

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Université ABDREHMANE MIRA-Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

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

Option : Réseaux électriques

Thème

*Distribution de la densité de courant d'une décharge
couronne en géométrie nappe de fils-plan*

Réalisé par :

- ❖ KABOUCHE Kousseila
- ❖ TATAH Mahrez

Encadré par :

Mr. OUATAH El Hanafi

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier ALLAH de nous avoir guidés vers le droit chemin, de nous avoir aidé tout au long de nos années d'étude.

Un grand merci à notre encadreur de Mémoire : Mr OUATAH El Hanafi qui a fourni des efforts énormes, par ses Informations, ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier le président du jury, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont toujours porté pour mes études, je ne les remercierai jamais assez, pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté. Que Dieu leurs accordent une très longue vie.

À mes frères et sœurs, à toute ma famille et à tous mes amis.

K.K

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers et précieux parents qui m'ont toujours soutenu, et à l'intérêt qu'ils ont toujours porté pour mes études, je ne les remercierai jamais assez, pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté. Que Dieu leurs accordent une très longue vie.

À mes frères et sœurs, à toute ma famille et à tous mes amis.

Mahrez

Nomenclature

Symbole	Définition	unité
E	Champ électrique	kV/m
V _a	Tension appliquée	kV
h	La distance inter- électrode	mm
A	Atomes	
e	Charge élémentaire (1.6x10 ⁻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
Øfil	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 figures

Chapitre I

FIGURE I. 1: CARACTERISTIQUE COURANT-TENSION D'UNE DECHARGE COURONNE DANS L'AIR A PRESSION ATMOSPHERIQUE	4
FIGURE I. 2: DIFFERENTS TYPES DE GEOMETRIE D'ELECTRODES	8
FIGURE I. 3: SCHEMA REPRESENTATIF DE LA DECHARGE COURONNE CONTINUE POSITIVE EN GEOMETRIE	10
FIGURE I. 4: DESCRIPTIF DE LA DECHARGE COURONNE NEGATIVE.....	11
FIGURE I. 5: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE DBD.....	12
FIGURE I. 6: CONFIGURATIONS CLASSIQUES DE LA DBD : (A) PLANAIRE ET (B) CYLINDRIQUE.....	12
FIGURE I. 7: PRINCIPE DE LA PRECIPITATION ELECTROSTATIQUE (MODELE CYLINDRIQUE).....	16
FIGURE I. 8: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES LIGNES DE CHAMP POUR UNE LIGNE DE TRANSMISSION	17

Chapitre II

FIGURE II 1: SCHEMA DE L'INSTALLATION HAUTE TENSION.....	20
FIGURE II 2: PHOTO DE LA SOURCE HAUTE TENSION CONTINUE	21
FIGURE II 3: PHOTO DE LA SOURCE BASSE TENSION SG1	21
FIGURE II 4: SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	22
FIGURE II 5: SONDE LINEAIRE DANS L'ETUDE DE LA DISTRIBUTION DE LA DENSITE DE COURANT	23
FIGURE II 6: PHOTO DE PROFIL DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	23
FIGURE II 7 : PHOTOS DE LA GRILLE METALLIQUE.....	24
FIGURE II 8: PHOTO DU VOLTMETRE DE CRETE	25
FIGURE II 9: APPAREILS UTILISES DANS LA MESURE DU COURANT DE DECHARGE	25
FIGURE II 10: PICO-AMPEREMETRE A AIGUILLE UTILISE DANS LA MESURE DU COURANT DE LA SONDE.....	26
FIGURE II 11: THERMOMETRE A AIGUILLE UTILISE DANS LA MESURE DE TEMPERATURE	27
FIGURE II 12: HYGROMETRE A CHEVEUX UTILISE DANS LA MESURE D'HUMIDITE RELATIVE.....	27
FIGURE II 13: BAROMETRE A MERCURE DISPONIBLE AU LABORATOIRE	28

Chapitre III

FIGURE III 1: CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION POUR LES DEUX POLARITES	30
FIGURE III 2: CARACTERISTIQUES I-V EN POLARITE POSITIVE POUR DIFFERENTES DISTANCES INTER- ELECTRODES	31
FIGURE III 3 : CARACTERISTIQUES I-V EN POLARITE NEGATIVE POUR DIFFERENTES DISTANCES INTER-ELECTRODES	31
FIGURE III 4: CARACTERISTIQUE I-V EN POLARITE NEGATIVE POUR DIFFERENTS DIAMETRES DU FIL.....	32
FIGURE III 5: CARACTERISTIQUE I-V EN POLARITE POSITIVE POUR DIFFERENTS DIAMETRES DU FIL.....	33
FIGURE III 6 : TENSION DE CLAQUAGE EN FONCTION DE NOMBRE DE FILS	34
FIGURE III 7: CARACTERISTIQUES I-V EN POLARITE NEGATIVE POUR DIFFERENTS NOMBRES DE FILS	34
FIGURE III 8: CARACTERISTIQUES I-V EN POLARITE POSITIVE POUR DIFFERENTS NOMBRES DE FILS	35
FIGURE III 9: CARACTERISTIQUES I-V EN POLARITE NEGATIVE POUR DIFFERENTES DISTANCES INTER-FILS.....	35
FIGURE III 10: CARACTERISTIQUES I-V EN POLARITE POSITIVE POUR DIFFERENTES DISTANCES INTER-FILS.....	36
FIGURE III 11: DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE POSITIVE.....	37
FIGURE III 12: DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE NEGATIVE	37
FIGURE III 13 : DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE POUR LES DEUX POLARITES (VA=26 kV)	38
FIGURE III 14 : SCHEMA DESCRIPTIF DE LA REPARTITION DE LA DENSITE DU COURANT IONIQUE AU PLAN POUR UNE GEOMETRIE POINTE-PLAN.....	38

FIGURE III 15 : DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE POSITIVE POUR UN NOMBRE DE FILS 3	39
FIGURE III 16 : DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE NEGATIVE POUR UN NOMBRE DE 3 FILS-PLAN	40
FIGURE III 17 : DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE POSITIVE POUR UNE GEOMETRIE 5 FILS-PLAN.....	41
FIGURE III 18: DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE NEGATIVE POUR UN NOMBRE DE FILS 5	41
FIGURE III 19: DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE NEGATIVE SANS ET AVEC GRILLE	42
FIGURE III 20: DENSITE DE COURANT EN FONCTION DE LA POSITION DE LA SONDE EN POLARITE POSITIVE SANS ET AVEC GRILLE	42

Liste des tableaux

TABLEAU III 1: PARAMETRES DU MODELE DE TOWNSEND POUR LES DEUX POLARITES..... 30

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Théorie de la décharge	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités sur les décharges couronnes	3
I.2.1. Définition de la décharge couronne.....	3
I.2.2. Description de la décharge couronne.....	3
I.2.3. Domaine d'existence de la décharge couronne.....	4
I.3. Décharge couronne	6
I.3.1. Mécanisme de développement de la décharge couronne	6
I.3.2. Théorie de Townsend.....	6
I.3.3. Décharge par streamers	7
I.5. Types de décharges couronnes.....	9
I.5.1. Décharge à tension alternative	9
I.5.2. Décharge couronne positive	9
I.5.3. Décharge couronne négative	10
I.5.4. Décharge à barrière diélectrique.....	11
I.6. Paramètres influençant la décharge couronne	12
I.6.1. Facteurs physico-chimiques	13
I.6.2. Facteurs géométriques.....	13
I.6.3. État de surface.....	14
I.6.4. Facteurs électriques.....	14
I.7. Applications de la décharge couronne.....	15
I.7.1. Traitement de surface	15
I.7.2. Production d'ozone	15
I.7.3. Précipitation électrostatique	16
I.8. Problèmes liés à la décharge couronne.....	16
I.8.1. Pertes dans les lignes de haute tension	16
I.8.2. Autres problèmes liés à la décharge couronne.....	17
I.9. Conclusion	18
Chapitre II : Description du dispositif expérimental	
I.1. Introduction.....	19
II.2. Les dispositif expérimental.....	19
II.2.1. Source haute tension continue.....	19

