscilloscope choisit lors de l'enregistrement des résultats

Time base : Cette fenêtre indique les calibres de temps pris par chaque canal.

II.8. Mesure de courant de pré-claquage

Pour étudier le courant de décharge de surface, on a utilisé un oscilloscope numérique à mémoire HAMEG1507 qu'on a branché aux bornes d'une résistance R dont la valeur de $45K\Omega$, L'oscilloscope à mémoire offre l'avantage de faciliter l'acquisition de signaux de fréquence élevée. Sa bande passante a été bien choisie $150MHz$ de sorte qu'il puisse enregistrer des signaux qui ont un temps très court, une impédance d'entrée de $10M\Omega$, et un taux d'échantillonnage de $220 MS/s$, ce qui facilite l'interprétation des signaux acquis.

Les informations obtenues et enregistrées par l'oscilloscope sont transmises à un ordinateur pour être traitées.

Pour assurer la protection de l'oscilloscope contre l'éventuelle surtension, nous avons placé des diodes Zener qui court-circuiteront la résistance de mesure R dès que la tension atteindra une valeur de sécurité qui a été fixée à ses bornes.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes installations et équipements utilisés dans nos investigations expérimentales, ainsi que les modes opératoires pour étudier des décharges surfaciques au point triple solide isolant/ gaz/métal. Le système d'enregistrement des phénomènes d'apparition de la décharge constitue un des éléments essentiels des équipements utilisés.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The top edge is slightly curved, and the bottom edge is also rounded. There are two grey, semi-circular elements on the left side, one at the top and one at the bottom, resembling the ends of the scroll's binding or the edges of the paper.

CHAPITRE III

**RESULTATS ET
INTERPRETATIONS**

III.1. Introduction

Les courants de décharges sont souvent les facteurs majeurs des défaillances et du vieillissement des isolants électriques, leur détection est difficile elle nécessite un matériel sensible et précis qu'il faut manipuler avec une grande prudence.

Notre étude porte sur la mesure du courant maximum associé aux décharges électriques dans un point triple métal/gaz/solide isolant et cela pour chaque échantillon de porcelaine et de silicone en fonction de la tension appliquée, de la distance inter électrodes et du temps du vieillissement.

III.2. Courant de décharge

Dans cette partie nous présentons les résultats expérimentaux de l'étude des courants de décharges pour des échantillons de silicone et de porcelaine. En faisant varier la tension appliquée, nous mesurerons le courant maximum de décharge. Ces mesures sont faites sous tension alternative en système d'électrodes pointe-plan.

III.2.1. Essais préliminaires

Une fois le montage expérimentale est prêt, nous devons alors faire quelques essais préliminaires dans un montage simple, pour cela nous avons mesuré la tension de la source d'alimentation fournie par le réseau (220V) que nous avons représenté sur la figure II.1, afin de se familiariser avec le logiciel fournis avec l'oscilloscope ainsi que les différentes fonction de l'oscilloscope.

Les essais préliminaires sont nécessaires pour la mise en place des essais expérimentaux, ils nous permettent de prendre une marge sécuritaire pour le matériel afin d'éviter le contournement de l'isolation solide qui risque d'endommager l'oscilloscope.

Lors des essais préliminaires, nous avons constaté la présence de parasites qui peuvent influencer les mesures. Pour minimiser ces perturbations ou bien les éliminer complètement, nous avons mis à la terre toutes les masses avec des câbles coaxiaux.

