



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université ABDREHMANE MIRA-Bajaia

Faculté de Technologie

Département Génie Electrique

MEMOIRE FIN D'ETUDE

On vue d'obtention d'un diplôme de master en électrotechnique

Option : Réseaux électriques

THÈME

**Caractérisation expérimentale de la décharge couronne
continue en configuration fils-plans**

RÉALISÉ PAR :

Mr. BENHAMOUCHE BILAL

Mr. FEDILA MARZOUK

PROPOSÉ ET DIRIGÉ PAR :

Mr. QUATAH El Hanafi

2021/2022

Remerciement

Nous rendons grâce à dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme.

Ce projet a été réalisé au sein du Laboratoire de génie électrique à l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia, sous l'encadrement de monsieur **OUATAH Elhanafi**, nous lui exprimons toute notre profonde reconnaissance d'avoir accordé sa haute confiance, l'aide et les conseils qu'il nous a mené au cours de ce travail.

Nous tenons particulièrement à remercier Monsieur, professeur à l'université de Bejaia, qui nous a fait l'honneur de présider le jury. Ainsi que, doctorante et enseignante à l'université de Bejaia, d'avoir acceptée d'examiner ce travail.

Notre grand remerciement à tous les enseignants du département d'électrotechnique, et particulièrement ceux en option technique de haute tension qui nous ont enseigné durant nos années d'études, et qui ont donnés naissances à la nouvelle promotion de 2022.

Enfin notre profond remerciement va également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Dédicace

Chaleureusement, et de tous mes profonds sentiments je dédie ce modeste mémoire à ma très chère mère OUMARA Ouardia ainsi que mes deux frères FEDILA KARIM, et FEDILA IYAD, et j'aimerais leurs dire que je vous aime très fort et que vous êtes fiers de moi, vous étiez et vous serez toujours dans mes pensées et mon cœur, que Dieu tout puissant vous accueille dans son plus vaste paradis amen.

Mon père FEDILA MOHAND ALMOULOUJ qui a fait de moi un homme, et qui m'a accompagné pour tout arrivé jusqu'à ce jour.

Je tiens de tous mes profonds du cœur et amour à remercier ma très chère femme FEDILA SACHA qui m'a soutenu, et aidé durant ce travail, ainsi d'être à mes côtés pour dépasser mes peines.

JE remercie tous mes frères FEDILA d'être à mes côtés et m'encourager pour maintenir à finir mes études, je vous aime de tout cœur.

Tous mes sincères, et grands remerciements pour mon binôme ben Hamouche Bilal qui a été à mes côtés pour réaliser ce mémoire et sans oublier son aide durant mon mariage merci beaucoup mon très cher frère.

Enfin à mes chers amis(es), que Dieu exauce notre prière pour que le lien qui nous a unis demeure solide.

AMEN.

Dédicace

Dédicace

Avec tous l'amour que je porte dans mon plus profond du cœur, je dédie ce modeste mémoire pour mes parents que j'aime très fort L'HAOUARI BEN HAMOUCHE, et ma mère MANOUNE BEN DAHMANE qui m'ont soutenu durant mon travail pour ont arrivé jusque-là, et en profité pour remercier dieu tout puissant de vous avoir mes parents.

Je tiens de tous mes profonds sentiments à remercier ma fiancée KAMILIA HAMIDOUCHE qui m'a aidé à réaliser ce mémoire et m'a Encouragé durant les moments difficiles et de lui souhaiter que dieu tout puissant lui accorde une très bonne santé amen.

Ma grande sœur BEN HAMOUCHE SAMIRA, et Mes petits frères BEN HAMOUCHE KHIRDDINNE, et BEN HAMOUCHE AXCEL ainsi que notre dernier petit chouhou BEN HAMOUCHE DAOUD, qui me donnent de l'amour et vivacité.

Tous mon très grand remerciement pour mon très cher frère, et binôme MARZOUK FEDILA qui a mis tous son cœur, et ces efforts pour accomplir ce travail.

Enfin à tous mes cousins et mes chers amis (es), que dieu exauce notre prière pour que le lien qui nous a uni demeure solide.

AMEN.

B.B

Sommaire

Remerciement

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviation

Introduction général.....1

CHAPITRE I

Généralités sur la décharge couronne

I.1. Introduction3

I.2. Historique.....4

I.3. Décharges électriques à pression atmosphérique..... 5

I.4. Mécanismes de formation et processus physique des décharges..... 6

I.5. Domaine d'existence de la décharge couronne6

I.6. Décharge couronne8

I.7. Mécanismes de décharge couronne8

I.7.1. Théorie de Townsend (Basse Pression)..... 9

I.7.2. Théorie de Streamer (haute Pression)10

I.8. Difficultés de décharge couronne..... 11

I.9. Différents types des décharges couronnes..... 11

I.9.1. Décharge couronne à polarité positive11

I.9.2. Décharge couronne à polarité négative12

I.10. Seuil d'apparition de la décharge couronne13

I.11. Les facteurs influençant la décharge couronne13

I.11.1. Facteurs physico-chimiques..... 13

I.11.2. Facteurs électriques..... 14

Table des matières

I.11.3. Facteurs géométriques	15
I.12. Problèmes liés à la décharge couronnes.....	17
I.12.1. Pertes dans les lignes de haute tension	17
I.12.2. Interférences radio – télévision	17
I.12.3. Bruit audible	18
I.12.4. Vent ionique	18
I.12.5. Effet chimique	18
I.13. Avantage de la décharge couronne dans un réseau	18
I.14. Applications utilisant la décharge couronne	18
I.14.1. Filtrage électrostatique	19
I.14.2. Séparation électrostatique	20
I.14.3. Générateur d’ozone.....	21
I.14.4. Neutralisation et charge des médias non-tissés.....	21
I.14.5. Paratonnerre.....	22
I.14.6. Élimination de l’électricité statique	23
I.15. Conclusion	24

CHAPITRE II

Description du dispositif expérimental

II.1. Introduction.....	25
II.2. Dispositif expérimental.....	25
II.2.1. Géométrie des électrodes.....	25
II.2.2. Sonde de mesure de la densité de courant.....	27
II.2.3. Forme de la grille métallique.....	28
II.2.3. Source haute tension continue.....	28
II.3. Appareils de mesure	31
II.3.1. Mesure de la tension appliquée.....	31

Table des matières

II.3.2. Mesure du courant de décharge.....	31
II.3.3. Mesure de la densité de courant.....	32
II.3.4. Mesure des paramètres physiques de l'air	33
II.4. Correction des résultats suivant les conditions atmosphérique	34
II.5. Conclusion.....	36

CHAPITRE III

Présentation et interprétation des résultats

III.1. Introduction.....	37
III.2. Caractéristique courant-tension.....	37
III.2.1. Influence de la polarité de la tension appliquée.....	37
III.2.2. Influence du nombre de fils sur le courant de décharge.....	39
III.2.3. Influence de la distance inter-fils ' <i>a</i> '.....	40
III.2.4. Influence de la distance inter-électrodes.....	41
III.3. Densité du courant <i>J</i>	42
III.3.1. Influence de la polarité de la tension sur la distribution de la densité de courant.....	43
III.3.2. Influence du nombre de fils sur la densité de courant.....	45
III.3.3. Influence de la hauteur sur la distribution de la densité de courant.....	47
III.4. Système d'électrodes fils-grille-plan.....	48
III.4.1. Influence de la grille à potentiel flottant sur la caractéristique <i>J-V</i>	48
III.4.2. Influence de la position de la grille sur la distribution de la densité de courant.....	50
III.4.3. Influence de la grille sous potentiel sur la caractéristiques courant-tension.....	51
III.4.3.1. Influence de la distance grille-plan.....	52
III.5. Conclusion.....	54

Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : effet couronne lumineux.....	4
Figure I.2 : Caractéristique courant-tension des décharges dans l'air à pression atmosphérique.....	7
Figure I.3 : Configurations d'électrodes en décharge couronne.....	8
Figure I.4 : Réalisation d'une décharge de Townsend à courant continu.....	9
Figure I.5 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive.....	12
Figure I.6 : Descriptif de la décharge couronne négative.....	13
Figure I.7 : Distribution du champ dans un système pointe-plan.....	16
Figure I.8 : Distribution du champ dans un système plan-plan.....	16
Figure I.9 : Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission.....	17
Figure I.10 : Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes.....	19
Figure I.11 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour.....	20
Figure I.12 : Composants de base de toute installation expérimentale d'ozonation.....	21
Figure I.13 : Système de neutralisation et de charge des médias de type triode.....	22
Figure I.14 : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre.....	23

CHAPITRE II

Figure II.1 : Schéma du dispositif expérimental.....	26
Figure II.2 : Vue de profil du dispositif.....	27
Figure II.3 : La sonde linéaire utilisée dans les essais de densité de courant.....	27
Figure II.4 : Photos de la grille métallique.....	28
Figure II.5 : Schéma de l'installation haute tension.....	29
Figure II.6 : Photo de la source basse tension SG1.....	30
Figure II.7 : Photo de la source haute tension.....	30
Figure II.8 : Photo du voltmètre de crête.....	31

Liste des figures

Figure II.9 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge.....	32
Figure II.10 : Pico-ampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de la sonde.....	33
Figure II.11 : Le thermomètre à aiguille et l'hygromètre à cheveux disponibles au laboratoire haute tension.....	34
Figure II.12 : Photo du baromètre à mercure utilisé dans la mesure de pression.....	34
Figure II.13 : courbe de l'humidité absolue en fonction de la température et l'humidité relative $H = f(Hr, T)$	35
Figure II.14 : Facteur de correction relatif à l'humidité $K_h = f(H)$	36

CHAPITRE III

Figures III.1 : Caractéristiques courant-tension pour les deux polarités positive et négative.....	38
Figure III.2 : Caractéristiques I-V en polarité négative pour différents nombres de fils.....	39
Figure III.3 : Caractéristiques I-V en polarité positive pour différents nombres de fils.....	40
Figure III.4 : Caractéristiques I-V en polarité négative pour différentes distances inter-fils.....	40
Figure III.5 : Caractéristiques I-V en polarité positive pour différentes distances inter-fils.....	41
Figure III.6 : Caractéristiques I-V en polarité positive pour différentes distances inter-électrodes.....	42
Figure III.7 : Caractéristiques I-V en polarité négative pour différentes distances inter-électrodes.....	42
Figure III.8 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive.....	43

Liste des figures

Figure III.9 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative.....	43
Figure III.10 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde pour les deux polarités ($V_a=36$ kV).....	44
Figure III.11 : Schéma descriptif de la répartition de la densité du courant ionique au plan pour une géométrie pointe-plan.....	45
Figure III.12 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour un nombre de fils 3.....	45
Figure III.13 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour un nombre de fils 3.....	45
Figure III.14 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour un nombre de fils 5.....	46
Figure III.15 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour un nombre de fils 5.....	47
Figure III.16 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour diverses distances inter-électrodes	48
Figure III.17 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour diverses distances inter-électrodes.....	48
Figure III.18 : Caractéristique J-V en polarité positive à $x=0$ pour diverse distance grille-plan.....	49
Figure III.19 : Caractéristique J-V en polarité négative à $x=0$ pour diverse distance grille-plan.....	49
Figure III.20 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive sans et avec grille.....	50
Figure III.21 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative sans et avec grille.....	50
Figure III.22 : Effet de la position de la grille sur l'uniformité de la densité de courant au plan.....	51

Liste des figures

Figure III.23 : Caractéristique Ig-V de polarité positive en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan.....	52
Figure III.24 : Caractéristique Ig-V de polarité négative en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan	52
Figure III.25 : Caractéristique I-V de polarité positive en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan.....	53
Figure III.26 : Caractéristique I-V de polarité négative en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan.....	54

Liste des symboles et des abréviations

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Symbole	Définition	unité
E	Champ électrique	kV/m
V_a	Tension appliquée	kV
h	La distance inter- électrode	mm
A	Atomes	
e	Charge élémentaire (1.6×10^{-19})	C
V_0	Tension de seuil	kV
α	Premier coefficient de Townsend	
γ	Deuxième coefficient de Townsend	
I	courant de décharge	A
E_c	le champ critique	kV/m
E_s	le champ de surface d'anode	kV/m
E_p	le champ de la charge d'espace	kV/m
HT	Haute tension	
V_c	Tension de claquage	V
J	Densité de courant	A/m ²
S_s	la surface de la sonde	m ²
K_d	Facteur de correction relatif à température et pression	
K_h	Facteur de correction relatif à l'humidité	
H	l'humidité absolue	g/m ³
\varnothing_{fil}	Diamètre de fil	mm
N	Nombre de fil	
K	Constante dépend de la géométrie les électrodes	
a	La distance entre fils	mm
$DC+$	polarité positive	
$DC-$	polarité négative	
$dg-p$	Distance entre la grille et le plan	
I_g	Courant de la grille	nA

Liste des symboles et des abréviations

LISTE DES TABLAUX

Tableau III.1 : Paramètres du modèle de Townsend pour les deux polarités.....38

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Depuis l'antiquité, plus d'un chercheur s'est passionné par les phénomènes électriques, accidentellement ou intentionnellement. Les physiciens ont découvert que ces phénomènes ont des explications bien définies. L'électrotechnique a énormément progressé grâce au développement de la « décharge corona », les explications phénoménologiques de cette décharge ont contribué à inspirer de nombreuses applications industrielles.

Lorsque les électrodes présentent de différents rayons de courbures, le champ électrique est plus concentré autour de celui avec un petit rayon de courbure. Cela peut être accompli en utilisant des configurations pointe-plan, fil-cylindre, fil-plan. D'autres formes d'électrodes telles que lame-plan et lame en dents de scie-plan peuvent exister pour des applications industrielles bien définies [1].

La décharge couronne est une décharge électrique à faible courant qui se produit à une certaine tension entre les électrodes. Si la tension appliquée aux bornes des électrodes est inférieure à une certaine tension qualifiée de tension seuil de l'effet couronne, l'air dans l'espace inter-électrodes reste isolant. Le courant très faible qui circule entre les électrodes est dû au drainage des paires électrons-ions qui sont créées naturellement.

Lors d'une décharge couronne ; différents phénomènes se produisent, à savoir : les phénomènes optique, électrique, acoustique et radioélectrique. Ceux-ci peuvent être affectés par un certain nombre de facteurs, y compris : les paramètres électriques tels que la nature et la polarité de la tension appliquée à l'électrode de faible rayon de courbure, les paramètres physiques du gaz emprisonné dans l'espace inter-électrodes tel que sa nature, sa pression, sa température et son humidité.

L'effet couronne qui apparait aux voisinages de conducteurs de faibles rayons de courbure, portés à des hautes tensions présente des applications pratiques intéressantes, telles que la précipitation de poussières, la peinture électrostatique, la fabrication d'ozone, le traitement de surface, la séparation électrostatique...etc.

L'objectif de ce projet de fin d'études est de déterminer les paramètres électriques de la décharge couronne en géométrie nappe de fils-plans tels que la tension seuil, le courant de décharge et la densité de courant et de mettre en évidence l'influence des paramètres géométriques tels que : l'espace inter-fils et la distance inter-électrodes.

L'influence de l'insertion d'une grille métallique sur les paramètres de la décharge couronne surtout la densité de courant constituera le deuxième objectif principal de ce travail.

Introduction générale

Le présent manuscrit est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera réservé à l'étude bibliographique des décharges couronnes. Dans ce chapitre, nous aborderons les mécanismes de formation des décharges couronnes, l'influence des divers paramètres sur cette dernière et enfin les applications industrielle de ce type de décharge.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons le dispositif expérimental utilisé au laboratoire et les méthodes de mesure utilisées. Nous exposerons aussi dans ce chapitre les méthodes de correction liées aux conditions atmosphériques pour ramener les mesures aux conditions normales de température, pression et humidité.

Le troisième chapitre sera dédié à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Enfin, nous clôturerons ce manuscrit par une conclusion générale.

CHAPITRE I:

Généralités sur les décharges couronnes

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans le cas des décharges couronne, les processus physiques qui conduisent à la production d'espèces et à leur dispersion. Ces phénomènes, qui ont largement été décrits pour des géométries fil-plan, peuvent être généralisés à la configuration fil-cylindre, pointe-plan et nappe de fils-deux plans

Dans ce premier chapitre, on va exposer les processus physiques de la décharge couronne qui mènent à la production des genres et leur décimations qui sont des phénomènes duquel fonctionnent avec différent configurations géométriques comme la géométrie fils-plan qui présente notre sujet qu'on travaille, ainsi d'autres configurations qui sont fil-cylindre, pointe-plan et nappe de fils-deux plans.

L'effet couronne est une décharge lumineuse et sonore qui se produit en cas de présence d'un champ électrique localisé excessif sur un conducteur, qui provoque l'ionisation et une éventuelle décharge électrique de l'air à proximité de ce point. L'effet de couronne se caractérise par des phénomènes de nature électrique optique et acoustique se fait autour d'une électrode de grand rayon de courbure tel que le champ électrique à ces environs est grand, qui se traduit généralement par un sifflement subtil, augmente d'intensité avec la tension de sortie.

L'effet corona est une décharge brillante (lumineuse) et sonore qui se produit par la présence d'une tension appliquée sur l'électrode active, cela provoque l'ionisation des électrons dans l'espace inter-électrodes,

I.2. Historique

Depuis plus d'un siècle, plusieurs études liées au choc électrique ont été menées [2-3]. Les premières études expliquant le mécanisme de leur développement remontent au début du 20^e siècle [4].

La première publication sur l'effet corona remonte à 1911 avec les travaux de F.W. Peek [5]. Depuis lors, plusieurs recherches sur l'effet corona dans les lignes de transmission ont été menées et publiées.

L'une des conséquences du transport de l'énergie électrique à des niveaux de tension élevés est l'émergence d'un effet corona autour des lignes électriques [6]. Les premiers tests de fils conducteurs minces exposés à une tension suffisamment élevée ont montré qu'une gaine bleu-violet brillante s'était formée autour d'eux, dont l'épaisseur augmentait avec la tension (Fig. I.1). C'est cette brillance qui a conduit au terme couramment utilisé de "décharge corona" ou "effet corona" [7]. Depuis, plusieurs études ont été menées pour expliquer les différents mécanismes impliqués dans la formation, le développement et la propagation de cette décharge [7].



Figure I.1 : effet couronne lumineux

Le pionnier de la recherche scientifique sur l'effet corona est un chercheur américain, F. W. Peek, qui est établi Vers 1920 une règle empirique qui décrit le seuil d'apparition des décharges corona associées aux champs électriques de surface. Cette fameuse loi s'applique

encore aujourd'hui. En conséquence, de nombreuses théories ont été développées pour expliquer les causes de la perte corona. Entre autres, nous pouvons citer les travaux de Ryan et Henline (1924), von Hessemeyer et Kostko (1925) et von Holm (1927). Le premier essai en laboratoire remonte à 1932 [8]. Le développement des systèmes à haute tension a donné une grande impulsion à l'étude des décharges corona dans divers entrefers. Vers les années 1940, Loeb, Meek et Razor ont proposé un nouveau modèle de propagation d'avalanche d'électrons lors d'une décharge corona [9].

Dans les années 1950, les très hautes tensions utilisées pour transporter l'énergie électrique conduisent les concepteurs à envisager un autre phénomène. En effet, en cas de pluie, de brouillard ou de neige, on observe des vibrations mécaniques provoquées par l'effet couronne sur les conducteurs reliés à des hautes tensions [10].

Le phénomène de décharge électrique reste l'objet de recherches actives par les scientifiques. Certains peuvent s'interroger sur cette situation, mais il est facile de voir que cela n'arrive que parce que le phénomène et les mécanismes qui le composent sont si complexes. Cependant, au cours des dernières décennies, de grands progrès ont été réalisés dans l'amélioration des moyens de diagnostic du premier moment de décharge, et donc dans l'étude du mécanisme d'initiation. Cela a permis d'accroître la connaissance des phénomènes et de faire progresser des applications plus répandues [11]. La forme ponctuelle de la décharge utilise la spectroscopie d'émission pour montrer la production de grandes quantités de radicaux d'hydrogène dans la phase liquide [10,12].

I.3. Décharges électriques à pression atmosphérique

La recherche scientifique sur les décharges électriques a commencé au 18^{ème} siècle avec des observations expérimentales d'étincelles produites par des générateurs électrostatiques et des orages. Michael Faraday a découvert les décharges luminescentes entre 1831 et 1835 et a commencé à les étudier à l'aide des tubes contenant du gaz à une pression de l'ordre de 100 Pa sous 1000 volts. Vers 1900, un étudiant de J.J. Thomson Mr J. Townsend réalisait la première modélisation d'une décharge luminescente dans un champ uniforme [13].

La première tentative pour comprendre le plasma et la décharge n'est pas nouvelle, mais le concept de plasma n'est apparu que dans les années 1930. Les phénomènes naturels sont souvent spectaculaires, accompagnés d'arcs et de plasmas. Ils ont fasciné les gens et motivé les recherches sur les Plasmas industriels [14].

Un arc est une décharge d'émission à médiation gazeuse caractérisée par une densité de courant élevée et un faible gradient de potentiel. Le plasma est défini comme le quatrième état de la matière suivant l'état "gaz, solide, liquide", et est également défini comme un gaz partiellement ou totalement ionisé [14].