II.2.2. Configuration des électrodes.....	22
II.3. Forme de la grille métallique	23
II.4. Appareils de mesure	24
II.4.1. Mesure de la haute tension.....	24
II.4.2. Mesure du courant de décharge	25
II.4.3. Mesure du courant collecté par la sonde	26
II.5. détermination de la densité de courant.....	26
II.5.1. Mesure des conditions atmosphériques d’expérimentation	27
II.6. Conclusion.....	28

Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

III.1. Introduction	29
III.2. Caractéristiques courant-tension (I-V).....	29
III.2.1. Influence de la polarité de tension	29
III.2.2. Influence de la distance inter-électrodes (hauteur H).....	31
III.2.3. Influence du rayon de courbure	32
III.3. Nappe de fils plan.....	33
III.3.1. Tension de claquage en fonction de nombre de fils	33
III.3.2. Influence du nombre de fils sur le courant de décharge	34
III.3.3. Influence de la distance inter-fils.....	35
III.4. Densité du courant.....	36
III.4.1. Influence de la polarité de la tension sur la densité de courant	36
III.4.2. Influence du nombre de fils sur la densité de courant.....	39
III.5. Système d’électrodes fils-grille-plan	41
III.5.1. Influence de la position de la grille sur la densité de courant.....	41
III.6. Conclusion	43
Conclusion générale	44

Introduction générale

Introduction générale

Les décharges dans un gaz sont à l'origine associées au courant traversant l'espace inter-électrodes. Plus généralement, elles regroupent tous les processus tels que l'ionisation, l'attachement ou la photoémission qui interviennent dans un gaz lorsqu'un champ électrique suffisamment important lui est appliqué, mais également les écoulements de particules chargées et neutres qui s'en suivent. Les phénomènes mis en jeu dans ces décharges sont complexes et variés selon, entre autres, la nature et la pression du gaz, et l'importance du champ électrique.

Une décharge corona est une décharge à faible courant qui se produit à une tension entre des électrodes présentant des rayons de courbure très différents (par exemple, pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre). Si la tension appliquée aux bornes des électrodes est inférieure à une certaine tension de plusieurs milliers de volts (appelée « tension de seuil »), l'air présent dans l'espace entre les électrodes peut être assimilé à un isolant. De très faibles courants, de l'ordre du nano ampère (nA), circulent entre les électrodes en raison de l'expulsion de paires électron-ion d'origine naturelle (radioactivité, rayonnement cosmique, etc.).

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. Dans le souci de comprendre certains aspects de l'effet couronne, des études ont été déjà réalisées au Laboratoire Génie Electrique de Béjaia avec des électrodes de formes diverses (pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre ...).

Le présent travail s'inscrit dans la suite des travaux déjà réalisés au laboratoire et qui consiste à caractériser la décharge couronne, positive et négative, en géométrie nappe de fils-plan avec variation de deux paramètres géométriques (distance inter-électrode et rayon de courbure de l'électrode haute tension, distance inter-fils).

Le travail expérimental à réaliser a deux objectifs principaux : le premier objectif concerne l'étude de la caractéristique courant-tension et le deuxième consiste à étudier la distribution de la densité de courant au plan.

Le présent manuscrit est organisé en trois chapitres.

- ❖ Le premier chapitre sera consacré à l'étude théorique des décharges couronnes. Dans ce chapitre, nous parlerons sur les mécanismes de formation des décharges couronnes,

l'influence des différents paramètres sur cette dernière et les applications de cette décharge dans le domaine industriel.

- ❖ Dans le deuxième chapitre nous présenterons le dispositif expérimental utilisé lors des manipulations au laboratoire et les méthodes de mesure.
- ❖ Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations.
- ❖ Enfin, nous terminerons ce manuscrit par une conclusion générale.

Chapitre I : Théorie de la décharge

I.1. Introduction

De nos jours, les décharges couronnes sont de plus en plus utilisées dans plusieurs secteurs industriels. Ces décharges pré-disruptives apparaissant sous la forme de lueurs diverses qui prennent naissance au voisinage d'une électrode à faible rayon de courbure ou dans un Champ non uniforme.

Dans ce chapitre, nous aborderons les notions générales de la décharge couronne, à savoir : la définition de la décharge couronne, les différents régimes et les mécanismes d'initiation de cette décharge.

I.2. Généralités sur les décharges couronnes

I.2.1. Définition de la décharge couronne

La décharge corona est l'une des techniques les plus utilisées pour générer du plasma à pression atmosphérique. Cela se produit entre deux électrodes asymétriques en appliquant un fort champ électrique. Cette technologie permet de modifier l'état chimique et physique des surfaces des matériaux diélectriques et conducteurs, élargissant ainsi leurs domaines d'utilisation. La décharge corona est également connue pour être la méthode la plus fiable et la plus efficace pour déposer des charges positives et négatives sur la surface de ces matériaux, en fonction de la polarité de la tension appliquée au système d'électrodes utilisé. Par conséquent, la décharge corona présente un intérêt croissant en raison de la nécessité de charger des matériaux polymères pour diverses applications.

I.2.2. Description de la décharge couronne

Toutes les décharges pré-disruptives apparaissant sous forme de lueurs diverses provenant du voisinage d'électrodes à faible rayon de courbure ou de champs non uniformes sont classées comme décharges corona [1]. La décharge couronne est associée à l'apparition d'une avalanche d'électrons ou multiplication d'électrons, qui se développe dans un intervalle de gaz séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torr à quelques atmosphères. La décharge corona se manifeste dans des conditions naturelles. Cela se produit lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint la valeur maximale du champ d'ionisation du gaz et se manifeste sur toute la plage de fréquences de tension. La décharge corona est caractérisée par des phénomènes optiques, acoustiques et

électriques [2]. L'avantage de la décharge corona est qu'elle peut fonctionner avec tous les types de sources d'énergie, mais la principale difficulté rencontrée avec ce type de décharge est la transition en arc [3].

I.2.3. Domaine d'existence de la décharge couronne

Au départ, une simple collecte de charges puis une multiplication électronique seront effectuées pour atteindre une troisième phase qui correspond au domaine d'existence de la décharge couronne. En effet, lors d'un certain haut potentiel, le champ sera d'envergure pour ioniser le gaz qui est au voisinage des électrodes. A ce niveau, la décharge est auto-entretenu où peuvent apparaître des dards où ce qu'on appelle les streamers. Ces derniers font l'objet de la composante impulsionnelle du courant et de sa transition vers l'arc électrique (Fig. I.1) [4].