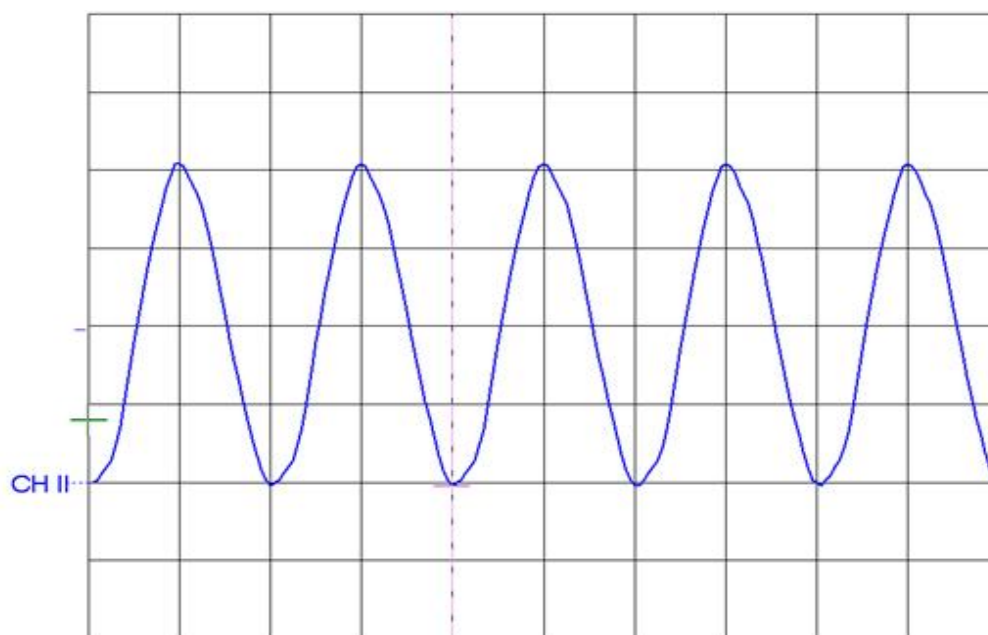


Figure III.1 Forme de la tension aux bornes de la source d'alimentation 220V.

III.2.2. Forme du courant de la décharge

Le courant de décharge est sous forme d'impulsions positives et négatives qui peuvent être mesurées avec un oscilloscope à mémoire, pour $d=2.9$ cm, $V=4$ kV, $R=45$ k Ω .

III.2.2.1 Représentation graphique

Les figures(III.2), (III.3), (III.4) et (III.5) présentent les formes de courant de décharge pour les impulsions positives et négatives.

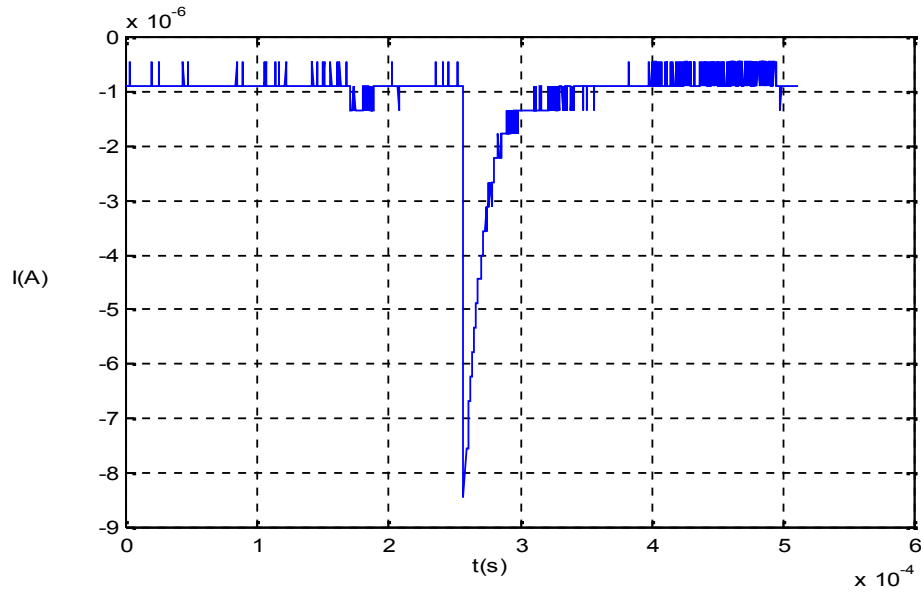


Figure III.2 Forme d'une impulsion négative de courant de décharge pour la porcelaine.