Ces dernières années, de nombreux efforts ont été faits pour développer de nouvelles techniques de traitement de l'air contenant de faibles niveaux de polluants, notamment les méthodes à base de plasma non thermique ou froid [15]. La décharge est l'une des principales techniques de production de tels plasmas à pression atmosphérique. Le plasma froid est un processus thermodynamique hors d'équilibre. C'est-à-dire que l'énergie est transférée principalement aux électrons, mais la température des espèces lourdes (ions, molécules neutres, etc.), et donc du gaz environnant, reste relativement basse. Ces plasmas permettent de produire des espèces très réactives à faible coût énergétique. En matière de traitement de l'air intérieur, la décharge corona (DC) et la décharge à barrière diélectrique (DBD) sont les deux décharges les plus couramment générées en raison de leur facilité de mise en œuvre [16].

I.4. Mécanismes de formation et processus physique des décharges

L'électron placé dans un champ électrique uniforme E ; $E = V/d$; où V est la tension appliquée entre les deux électrodes séparées d'une distance d , est accéléré dans le sens du champ, et peut alors ioniser des atomes ou des molécules, comme $A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$. Quand cela se produit, on dit que la molécule est ionisée. Une particule chargée se forme et un autre électron est libéré. Cet électron nouvellement libéré est alors accéléré, et peut ioniser une autre particule. Ce processus d'ionisation successive des particules est appelé avalanche d'électrons ou décharge de Townsend [17,18].

Pour que la décharge soit auto-entretenu, il est nécessaire que tout électron qui quitte la zone d'ionisation soit remplacé. Chaque électron doit créer suffisamment d'ions positifs, de photons et d'espèces instables pour qu'au moins l'un d'eux puisse produire un nouvel électron.

I.5. Domaine d'existence de la décharge couronne

La figure ci-après représente la caractéristique courant-tension pour les décharges à pression atmosphérique et en champs inhomogènes [17,19].

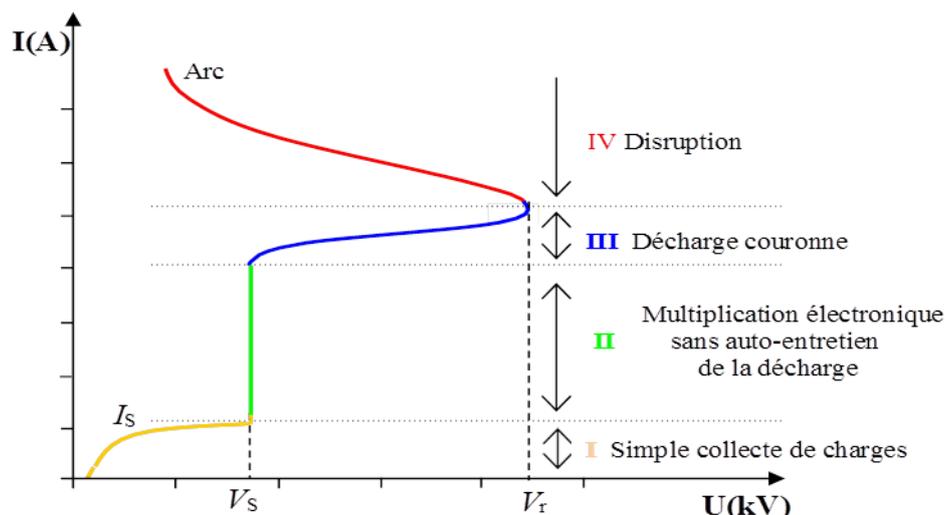


Figure I.2 : Caractéristique courant-tension des décharges dans l'air à pression atmosphérique [20]

Cette courbe permet de distinguer les quatre régimes suivant :

➤ **Le 1^{er} régime :** (Régime de collecte)

En raison de la présence d'ions due à la désintégration radioactive naturelle ou aux rayons cosmiques, le courant est très faible ($\leq 1 \text{ pA/cm}^2$), à ce compte-là, le champ électrique est trop faible pour assurer de manière fiable l'avalanche d'électrons [21].

➤ **Le 2^{em} régime :** (décharge de Trichel)

Lorsque la tension atteint la valeur seuil V_0 , le champ est suffisamment fort pour qu'un électron ionise une particule environnante. Le processus d'avalanche se déclenche alors sans répondre aux critères d'auto-entretien. La décharge nécessite une source externe supplémentaire et le courant reste faible ($\leq 1 \text{ nA/cm}^2$) [21].

➤ **Le 3^{em} régime :** (Régime de Couronne)

Les phénomènes d'ionisation externes sont plus nécessaires pour l'ionisation du gaz par la décharge, cette dernière est suffisamment auto-entretenu, dans ce cas une composante impulsionnelle du courant et sa transition vers l'arc électrique causée par l'apparition des streamers (les dards) [20].

➤ **Le 4^{em} régime :** (Décharge disruptives ou Régime d'arc)

Lorsque la tension est supérieure à la tension de rupture V_r , un canal conducteur (arc électrique) s'établit entre les électrodes et les valeurs de courant de décharge sont très élevées. C'est ce qu'on appelle un régime de décharge disruptive [21].

I.6. Décharge couronne

La décharge corona se situe dans le 3^{ème} régime de caractéristique courant-tension, elle est caractérisée par une asymétrie des électrodes [22]. Lorsqu'un conducteur de faible rayon est mis sous haute tension, de nombreux phénomènes apparaissent au voisinage de l'électrode. C'est ce qu'on appelle une décharge corona et inclut la conductivité apparaissant dans le gaz entre l'électrode et un autre point. L'électrode qui a le plus petit rayon de courbure est considérée comme l'électrode active et détermine si la décharge corona est positive ou négative [23].

Parmi les configurations d'électrodes les plus utilisées, on trouve les systèmes pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre, peigne-plan [24]. (Figure I.3).

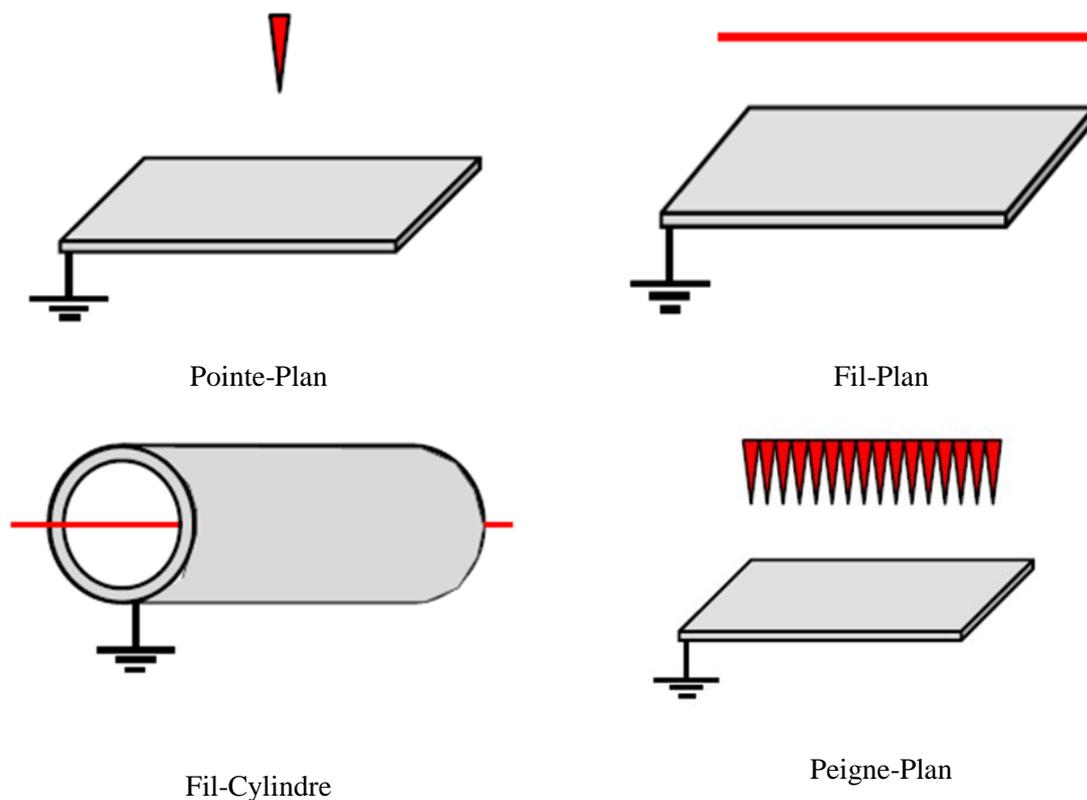


Figure I.3 : Configurations d'électrodes en décharge couronne [25].

I.7. Mécanismes de décharge couronne

Les recherches expliquent le mécanisme de développement de la décharge couronne, ce dernier se fait complémentaiement par deux théories :

- ✚ La première théorie prend en compte toute la distance entre les électrodes. C'est la théorie de Townsend. [26, 27].

✚ La deuxième théorie correspond à l'apparition de la lumière et l'écartement des filaments
Appelé un streamer [7, 28].

I.7.1. Théorie de Townsend (Basse Pression)

L'électricité peut créer une ionisation dans le gaz, la théorie de Townsend est basée sur un champ électrique constant sur toute la surface pouvant amener un ou plusieurs électrons à obtenir suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules avec lesquelles ils entrent en contact lorsqu'ils se déplacent vers l'extrémité positive du champ (voir Figure I.4). Chaque fois qu'une molécule est ionisée, un ion positif et un autre électron sont créés. L'électron créé ; à son tour ; est accéléré par le champ extérieur et en rentrant en collision avec une nouvelle molécule. Ce mécanisme d'ionisation successif est connu sous le nom « d'avalanche électronique » ou « décharge de Townsend ». La taille de l'avalanche est de N électrons [29].

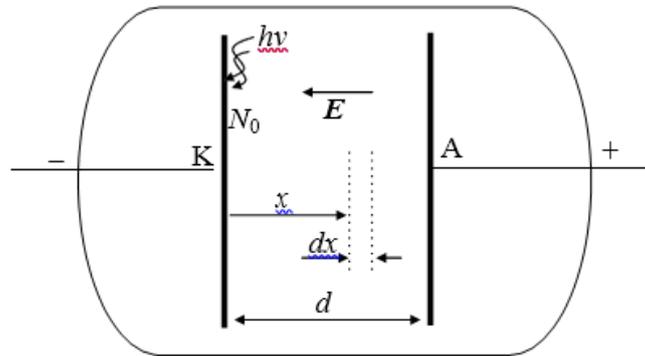


Figure I.4: Réalisation d'une décharge de Townsend à courant continu

A: anode, K : cathode, d : distance anode-cathode, hv: source de rayonnement

Considérons N_0 le nombre électrons par unité de temps émis par l'irradiation cathodique. Désignons par α , le coefficient d'ionisation primaire de Townsend, le nombre moyen de paires électron-ion ainsi créés par un électron et par unité de longueur de parcours, dans la direction du champ électrique E . La valeur de α , pour un gaz donné, dépend de la valeur du champ réduit E/P . Dans le cas d'un champ homogène α reste constant.

Supposons donc qu'il se soit formé $N(x)$ électrons à une distance x de la cathode, alors ils vont produire $dN(x)$ électrons sur une distance dx :

$$dN(x) = \alpha \cdot N(x) \cdot dx \dots\dots\dots(I.1)$$

En intégrant cette équation, nous obtenons le nombre d'électrons atteignant l'anode :

$$N(d) = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \dots\dots\dots(I.2)$$

L'anode reçoit un courant :

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

Où : $I_0 = e \cdot N_0$, tel que ; e est la charge de l'électron .

L'étude expérimentale du courant I , effectuée par Townsend en fonction de la distance d , a montré que ce courant augmente plus rapidement que ce qui est prévu par la relation (I.3) ceci est dû au phénomène d'ionisation secondaire se produisant près de la cathode. En effet, si l'on considère les ions positifs créés lors des collisions ionisantes électrons-molécules, leur impact sur la cathode peut provoquer l'émission d'électrons secondaire. On caractérise cette émission par un facteur γ , dit coefficient d'ionisation secondaire de Townsend, qui représente le nombre d'électrons émis à la cathode par ion incident [29,30].

I.7.2. Théorie de Streamer (haute Pression)

Le streamer apparait sur une photographie statique comme un canal filamentaire lumineux. La luminosité du canal conducteur provient essentiellement des photons créés en tête du streamer [31]. Dans le cas du streamer, la photo-ionisation du gaz, au sein de la charge d'espace générée par la première avalanche de Townsend près de la cathode, joue un rôle important. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent, par collision, des molécules neutres qui, en revenant à leur état fondamental, émettent des photons. Ces derniers sont absorbés par le gaz inter-électrodes. Dans l'air, les molécules d'azote excitées émettent des photons avec une énergie supérieure à 13 eV, permettant d'ioniser les molécules d'oxygène dont le potentiel d'ionisation est de 12.2 eV. Les électrons produits créent de nouvelles avalanches secondaires selon le même mécanisme de multiplication électronique décrit par Townsend. Ces avalanches secondaires se développent vers la charge d'espace positive en formant un canal d'étincelles. Ce phénomène de streamer est caractérisé par un temps de développement d'environ 10^{-8} secondes.

Meek et Raether ont proposé des critères permettant d'estimer le champ électrique de transformation d'une avalanche en streamer. Raether a établi un critère simple qui exprime que l'avalanche doit atteindre une taille critique l_c pour que le streamer puisse se développer. Dans le cas d'un champ non uniforme, si l'on désigne par E_s le champ à la surface de l'anode et E_c le champ critique du minimum d'ionisation correspondant à $(\alpha - \eta = 0)$, ce critère s'écrit :

$$\int_0^{l_c} (\alpha - \eta) dx = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Electrons} \dots\dots\dots (I.4)$$

L'expression ci-dessus est obtenue du critère de claquage de Townsend et du critère de Meek. Ce dernier critère exprime que le champ de la charge d'espace E_p est du même ordre de grandeur que le champ E_s à la surface de l'anode [32].

I.8. Difficultés de décharge couronne

Lorsqu'un courant élevé parcourt un espace gazeux, la température du gaz augmente, ainsi que le courant de la décharge. Le plasma généré est proche de l'équilibre thermodynamique, et la majeure partie de la puissance injectée dans le gaz est dissipée par effet Joule. Le principal problème avec ce type de décharge est qu'il se transforme en arc électrique, provoquant une énorme augmentation du courant et de la température du gaz. Les décharges corona peuvent endommager les électrodes sur lesquelles elles sont utilisées, de sorte que la plupart des applications les utilisent de manière à ne pas provoquer d'arc. Ces applications utilisent les décharges corona pour créer des espèces chimiques actives en injectant de l'énergie dans le système [33].

I.9. Différents types des décharges couronnes

Il existe deux types de décharge : celles avec un diélectrique, et celles sans diélectrique. Ces décharges peuvent être générées avec une polarité positive ou négative [33].

I.9.1. Décharge couronne à polarité positive

Lorsque l'électrode active est portée à un potentiel positif et que la plaque est reliée à la terre, la photo-ionisation crée des électrons, qui se dirigent ensuite vers l'anode. Cela produit une décharge corona dans le champ électrique élevé autour de l'électrode de faible rayon de courbure.

Dans la figure I.5, l'arc en pointillé sépare la zone d'ionisation de la zone de dérive [21]. Lorsque des positifs ions sont créés, ils sont repoussés de l'anode en raison des forces agissant sur eux (force de Coulomb). Il existe une région à quelques millimètres de l'électrode active appelée région de dérive. Cependant, le champ électrique devient trop faible au-delà de cette zone inférieure à 30 kV/cm (dans l'air à la pression au niveau de la mer) pour créer des ions positifs. Les ions positifs se dirigent alors vers la cathode (la plaque). Comme il n'y a que des ions positifs dans cette zone, on l'appelle la région de dérive. Pour cette décharge, il y a un avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a un passage à l'arc.

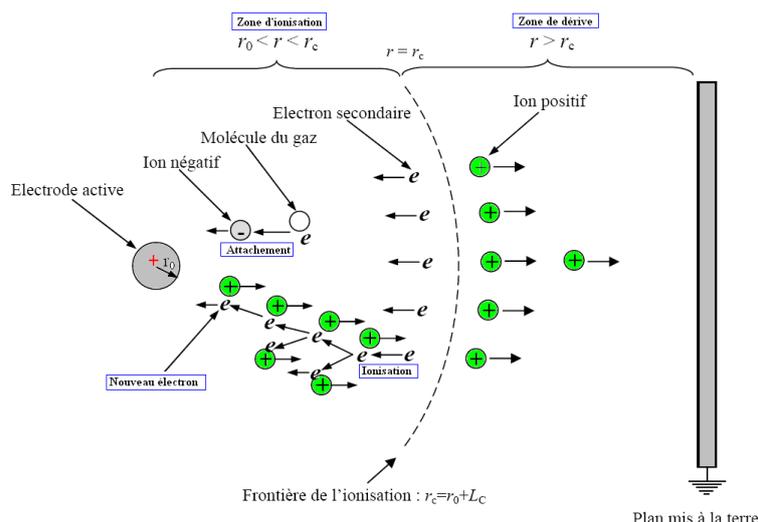


Figure I.5. Schématisation d'une décharge couronne continue positive [20, 21]

I.9.2. Décharge couronne à polarité négative

Lorsqu'un potentiel négatif est appliqué à l'électrode active, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de l'électrode HT (Figure I.6). Les ions positifs créés dans cette zone reviennent rapidement à la cathode. Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers l'électrode plane mise à la terre. Comme le cas de la décharge positive, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc. Le courant de cette décharge est dû aux impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée [22, 34].

La fréquence des impulsions de Trichel provoquées par l'arrêt de l'ionisation est déterminée par le temps de dérive des ions positifs. La fréquence peut aller de quelques kHz pour les basses tensions à quelques MHz pour les hautes tensions [22, 34]. Si le niveau de tension à l'électrode active est augmenté, l'ionisation est amplifiée et le temps entre les impulsions est diminué et par conséquent la fréquence des impulsions augmente.

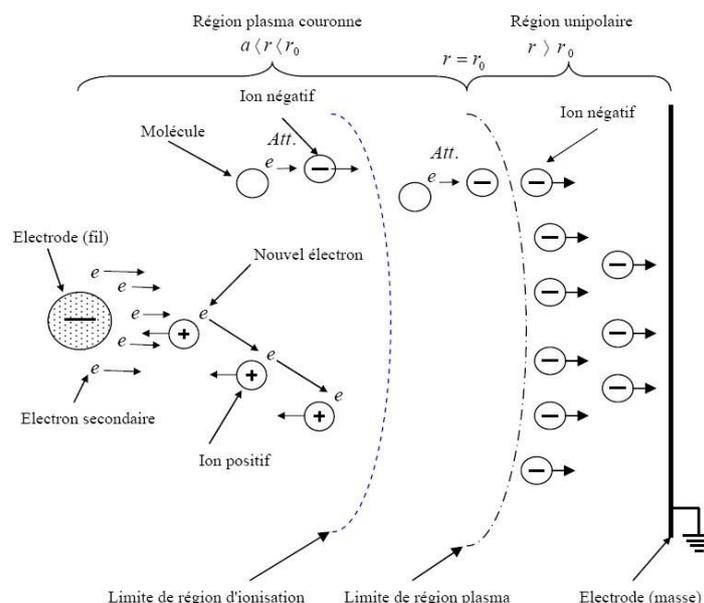


Figure I.6 : Descriptif de la décharge couronne négative [22]

I.10. Seuil d'apparition de la décharge couronne

Le champ électrique doit être suffisamment fort pour que ce phénomène se produise ; supérieur au champ de seuil de Peek. La tension appliquée détermine le champ électrique et peut provoquer l'ionisation de certaines particules de l'air dans une petite zone du gaz. Ce sont les électrons libres créés par le champ électrique intense qui constituent la base de ce processus. Lorsque des électrons libres entrent en collision avec des molécules de gaz, l'énergie des électrons est supérieure à l'énergie d'ionisation des molécules de gaz. Ces derniers s'ionisent et de nouveaux électrons se forment. Les électrons nouvellement formés sont exposés au même champ qui a provoqué leur formation. Au cours du processus d'ionisation, des avalanches de Townsend peuvent se produire, en raison de la production des photons à haute énergie. La décharge corona est créée lorsque plusieurs avalanches se produisent. Les électrons et les ions créés se déplacent en fonction de leur polarité de charge, créant des charges d'espace [35].

I.11. Les facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer les caractéristiques des décharges électriques, Ces facteurs sont classés en trois catégories : physico-chimiques, géométriques et électriques [36].