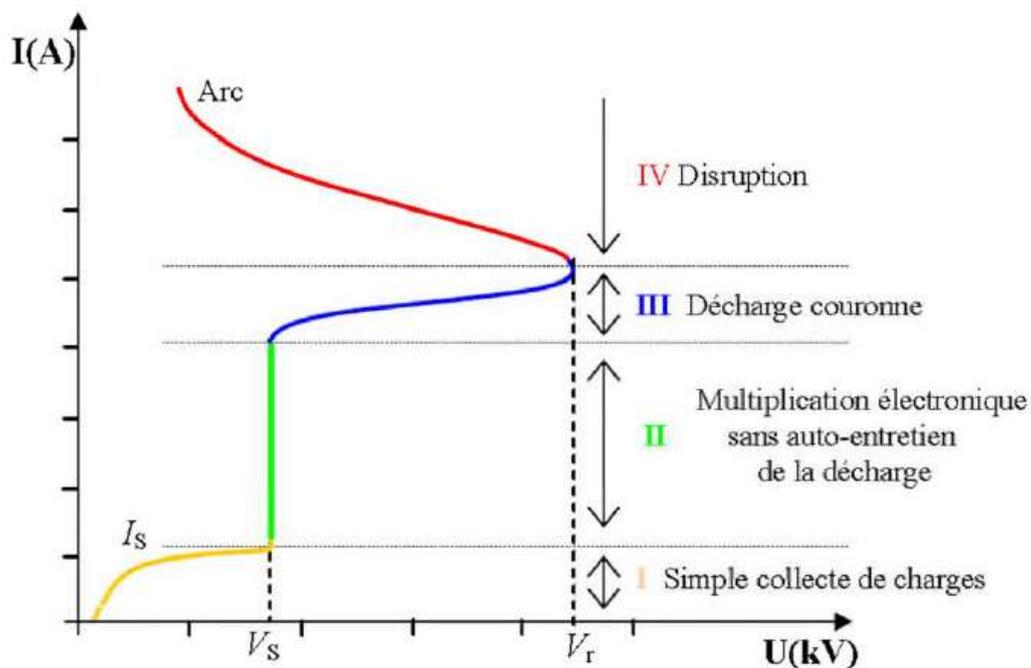


Figure I. 1: Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique

Régime I : Collecte de charge.

Ce régime consiste à la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu, ces espèces sont produites par l'impact des rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter-électrodes [5]. Le courant est très faible et il est dû à la présence d'ions issus de

la radioactivité naturelle ou rayonnement cosmique. Dans ce cas le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique [6].

Régime II : Régime impulsif ou de décharge de Trichel non autoentretenu (positive et négative)

Lorsque la tension atteint une valeur seuil V_0 , le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule environnante. Le processus d'avalanche électronique de Townsend se déclenche, alors sans que le critère d'auto entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire, on parle de régime de Townsend non entretenu. Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très petite variation de la tension appliquée [1].

Régime III : Régime de décharge couronne.

Au-dessus de la tension seuil d'auto entretien, des impulsions de Trichel deviennent régulières, la création d'électrons germes par une source extérieure n'est plus nécessaire.

La décharge ne s'éteint plus car la condition d'auto entretien est atteinte. La composante continue (représentative de la charge d'espace) augmente avec la tension.

Si la tension est plus élevée, la fréquence des impulsions devient de plus en plus élevée, le temps entre deux impulsions successives devient plus petit que la durée d'une impulsion : ce régime est donc caractérisé par l'absence d'impulsions. Cependant, physiquement il n'est que la continuité du régime de Trichel [1].

Régime IV : Régime disruptif ou *Régime d'arc*

Au-delà d'une tension de rupture V_r , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit E/N est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisations deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électrique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe de l'état de plasma hors équilibre à l'état de plasma thermique [1]. Les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. C'est le régime des décharges disruptives tel que les arcs électriques [6].

I.3. Décharge couronne

I.3.1. Mécanisme de développement de la décharge couronne

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [7] :

Le premier concerne les décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier et notamment les effets secondaires à la cathode : C'est la décharge de Townsend.

Le deuxième modèle mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concernant les décharges à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale. C'est la décharge par streamers.

I.3.2. Théorie de Townsend

Dans des conditions normales, les gaz sont généralement de bons isolants électriques, mais soumis à des contraintes extérieures (rayonnement optique, chaleur, champs électriques, etc.) ils peuvent devenir conducteurs. La transition d'un gaz d'un état isolant à un état conducteur sous l'action d'un champ électrique peut être simplement décrite par la théorie de Townsend. Considérons pour cela deux électrodes planes, séparées d'une distance d dans un gaz à pression P et contenues dans une enceinte. Si l'on applique une différence de potentiel V entre ces électrodes, un champ électrique d'intensité uniforme apparaîtra dans cet intervalle :

$$E = \frac{V}{d} \dots\dots\dots (I.1)$$

Il existe dans le gaz un petit nombre d'électrons libres, dits électrons germes, provenant des effets d'agents ionisants naturels. Par souci de simplicité, supposons que, par unité de temps, n_0 électrons initiaux sont créés par effet photoélectrique à la cathode du système d'électrodes. Accélérés par le champ électrique, ces électrons pourront produire des réactions d'ionisation du gaz et induire ainsi un courant électrique, si au cours des chocs qu'ils subissent avec les molécules du gaz, ils peuvent acquérir une énergie We égale ou supérieure à l'énergie d'ionisation Wi des molécules M ($We \geq Wi$).

Désignons par α , 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.

Si on suppose que $n(x)$ électrons sont formés à une distance x de la cathode, alors ils vont produire $dn(x)$ électrons sur une distance dx :

$$dn(x) = \alpha \cdot n(x) \cdot dx \dots\dots\dots (I.2)$$

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

$$n(d) = n_0 \cdot \exp(ad) \dots\dots\dots (I.3)$$

La charge collectée à l'anode vaut :

$$e \cdot n(d) = e \cdot n_0 \cdot \exp(ad) \dots\dots\dots (I.4)$$

D'où le courant collecté est :

$$i = i_0 \cdot \exp(ad) \dots\dots\dots (I.5)$$

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.5) et 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 [6].

I.3.3. Décharge par streamers

Pour qu'un ion se déplace jusqu'à la cathode il lui faut 10^{-5} à 10^{-4} s. L'expérience réalisée par Meek, Raether et Loeb a montré que le temps de la formation d'étincelle est de 10^{-7} s et moins, donc l'émission secondaire ne peut expliquer la décharge par étincelle [8].

La théorie des streamers justifie par des données expérimentales la grande vitesse avec laquelle se développe l'étincelle : une première avalanche de Townsend faiblement luminescente prend naissance. Sous l'effet de la photo-ionisation due aux rayonnements émis par cette avalanche, de nouvelles avalanches prennent naissance et donnent naissance à leur tour à d'autres avalanches dans le volume du gaz.

Au cours de leur développement, les diverses avalanches se rattrapent les unes, les autres et se confondent en donnant un canal conducteur du streamer.

La grande vitesse à laquelle se produit la décharge est due au fait que le streamer est conduit par plusieurs avalanches qui se développent simultanément entre les deux électrodes.

I.4. Différents types de configuration des électrodes

Les décharges couronnes sont des décharges électriques près-disruptives qui se développent dans l'intervalle gazeux. Parmi les configurations d'électrodes les plus utilisées, on trouve les systèmes pointe-plan, couteau-cylindre, fil-plan, fil-cylindre ou cylindre-cylindre,

La distance inter-électrode est habituellement de l'ordre du centimètre [1].