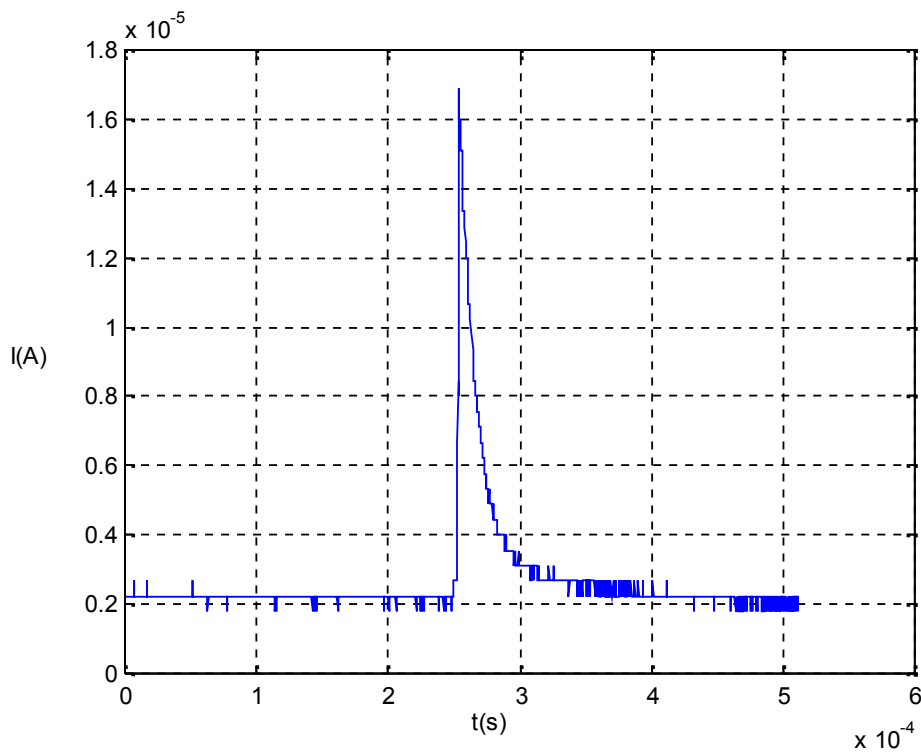


Figure III.3 Forme d'une impulsion positive de courant de décharge pour la porcelaine.

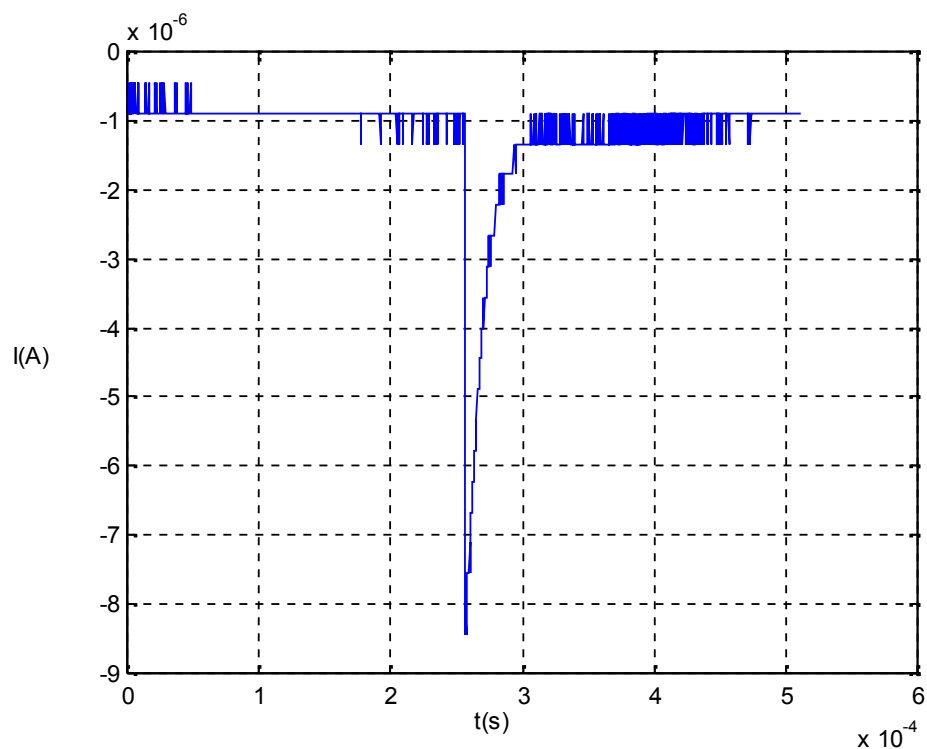


Figure III.4 Forme d'une impulsion négative de courant de décharge pour la silicone.