I.11.1. Facteurs physico-chimiques

a. La température

L'augmentation de la température provoque l'augmentation du libre parcours moyen. Par conséquent, la rigidité diélectrique diminue, ce qui favorise l'effet couronne. Les essais expérimentaux ont montré que l'augmentation de la température provoque la diminution du seuil de l'effet couronne et l'augmentation de décharge [37].

b. L'humidité

La rigidité diélectrique de l'air est considérablement affectée par l'humidité, et ce fait est très important à prendre en compte lorsque le champ électrique est irrégulier. Une humidité élevée fait que les électrons libres adhèrent davantage à l'air, en raison de la forte affinité électronique de la vapeur d'eau dans l'air. De plus, les photons sont davantage absorbés au début des streamers (zone d'avalanche de photo-ionisation secondaire), en raison de la conductivité plus élevée de l'air. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative. La diminution de la tension peut être attribuée à l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente [7, 10, 27].

c. La pression atmosphérique

Le courant de décharge est remarquablement influencé par la pression. Nouri et al. ont étudié l'effet de la pression dans la gamme 0,1 à 1 bar sur les caractéristiques de la décharge couronne en géométrie fils-plan. Ils ont trouvé que l'effet de la pression sur le seuil de l'effet couronne est équivalent à celui de l'espace inter-électrodes. Selon la loi de Paschens, lorsque la pression autour des électrodes augmente, le nombre de particules dans l'espace entre les électrodes augmente. À mesure que le nombre de particules chargées augmente, la distance moyenne qu'elles parcourent avant d'entrer en collision avec autre chose diminue. Lorsque la quantité d'ionisation de l'air est réduite, le seuil de la décharge corona augmente et la mobilité des porteurs de charge diminue [7, 38].

I.11.2. Facteurs électriques

Le niveau et le type de tension appliquée sur les électrodes influent les caractéristiques de la décharge couronne. La majorité des recherches ont été réalisées sous tension continue [39].

En tension alternative, on observe les mêmes modes d'émissions de charges décrits en tension continue. La seule différence est qu'en tension alternative, la concentration des émissions de charge, se situe à la crête de la sinusoïde de la tension appliquée, tandis qu'en tension continue les émissions de charge se produisent d'une manière permanente [10].

a. En tension continue

Si le champ électrique n'est pas assez fort pour qu'un streamer traverse tout l'espace entre les électrodes, le courant supplémentaire qui aurait provoqué le court-circuit circule à la place dans les parties externes du circuit. Le courant plus faible a pour effet de réduire le champ dans la zone des électrodes, provoquant l'arrêt de toute ionisation, tout en créant également un niveau de tension minimum qui indique quand un streamer s'est développé. À la pointe de l'étincelle, la zone environnante sera dégagée par les processus de dérive et de diffusion, de recombinaison et d'augmentation du champ électrique. Cela provoque une série de petites décharges d'étincelles à intervalles réguliers, en fonction du niveau de tension. La décharge par étincelle est également connue sous le nom de "dard" [40].

b. En tension alternative

Le bruit dégagé par les lignes haute tension (HT), sont des crépitements expliqués par le développement des streamers autour du câble HT, c'est la décharge couronne [40].

I.11.3. Facteurs géométriques**a. Le Rayon de courbure**

Le rayon de courbure influe sur la tension seuil de décharge, le seuil d'apparition de l'effet couronne augmente avec l'augmentation de rayon de courbure de l'électrode active [41]. Sous les mêmes conditions atmosphériques, le courant de décharge diminue considérablement avec l'augmentation du rayon de courbure.

b. La distance inter-électrodes

Il a été constaté expérimentalement que le courant de décharge est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des petites distances inter-électrodes [41].

c. La nature des électrodes

Pour étudier l'influence de la nature des électrodes sur la décharge couronne, des essais sur les matériaux des électrodes ont été réalisés, en utilisant différentes natures d'électrodes pour les mêmes paramètres d'essais (diamètres et la distance inter-électrodes). Pour cela, une étude a été réalisée sur la caractéristique courant-tension pour les trois natures d'électrodes (cuivre, aluminium et acier) [42]. Il a été constaté que les valeurs de courant de décharge pour l'acier,

sont plus élevées que celles de l'aluminium et le cuivre qui sont très proches. Inversement, la tension seuil pour l'acier est plus faible que celle de l'aluminium et le cuivre.

d. La forme d'électrodes

Les configurations géométriques des électrodes, jouent un rôle essentiel dans la distribution du champ électrique dans la zone inter-électrode.

Dans la figure I.7, le champ n'est pas uniforme (dissymétrie des électrodes), donc la décharge couronne forme une zone stable. La décharge corona se forme lorsque la tension atteint une certaine tension seuil, puis se transforme en arc électrique à un certain niveau de tension dite de rupture.

La figure I.8 montre un champ qui est uniforme (géométrie plan-plan), et dès que la décharge commence, elle se transforme rapidement en arc électrique. Cela signifie que la décharge corona n'existe pas [27].

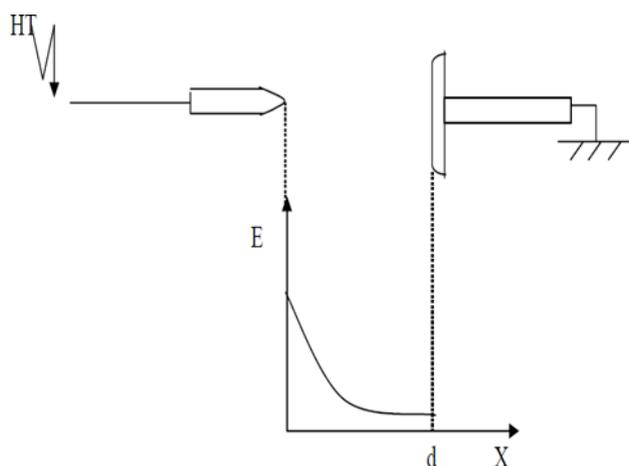


Figure I.7 : Distribution du champ dans un système pointe-plan [27]

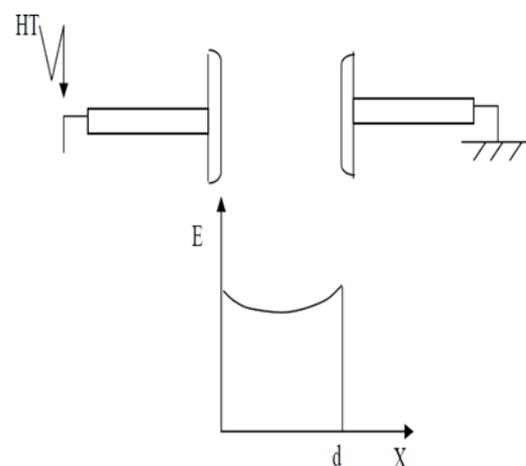


Figure I.8 : Distribution du champ dans un système plan-plan [27]

e. L'état de surface

L'état de surface de l'électrode active (fil par exemple) est important car à mesure qu'il se détériore, les pertes augmentent et le champ perturbateur s'intensifie. En général, La pollution d'air autour de fil conducteur dans les lignes de transport, est un facteur important de dégradation. L'eau de pluie peut rendre les fils plus rugueux, ce qui peut intensifier l'effet corona [27].

I.12. Problèmes liés à la décharge couronne

I.12.1. Pertes dans les lignes de haute tension

L'effet corona provoque une perte d'électricité dans les lignes de transmission à haute tension. Ces pertes sont faibles par beau temps, mais peuvent être importantes par temps humide. Les couronnes se produisent à la suite du champ électrique créé entre les fils conducteurs et les gouttes d'eau sur la ligne. Lorsque le fil est mouillé, les gouttes d'eau restent étendues, ce qui provoque une grosse perte de puissance. Dès qu'il commence à pleuvoir, les pertes diminuent car il n'y a plus de gouttes sur la ligne. Si un fil est gras, l'effet corona provoque une perte de puissance plus importante. Un fil propre peut réduire l'effet. Une perte de 100 kW par km de ligne a été constatée [10].

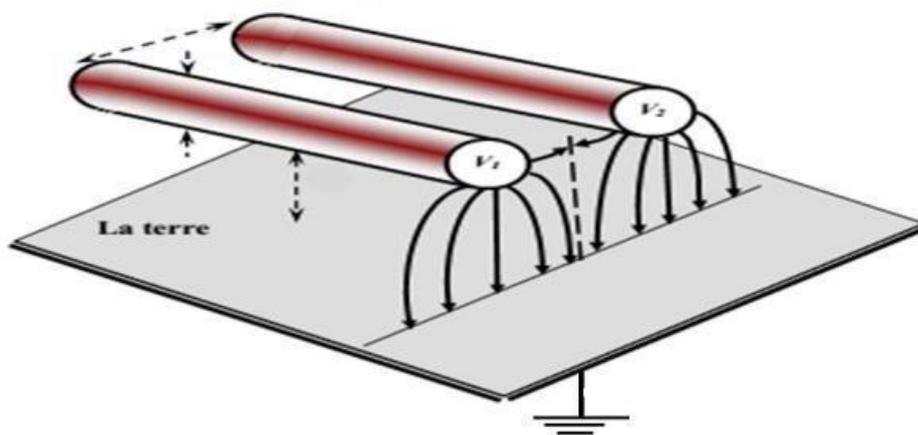


Figure I.9 : Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission.

I.12.2. Interférences radio - télévision

Les conditions météorologiques peuvent affecter la capacité des antennes à capter les interférences. Lors d'une décharge corona, l'énergie peut se déplacer hors des lignes électriques et se refléter sur les grilles et structures métalliques à l'air libre, atteignant potentiellement une antenne. Cela peut se produire encore plus par temps instable. Les variations du courant circulant dans un fil peuvent provoquer des interférences de radiofréquence. Les changements de courant sont causés par des inductions électromagnétiques sur le conducteur neutre du fil. Les courants induits peuvent alors être conduits vers les appareils utilisant le fil (récepteurs radio et TV), créant des interférences avec leur fonctionnement [42].

I.12.3. Bruit audible

Plus la tension des lignes électriques est élevée, plus le bruit audible est important. Les interférences radio sont un problème plus important lorsque les lignes ont une tension supérieure à 500 kV, donc si les conducteurs sont capables de fournir une quantité acceptable d'interférences radio, les lignes ne doivent pas produire de bruit audible. On sait depuis longtemps que pendant la pluie, l'effet corona peut produire des sifflements et des crépitements. L'importance du bruit émis lorsque la tension est supérieure à 500 kV est un problème tout autant que les interférences radiofréquences. Dans certains cas, c'est l'un des principaux facteurs utilisés pour déterminer la taille de conducteur nécessaire [27].

I.12.4. Vent ionique

La décharge corona crée des ions, qui dérivent et accélèrent lorsqu'ils entrent en collision avec d'autres molécules de gaz sous l'influence du champ électrique. Le mouvement des particules est connu sous le nom de vent ionique et est observé depuis le 18^e siècle [10, 43].

I.12.5. Effet chimique

Lorsqu'une décharge se produit, certains éléments chimiques naissent. Dans le cas de l'air, des oxydes d'azote (NO, NO₂), des radicaux hydrogène (HO) et de l'eau (H₂O) peuvent se former, ainsi que de l'ozone (O₃), qui est un gaz instable et peut endommager de nombreux matériaux [28].

I.13. Avantage de la décharge couronne dans un réseau

L'effet corona est un régulateur de tension, car lorsque le champ de surface atteint un niveau critique, les charges créées par l'effet corona annulera les charges du conducteur. Cela entraînera une baisse du champ de surface et de la tension de la ligne. La décharge corona se produit lorsqu'il y a trop de charges sur la ligne, généralement à cause de la foudre. Lorsqu'une ligne est exposée à une décharge électrique soudaine (comme cela pourrait se produire lors d'un coup de foudre), l'effet corona se produit autour des fils. La conductivité accrue de l'air autour du conducteur rend le fil plus gros, ce qui diminue en fait le champ électrique. [14, 36].

I.14. Applications utilisant la décharge couronne

Il existe de nombreux processus industriels qui utilisent l'effet corona pour créer des charges électriques, y compris les précipitateurs électrostatiques, la destruction de la pollution

(dépollution des gaz), la vaporisation électrostatique, la séparation de matériaux à l'aide d'isolants chargés (comme des plaques ou des granulés), des générateurs d'ozone, utilisés pour éliminer l'électricité statique de photocopieurs et imprimantes à jet d'encre, et neutralisants combinés [44].

I.14.1. Filtrage électrostatique

Le principe de fonctionnement des électrofiltres (dépollueurs électrostatiques) est constitué sur le fait du champ électrique sur les atomes concernés. En effet, ils sont des filtres qui utilisent la puissance de l'électricité pour séparer les particules. On les trouve dans de nombreux endroits, traitant de nombreux types de pollution de l'air et des fumées comme la fumée de charbon, l'air pollué, des brouillards d'huile, des fumées de soudage, des gaz évacués par les moteurs diesel, ...etc. Le champ électrique attire les particules chargées qui doivent être séparées, faisant de sa puissance, une force de séparation [45].

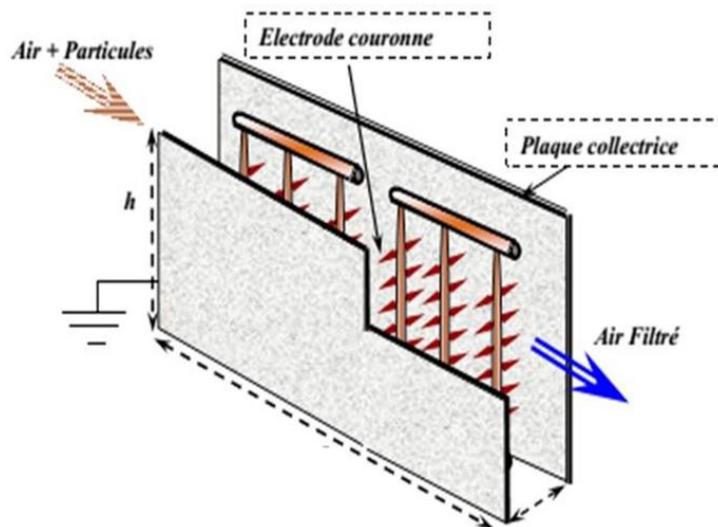


Figure I.10 : Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes [45]

Comme le montre la figure I.10, le précipitateur est constitué d'un ensemble de cylindres conducteurs avec une électrode pointue soumise à un potentiel V , située au milieu de deux électrodes planes parallèles mises à la terre. Une décharge corona se forme près de la pointe terminale et les ions de même polarité que la pointe sont repoussés sur le plan. Il en résulte la formation de charges d'espace ioniques à haute densité près de la pointe et décroissantes vers les plans collecteurs. Certains de ces ions sont piégés par les poussières du fait de la distorsion locale du champ électrique provoquée par la différence entre la permittivité relative des particules et celle du gaz. Par conséquent, les particules dans le gaz ou dans l'air seront chargées en tenant des ions jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte. Les particules sont

affectées par l'électricité et se déplacent vers le plan où elles se rassemblent, formant une couche sur les plaques collectrices.

De nombreux domaines utilisent des filtres électrostatiques, ce qui pose la question de l'efficacité de collecte et de la performance économique/industrielle. Ces filtres ont des propriétés physiques qui doivent être comprises car elles affectent les propriétés électriques et mécaniques des particules dans la suspension [45].

I.14.2. Séparation électrostatique

Le modèle le plus utilisé dans l'industrie de la séparation est le séparateur électrostatique, qui permet de diviser les mélanges granuleux métaux-isolants. Le séparateur électrostatique à tambour est le plus utilisé avec un pourcentage de pureté très proche de 100 %.

Le fonctionnement de ce type de séparateur est basé sur le champ électrique qui est créé entre les deux électrodes (1 & 2) et une autre électrode (3) mise à la terre pivotant sur soit même, comme présentée dans la figure I.11.

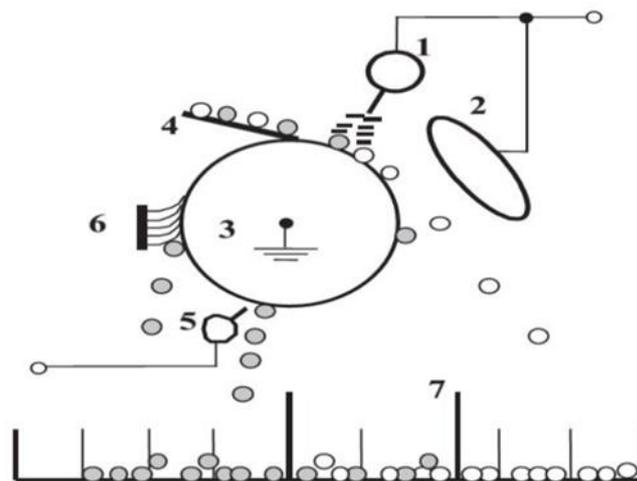


Figure I.11 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [46]

Pour générer le champ électrique, les deux électrodes doivent être connectées à une source haute tension. Dans ce type de séparateur, deux mécanismes de charge sont utilisés. Le premier est destiné aux particules isolantes et le deuxième implique seulement les particules conductrices. Les granules isolants ; chargés par bombardement ionique dans la zone de décharge couronne ; adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique. Ils tombent dans la partie (7) du collecteur lorsque la résultante des forces de pesanteur et centrifuge l'emportent sur la force d'image électrique.

Ces particules sont tombées du fait que leur charge acquise est supérieure à la force d'attraction entre la particule chargée et l'électrode de neutralisation (5), qui est utilisée pour éliminer la charge sur la particule. La brosse à tambour (6) est utilisée pour séparer les particules qui restent collées à la surface du tambour [46].

I.14.3. Générateur d'ozone

L'oxydation est produite par décharge corona. La décharge brise les molécules d'oxygène stables, formant deux ions oxygène chargés. Les ions peuvent alors se combiner avec plus de molécules d'oxygène pour former de l'ozone [47].

L'ozone est utilisé dans le traitement de l'eau, ainsi que dans de nombreuses autres applications, telles que le nettoyage ou la conservation des aliments. L'ozone est un oxydant puissant et est introduit dans le gaz qui doit être traité. La solution n'est pas de créer un milieu trop réactif, mais d'introduire de l'ozone dans le flux de gaz. Le schéma de la figure I.12 donne un aperçu d'un ozonateur qui fournit de l'oxygène ou de l'air. Le courant électrique transforme une partie du gaz qu'il traverse en ozone [33].

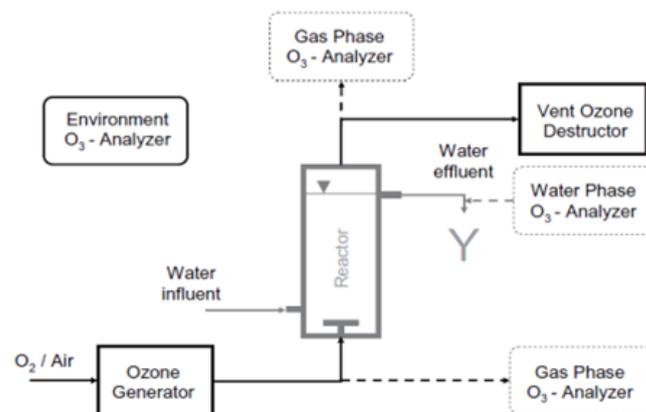


Figure I.12 : Composants de base de toute installation expérimentale d'ozonation [33]

I.14.4. Neutralisation et charge des médias non-tissés

Les matériaux isolants peuvent avoir des charges sur leurs surfaces, ce qui peut causer de gros problèmes électrostatiques. Les charges peuvent coller des matériaux ensemble, ou même les charges peuvent coller des matériaux sur des surfaces métalliques. De nombreuses applications, telles que les feuilles de papier, la manipulation de textiles ou les films polymères, ne peuvent pas être utilisées lorsque les matériaux sont affectés par ces forces électriques [45].

La production d'électronique doit être manipulée avec précaution car les décharges électriques provenant d'éléments chargés peuvent être dangereuses. Le contrôle de la charge sur les matériaux avec lesquels on travaille est important et se fait en utilisant un ensemble de trois électrodes (triode). Cet ensemble d'électrodes est utilisé pour générer une décharge corona, qui neutralise la charge sur le matériau. Le même jeu d'électrodes peut également être utilisé pour charger des tissus non tissés ou des films isolants. Plusieurs laboratoires et entreprises manufacturières ont mené des études sur l'efficacité des filtres à air fabriqués avec des matériaux non tissés après avoir été exposés à une décharge corona. Cette classe d'applications du système d'électrode « triode » a fait l'objet de nombreuses études (Figure I.13) [45].

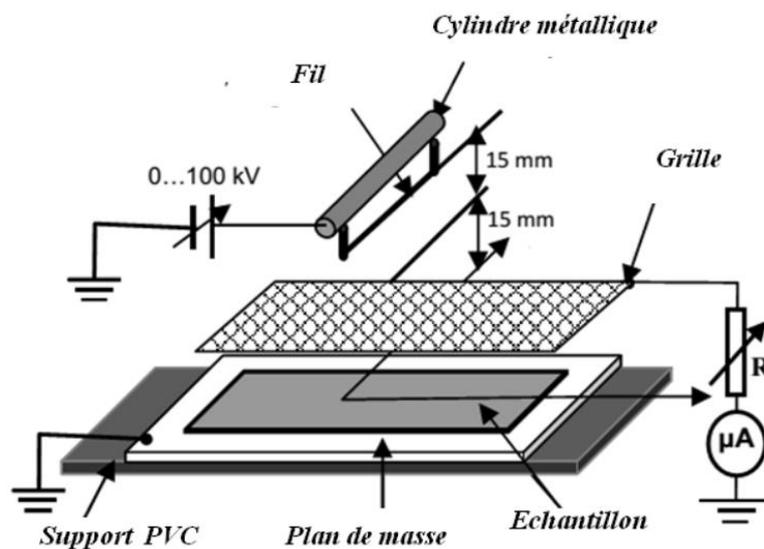


Figure I.13 : Système de neutralisation et de charge des médias de type triode [45]

I.14.5. Paratonnerre

Un paratonnerre est un dispositif utilisé pour protéger un bâtiment contre les coups de foudre directs. Le conducteur est relié à la terre par plusieurs fils et possède une pointe métallique placée sur le toit du bâtiment. L'effet corona augmente la conductivité de la pointe, qui attire les éclairs. Un nuage a des charges négatives et la terre a des charges positives. Lorsque la foudre frappe, elle se déplace le long des conducteurs (elle choisit en effet le chemin le plus facile) pour joindre les charges positives de la terre aux charges négatives du nuage [7, 33].