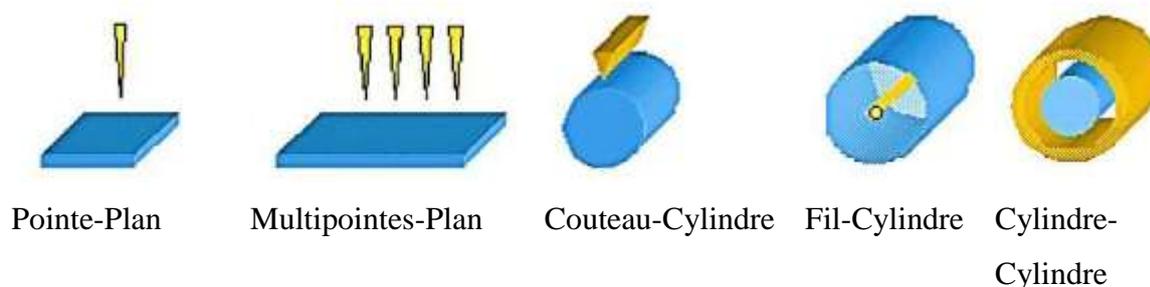


Figure I. 2: Différents types de géométrie d'électrodes

Du fait de cette dissymétrie, le champ entre les deux électrodes est hétérogène. Les décharges couronne peuvent s'appliquer à des milieux variés à des pressions allant de quelques centaines de pascals à quelques atmosphères.

Suivant les applications envisagées, la haute tension, qui est généralement appliquée à l'électrode active, peut être pulsée, alternative ou continue de polarité positive ou négative.

L'utilisation d'une alimentation pulsée permet de générer de fort courant pendant des temps très court et donc d'obtenir sans passage à l'arc des électrons de haute énergie, adaptés au traitement de certains polluants. Les tensions de travail habituellement utilisées varient de quelques kilovolts à une trentaine de kilovolts environ tandis que les puissances dépassent rarement quelques kilowatts.

I.5. Types de décharges couronnes

La décharge corona peut être positive ou négative, selon la polarité de l'électrode à faible rayon de courbure. Si elle positive, on dit que la décharge corona est positive, sinon elle est négative, car on peut aussi ajouter une décharge corona en régime alternatif.

I.5.1. Décharge à tension alternative

En appliquant un champ alternatif au gaz, le comportement du système dépendra de la distance entre les électrodes et de la fréquence de la tension d'alimentation. En effet, si le temps inter-parcours des particules chargées de gaz est inférieur au temps d'inversion de polarité, la charge d'espace générée par la décharge quittera l'espace inter-électrodes avant que la décharge suivante ne se produise. Par conséquent, le comportement de base du système consistera en des alternances de décharges indépendantes positives et négatives.

En augmentant la fréquence du signal électrique, les ions n'ont pas le temps de s'évacuer avant que la polarité de la tension appliquée ne change, et la charge d'espace résiduelle persistera dans l'espace inter-électrodes, ce qui réduit le champ électrique et la force ionique. Ainsi, pour une même tension, la décharge en tension alternative n'est pas aussi intense que la décharge en tension continue [10].

I.5.2. Décharge couronne positive

La figure (I.3) montre un système d'électrodes en géométrie fil-plan, où l'électrode active portée au haut potentiel est le fil (anode) qui est suspendu d'une certaine hauteur h du plan (cathode) qui constitue l'électrode passive puisque cette dernière est mise à la terre. En alimentant l'électrode active positivement, on aura donc une décharge continue positive. En sachant que le champ électrique est plus intense sur la périphérie de l'anode, des électrons seront produits par photo-ionisation et seront accélérés, attirés vers le fil, et autour de celui-ci, se développe alors une région de forte ionisation (zone en pointillé). Les ions positifs ainsi créés seront repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance du fil (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique est trop faible (< 30 kV/cm dans l'air à pression atmosphérique) et ne permet plus la création d'ions positifs.

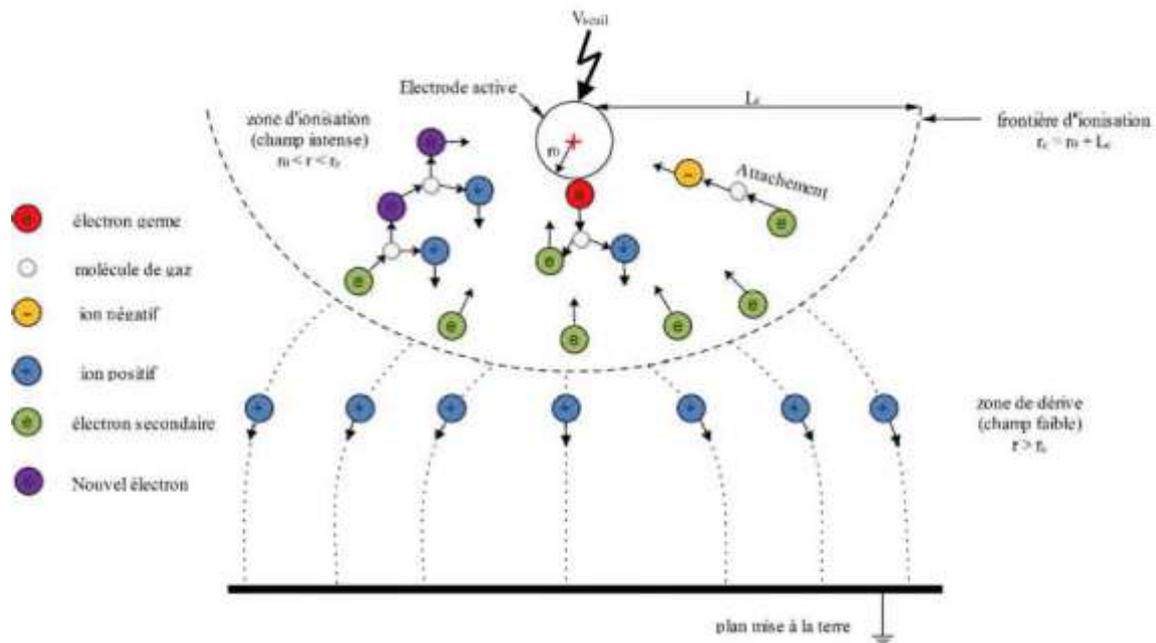


Figure I. 3: Schéma représentatif de la décharge couronne continue positive en géométrie fil-plan

Les ions positifs migrent donc vers la cathode (le plan). Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs, est appelée région de « dérive ». Pour cette décharge, il y'a avancement des streamers qui se propagent en quelque sorte comme une extension de l'anode.

D'après les modélisations de LOISEAU [9], la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de 210 m/s) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence de 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires [10].1

I.5.3. Décharge couronne 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.4). 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 [9, 10]. 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 [9, 10]. Si le niveau de tension appliquée 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.