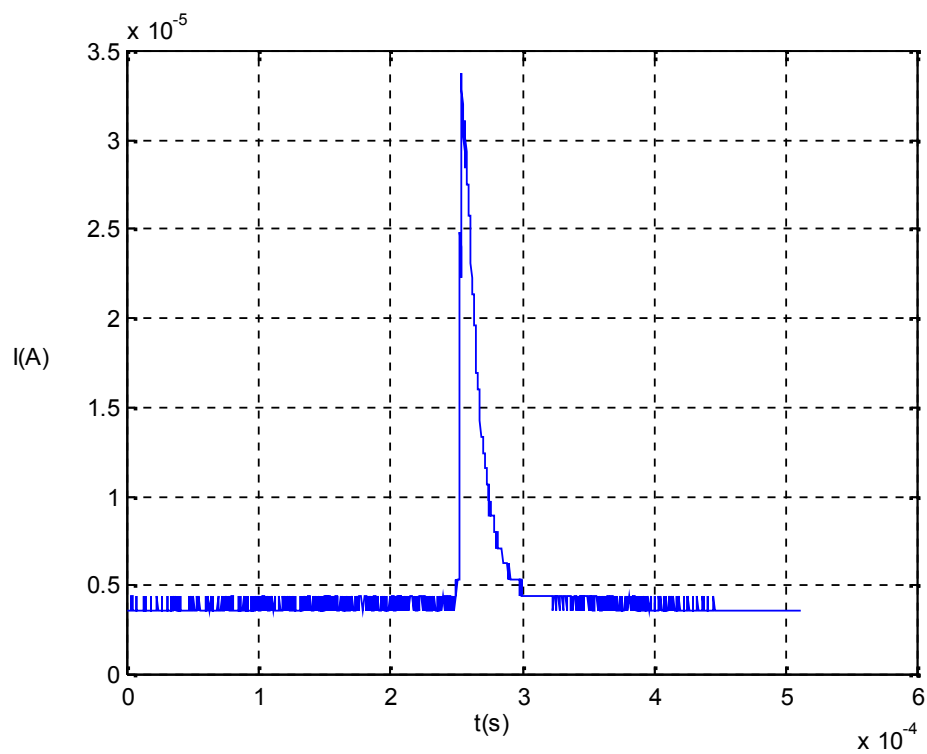


Figure III.5 Forme d'une impulsion positive de courant de décharge pour la silicone.

III.2.2.2. Interprétation des résultats

Les figures (III.2), (III.3), (III.4) et(III.5) montrent la forme des impulsions de courant positive et négative.

Les premières impulsions du courant de la décharge sont apparues en premier en polarité négative, cela est dû au fait que l'initiation des courants de décharge est plus facile pour les impulsions négatives, alors que l'initiation de ces courants pour les impulsions positives nécessite une tension d'application importante.

Les impulsions négatives sont plus nombreuses que celles des impulsions positives.

L'amplitude des impulsions positives est plus importante que celle des impulsions négatives.

Dans nos essais, nous avons remarqué qu'il n'est pas toujours aisé de repérer sur une impulsion, l'origine du temps de montée souvent brouillée par des oscillations parasites. De plus, la crête de l'onde était souvent déformée, l'instant où l'impulsion atteint le maximum ne peut pas être repéré avec précision.

On remarque que le temps de montée dans toutes les impulsions est toujours inférieur au temps de descente.

Le temps de montée des impulsions positives est supérieur à celui des impulsions négatives, cela s'explique le faite que les streamers négatifs se développent rapidement que les streamers positifs.

III.2.3. Influence de la distance inter électrodes sur le courant maximum de décharge

La variation de l'amplitude du courant maximum de décharge en fonction de la distance est donnée par les tableaux (III.1), (III.2).

Pour $V=12KV$, $R=45K\Omega$.

III.2.3.1. Résultats obtenus Pour la silicone

d en (cm)	3.9	3.4	2.9	2.4	1.9
I^+ (μA)	102.88	102.22	105.55	199.77	268
I^- (μA)	11.86	14.77	45	46	58

Tableau III.1 Variation du courant de décharge en fonction de la distance inter électrodes.

III.2.3.2. Résultats obtenus pour la porcelaine

d en (cm)	3.9	3.4	2.9	2.4	1.9
I^+ (μA)	95.77	155.77	160	198.44	315.55
I^- (μA)	59.33	65.11	42	82.44	127.33

Tableau III.2 Variation du courant de décharge en fonction de la distance inter électrodes.

III.2.3.3 Représentation graphique

La figure (III.6) présente la variation de courant de décharge en fonction de la distance inter électrodes pour les deux échantillons.