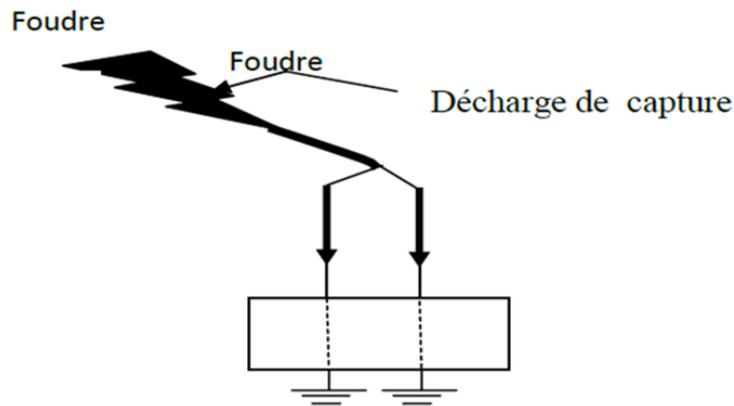


Figure I.14 : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre [10]

I.14.6. Élimination de l'électricité statique

Dans l'industrie, l'électricité statique provoque des problèmes tels que l'adhérence de la poussière sur les produits propres ou des décharges nocives sur les appareils électroniques, c'est pour cela, la société Valitec a créé un système qui utilise l'injection d'ions pour éliminer l'électricité statique dans les grandes cadences de production [48].

Les autres utilisations commerciales et industrielles des décharges corona sont :

- ✚ Photocopieur.
- ✚ Refroidir les composants électroniques (le mouvement des particules ionisées produit un flux d'air).
- ✚ Peinture électrostatique.
- ✚ Traitements de différentes surfaces.
 - ❖ nettoyage et l'érosion de la surface.
 - ❖ Le nettoyage et la destruction des Surfaces.
 - ❖ Modifications chimiques de surfaces.
- ✚ Traitement des effluents gazeux avec des produits chimiques.
 - ❖ Séparation des particules de l'air à l'aide d'électricité (précipitateurs électrostatiques).
 - ❖ Elimination des polluants organiques des effluents

I.15. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur l'évolution des différents processus élémentaires liés aux phénomènes de décharges électriques dans les gaz, particulièrement la décharge couronne qui fera l'objet de notre étude.

Nous avons tout d'abord donné un petit aperçu historique sur les décharges électriques en général et leur processus de formation.

Ensuite, nous avons décrit les divers mécanismes de décharge couronne et ses différents types, ainsi que les paramètres affectants ce type de décharge.

Enfin, nous avons présenté certaines applications de la décharge couronne dans le domaine industriel et les problèmes qui lui sont associés.

Dans le chapitre qui suit, nous allons élaborer le dispositif expérimental et les méthodes de mesure utilisées.

CHAPITRE II:

Description du dispositif expérimental

II.1. Introduction

Afin de comprendre le principe de fonctionnement de la décharge couronne et les différents paramètres influençant cette dernière, nous avons réalisé des travaux expérimentaux en laboratoire haute tension de l'université de Bejaia. Certains travaux liés à la réalisation du dispositif expérimental ont été réalisés au hall de Technologie.

Cette partie est réservée à la description du dispositif expérimental. Le but de notre travail est d'étudier la décharge couronne en nappe de fils – plan. Lors de la réalisation de nos expériences, nous avons évalué les paramètres de la décharge Corona comme la tension de seuil, la densité de courant, la tension appliquée et le courant de décharge.

Dans un premier temps, notre travail consiste à relever la caractéristique courant-tension en variant les paramètres géométriques à savoir la distance inter-électrodes et la distance entre les fils.

II.2. Dispositif expérimental

Notre travail a pour but de caractériser expérimentalement la décharge couronne continue en configuration nappe de fils-plan. L'électrode active ; constituée d'un ou plusieurs fils ; est connectée à une source haute tension continue pour les deux polarités négative et positive. L'électrode passive qui est le plan de mesure est mis à la terre. Les mesures consistent à relever le courant collecté au plan de mesure en fonction de la tension appliquée.

La figure III.1 présente le dispositif expérimental utilisé dans le cadre de cette étude, il est composé des éléments suivants :

-  Une source haute tension continue avec son unité de commande basse tension.
-  Le système à étudier est un précipitateur électrostatique (PES) qui est composé de deux électrodes, un système nappe de fils- plan, dont les fils constituent l'électrode d'émission et le plan est l'électrode de collecte.
-  Les appareils de mesure.

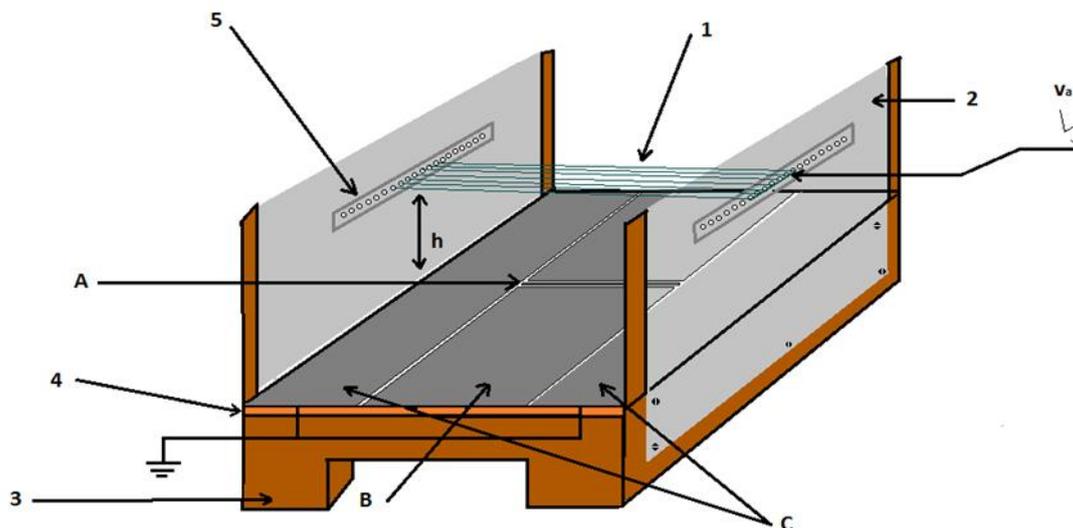
II.2.1. Géométrie des électrodes

Notre dispositif expérimental (Figures II.1 et II.2) est constitué d'un (ou plusieurs) fil conducteur (1) (électrode d'émissions) de longueur 600 mm et de diamètre 0.6 mm, tendu par les deux plaques isolantes (2) en plexiglas fixées sur le support en bois (3). Pour qu'on puisse étudier la décharge en géométrie nappe de fils-plan, les deux plaques sont percées par des

trous alignés (5) et espacés de 10 mm. L'électrode active est connectée à une source haute tension continue V_a .

L'électrode active est en face d'une autre électrode dite passive, réalisée par trois plans rectangulaires en acier inoxydable d'épaisseur 1.5 mm et de longueur 600 mm. Le plan de mesure ou collecteur (B) de largeur 300 mm est placé entre les deux plans de garde (C) de largeur 150 mm chacun. Afin de faciliter le changement de la distance inter-électrodes (h), les trois plans sont fixés sur la planche mobile en bois (4). La planche (4) (avec les trois plans) peut être déplacée en horizontal et en vertical en respectant le parallélisme avec l'électrode active.

La sonde linéaire (A), en acier inoxydable massif, est placée entre les deux parties du plan collecteur (B) sur la même surface.



- | | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|
| 1. Electrode active (fils) | 2. Plaque en plexiglass | 3. Support en bois |
| 4. Planche en bois | 5. Trous alignés | |
| A. Sonde linéaire | B. Plan de mesure | C. Plans de garde |

Figure II.1 : Schéma du dispositif expérimental



Figure II.2 : Vue de profil du dispositif

II.2.2. Sonde de mesure de la densité de courant

Il existe deux types de sondes à champ statique, tel que la sonde capacitive ; qui est apparue en premiers, et la sonde polarisée. L'origine de ce dernier a été établie par Tassicker depuis 1974 [49], ces deux types n'ayant pas le même principe de mesure. Elle existe soit de forme linéaire ou circulaire.

Dans notre cas on cherche à déterminer juste la densité de courant au plan. C'est pour cette raison qu'on a utilisé une sonde linéaire non polarisée (voir figure II.3). La sonde est en acier inoxydable de surface $300 \times 1.75 \text{ mm}^2$. La mesure du courant qui la traverse nous permet de déduire la densité de courant sur le plan.



Figure II.3 : La sonde linéaire utilisée dans les essais de densité de courant

II.2.3. Forme de la grille métallique

Afin d'étudier l'effet de la grille métallique sur la distribution de la densité de courant au plan, nous avons mesuré le courant collecté par la sonde en introduisant une grille en aluminium galvanisé de forme carrée et de surface de $250 \times 250 \text{ mm}^2$ entre les électrodes. Cette grille est réalisée par un fil de tresse de section 1.18 mm^2 , et les petits trous de cette grille sont des losanges de dimension diagonales 4 et 8 mm comme illustré dans la figure II.4.

Le mode de pose de cette grille dans le dispositif est de la mettre en position parallèle avec le plan et la centrer sur la sonde en laissant une distance de quelques centimètres de ce dernier. Nous avons effectué plusieurs essais pour différentes distances de la grille (10, 20 et 30 mm entre la sonde et la grille), afin d'acquérir les résultats démontrant l'influence de cette distance sur la décharge.

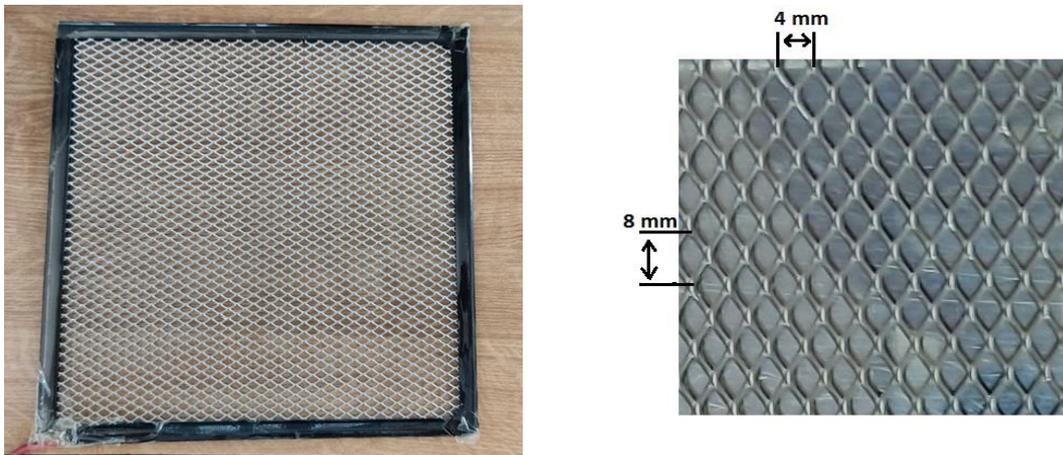
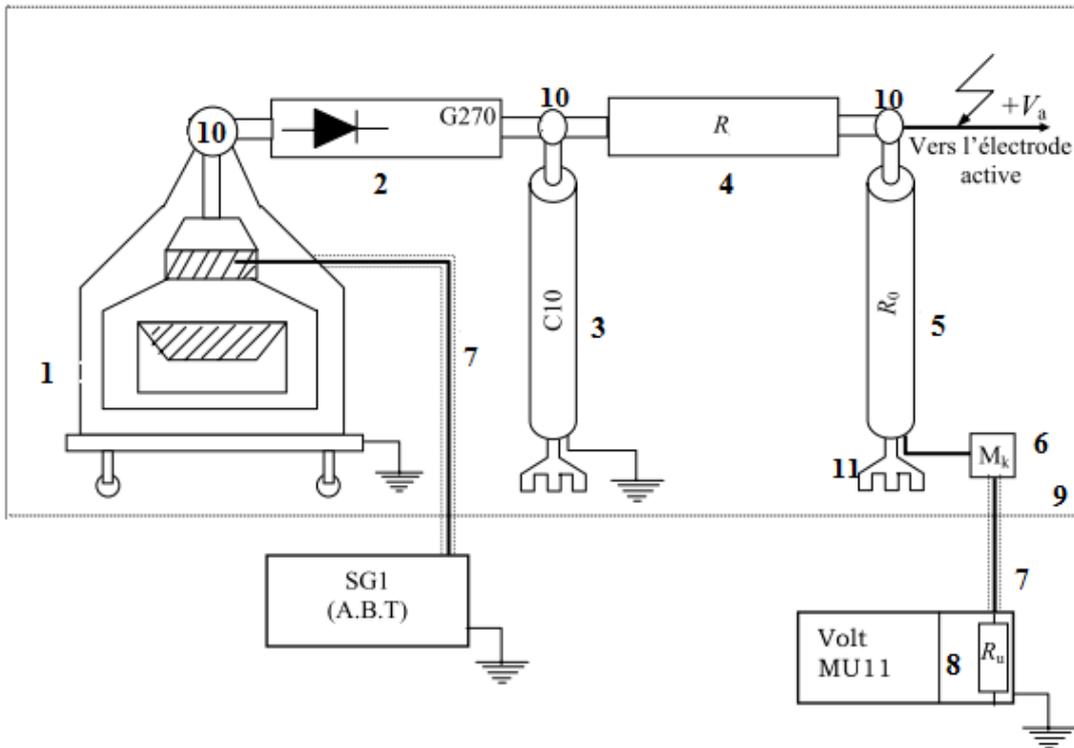


Figure II.4 Photos de la grille métallique

II.2.3. Source haute tension continue

Le laboratoire de haute tension de l'université dispose d'alimentations électriques capable de fournir des tensions de 0 à 140 kV alternative et continue pour les polarités avec un courant maximal de 80 mA. Dans notre cas, nous avons utilisé l'une de ces alimentations en continu positif et négatif (figure II.5). Cette dernière est composée :

- D'une source basse tension SG1.
- D'une transformatrice haute tension T100, alimentée par la source SG1.
- D'une diode haute tension G270.
- D'un condensateur de lissage C10 de 10 nf.



- | | |
|--|--|
| SG1. Alimentation basse tension. | 7. Câble coaxial |
| 1. Transformateur haute tension (T100). | 8. Résistance basse tension (R_u) |
| 2. Diode haute tension (G270). | MU11. Voltmètre de crête |
| 3. Condensateur de lissage (C10) | 9. Grille de protection |
| 4. Résistance d'amortissement (R) | 10. Nœuds de liaison |
| 5. Résistance haute tension (R_0) | 11. Support |
| 6. Boîte de connexion | |

Figure II.5 : Schéma de l'installation haute tension [20].

La variation de la source basse tension *SG1* peut être effectuée manuellement, ou automatiquement par un moteur sur l'appareil de commande (voir Figure II.6). L'enroulement du transformateur haute tension *T100* est connecté au secondaire de l'autotransformateur de la source basse tension *SG1*. Donc une tension variable est appliquée au primaire du *T100* permettant d'avoir une haute tension alternative variable sur son bobinage secondaire.



Figure II.6 : Photo de la source basse tension SG1

Un redresseur est utilisé pour produire des tensions continues de polarité positive ou négative. Ce redresseur mono-alternance est réalisée par une diode haute tension appelée diode au silicium *G270* capable de supporter 270 kV en tension inverse. Le lissage de la tension redressée est assuré par le condensateur *C10* de 10 nF. La résistance d'amortissement *R* de 106 k Ω protège la diode des surintensités.

Un diviseur résistif est associé à l'installation pour mesurer la tension délivrée. Il est composé d'une résistance haute tension *R₀* de 248,5 M Ω et d'une résistance basse tension *R_u* de 501 k Ω à laquelle il faut associer en parallèle la résistance du voltmètre de crête MU11 *R_e* de valeur 4.24 M Ω .

La Figure II.7 montre une photo de la source haute tension utilisée :



Figure II.7 : Photo de la source haute tension

II.3. Appareils de mesure

II.3.1. Mesure de la tension appliquée

La mesure de la tension continue à la sortie de la source HT (V_a) qui est appliquée à l'électrode active se réalise à l'aide du diviseur résistif décrit précédemment et du voltmètre de crête MU11 (Voir Figure II.8). Les résistances R_e et R_u sont reliées par un câble coaxial blindé. Le voltmètre mesure la tension u aux bornes résistance basse tension R_u , et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée V_a . La tension appliquée (affichée sur le voltmètre de crête) est égale à la basse tension u multipliée par le rapport du diviseur k ($V_a = k.u$), tel que :

$$k = \frac{R_0 + (R_e // R_u)}{(R_e // R_u)} = \frac{R_0 R_e + R_0 R_u + R_e R_u}{R_e R_u}.$$

La valeur théorique de k est de 556. Cette dernière change avec le vieillissement de l'installation. Par conséquent, un étalonnage de l'installation doit se faire pratiquement chaque année. Pour réajuster la valeur du coefficient k sur le voltmètre de crête, un voltmètre électrostatique est utilisé.



Figure II.8 : Photo du voltmètre de crête

II.3.2. Mesure du courant de décharge

Les valeurs des courants de charges par effet couronne sont très faibles. Pour les mesurer nous avons utilisé un microampèremètre à aiguille (figure II.9). Cet appareil est connecté au plan

de mesure par un câble coaxial en respectant la polarité de la tension appliquée. La masse du câble coaxial est branchée à la terre.



Figure II.9 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge

II.3.3. Mesure de la densité de courant

La densité de courant électrique est définie comme étant un courant par unité de surface. Mathématiquement, on peut écrire :

$$I = \iint J(x,y) ds$$

Avec : I est le courant électrique en (A).

$J(x,y)$: densité de courant au point de coordonnées (x,y) en (A/m^2) .

S : est la surface en (m^2) .

La mesure du courant collecté par la sonde rectangulaire non polarisée, nous permet de déterminer la composante normale de la densité de courant de décharge \vec{J} , tel que :

$$J_n = \frac{I_0}{S_s} : \text{Composante normale de la densité de courant } (A/m^2)$$

I_0 est le courant mesuré.

S_s est la surface de la sonde.

Le courant collecté par la sonde est généralement faible (d'ordre pA à nA). D'où, on utilise le pico-ampèremètre à aiguille de la figure II.10 permettant de mesurer des courants faible dans la gamme 1 pA jusqu'à 300 μ A. Le pico-ampèremètre se connecte à la sonde par un coaxial blindé en respectant la polarité du courant mesuré.



Figure II.10 : Pico-ampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de la sonde

II.3.4. Mesure des paramètres physiques de l'air

La décharge couronne est sensible aux paramètres physiques de l'aire qui l'entoure, donc ; nous étions systématiquement obligés de les relever avant chaque essai. Dans l'intention de mesurer ces paramètres physiques nous avons besoin :

- ✓ D'un thermomètre à aiguille dans la gamme de mesure ($-30^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$) pour mesurer la température ambiante du laboratoire (Voir Figure II.11).
- ✓ D'un hygromètre à cheveux dans la gamme ($0 \% \leq H_r \leq 100 \%$) pour mesurer l'humidité de l'aire (Voir Figure II.11).
- ✓ D'un baromètre à mercure (Figure II.13) pour mesurer la pression de l'air ambiant, les valeurs relevées en hectopascal.

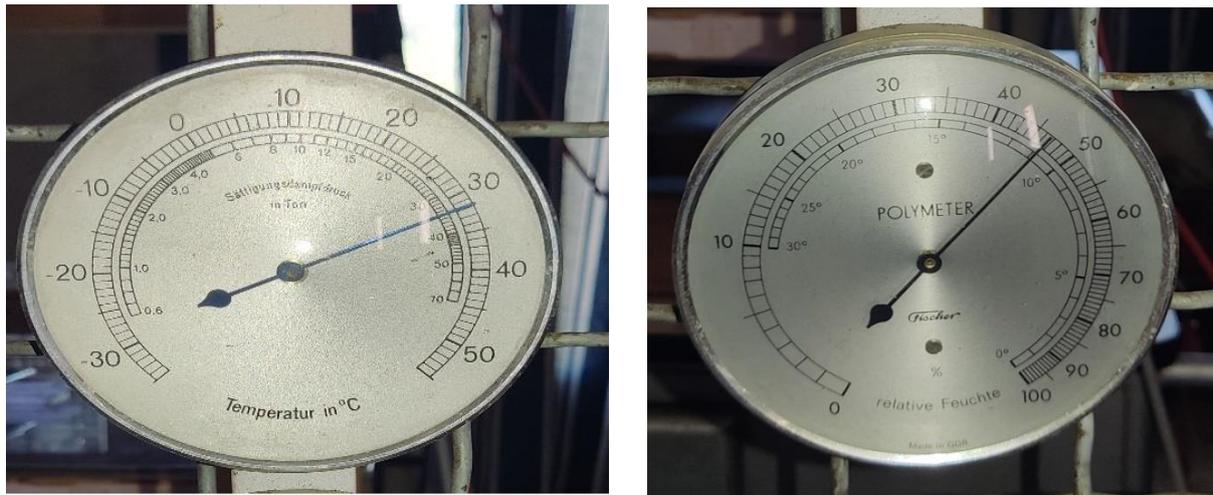


Figure II.11: Le thermomètre à aiguille et l'hygromètre à cheveux disponibles au laboratoire haute tension



Figure II.12 : Photo du baromètre à mercure utilisé dans la mesure de pression

II.4. Correction des résultats suivant les conditions atmosphériques

Le courant de décharge est lié aux conditions atmosphériques à savoir : la température ambiante, à la pression et l'humidité de l'air environnant. Pour que nos travaux soient comparables, et pour avoir les mêmes conditions pour tous les graphes, les valeurs obtenues dans n'importe quelles conditions doivent être ramenées aux conditions normales de température T_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 [49].