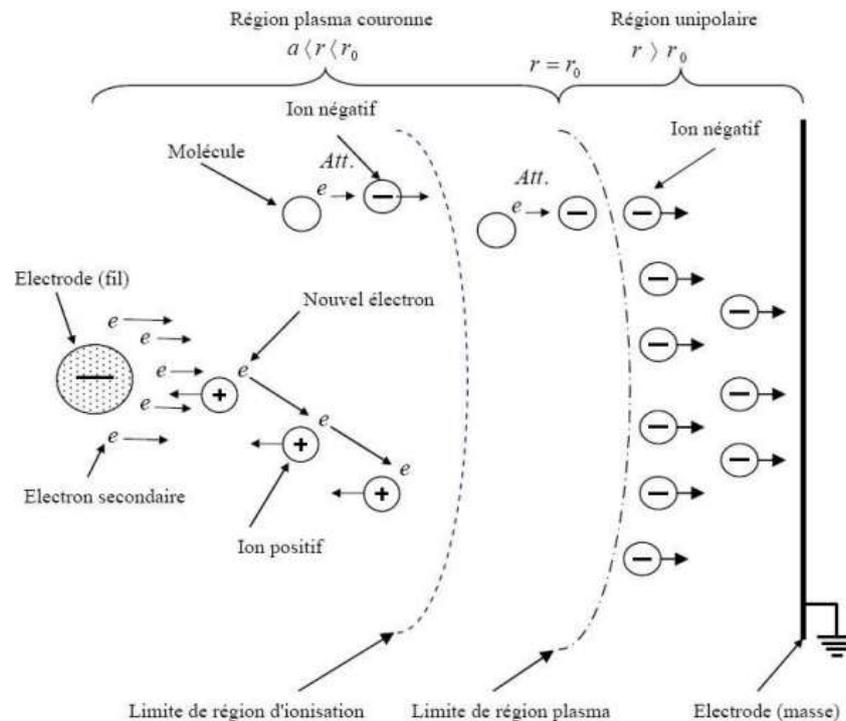


Figure I. 4: Descriptif de la décharge couronne négative

I.5.4. Décharge à barrière diélectrique

Le risque des décharges en tension continue telle que la décharge couronne est le passage à l'arc provoqué par l'accumulation de charges électriques. Ce risque est limité dans les décharges à barrière diélectrique (DBD) grâce à la présence d'au moins une couche de matériau diélectrique disposée sur ou entre les deux électrodes. Lorsque la tension appliquée atteint la tension d'amorçage, une micro-décharge s'établit entre l'électrode et le diélectrique (Figure I-5(a)) [11]. Aux points de jonction de la décharge avec le diélectrique, des particules chargées (électrons ou ions) s'accumulent en surface, générant un champ électrique qui s'oppose au champ externe. Le champ électrique subi par le gaz diminue donc progressivement au fur et à mesure que les charges électriques se déposent sur le diélectrique, ce qui conduit à l'extinction de la décharge avant son passage à l'arc. Alors que la tension augmente, de nouvelles micro-décharges apparaissent (Figure I-5(b)) [11]. Quand la polarité s'inverse, la tension externe nécessaire à l'amorçage de la micro-décharge est plus faible qu'au premier cycle du fait des charges accumulées précédemment (Figure I-5(c)) [11]. En résumé, la présence du diélectrique permet

de développer des micro-décharges de quelques centaines de micromètres réparties sur toute la surface des électrodes tout en limitant le risque du passage à l'arc.

La DBD est excitée en tension alternative avec une fréquence généralement de quelques kilohertz (comprise entre 50 Hz et 1 MHz). Par ailleurs, les distances inter-électrodes généralement rencontrées sont de l'ordre de quelques millimètres.

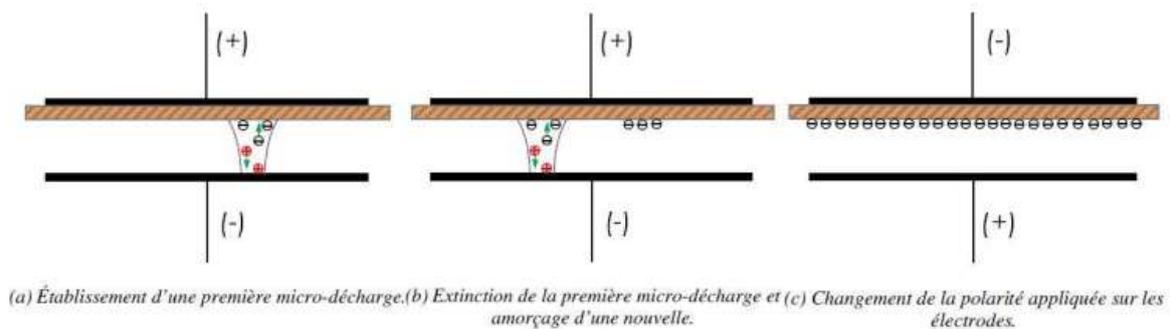


Figure I. 5: Principe de fonctionnement d'une DBD

De nombreuses configurations existent ; les plus courantes mettent en œuvre des électrodes planes parallèles ou cylindriques concentriques (Figure I-6). Les matériaux utilisés pour le diélectrique sont généralement le verre, la silice, la céramique et l'émail mince ou la couche en polymère. Dans certaines applications, des revêtements protecteurs ou fonctionnels sont ajoutés.

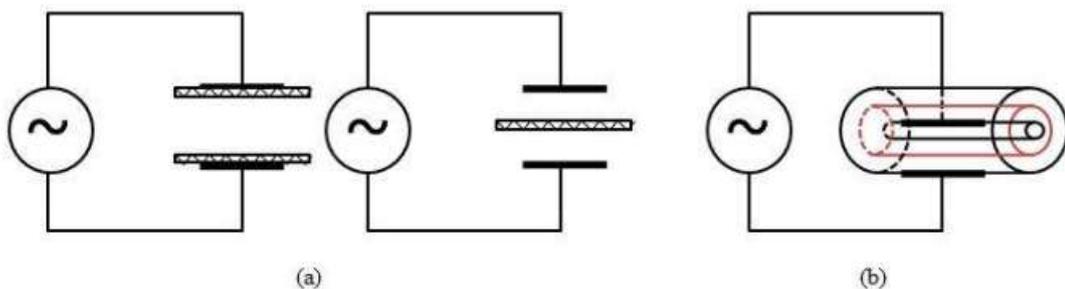


Figure I. 6: Configurations classiques de la DBD : (a) planaire et (b) cylindrique

I.6. Paramètres influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent affecter les caractéristiques de la décharge couronne, et ces facteurs sont divisés en trois catégories : les facteurs physico-chimiques, les facteurs géométriques et les facteurs électriques [12].

I.6.1. Facteurs physico-chimiques**a. La température**

Une augmentation de la température entraîne une augmentation du libre parcours moyen. La rigidité diélectrique diminue donc, ce qui favorise l'effet couronne. Des tests expérimentaux ont montré qu'une augmentation de la température entraîne une diminution du seuil corona et une augmentation du courant de la décharge [13].

b. L'humidité

L'humidité affecte de manière significative la rigidité diélectrique de l'air, et ce fait est très important à prendre en compte lorsque le champ électrique est irrégulier. Une humidité élevée fait que les électrons libres présents dans l'air se collent davantage les uns aux autres en raison de la forte affinité électronique de la vapeur d'eau présente dans l'air. De plus, les photons sont davantage absorbés au début des streamers (zone de photo ionisation secondaire), en raison de la conductivité plus élevée de l'air. Le seuil d'apparition d'une décharge corona se produit même à des tensions inférieures de 90 % à celles d'une humidité relative de 5 %. La chute de tension est due à l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente [6,14, 15].

c. La pression atmosphérique

Le courant de la décharge couronne est fortement influencé par la pression. Dans une étude menée par Nouri et al. l'effet de la pression a été examiné dans la plage de 0,1 à 1 bar sur les caractéristiques de la décharge couronne dans une configuration fil-plan. Les chercheurs ont constaté que l'effet de la pression sur le seuil de la décharge couronne est comparable à celui de l'espace inter-électrodes. Conformément à la loi de Paschens, lorsque la pression autour des électrodes augmente, le nombre de particules présentes dans l'espace entre les électrodes augmente également. Cette augmentation du nombre de particules chargées entraîne une diminution de la distance moyenne qu'elles parcourent avant d'entrer en collision avec d'autres particules [6, 16].

I.6.2. Facteurs géométriques**a. Le Rayon de courbure**

Le rayon de courbure a une influence significative 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 [17]. Sous les mêmes conditions atmosphériques, le courant de décharge diminue considérablement avec l'augmentation du rayon de courbure.

b. La distance inter-électrodes

Des expériences ont révélé que le courant de décharge augmente considérablement et croît plus rapidement avec la tension appliquée lorsque les distances inter-électrodes sont faibles. De plus, les seuils d'apparition de la décharge couronne se manifestent pour de faibles valeurs de tension, en particulier dans le cas des petites distances inter-électrodes [17].