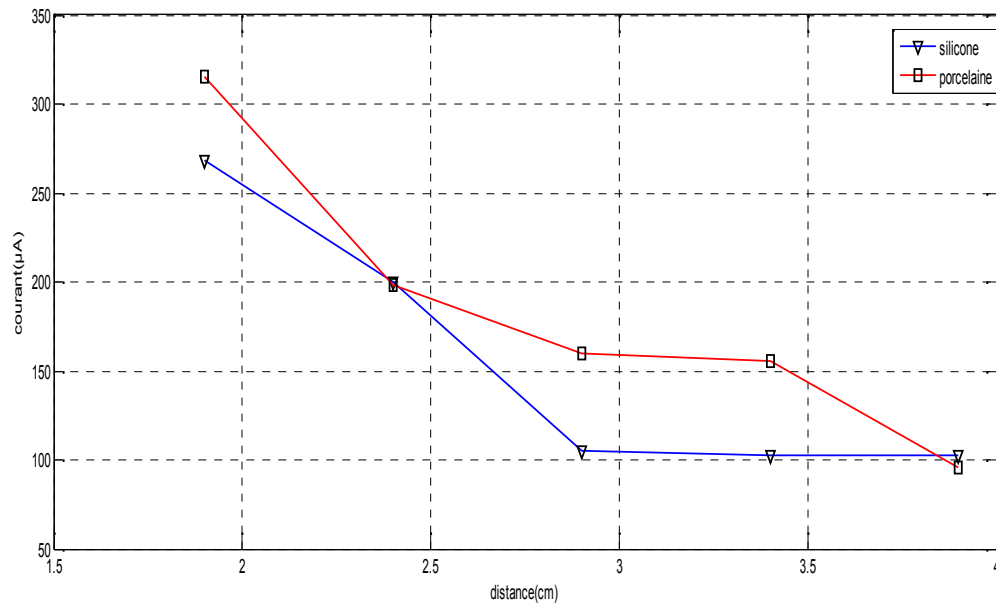


Figure III.6 Variation du courant maximum de la décharge en fonction de la distance.

III.2.3.4. Interprétation des résultats

D'après la figure (III.6) on constate que le courant maximum de décharge électrique diminue avec l'augmentation de la distance inter électrodes, pour les deux échantillons.

Pour les deux matériaux, l'amplitude des impulsions positives diminue rapidement pour $d=1,19$ cm jusqu'à 2.88 cm, pour les deux matériaux. A partir de cette valeur de la distance, la diminution de courant de décharge est beaucoup plus faible. Alors que l'amplitude des impulsions positives varie relativement moins en fonction de la distance pour la silicone. L'amplitude des impulsions positives pour la porcelaine est plus grande que celle des impulsions positives pour la silicone cela pourrait s'expliquer par ce qu'on appelle streamers à savoir que les streamers positifs de la porcelaine se développent sur des distances plus longues que celles des streamers positifs de la silicone.

L'amplitude des impulsions positives pour la porcelaine est plus grande que celle de la silicone, cela signifie que le degré d'influence de la distance sur la porcelaine est plus important par rapport à la silicone ,ce qu'implique que la silicone est le diélectrique le plus performant ,en terme de la résistance contre le courant de la décharge en fonction de la distance inter électrodes.

III.2.4. Influence de la tension appliquée sur le courant de la décharge

La variation de l'amplitude du courant maximum de décharge en fonction de la tension est donnée par les tableaux suivants :

III.2.4.1. Résultats obtenus Pour la silicone

Pour $d = 3.9\text{cm}$

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	7.11	20.44	31.11	102.88
I^- (μA)	2.07	6.07	7.91	11.87

Tableau III.3 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.9\text{cm}$.

Pour $d=3.4\text{cm}$

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	10.29	28.22	65.79	102.22
I^- (μA)	3.98	8.02	9.29	14.78

Tableau III.4 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.4\text{cm}$.

Pour $d=2.9\text{cm}$

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	15.44	46.22	87.56	105.56
I^- (μA)	14.42	20.96	32	45.11

Tableau III.5 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour $d=2.9\text{cm}$.

Pour d=2.4cm

U (kV)	4	6	8	10
I ⁺ (μA)	30.89	50	93.56	199.78
I ⁻ (μA)	13.89	23.78	36.22	46.89

Tableau III.6 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour d=2.4cm.

Pour d=1.9cm

U (kV)	4	6	8	10
I ⁺ (μA)	36.89	61.78	157.56	268.89
I ⁻ (μA)	12.29	33.78	46.44	58.67

Tableau III.7 Variation de courant de décharge en fonction de la tension pour d=1.9cm.

III.2.4.2. Représentation graphique

La figure(III.7) presente la variation de couraant de décharge en fonction de la tension pour la silicone.