La relation permettant la correction de courant de décharge en fonction des conditions atmosphérique est donne par :

$$I(P_0, T_0, H_0) = I_m(P, T, H) \cdot \frac{K_h}{K_d}$$

Avec: I : Le courant de décharge ramenée aux conditions normales de température T_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 .

- Température $T_0 = 20\text{ C}^\circ$ ou 293K
- Pression $P_0 = 760\text{ mmHg}$ ou 1013 mbar ou 1013.25 hPa
- Humidité $H_0 = 11\text{ g/m}^3$

I_m : Le courant de décharge mesurée à la température T , à la pression P et à l'humidité H .

K_d : Facteur de correction relatif à la température T et à la pression P ;

$$K_d = \frac{P}{1013.25} \cdot \frac{(273+20)}{(273+T)} = \frac{0.289P}{(273+T)}$$

Avec: P en hPa, et T en C°

K_h : Facteur de correction relatif à l'humidité ;

La figure II.13 montre comment l'humidité relative (H_r) évolue avec la température. Cette figure nous permet de déterminer l'humidité absolue à partir de l'humidité relative et de la température [49].

Pour déterminer K_h , il faut utiliser le graphique de la figure II.14, car K_h est calculé à l'aide de l'humidité absolue (H).

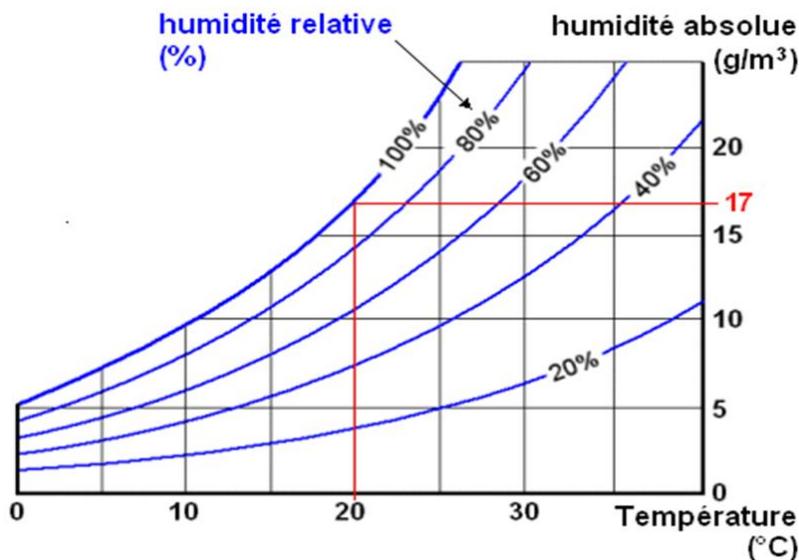


Figure II.13 : courbe de l'humidité absolue en fonction de la température et l'humidité relative $H = f(Hr, T)$.

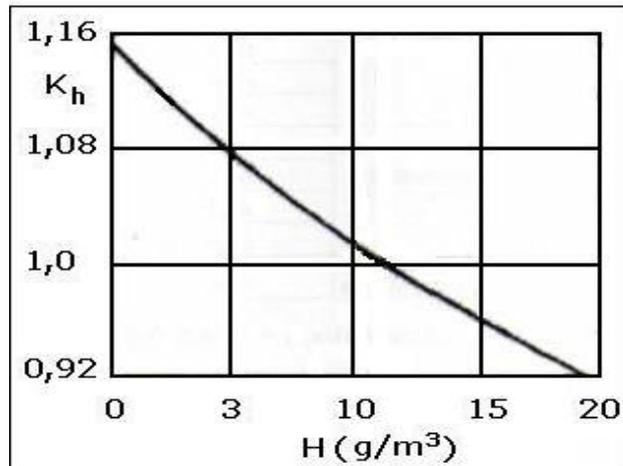


Figure II.14: Facteur de correction relatif à l'humidité $K_h = f(H)$ [49]

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le dispositif expérimental en exposant ses différents composants et expliquant son principe de fonctionnement. Nous avons aussi exposé les méthodes utilisées pour mesurer les paramètres caractéristiques de la décharge couronne, tels que : la tension seuil de l'effet couronne, le courant de décharge et la distribution de la densité de courant au plan.

Dans le prochain chapitre, nous procéderons à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus pour caractériser la décharge couronne en géométrie nappe de fils-en polarité positive et négative.

CHAPITRE III:

Présentation et interprétation des résultats

III.1. Introduction

Notre travail expérimental consiste à la caractérisation du phénomène de la décharge couronne, par la mesure des courants de la décharge en fonction de la tension appliquée par la variation de certains paramètres géométriques. Cela nous permet de tracer la caractéristique courant-tension de la décharge et de déterminer la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

Afin d'étudier la distribution de la densité de courant sur le plan, nous avons mesuré le courant collecté par une sonde linéaire en mettant à la terre l'électrode plane. La division de ce courant par la surface de la sonde nous donne la densité de courant pour différentes positions de la sonde.

Comme dernière partie de notre travail expérimental, nous avons inséré une grille métallique entre les électrodes et étudié son influence sur la distribution de la densité de courant au plan.

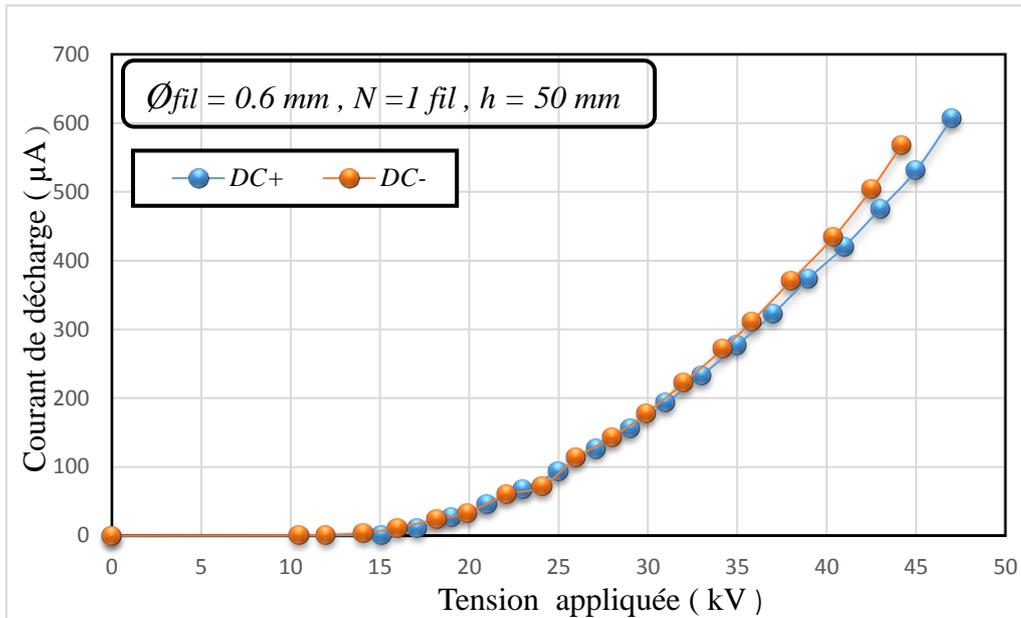
III.2. Caractéristique courant-tension

Dans cette étape, on applique une tension continue (V_a) sur les électrodes actives, puis on mesure la quantité de courant (I) captée par le plan de mesure en augmentant la valeur de la tension. Les valeurs de la tension doivent être inférieures à la tension de claquage (de 5 kV au minimum). La variation progressive de la tension s'effectue manuellement.

III.2.1. Influence de la polarité de la tension appliquée

Dans la majorité des applications industrielles, on utilise la décharge négative à cause de son efficacité et sa stabilité par rapport à la décharge positive, ce qui nous a donné l'idée à faire une comparaison entre la décharge couronne négative et la décharge couronne positive. Sur la figure (III.1), on peut identifier l'effet de la polarité sur la courbe $I = f(V)$. Les essais ont été effectués par la configuration géométriques fil-plan, tel que l'électrode active est un fil conducteur de diamètre $\varnothing_{fil} = 0.6 \text{ mm}$ avec une distance inter-électrodes de $h = 50 \text{ mm}$.

Cette figure montre bien que le courant augmente graduellement avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse une certaine valeur (V_0) et ce jusqu'au claquage du milieu gazeux à la tension de rupture (V_c). Il est à noter que pour des tensions élevées ($>30 \text{ kV}$), le courant de décharge est plus important lors de la polarité négative sur le fil, exemple pour une tension appliquée constante $V = 40 \text{ kV}$, le courant de décharge $I = 435 \mu\text{A}$ pour la polarité négative, et $I = 400 \mu\text{A}$ pour la polarité positive.



Figures III.1 : Caractéristiques courant-tension pour les deux polarités positive et négative

Le courant continu qui traverse l'espace inter-électrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée. Une relation empirique classique simple dite loi courant-tension de Townsend est généralement utilisée. En 1914, Townsend a tiré une formule pour la caractéristique courant-tension ($I-V$) en géométrie fil-cylindre, plus tard il a été expérimentalement constaté que la relation de Townsend pourrait également être utilisée pour les géométries pointe-plan et pointe-grille, cette relation est donnée par [50] :

$$I = K \cdot V(V - V_0) \dots\dots\dots (III.1)$$

K : est une constante qui dépend de la géométrie des électrodes et les paramètres atmosphériques (la température, l'humidité et la pression) et de la mobilité des porteurs de charges.

V_0 : est la tension seuil de l'effet couronne.

En exploitant la courbe du rapport I/V en fonction de V déduite de la courbe précédente, nous pouvons calculer les paramètres du modèle de Townsend pour les deux polarités (voir tableau III.1) :

Tableau III.1 : Paramètres du modèle de Townsend pour les deux polarités

	Polarité positive	Polarité négative
K	0.3947	0.3711
V_0	15.6638	11.6909

III.2.2. Influence du nombre de fils sur le courant de décharge

Pour étudier l'influence du nombre de fils sur la décharge couronne pour les deux polarités, nous avons utilisé un fil de diamètre $\varnothing_{fil} = 0.6 \text{ mm}$, pour une distance de 20 mm entre un fil et un autre ($2a=20 \text{ mm}$), et nous avons essayé de faire nos essais aussi vite que possible afin d'éviter les grandes variations d'humidité qui est, dans notre cas, un paramètre incontrôlable, donc on a fait une correction pour des valeurs proches de la normalisation illustrées dans les figures III.2 et III.3.

Nous remarquons que le courant de décharge augmente avec le nombre de fils (lorsque le nombre de fils augmente, le courant aussi augmente) et cela est dû à l'augmentation du nombre de régions ionisées autour de chaque fil entraînant une augmentation du champ électrique entre les électrodes qu'est très intense au voisinage des fils (électrodes émissives). En polarité positive, nous avons enregistré une saturation à partir de 5 fils ; le courant mesuré pour 5, 7 et 9 fils est le même. La caractéristique courant-tension est stable quelle que soit la polarité de la tension appliquée. Une stabilité du seuil de l'effet couronne est remarquable pour les deux polarités de tension, ce seuil en polarité positive est légèrement inférieure à celle de la polarité négative.

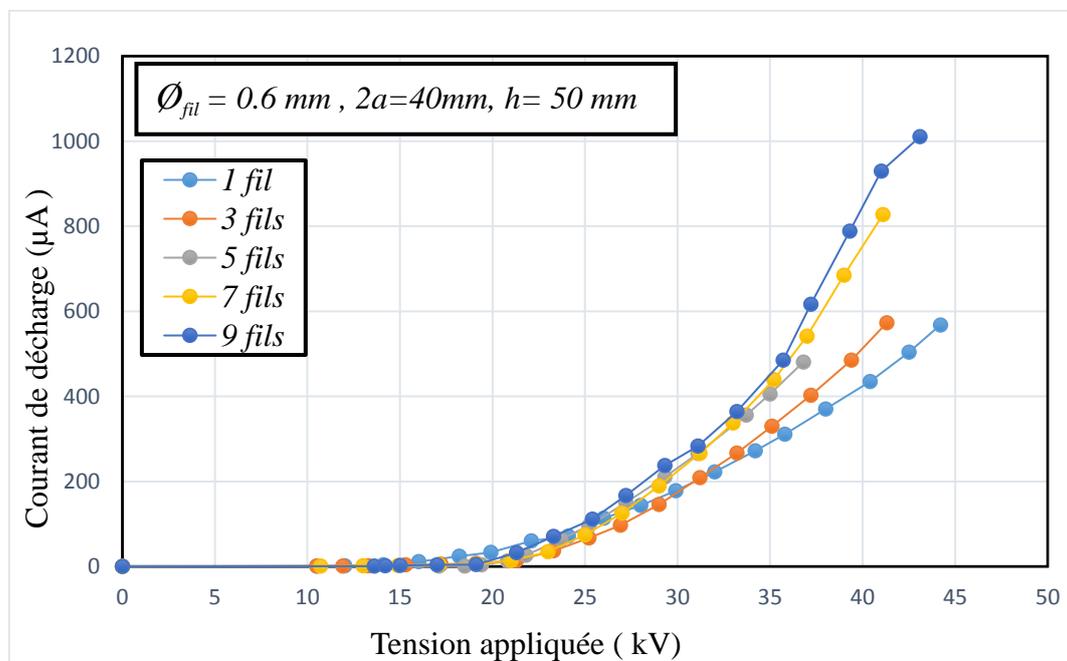


Figure III.2 : Caractéristiques I-V en polarité négative pour différents nombres de fils

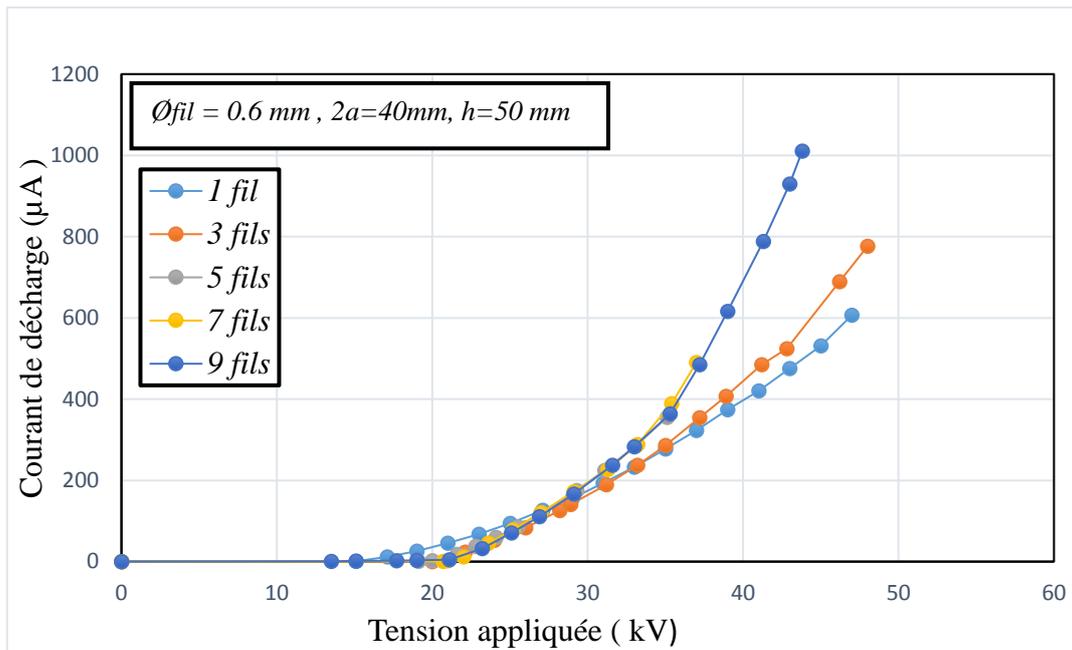


Figure III.3 : Caractéristiques $I-V$ en polarité positive pour différents nombres de fils

III.2.3. Influence de la distance inter-fils ‘a’

Les caractéristiques courant-tension ($I-V$) de la décharge couronne pour les deux polarités en géométrie fils-plan pour un nombre de fils fixé à 3 sont représentées dans les figures III.4 et III.5, en variant la distance inter-fils (a).

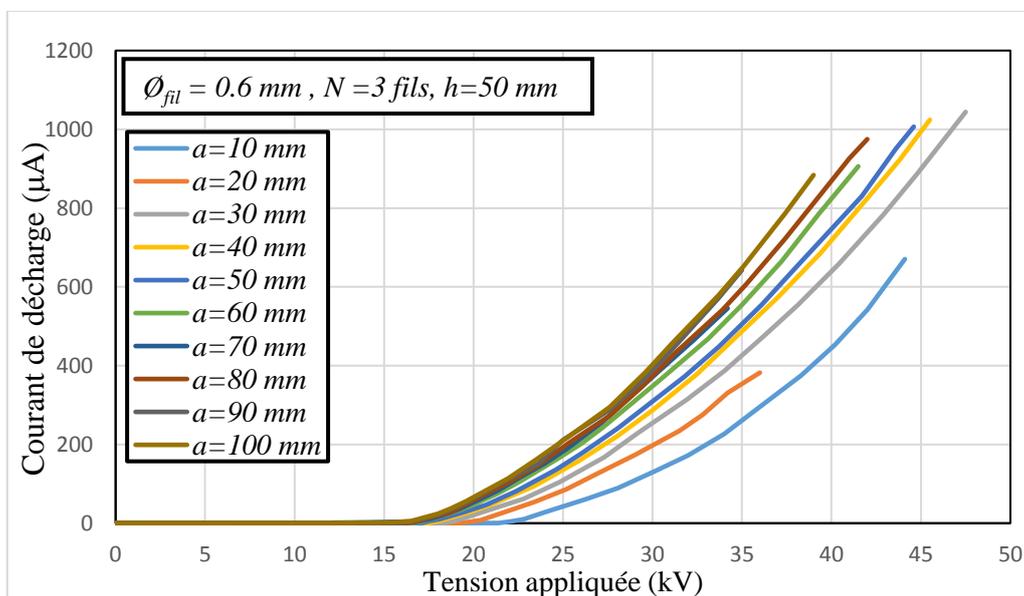


Figure III.4 : Caractéristiques $I-V$ en polarité négative pour différentes distances inter-fils

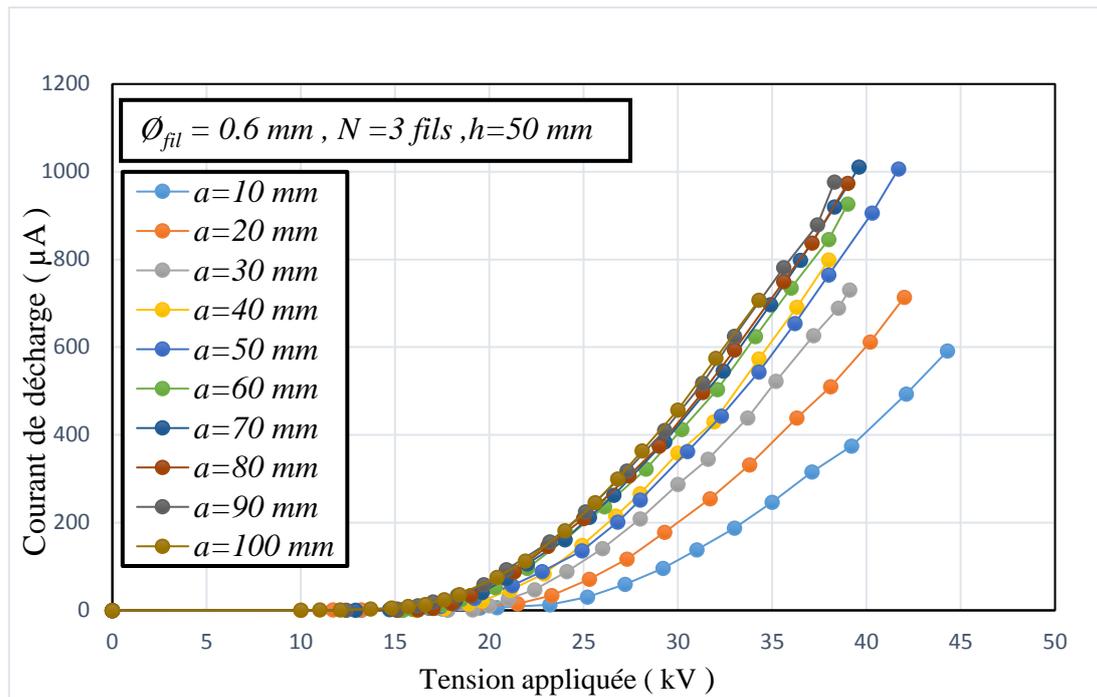


Figure III.5 : Caractéristiques I - V en polarité positive pour différentes distances inter-fils

D'après les courbes III.4 et III.5, le courant de décharge augmente avec l'augmentation de la distance inter-fils avec une diminution de la tension seuil pour les deux polarités. En effet, la propagation du champ sur toute la surface inter-électrodes provoque l'ionisation de tout le gaz et l'orientation vers le plan de collecte (il n'y a pas de lignes de fuites). Par conséquent, si on cherche à avoir un courant de décharge élevé tout en limitant la tension maximale (proche de la tension de claquage), les fils doivent être éloignées le plus possible ($2a \gg h$).