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) [18, 19]. Il a été constaté que les valeurs du 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.

I.6.3. 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 [15].

I.6.4. Facteurs électriques

La décharge couronne est influencée par les paramètres électriques de la tension appliquée au système d'électrodes à savoir [18] :

a. Forme d'onde

La forme d'onde de la tension appliquée à l'électrode active est importante. Les formes d'onde alternatives, telles que la sinusoïde, la triangulaire et la rectangulaire, peuvent avoir des effets différents sur la décharge couronne. Par exemple, une onde sinusoïdale est généralement moins susceptible de provoquer une décharge couronne qu'une onde rectangulaire en raison de sa douceur.

b. L'amplitude

Plus la tension est élevée, plus le risque de décharge couronne est grand. Cela est particulièrement vrai lorsque les conducteurs sont rapprochés ou lorsque des pointes ou des arêtes vives sont présentes. Lorsque l'amplitude de la tension dépasse un certain seuil, l'air environnant est ionisé, créant ainsi la décharge couronne.

c. La fréquence

Le courant de décharge et le nombre de décharges par unité de temps augmentent avec l'augmentation de la fréquence d'alimentation. Plus la fréquence est élevée et plus le temps entre la dernière décharge d'une demi-alternance et la première de la demi-alternance suivante est court. Les charges ont moins de temps de s'écouler et renforcent ainsi le champ électrique [20].

I.7. Applications de la décharge couronne**I.7.1. Traitement de surface**

La décharge couronne peut être utilisée pour modifier la mouillabilité des surfaces de matériaux, tels que les polymères, le verre et les métaux. Cela peut améliorer l'adhésion des revêtements, des peintures et des colles.

I.7.2. Production d'ozone

L'ozone est un gaz oxydant puissant qui peut être utilisé pour désinfecter l'eau et l'air, dégrader les polluants et blanchir les textiles. La décharge couronne est l'une des méthodes les plus courantes de production d'ozone.

I.7.3. Précipitation électrostatique

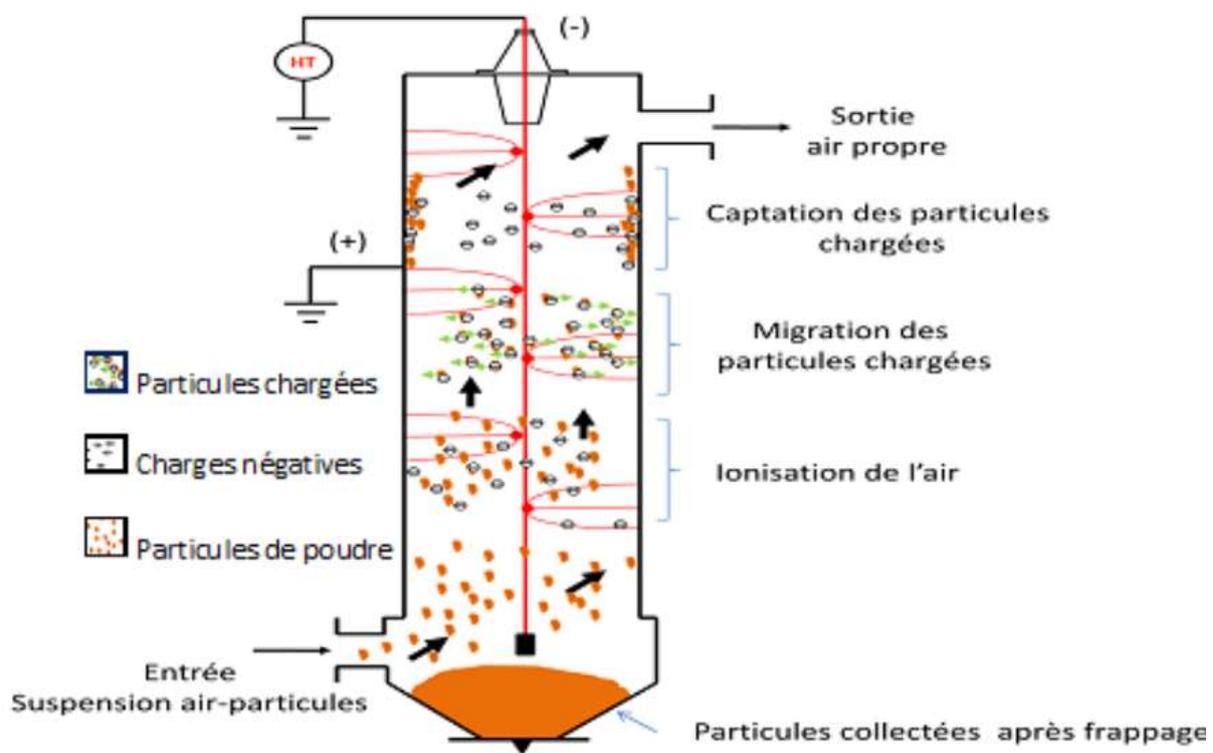


Figure I. 7: Principe de la précipitation électrostatique (modèle cylindrique)

La précipitation électrostatique est une technique utilisée pour capturer les particules en suspension dans un gaz, telles que la poussière, les fumées et les brouillards. La décharge couronne charge les particules, ce qui les attire vers des collecteurs chargés de manière opposée.

I.8. Problèmes liés à la décharge couronne

I.8.1. Pertes dans les lignes de haute tension

L'un des problèmes rencontrés dans les lignes de transmission d'électricité à haute tension est celui de la perte de puissance électrique à cause de l'effet couronne Figure (I.8). Ces pertes sont négligeables par beau temps mais deviennent importantes par temps de pluie. En effet les gouttes d'eau sur les fils conducteurs s'allongent sous l'action du champ électrique et donnent un effet de pointe très intense déclenchant un effet couronne et les pertes sont multipliées par 100 au début d'une pluie. Quand le fil est mouillé, il n'y a plus formation de gouttes et les pertes diminuent. Un fil gras favorise la formation des gouttes, donc les pertes par effet couronne, tandis qu'un fil propre les réduit. Les pertes peuvent atteindre 100 kW par km de ligne [13].

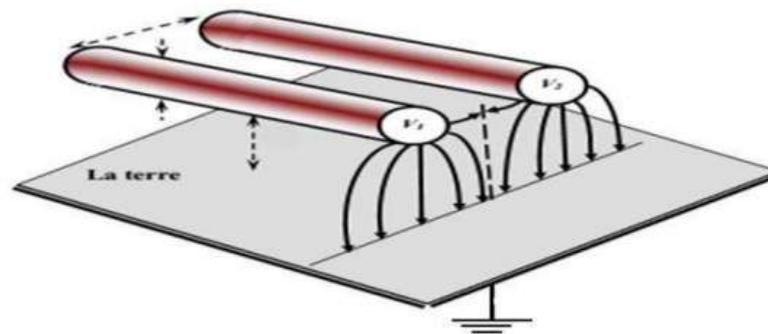


Figure I. 8: Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission

I.8.2. Autres problèmes liés à la décharge couronne

Le facteur essentiel pour contrôler l'apparition de décharges couronnes est le diamètre des fils. On est limité dans l'augmentation du diamètre par la rigidité mécanique qui en résulte. On peut cependant réduire le champ et diminuer les pertes en prenant deux ou plusieurs conducteurs en parallèle. Remarquons que, à la limite, un grand nombre de conducteurs en parallèle seraient équivalents à un conducteur unique de grand diamètre. L'effet couronne joue un rôle important dans l'amortissement des surtensions sur les lignes et constitue à ce titre une protection non négligeable des lignes et des installations électriques à très haute tension.