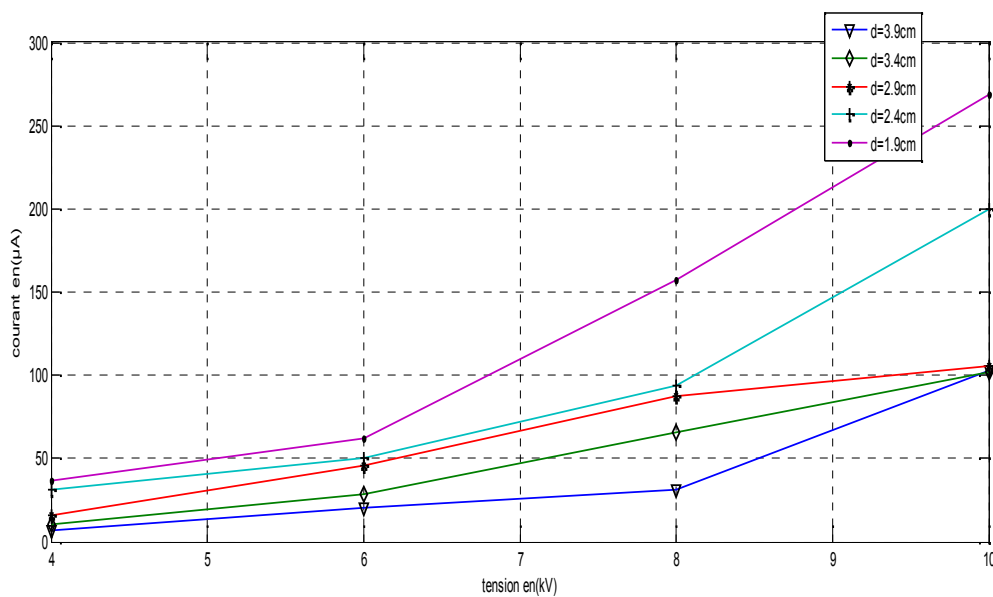


Figure III.7 Variation du courant de décharge en fonction de la tension pour la silicone.

III.2.4.3. Résultats obtenus pour la porcelaine

Pour $d=3.9\text{cm}$

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	20.78	42	66.67	95.78
I^- (μA)	5.71	15.44	15.95	59.33

Tableau III.8 Variation du courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.9\text{cm}$.

Pour $d= 3.4\text{cm}$

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	15.73	49.77	80.89	155.77
I^- (μA)	7.8	16.8	22.66	32.22

Tableau III.9 Variation du courant de décharge en fonction de la tension pour $d=3.4\text{cm}$.

Pour $d=2.9\text{cm}$

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	18.42	55.56	82.66	160
I^- (μA)	8.57	23.33	38.66	43.11

Tableau III.10 Variation du courant de décharge en fonction de la tension pour $d=2.9\text{cm}$.

Pour $d=2.4\text{cm}$

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	22.44	66	105.33	198.44
I^- (μA)	10.73	15.11	43.55	82.44

Tableau III.11 Variation du courant de décharge en fonction de la tension pour $d=2.4\text{cm}$.

Pour $d=1.9\text{cm}$.

U (kV)	4	6	8	10
I^+ (μA)	28.44	84.67	121.78	315.56
I^- (μA)	9.62	15.55	40.66	127.33

Tableau III.12 Variation du courant de décharge en fonction de la tension pour $d=1.9\text{cm}$.

III.2.4.4. Représentation graphique

La figure(III.8) présente la variation de couraant de décharge en fonction de la tension pour la porcelaine.

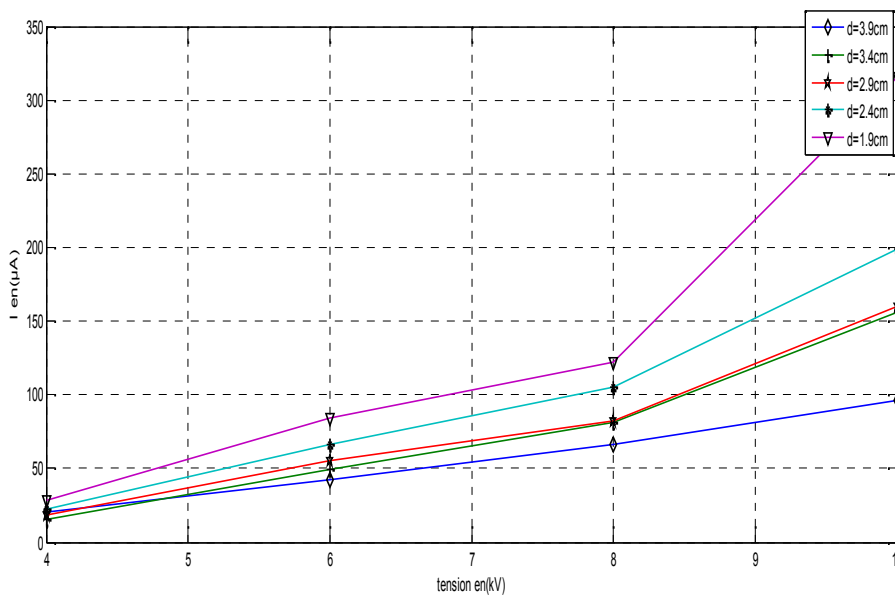


Figure III.8 Variation du courant de décharge en fonction de la tension pour la porcelaine.