III.2.4. Influence de la distance inter-électrodes

Pour étudier l'influence de la hauteur des fils (électrodes actives) par rapport aux plans mis à la terre, nous avons effectué des essais expérimentaux pour plusieurs cas. Pour cela, nous avons utilisé 1 fil comme électrode active, ensuite 3 fils. Les résultats obtenus sont donnés dans les courbes III.6 et III.7.

Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes.

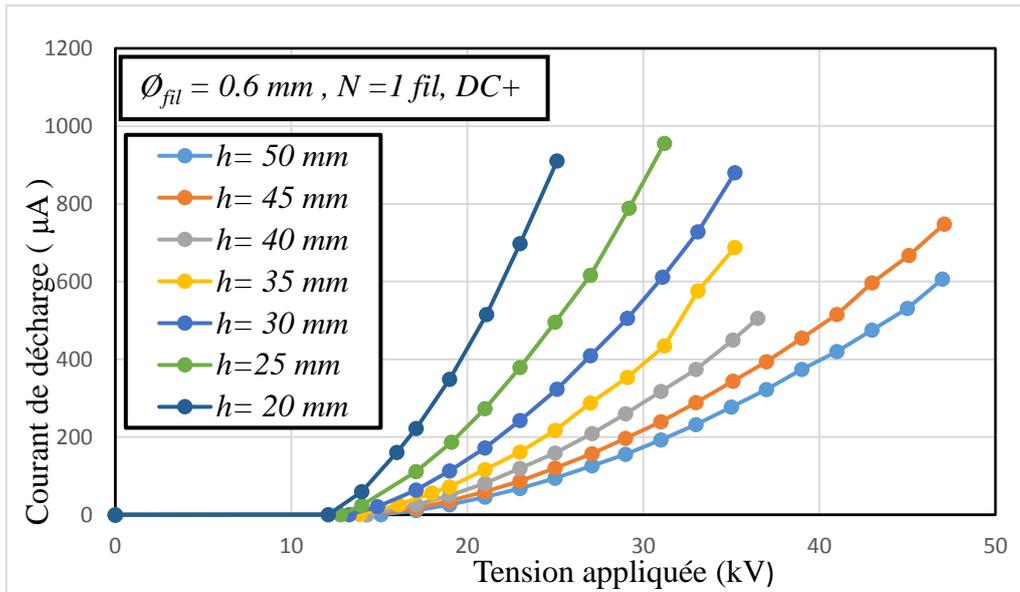


Figure III.6 : Caractéristiques I-V en polarité positive pour différentes distances inter-électrodes

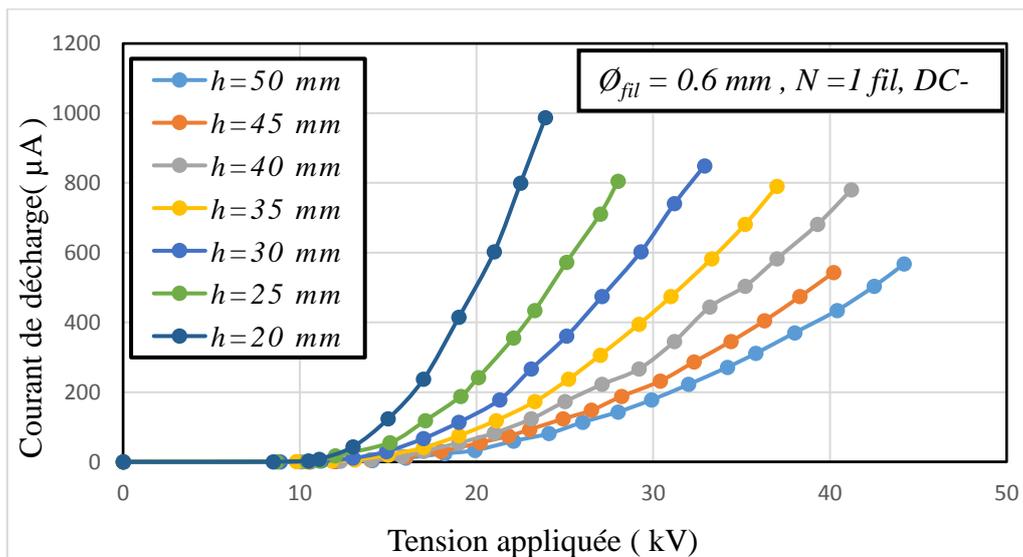


Figure III.7 : Caractéristiques I-V en polarité négative pour différentes distances inter-électrodes

Pour un même niveau de tension, la diminution de la distance inter-électrodes entraîne l'augmentation du champ électrique entre les électrodes ce qui va causer la diminution de la tension seuil de l'effet couronne et l'augmentation du courant de décharge collecté au plan.

III.3. Densité du courant J

La densité du courant de décharge couronne est la quantité de courant collectée par la sonde divisée par sa surface. Dans notre cas ; comme indiqué dans le chapitre II ; nous avons utilisé

une sonde linéaire rectangulaire pour étudier la distribution de la densité de courant au plan en polarités positive et négative. Ces essais consistent à mesurer le courant collecté par la sonde en variant la distance inter-électrodes et en déplaçant horizontalement la sonde avec un pas de 10 mm à partir de la position centrale ($x=0\text{ mm}$).

III.3.1. Influence de la polarité de la tension sur la distribution de la densité de courant

Les figures III.8 et III.9 illustrent l'allure de la densité de courant en fonction de la position de la sonde pour trois niveaux de tension en polarité positive et négative respectivement.

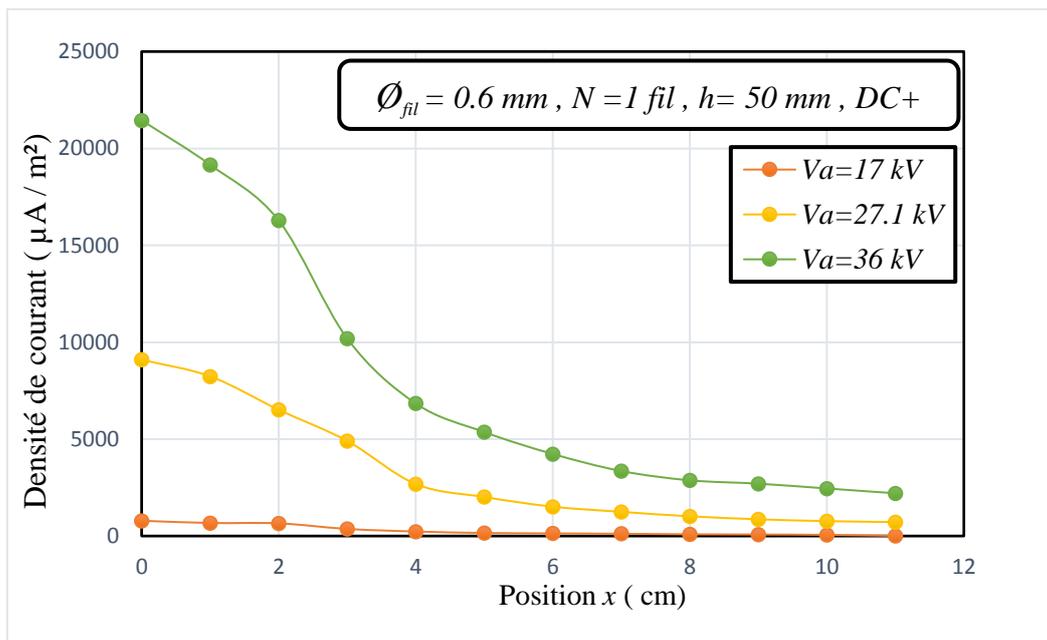


Figure III.8 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive

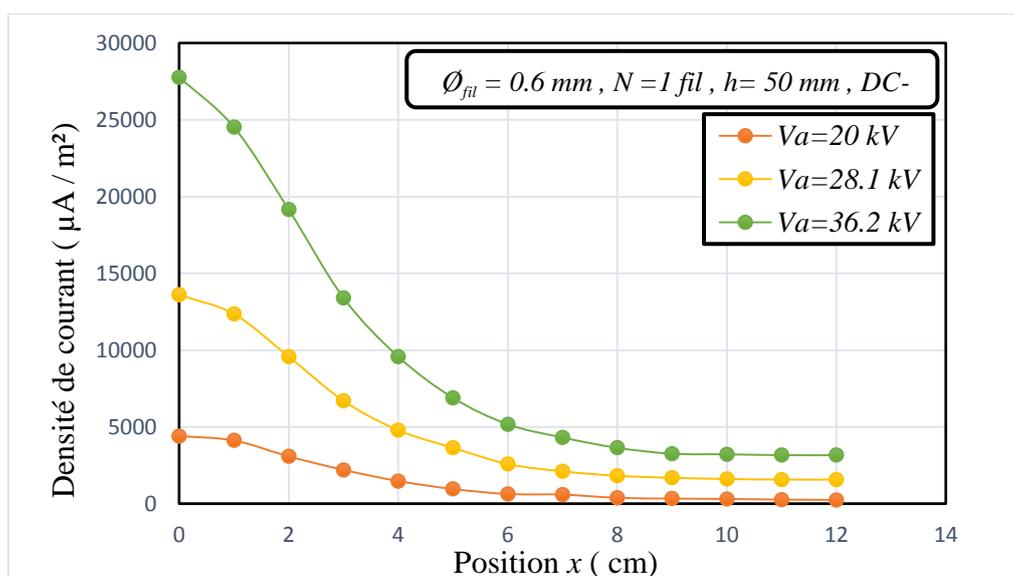


Figure III.9 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative

Afin de déterminer l'influence de la polarité de la tension appliquée sur la distribution de la densité de courant J , nous avons effectué cette expérience en fixant la distance inter-électrode à $h = 50 \text{ mm}$ et en variant la position de la sonde par rapport aux électrodes actives.

D'après les deux figures III.8 et III.9, nous constatons que pour les deux polarités la densité du courant diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la position centrale ($x=0$). La densité de courant qui est l'image des espèces récoltées par la sonde suite à l'ionisation du gaz, augmente avec la tension appliquée et en même temps diminue quand nous nous éloignons la sonde, suivant l'axe x , ce qui est tout à fait logique puisque le champ s'affaiblit.

Sur la figure III.10, nous avons tracé les valeurs de la densité de courant en fonction de la position de la sonde pour les deux polarités en fixant la tension appliquée à l'électrode active à 36 kV .

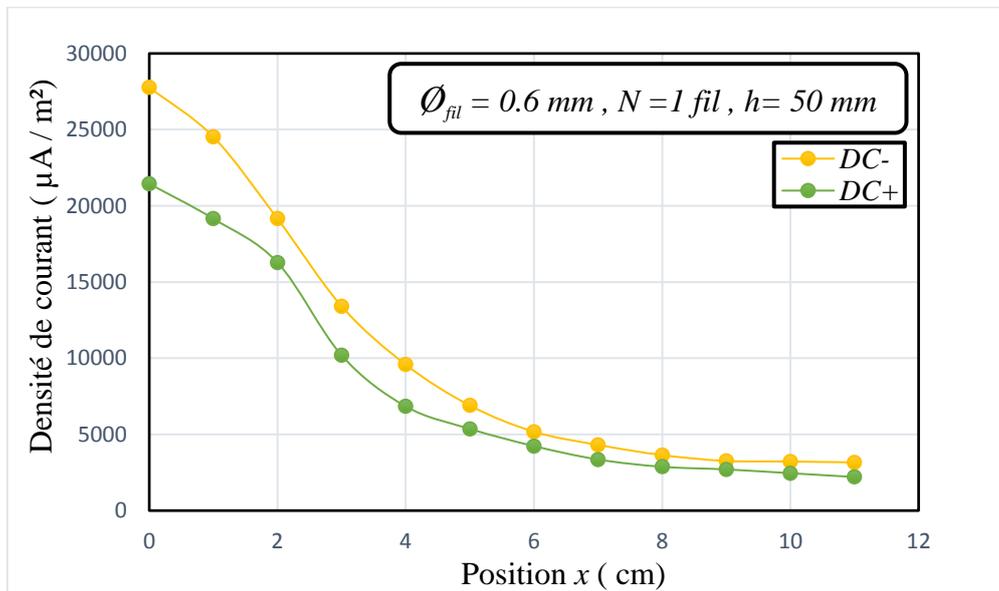


Figure III.10 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde pour les deux polarités ($V_a=36 \text{ kV}$)

Comme le cas du courant de décharge, la densité de courant pour une position donnée est plus importante en polarité négative.

Les premières expériences conduites par Warburg décrivent la répartition d'une charge d'espace unipolaire dans un système pointe-plan [51]. Il rapporte que la distribution de la densité du courant ionique sur le plan $j(\theta)$ suit la loi $\cos\theta$ dite la loi de Warburg. Cette loi a été utilisée pour d'autres géométries telles que fil-plan et lame-plan, elle suit la forme :

$$J(\theta) = J(0)\cos^m(\theta)$$

Avec : $J(0)$ est la densité de courant pour $\theta = 0$, $\cos(\theta) = \frac{h}{\sqrt{x^2+h^2}}$

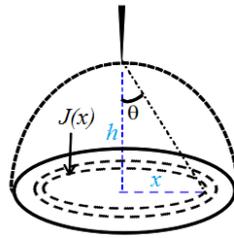


Figure III.11 : Schéma descriptif de la répartition de la densité du courant ionique au plan pour une géométrie pointe-plan

III.3.2. Influence du nombre de fils sur la densité de courant

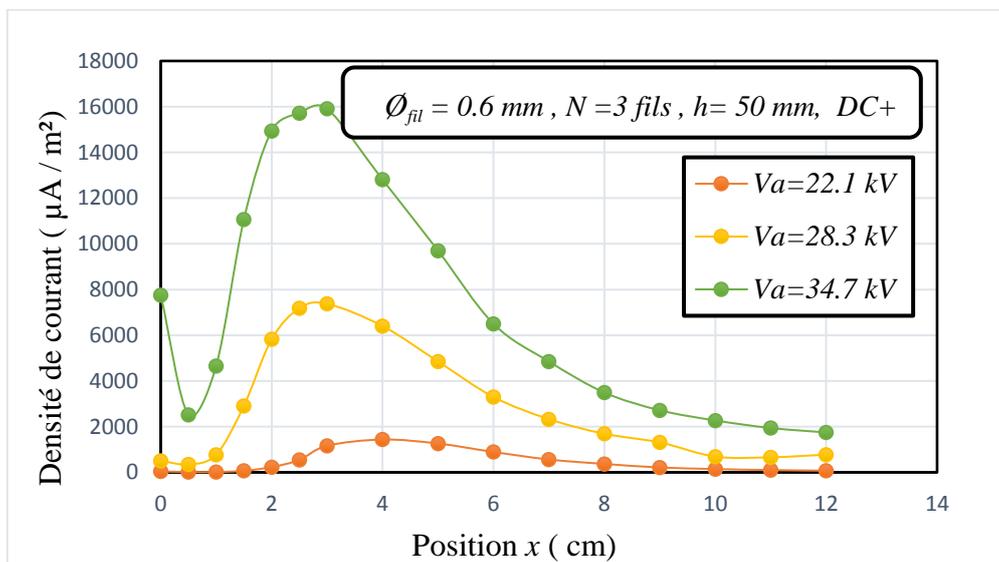


Figure III.12 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour un nombre de fils 3

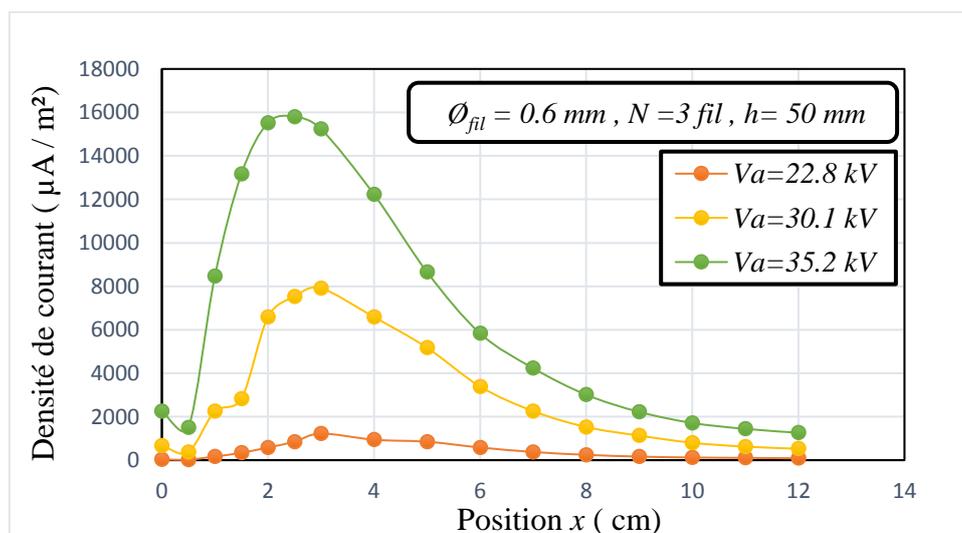


Figure III.13 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour un nombre de fils 3

Dans cette partie nous avons essayé d'étudier l'effet du nombre de fils constituant l'électrode active sur la distribution de la densité de courant pour une distance inter-fils $a=20\text{ mm}$ tout en fixant la distance inter-électrodes $h=50\text{ mm}$. Pour ce faire, nous avons réalisé nos expériences pour un nombre de fils 3, puis 5.

Pour un nombre de fils 3, nous avons représenté sur les figures III.12 et III.13 les valeurs de la densité de courant en fonction de la position de la sonde pour une polarité positive et négative respectivement.

D'après ces figures, on remarque que dans la zone en dessous des fils la densité de courant est faible pour les trois niveaux de tension et dans les deux polarités. Les courbes présentent un minimum entre les fils ($x=10\text{ mm}$), ensuite la densité de courant augmente pour atteindre sa valeur maximale en dehors de la zone en dessous des fils ($x=30\text{ mm}$). Au-delà de cette position, la diminution suivant la forme de Warburg est valable. La densité de courant présente un minimum entre les fils à cause des phénomènes d'interaction entre les électrodes actives entraînant une réduction de l'émission de courant de décharge corona.

Il est à noter aussi que pour un même niveau de tension, la densité de courant avec trois fils est supérieure à celle de la configuration 1 fil-plan (valable uniquement en dehors de la zone sous les fils).

De même, pour un nombre de fils 5, nous avons représenté sur les figures III.14 et III.15 les valeurs de la densité de courant en fonction de la position de la sonde pour une polarité positive et négative respectivement.