Comme on peut citer d'autres problèmes liés à la décharge couronnes :

1. Produire des bruits acoustiques directement rayonnés par les conducteurs, clairement Audibles.
2. Perturber certaines fréquences (radio et télévisuelles, avec des perturbations qui ne doivent pas être confondues avec une autre forme de perturbation des images de télévision... etc).
3. Une perte de puissance et une usure accélérée de certains composants de la ligne (conducteurs, pinces d'ancrages, supports, chaînes d'isolateurs). La vibration du câble associée à l'effet couronne ne dépasse pas, en général une dizaine de centimètres et la fréquence naturelle de la portée mais peut conduire à la fatigue des conducteurs et leurs éléments de support.
4. Produire des vibrations (le galop des lignes électriques), qui vont ajouter leurs effets à ceux des vibrations des câbles aériens et accélérer le vieillissement des câbles, plus la surface d'un conducteur est dégradée, plus l'effet couronne sera important et plus le champ perturbateur sera élevé.

5. Une pollution de l'air qui pourrait avoir localement un impact sur la santé d'animaux ou d'êtres humains à proximité des lignes de transport. L'ozone troposphérique est un polluant mais aussi un précurseur de plusieurs autres polluants de l'air [13].

I.9. Conclusion

Ce chapitre initial est à l'origine une partie primaire qui constitue une étude théorique de la décharge couronne. En effet, lors de l'étude bibliographique, une multitude de travaux ont été vérifiés et explorés pour avoir une idée convergente de ce phénomène et par la suite, des reprises, des citations, des conclusions et des travaux ont y été retransmis afin d'aboutir au but recherché. Dans cette partie, on y trouve quelques généralités sur la décharge couronne tel sa description, son domaine d'existence, ses conditions et son développement a une échelle atomique. Ensuite, on y a rapporté une théorie basique de TOWNSEND qui vise à offrir les informations possibles en vue d'expliquer le mécanisme de la décharge couronne. Mais malgré que le mécanisme de TOWNSEND été rationnel, on y a vu que des critiques sceptiques ont y été promulguées quant à sa validité dans les cas des hautes pressions. En fin, des outils théoriques (Courbe de Paschen et équation de Peek) ont été présentés pour vulgariser l'étude paramétrique de notre objet d'étude.

Chapitre II : Description du dispositif expérimental

I.1. Introduction

Afin de comprendre le fonctionnement de la décharge corona et les différents paramètres qui l'influencent, nous avons réalisé des travaux expérimentaux au Laboratoire Haute Tension de l'université de Béjaia.

Cette section est réservée à la description du dispositif expérimental. Le but de notre travail est d'étudier la décharge couronne en configuration nappe de fils-plan. Les expériences réalisées nous ont permis d'étudier la caractéristique courant-tension et la distribution de la densité de courant au plan en fonction de certains paramètres tels que le rayon de courbure de l'électrode active, la distance inter-électrodes, le nombre de fils constituant l'électrode active et la distance entre eux. Les essais sont réalisés en deux polarités ; positive et négative

II.2. Les dispositif expérimental

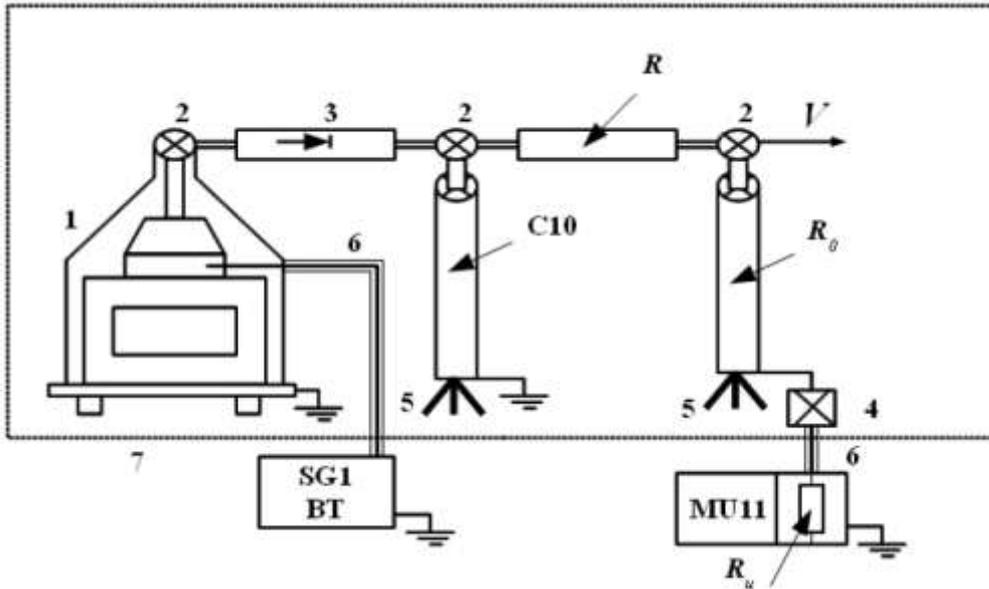
L'objectif principal de notre travail est de caractériser la décharge couronne continue positive et négative en configuration d'électrodes nappe de fils-plan. Les mesures consistent à relever simultanément le courant de décharge collecte par le plan de mesure et la tension appliquée à l'électrode active. Pour la densité de courant, on la déduit à partir du courant mesure avec la sonde linéaire.

Le dispositif expérimental utilisé est constitué de :

- ✚ la source haute tension continue et son unité de commande basse tension.
- ✚ le système d'électrodes, constitué de deux électrodes. Une nappe de fils portée à la haute tension, deux plans de mesure, une sonde linéaire et deux plans de garde mis à la terre.
- ✚ et enfin, des appareils de mesure

II.2.1. Source haute tension continue

Le laboratoire haute tension de l'université est équipé de sources haute tension alternatives et continues pour les deux polarités délivrant des tensions de 0 à 140 kV avec un courant maximal de 80 mA. Dans notre étude, nous avons utilisé une source continue (positive et négative). La figure (II.1) représente une schématisation de la source utilisée [21].



1. Transformateur haute tension (T100).	2. Nœuds de liaison	3. Diode haute tension (G270).
4. Boîte de connexion	5. Support d'éléments	6. Câble coaxial
7. Grille de protection		
Ru : Résistance basse tension	R : Résistance d'amortissement	R0 : Résistance haute tension
C10 : Condensateur de lissage	SG1 : Alimentation basse tension.	MU11 : Voltmètre de crête

Figure II 1: Schéma de l'installation haute tension

L'installation haute tension continue (Figure II.1) délivre une tension allant de 0 à 140 kV. Cette dernière est fournie par un redressement mono alternance composée avec la diode haute tension G270 au silicium supportant une tension de 270 kV, d'un condensateur de lissage (C10) de 10 nF et d'une résistance d'amortissement (R) de 106 kΩ. Le rôle de la résistance R est de protéger la diode des surintensités.

La tension alternative appliquée à la diode est générée par amplification d'une basse tension variable appliquée au primaire d'un transformateur élévateur (T100).

Le système d'électrodes et les éléments mis sous haute tension sont isolés par une grille séparatrice pour protéger les personnes intervenantes du danger.

La figure II.2 est une photo réelle de l'installation haute tension. Les éléments indiqués sur la photo sont donnés dans la légende de la figure II.1.