III.2.4.5. Interprétation des résultats

D'après les figures (III.7), (III.8) nous constatons que l'amplitude du courant électrique augmente avec la tension appliquée pour les systèmes de matériau choisis, cette croissance du courant électrique est expliquée par le phénomène d'accumulation de décharges électriques au niveau de la zone du point triple. Ce dernier est dû au renforcement du champ électrique au niveau de la surface étudiée, qui a donné naissance à des décharges localisées dans cette zone.

L'amplitude des impulsions croît légèrement en fonction de la tension jusqu'à 6kV pour la silicone, et jusqu'à 8kV pour la porcelaine, à partir de ces valeurs la croissance du courant maximum de décharge est beaucoup plus importante, mais avec un taux de croissance plus élevé pour la porcelaine, qui atteint des valeurs du courant maximum plus grande par rapport aux celles de la silicone. Cela signifie que la tension appliquée influe beaucoup plus sur la porcelaine.

III.2.5. Influence de temps de vieillissement sur le courant maximum de la décharge

La variation de l'amplitude du courant maximum de décharge en fonction du temps de vieillissement est donnée par les tableaux, (III.1), (III.2).

III.2.5.1. Résultats obtenus pour la silicone

Temps (min)	0	30	60	90	120
I^+ (μA)	127.78	133.78	13.62	13.4	9.2
I^- (μA)	28	39.78	22.02	20.18	13.96

Tableau III.13 Variation du courant de la décharge en fonction du temps de vieillissement pour la silicone.

III.2.5.2 Résultats obtenus pour la porcelaine

Temps (min)	0	30	60	90	120
I^+ (μA)	38.44	40.29	18.73	17.91	15.8
I^- (μA)	35.11	37.16	17.62	8.24	5.86

Tableau III.14 Variation du courant de la décharge en fonction du temps de vieillissement pour la porcelaine

III.2.5.3. Représentation graphique

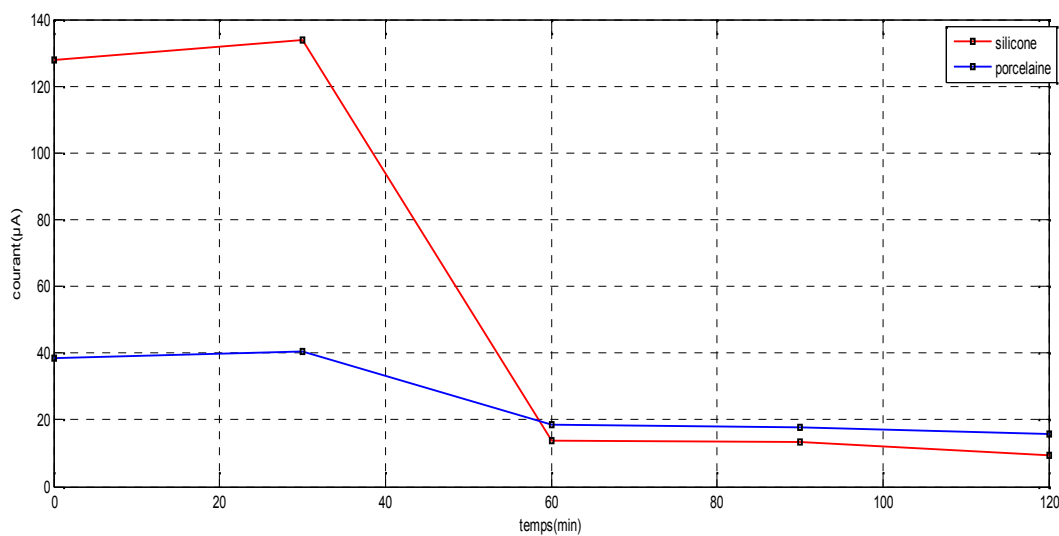


Figure III.9 Variation du courant de décharge en fonction du temps de vieillissement pour les deux échantillons.

III.2.5.4. Interprétation des résultats

La figure (III.9) montre l'influence du temps de vieillissement sur le courant maximum de décharge.