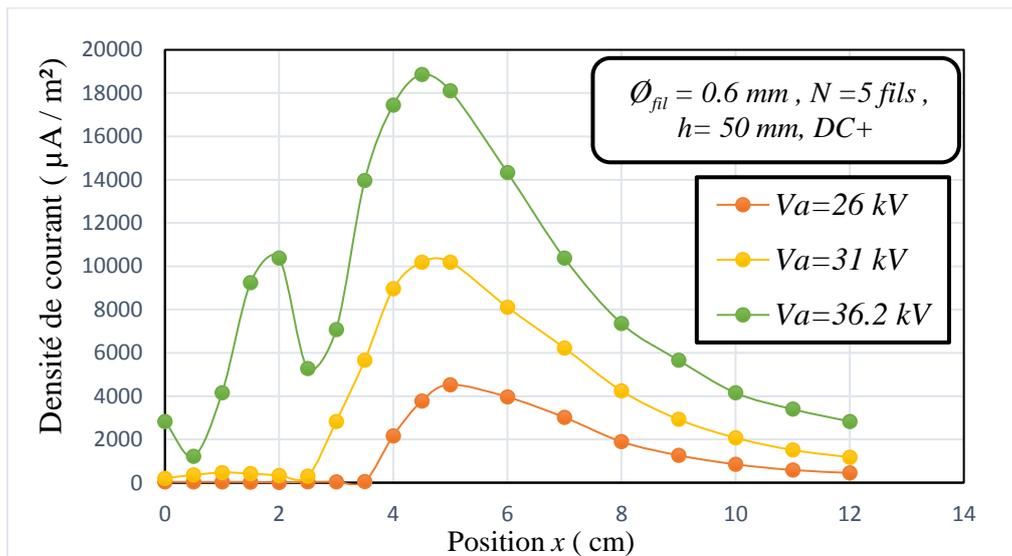


Figure III.14 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour un nombre de fils 5

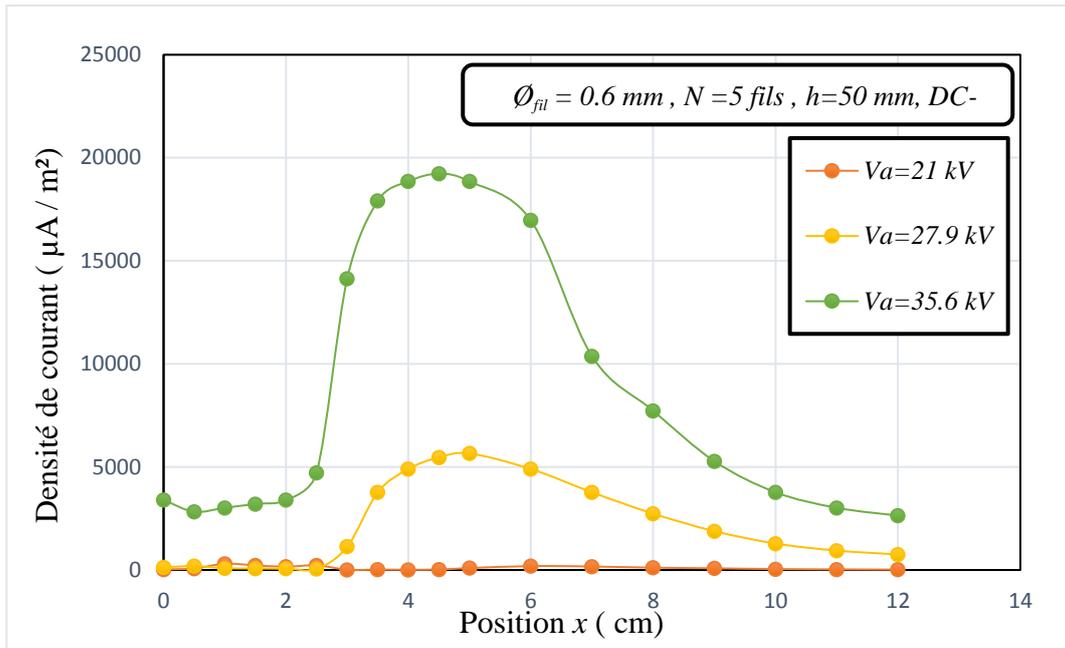


Figure III.15 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour un nombre de fils 5

Les explications données pour la configuration 3fils-plan sont valables pour 5fils-plan. Sous les fils, la densité de courant est faible et en dehors de cette zone le modèle de Warburg est valable. Pour la même position et pour le même niveau de tension, la densité de courant de la configuration 5fils-plan est supérieure à celle de 3fils-plan.

III.3.3. Influence de la hauteur sur la distribution de la densité de courant

Dans le but d'étudier l'influence de la hauteur des fils par rapport aux plans sur la distribution de la densité de courant J , nous avons effectué des essais en fixant la tension $Va=30 \text{ kV}$ pour la polarité positive et $Va=20 \text{ kV}$ pour la polarité négative et en variant les hauteurs ($h=50 \text{ mm}, 40 \text{ mm}, 30 \text{ mm}$). Les résultats obtenus sont donnés dans les figures III.16 et III.17.

D'après ces deux figures, on constate que la densité dépend fortement de la distance inter-électrodes surtout au voisinage du centre. Comme le courant de décharge, la densité de courant est plus importante pour les faibles distances inter-électrodes. Ce phénomène est lié à l'augmentation du champ électrique entre les électrodes avec la diminution de la hauteur h .

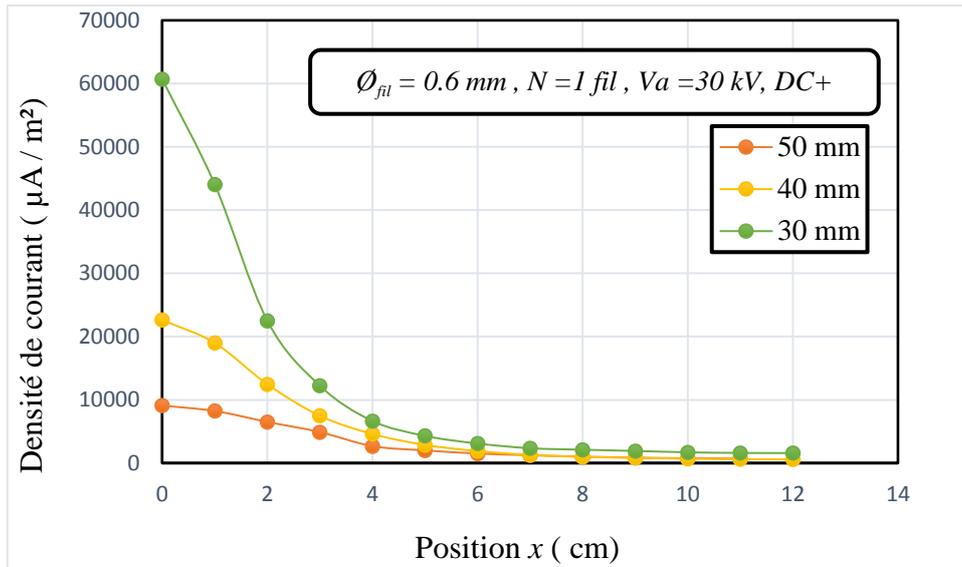


Figure III.16 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour diverses distances inter-électrodes

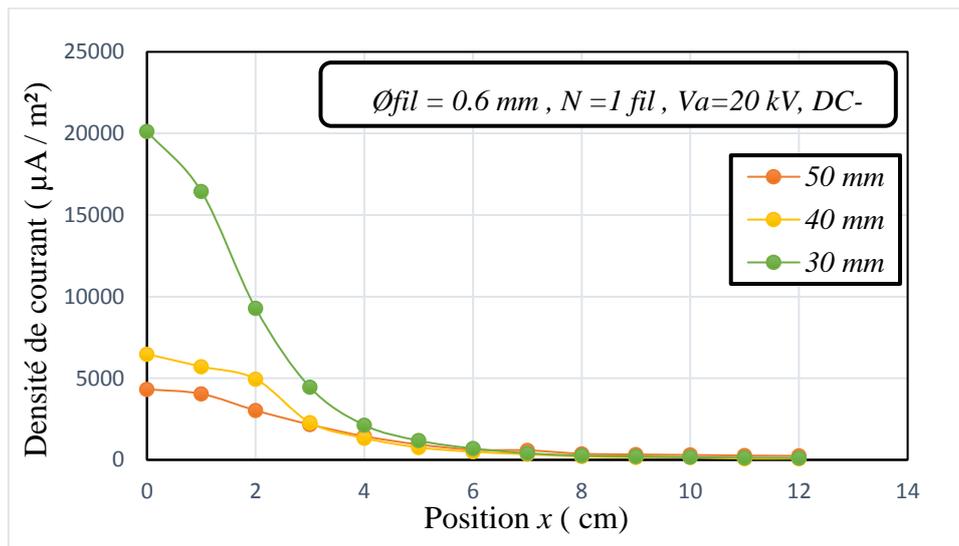


Figure III.17 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour diverses distances inter-électrodes

III.4. Système d'électrodes fils-grille-plan

III.4.1. Influence de la grille à potentiel flottant sur la caractéristique J-V

Pour les deux types de polarités, positive et négative nous avons d'abord relevé la caractéristique densité de courant-tension ($J-V$) du système sans grille en fixant la sonde à sa position centrale ($x=0$), puis on a refait le même essai avec grille en réglant sa hauteur par rapport aux plans à $d_{g-p} = 10\text{ mm}$, 20 mm , 30 mm et 40 mm , en utilisant des supports en

plexiglas d'une épaisseur de 5 mm, les résultats sont exposés sous forme de courbes dans les figures III.18 et III.19.

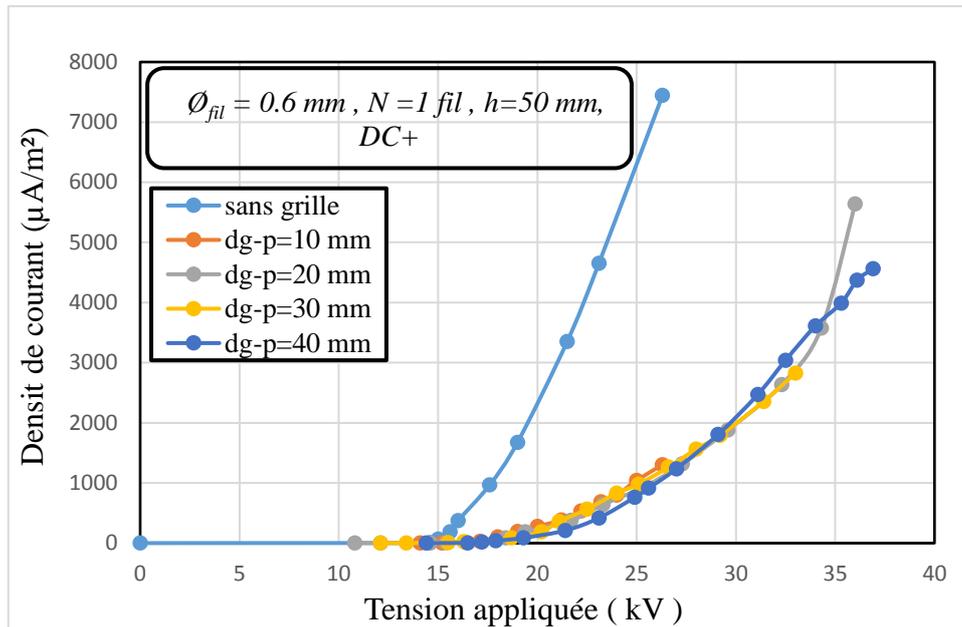


Figure III.18 : Caractéristique J - V en polarité positive à $x=0$ pour diverse distance grille-plan

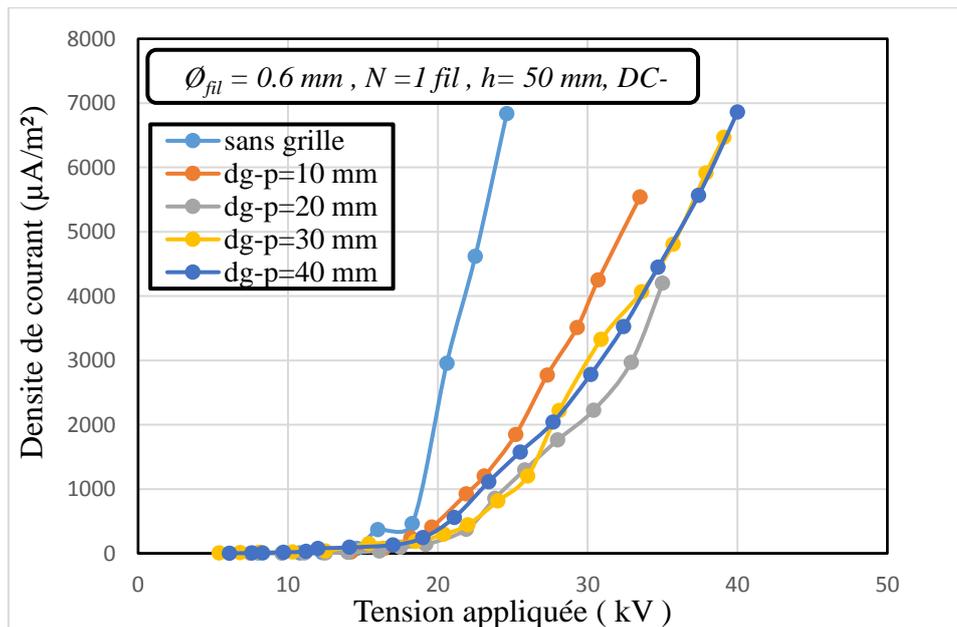


Figure III.19 : Caractéristique J - V en polarité négative à $x=0$ pour diverse distance grille-plan

D'après ces figures, la présence de la grille métallique a une influence significative sur la densité de courant. Son insertion entre électrodes provoque une diminution importante de la densité de courant au plan. Pour une tension donnée, le courant de couronne est plus élevé en absence de la grille et que la tension seuil de l'effet couronne V_0 est plus faible pour

l'électrode sans grille. En polarité positive, l'effet de la position de la grille par rapport au plan collecteur est négligeable. En polarité négative, cet effet est aléatoire et difficile à analyser.

III.4.2. Influence de la position de la grille sur la distribution de la densité de courant

Sur les figures ci-après, nous avons tracé pour les deux polarités de la tension appliquée à l'électrode active la distribution de la densité de courant au plan en fonction de la position de la sonde sans et avec grille tout en variant sa distance par rapport au plan.

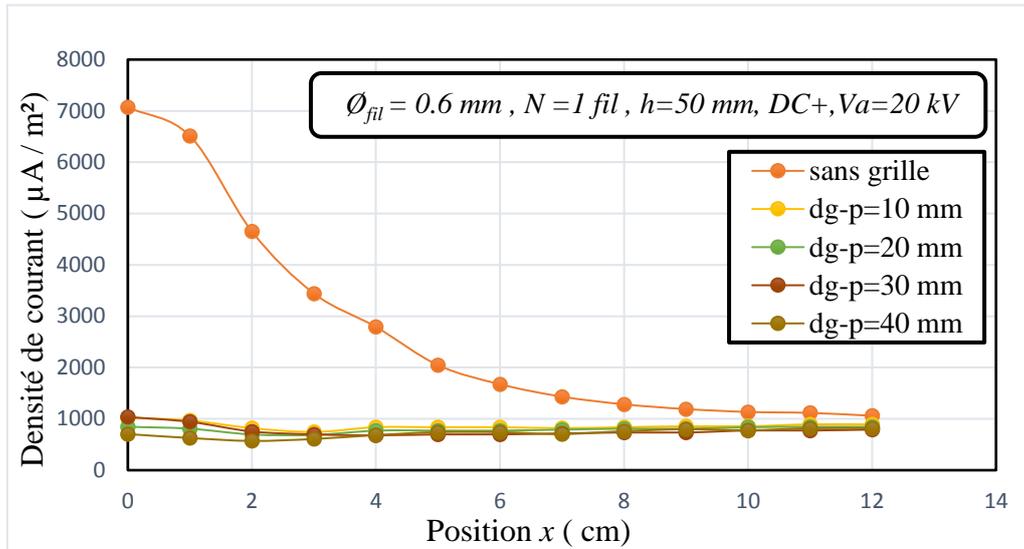


Figure III.20 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive sans et avec grille

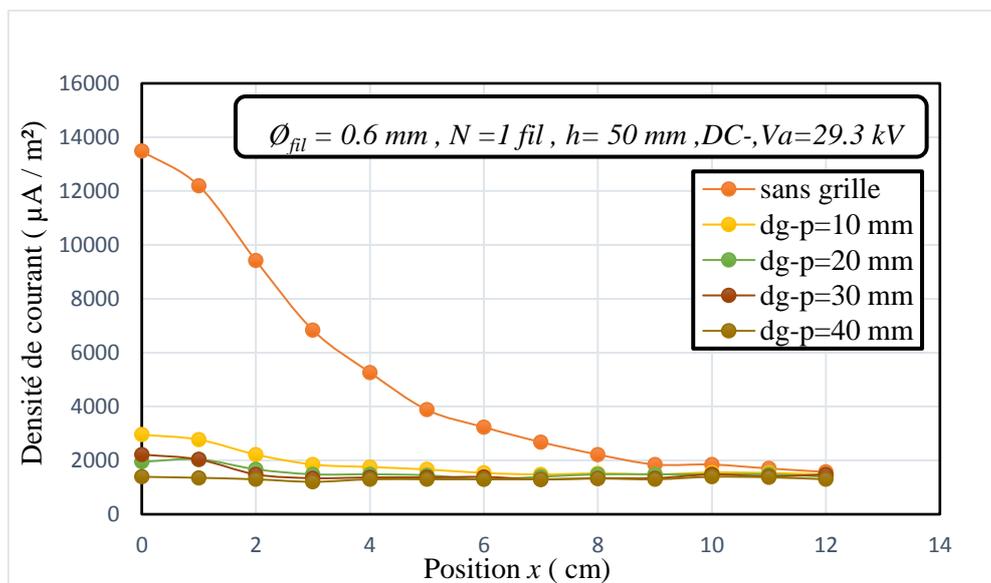


Figure III.21 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative sans et avec grille

Par l'observation des deux figures III.20 et III.21, pour la configuration fil-plan sans grille, la densité de courant décroît graduellement avec l'éloignement de position de la sonde selon la loi de Warburg. Par contre, la présence de la grille rend le courant de décharge collecté par la sonde presque uniforme, cela revient au fait que la densité de courant est distribuée sur toute la surface de la grille. L'agrandissement des zones de courant avec grille nous renseigne sur l'influence de la position de la grille sur l'uniformité de la densité de courant au plan. Il s'est avéré que l'uniformité est atteinte quand la grille est suffisamment éloignée du plan ($d_{g-p} = 40 \text{ mm}$).

L'effet de la distance d_{g-p} sur la densité de courant peut être expliqué par la figure ci-après.

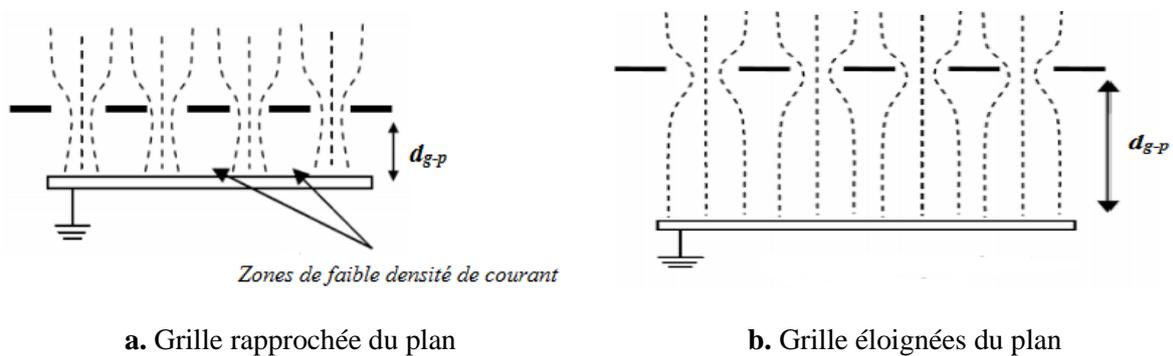


Figure III.22 : Effet de la position de la grille sur l'uniformité de la densité de courant au plan

Si la grille est très proche de la masse, telle qu'elle est présentée à la figure III.22.a, l'inhomogénéité du champ électrique dans la zone au-dessous de la grille s'accroît et il apparaît des zones de faible densité de courant. En effet, les dimensions des mailles de la grille ne sont plus négligeables par rapport à cette distance d_{g-p} relativement petite, alors l'uniformité de la distribution de la densité de courant n'est plus garantie.

Ainsi, il faut maintenir une distance minimale entre la grille et le plan de masse pour éviter tout contact entre la grille et le plan et que l'ensemble grille-plan soit semblable à une configuration plan-plan.

III.4.3. Influence de la grille sous potentiel sur la caractéristiques courant-tension

Afin d'étudier l'effet de la grille mise à la terre via une résistance de quelques $M\Omega$ sur la décharge couronne, nous avons réalisé nos essais avec la géométrie 1fil-grille-plan avec une distance inter-électrodes (fil-plan) $h=50 \text{ mm}$, et nous avons inséré la grille métallique décrite précédemment avec une distance grille-plan variable ($d_{g-p} = 10 \text{ mm}, 20 \text{ mm}, 30 \text{ mm}$). Cette

expérimentation consiste à relever les valeurs de courant de la grille ainsi le courant collecté par le plan de mesure en fonction de la tension appliquée.

III.4.3.1. Influence de la distance grille-plan

Les figures ci-dessous représentent les caractéristiques courant de la grille-tension (I_g - V) pour les deux polarités avec variation de la distance grille-plan (d_{g-p}).