Pour les deux échantillons, on remarque que le courant de décharge augmente pour la première période de vieillissement, à partir de cette dernière le courant de décharge diminue, mais le taux de diminution est beaucoup plus important pour la silicone, que pour la

porcelaine, cela signifie que le temps de vieillissement influe beaucoup plus sur la porcelaine, ça explique que la porcelaine est plus perméable au phénomène de propagation des décharges, ceci serait dû à la structure chimique ,autrement dit la porcelaine a une faible liaison entre ces molécules, contrairement à la silicone qui possède une forte liaison à base d'oxygène et de silice, cette dernière améliore les propriétés électriques et diélectriques de ce matériau [14].

III.3. Conclusion

Ce chapitre est basé sur l'étude des différentes variations de courant maximum de décharge dans cette zone de point triple, en fonction de la distance inter électrodes, de la tension d'application, et du temps du vieillissement .

Ce chapitre nous a permis de déterminer l'influence de ces facteurs sur les courants de décharge.

Conclusion générale

Ce travail est basé sur l'étude des caractéristiques des décharges partielles sur un point d'intersection rassemblant les trois matériaux, métal/gaz/solide isolant.

Nous avons étudié le courant maximum associé aux décharges électriques, dans un point triple qui est constitue le facteur majeur par lequel ces décharges causent des dégradations sur la surface de la zone étudiée.

Notre étude, nous a montré que plusieurs facteurs qui influent le courant maximum de décharge.

Nous avons conclu que la diminution de la distance entre électrode et contre électrode fait croitre le courant maximum de décharge.

L'amplitude des impulsions de courant diminue avec l'augmentation de la distance entre électrodes pour la porcelaine ainsi que pour la silicone, mais la diminution est d'autant plus importante pour la silicone.

Le temps de vieillissement influe aussi sur le courant maximum de décharge, l'amplitude de ce dernier augmente avec le temps de vieillissement puis diminuer à partir d'une durée donnée et se stabiliser enfin, donc la dégradation est d'autant plus importante que le temps de vieillissement est important, cela est valable pour les deux matériaux. Nous avons montré que l'influence du vieillissement électrique sur les propriétés électriques de la porcelaine est plus importante que celui de la silicone.

Nous avons montré aussi au cours de cette étude que les impulsions de courant associées aux décharges augmentent en nombre et en amplitude avec la tension appliquée. Leur amplitude est plus grande en polarité positive pour les deux matériaux. Les intensités de courant de décharge sont plus fortes en porcelaine qu'en silicone.

Nous avons montré que les facteurs tels que le distance, La tension appliquée et le temps de vieillissement influent beaucoup plus sur la porcelaine que la silicone, ça s'explique par le fait que la silicone a une tenu diélectrique plus élevée que celle de la porcelaine, ce que nous a mené à noter que la silicone est le matériau qu'a la rigidité diélectrique superficielle la plus élevée.

Références bibliographiques

- [1] **Lucian CALIAP** « Etude de l'optimisation des isolants d'un point de vue diélectrique pour les contraintes GIS ». Institut polytechnique de Grenoble, thèse 2010.
- [2] « Cours de haute tension assurés à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ». Dirigé par Mr **M.A.HANDALA**.
- [3] **Pierre LEBAS** « Diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles », Université de Liège, mémoire fin d'études 2008.
- [4] **Flavien KOLIATENE** « Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique », Université de Toulouse, thèse 2009
- [5] **Gaétan VIVIEN** « Détection ultrasonore de décharge partielles dans les transformateurs », INP Grenoble, mémoire de fin d'études 2004.
- [6] **Djedjiga SAAD** « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métallique », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, thèse 2011.
- [7] **Fazia LOUNES** « contribution à l'étude du vieillissement électrique d'interfaces isolants », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, thèse 2007.
- [8] **El Hadi BELHITECHE** « Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, thèse 2012.
- [9] **Moumadou Lamine COULIBALY** « Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide-Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale », L'école centrale de Lyon, thèse 2009.
- [10] **Ahcene LEMZADMI** « Etude des propriétés diélectriques des gaz isolants sous pression en vue de nouvelles applications », Université Badji Mokhtar Annaba, thèse 2006.
- [11] **Wikipedia Fichiers**.
- [12] Cf. publication d'**Emmanuel AUDIC** (SUPELEC)
- [13] **Jean-Marie HOUSSENE** « Céramique pour l'électronique et l'électrotechnique », livre 2002.
- [14] **NGUYEN Duc Hoang** « Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l'isolation électrique », Université Joseph Fourier Grenoble 1, thèse 2005.