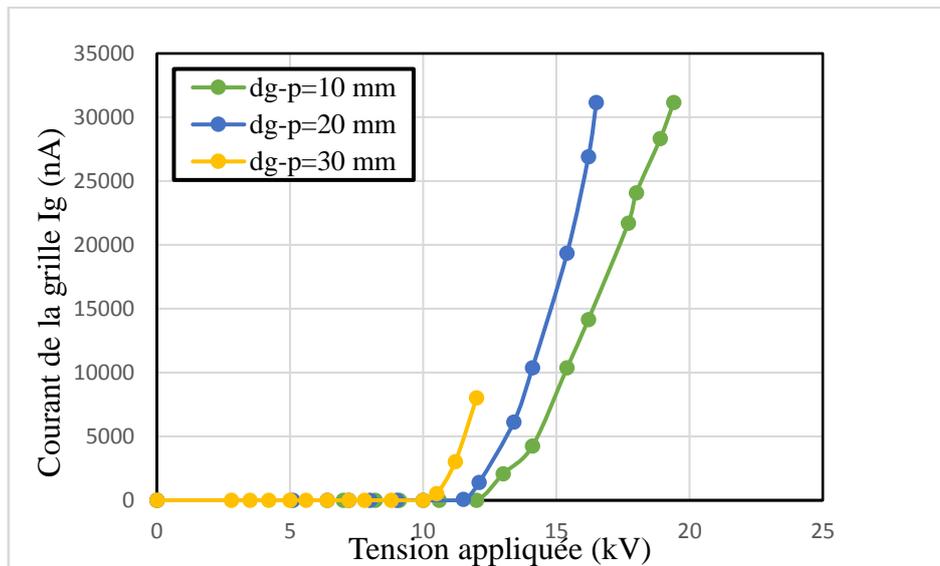


Figure III.23 : Caractéristique I_g - V de polarité positive en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan

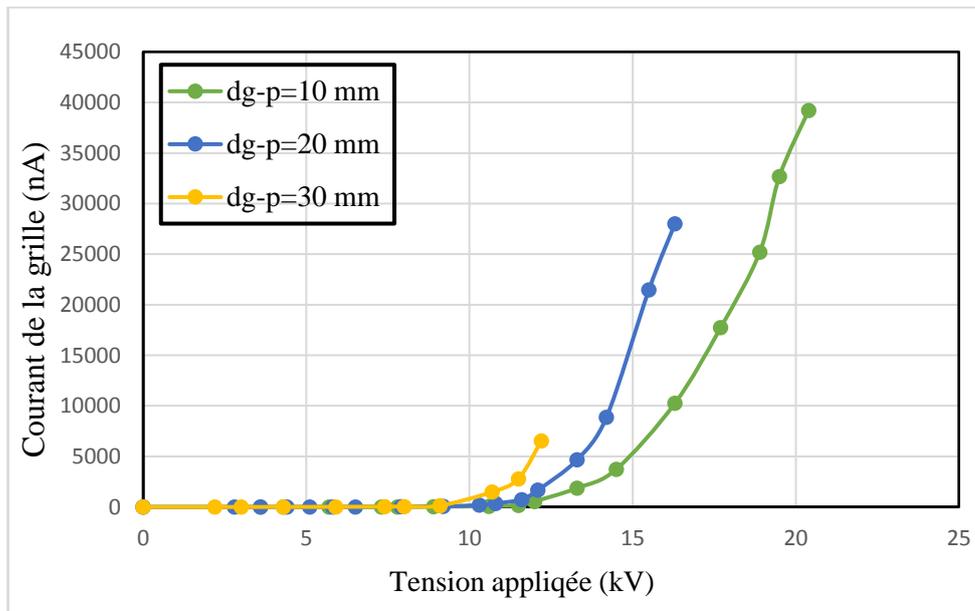


Figure III.24 : Caractéristique I_g - V de polarité négative en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan

Les figures III.23 et III.24 montrent bien que le courant capté par la grille augmente d'une manière non linéaire avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse la valeur seuil V_0 . Pour les deux polarités un modèle sous la forme $I_g = K'(V - V_0)^n$ peut être attribué à la loi de variation du courant de la grille en fonction de la tension appliquée.

A une tension appliquée donnée, le courant de la grille est plus important pour une distance grille-plan d_{g-p} plus grande. Par conséquent, le courant augmente rapidement en éloignant la grille du plan. On dit que la grande partie du courant délivré par la source est capté par la grille quand elle est proche de l'électrode active.

D'après ces figures, on note aussi que lorsque la grille est trop éloignée du plan ($d_{g-p}=30\text{ mm}$) ou bien très proche de l'électrode active, la gamme de fonctionnement est très réduite à cause de la tension de claquage qui devient faible dans ce cas.

Sur les figures ci-après, nous avons représenté le courant de décharge pour les deux polarités en absence de la grille métallique en sa présence avec variation de la distance d_{g-p} .

Pour une tension donnée en polarité positive et négative, le courant de décharge est plus élevé en absence de la grille et la tension de seuil couronne V_0 est plus faible pour l'électrode sans grille. L'effet de la distance d_{g-p} sur le courant collecté par le plan est négligeable devant présence de la grille. Des travaux antérieurs ont montré que le courant de déchargé varie contrairement au courant de la grille, il diminue avec l'augmentation de la distance d_{g-p} .

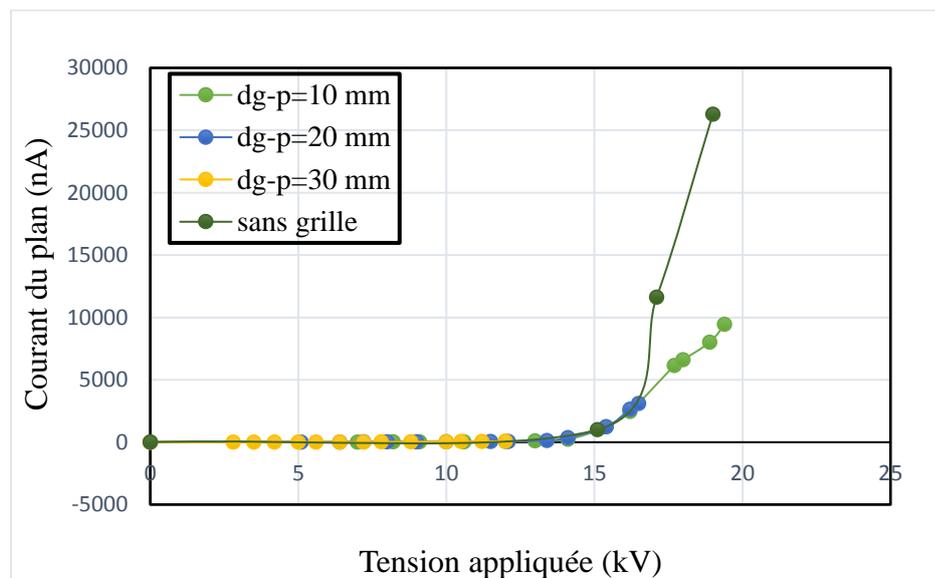


Figure III.25 : Caractéristique I - V de polarité positive en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan

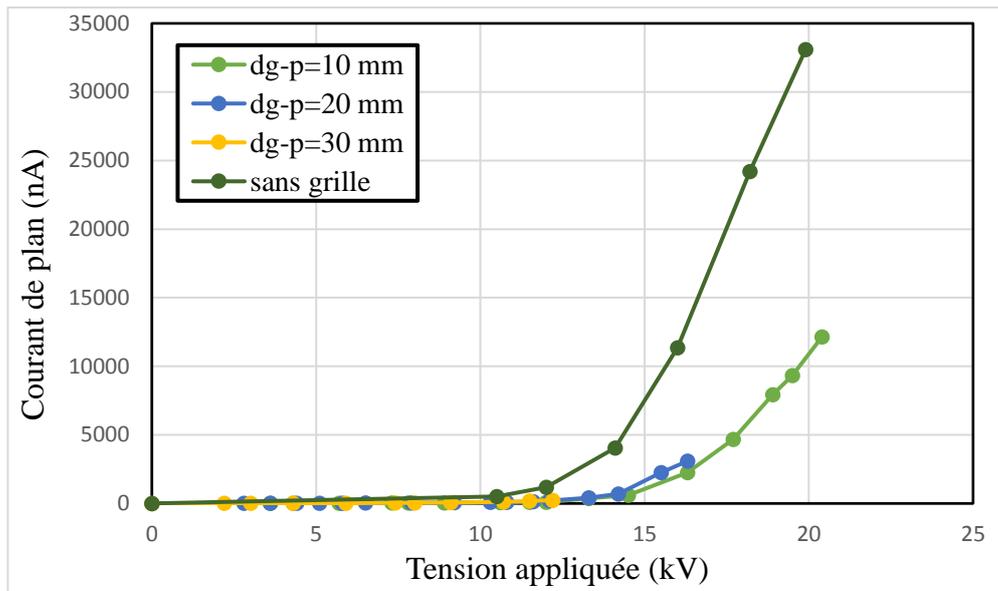


Figure III.26 : Caractéristique I - V de polarité négative en géométrie 1fil-plan avec différentes distances grille-plan

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre ; nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations.

La caractéristique courant-tension a été étudiée pour les deux polarités en absence et en présence de la grille métallique avec variation de sa distance par rapport au plan. L'effet de certains paramètres sur cette caractéristique tels que le nombre de fils constituant l'électrode active, la distance inter-électrodes et la distance inter-fils a été mis en évidence expérimentalement.

La distribution de la densité de courant au plan a été aussi étudiée en géométrie nappe de fils-plan. L'influence de l'insertion d'une grille métallique entre les électrodes sur cette densité a fait l'objet d'une partie du travail expérimental effectué.

En tenant compte des conditions expérimentales dans lesquelles nous avons travaillé, nous pouvons dire que les résultats obtenus sont satisfaisants et en accord avec plusieurs théories, existantes (Townsend et Warburg...).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'études a été consacré à l'étude expérimentale de la décharge couronne positive et négative en géométrie nappe de fils-plan. Le but recherché est de déterminer l'influence de certains paramètres tels que la distance inter-électrodes, la distance inter-fils, le nombre de fils constituant l'électrode haute tension et l'insertion d'une grille métallique entre les électrodes sur les paramètres de la décharge.

La première partie expérimentale consiste à déterminer la tension d'apparition de l'effet couronne pour les deux polarités et étudier la caractéristique $I-V$ avec la variation des paramètres sus-cités. A l'issus de cette partie du travail, nous pouvons conclure :

1. Le courant de décharge augmente avec l'augmentation de la tension appliquée dont la loi de variation est une fonction non linéaire. Pour les deux polarités, la caractéristique $I-V$ a une forme quadratique confirmant la loi de Tawsend.
2. La tension d'apparition de la décharge couronne en polarité positive est souvent plus forte comparée à la décharge négative ($V_0^+ > V_0^-$). Pour un même niveau de tension, le courant de décharge en polarité négative est supérieur à celui généré en polarité positive ($I^- > I^+$).
3. La tension seuil de l'effet couronne augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes dans les deux polarités. Pour les faibles distances inter-électrodes, le courant de décharge croît rapidement avec la tension appliquée.
4. Le courant de décharge augmente avec le nombre de fils constituant l'électrode active. En polarité positive, le courant mesuré en géométries 5fils-plan, 7fils-plan et 9fils-plan est pratiquement le même.
5. En géométrie 3fils-plan, le courant de décharge augmente avec l'écartement des fils.

L'objectif de la seconde partie du travail expérimental est d'étudier la distribution de la densité de courant au plan en configurations d'électrodes sans grille. La densité de courant est déduite du courant collecté par une sonde linéaire rectangulaire placée au milieu du plan de mesure. A partir des résultats obtenus, on conclut :

1. A l'image du courant de décharge, la densité de courant augmente avec la tension appliquée. Pour un même niveau de tension, la densité de courant en polarité négative est supérieure à celle de la polarité positive.
2. La densité de courant diminue au fur et à mesure qu'on éloigne la sonde de sa position centrale.
3. L'augmentation du nombre de fils fait agrandir la valeur de la densité de courant au plan.

Conclusion générale

La dernière partie de ce travail consiste à étudier l'influence de l'insertion d'une grille métallique sur la décharge. Cette partie nous permet de conclure :

1. L'insertion de la grille entre les électrodes entraîne une nette diminution du courant collecté par le plan et la densité de courant pour n'importe quelle position de la sonde.
2. L'uniformité de la densité de courant au plan est obtenue pour des positions éloignées de la grille par rapport au plan.
3. Le courant de la grille augmente avec la tension appliquée. La loi de variation est quadratique.
4. Le courant capté par la grille augmente avec le rapprochement de cette dernière de l'électrode active.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. REGUIG, thèse de doctorat, « contribution à l'étude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans différents types de configurations d'électrodes », Université Djilali LIABES de sidi BEL-ABBES 2017

- [2] R. FATEHI, C Morel, G. CHERON, catalogue « Matières plastique & adjuvant hygiène et sécurité », institut national de recherche et de sécurité, INRS, 2006.

- [3] Mnd A.HANDALA., thèse de doctorat, « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air/solide », Université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2007.

- [4] J.JARRIGE, thèse de doctorat, « étude expérimental des décharges électriques impulsionnelle. Application aux traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface », Université de Rouen, 2008.

- [5] S. LACHAUD, Thèse de doctorat. « Décharge pointe – plan dans les mélanges gazeux correspondant aux effluents industriels: étude électrique et physico-chimique, application à la destruction du dioxyde d'azote », Université de Toulouse France, 2002.

- [6] C. POTVIN, Mémoire de fin d'étude ingénieur, « comportement et effet de la charge d'espace sur les mécanismes des vibrations induites par effet de couronne », Université de Québec, mars, 2000.

- [7] S.ABDALI & CH.AIANE, Mémoire de fin d'étude en Master, « L'effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne », Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2017-2018.

- [8] B.BENAMAR, thèse de doctorat « la faisabilité de l'électrode-filtration d'une atmosphère chargée en poussière de bois étude expérimental et numérique », Université, Henri Poincaré, Nancy, 2008.

- [9] L.HOANG, Thèse de doctorat, « Comparaison des rendements énergétiques de dégradation de trois composés organiques par plusieurs procédés d'oxydation avancés en milieu aqueux », Université de Poitiers, 2009.

Références bibliographiques

- [10] B.MEDJDOUB & Y.AISSOU, Mémoire de fin d'étude en Master, « Décharge couronne fil –plan en polarité positive », Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia, 2021.
- [11] S.EYMERIE, Thèse de doctorat, « Etude expérimentale des décharges atmosphériques générées par impulsions nanosecondes : application aux traitements des particules de suie Diesel », Université de Rouen, 2003.
- [12] F.BITAM-MEGHERBi, Thèse de doctorat, « Etude d'une isolation combinée huile/papier isolant Approche non destructive », Université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2007
- [13] K. KHODJA, mémoire de fin d'études en Master « Modélisation unidimensionnel d'une décharge à barrières diélectrique pour lampe a excimère », Université de MOHAMED Boudiaf, Oran, 2010.
- [14] A.ABDELAHFID & T-A.KHALFA, mémoire de fin d'études en Master « Etude expérimentale de la décharge couronne sous tension alternative 50 Hz », Université de MOHAMED Boudiaf, M'sila, 2020.
- [15] J. Van DURME, J. DEWULF, W. SYSMANS, C. Leys, H. Van LANGENHOVE , Article de revue «Abatement and degradation pathways of toluene in indoor air by positive corona discharge, Chemosphere», 2007.
- [16] L.CHEN, Thèse de doctorat, « étude expérimentale de la décharge couronne pour le traitement de l'air intérieur ». Université Grenoble Alpes, 2019.
- [17] A.LABERGUE, Thèse de doctorat, «Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas-Application au contrôle de décollements d'écoulements. Dynamique des Fluides» Université de Poitiers, Français, 2005.
- [18] H.NAIT IGHIL, mémoire fin d'étude, en Master « Caractérisation de la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique », Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia, 2013-2014.
- [19] O.BEN MESLI & S.BOUARABA, mémoire de fin d'études, en Master «Effet de la pression sur les caractéristiques d'une décharge couronne sous tension continue » Université mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2018.

Références bibliographiques

- [20] A. KASDI, thèse de doctorat, « Etude théorique et expérimentale de la décharge couronne bipolaire », Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia, 2007.
- [21] M.KACI, Thèse de doctorat, « étude et caractérisation des électrets par la méthode de cartographie de surface », Université ABDERRAHMANE. MIRA -BEJAIA, 2016.
- [22] M. BOUFELDJA, Thèse de doctorat « Etude de la cinétique d'une décharge couronne pour la production de l'ozone et l'influence de la nature des parois sur la décomposition de cette molécule » Université Mohamed Boudiaf, Oran, 2015.
- [23] B.KHADDOUR, Thèse de doctorat, « modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée », Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2006.
- [24] I.NDIAYE, Thèse de doctorat « Les propriétés diélectriques de l'air 6 DIG 967 » ; Université de Chicoutimi, Québec, 2003.
- [25] A.FATIHOU, Thèse de doctorat, «Amélioration des performances des matériaux fibreux non-tissés chargés par décharge couronne utilisés pour la filtration de l'air », Université de Poitiers, 2016.
- [26] S.MIHOUBI, I.MEDJANI, mémoire d'Ingénieur « Mesure du champ électrique », Université de Guelma, 2002.
- [27] S.MIHOUBI & H.KERDOUSSI, mémoire de fin d'études en Master « Décharge Couronne en Configuration Coaxiale : Application à la neutralisation des charges », Université 8Mai 1945, Guelma, 2020.
- [28] T.OUNNOUGHI & A.MEGHAR, mémoire de fin d'études, en Master « Etude de la Distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative », Université ABDERRAHMANE MIRA de Bejaia, 2014.
- [29] S.THOMAS, Thèse de doctorat, «La fragmentation moléculaire : modèle statistique et réduction par plasma de l'acétone avec identification en ligne des produits. Physique des plasmas», Université Paris Saclay , 2018.

Références bibliographiques

- [30] R. BOUKADOUM, Thèse de doctorat «Étude des décharges partielles et de leur transition à l'arc dans la connectique aéronautique du futur » Université Paris Saclay , 2018.
- [31] S. AIT-AMAR, mémoire de fin d'études en Master « étude de la décharge couronne positive en géométrie nappe de fil-plan », Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia, 1997.
- [32] R. IKENE, mémoire de fin d'études en Master « influence des paramètres physique de l'air et de la distance inter-électrode sur la décharge couronne positive en géométrie fil-plan », Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia, 1997.
- [33] M. BENYAMINA, Thèse de doctorat « Etude de la production de l'ozone dans les décharges couronne », Université d'Oran des Sciences et de la Technologie, 2014.
- [34] P.SEIMANDI, Thèse de doctorat, « Modélisation mathématique et numérique de décharges couronnes Pour le contrôle d'écoulements », Université Toulouse III, Paul Sabatier, 2010.
- [35] G.ZOUAOUI, mémoire de fin d'études, en Master « Étude de la distribution du champ électrique généré par la décharge couronne en géométrie duale-plan et fil-plan », Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia, 2021.
- [36] D.TIFAOUÏ & A.LADJEL, Mémoire de Fin d'Etudes en Master « Etude de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continue », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2016.
- [37] J.-P. BORRA, Mémoire de Fin d'Etudes en Master «Etude des problèmes liés aux précipitateurs électrostatiques pour le traitement des cendres volantes», Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia ,1999.
- [38] T.LACHAUX, Thèse de doctorat «Etude des effets de la haute pression sur la structure et la dynamique des flammes turbulentes de pré mélangé pauvre de méthane-air», Université d'Orléans, 2004.

Références bibliographiques

- [39] T.IMBERT. Thèse de doctorat « Caractérisation de la rigidité diélectrique de fluides et d'une roche en fonction de leur conductivité, de la température et de la pression », Université de Pau et des Pays de l'Adour, Français, 2019.
- [40] B.KHIR, ABD. ZIDI & H.LABBI, Mémoire de Fin d'Étude en Master « Etude et réalisation d'un sectionneur de haute tension », Université ECHAHID HAMMA LAKHDAR d'El-Oued, 2021.
- [41] H.KADI, Mémoire de Fin d'Études en magister « influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [42] F. KOLIATENE, Thèse de doctorat, « contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique », Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009
- [43] Z.ANANE, Thèse de doctorat, «Modèle dynamique de l'effet couronne pour l'étude de la propagation de la surtension le long des lignes de transmission HT en utilisant l'EMTP», Université FERHAT Abbas, SETIF 1, 2018.
- [44] A.GOUADJELIA & A.BOUAZIZ, mémoire de fin d'études, en Master « Influence De L'Effet Couronne Sur La Propagation Des Surtensions Dans Les Lignes De Transmission Haute Tension », Université L'Arbi Ben M'hidi Oum El,Bouaghi, 2021.
- [45] H.AIT SAID, Thèse de doctorat « influence de l'humidité sur la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique d'aérosols », Université ABDERRAHMANE MIRA, BEJAIA.
- [46] O.IDOUGHI & A.AMEUR, mémoire de fin d'études, en Master « étude de l'effet couronne dans les précipitateurs électrostatique d'aérosols », Université ABDERRAHMANE MIRA, BEJAIA, 2017.
- [47] N.BENCHERIF & T.DJOUADI, mémoire fin d'étude en Master « Etude expérimentale de la décharge couronne continue en polarité positive et négative dans la configuration fils-plans », Université ABDERRAHMANE MIRA, Bejaia 2017.
- [48] P.MOUREAUX & J-L. POYARD, catalogue « Phénomènes électrostatiques » Articles de l'institut national de recherche et de sécurité (INRS) ,2019.
- [49] H.BOUSLIMANE, mémoire de fin d'études, en Master «Caractérisation de certains isolants utilisés dans les équipements électriques », Université ABDERRAHMANE MIRA, BEJAIA, 2021.

Références bibliographiques

- [50] N. NAUDE, Thèse de doctorat « étude électrique de la physique d'une décharge de Townsend a la pression atmosphérique et de son interaction avec un générateur », UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER U.F.R., 2005.
- [51] E. Warburg, Thèse de doctorat « Characteristic des spitzenstromes », Handbuch der Physi, Vol. 14, Berlin, Springer, 1927.