Figure II 2: Photo de la source haute tension continue

Une haute tension variable est obtenue par variation de la source basse tension *SG1* illustrée sur la figure II.3.

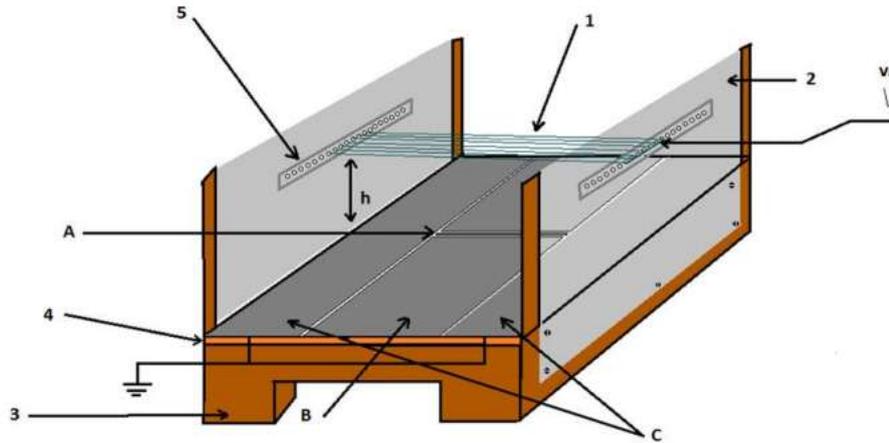


Figure II 3: Photo de la source basse tension SG1

La variation de la basse tension peut être effectuée manuellement, ou automatiquement par l'intermédiaire de l'unité de commande. L'enroulement primaire du transformateur haute tension *T100* est connecté au secondaire de l'autotransformateur de la source basse tension *SG1*. Par conséquent, une tension variable est appliquée au primaire du *T100* permet d'avoir une haute tension alternative variable sur son bobinage secondaire.

II.2.2. Configuration des électrodes

La figure II.4 montre le dispositif supportant le système d'électrodes.



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 4: Schéma du dispositif expérimental

Il est constitué d'une électrode haute tension (1) (électrode émissive) réalisée par un ou plusieurs fils conducteurs en tungstène de diamètres 0.2, 0.5 et 0.8 mm et 600 mm de longueur tendus et fixés aux deux plaques isolantes (2) en plexiglas fixées sur le support en bois (3). Afin de réaliser des essais sur une géométrie nappe de fils-plan avec diverses distances inter-électrodes, les deux plaques isolantes sont percées par des trous (5) alignés espacés de 10 mm sur différentes hauteurs par rapport au plan. La haute tension V_a ; délivrée par la source décrite ci-haut ; est appliquée à l'électrode active.

Une électrode autre dite passive est placée en dessous de l'électrode active. Elle est réalisée par trois plans rectangulaires en acier inoxydable de 1.5 mm d'épaisseur et 600 mm de longueur.

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 600mm. Le plan de mesure ou collecteur (B) de largeur 300 mm est placé entre les deux plans de garde (C) de largeur 100 mm chacun. Les trois plans sont fixés sur la planche mobile (4). Cette dernière peut être déplacée horizontalement et verticalement 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. La sonde a une forme rectangulaire de surface $300 \times 1.75 \text{ mm}^2$ (Figure II.5). Elle est utilisée pour étudier la distribution de la densité de courant au plan [22].



Figure II 5: Sonde linéaire dans l'étude de la distribution de la densité de courant



Figure II 6: Photo de profil du dispositif expérimental

II.3. Forme de la grille métallique

Des essais ont été réalisés sur l'effet de l'insertion d'une grille métallique entre les électrodes sur la distribution de la densité de courant au plan. La grille a une forme carrée de $240 \times 240 \text{ mm}^2$ de surface. Elle est en aluminium galvanisé et est réalisée par un fil de tresse de section 1.18 mm^2 . Les trous de la grille ont une forme de losange de dimensions diagonales 4 et 8 mm (Figure II.7).

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 d'un centimètre de cette dernière.

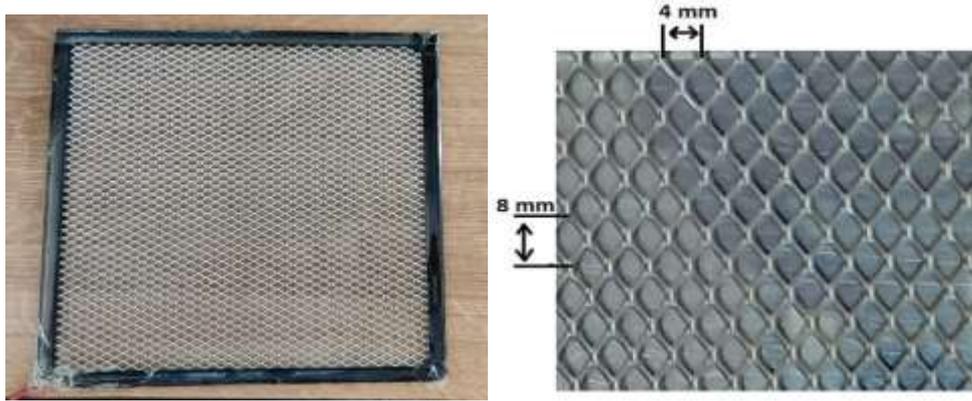


Figure II 7 : Photos de la grille métallique

II.4. Appareils de mesure

II.4.1. Mesure de la haute tension

La haute tension appliquée à l'électrode émissive est mesurée à l'aide du voltmètre de crête MU11 (Figure II.8) et d'un diviseur résistif. Le diviseur est composé de la résistance haute tension R_0 de grande valeur (250 M Ω) et de la résistance basse tension R_u de 501 k Ω . La résistance interne du voltmètre de crête R_e est associée en parallèle avec la résistance basse tension R_u , sa valeur est de 4.24 M Ω . Un câble coaxial blindé est utilisé pour relier les résistances R_e et R_u . Le voltmètre de crête indique la basse tension u aux bornes de la résistance R_u . Cette tension vaut : $u = Va/k$, 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, les responsables du laboratoire effectuent un étalonnage de l'installation pratiquement chaque année. Pour réajuster la valeur du coefficient k sur le voltmètre de crête, un voltmètre électrostatique de référence est utilisé [23].



Figure II 8: Photo du voltmètre de crête

II.4.2. Mesure du courant de décharge

Les courants d'une décharge couronne sont très faibles (quelques microampères). Pour les mesurer, nous avons utilisé deux appareils, à savoir un microampèremètre à aiguille et un multimètre numérique (Figure II.9). La masse du câble coaxial est mise à la terre tout en respectant la polarité de la tension appliquée.



Figure II 9: Appareils utilisés dans la mesure du courant de décharge

II.4.3. Mesure du courant collecté par la sonde

Pour mesurer le courant collecté par la sonde, nous avons utilisé le pico-ampèremètre de la figure II.10. Cet appareil est capable de mesurer des courants très faibles dans la gamme 1 pA jusqu'à 300 μ A. La sonde est connectée au pico-ampèremètre par l'intermédiaire d'un câble coaxial blindé. Durant les mesures, il faut respecter la polarité de la tension appliquée.



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

II.5. détermination de la densité de courant

La densité de courant électrique est un courant par unité de surface. Alors, on peut écrire :

$$I = \iint J(x, y) ds \quad (\text{II.1})$$

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) (II.2)

La composante normale de la densité de courant de décharge \vec{j} est déduite de la mesure du courant collecté par la sonde rectangulaire non polarisée. Si on considère que l'épaisseur de la sonde est assez faible devant la distance inter-électrodes pour supposer que la densité de courant est homogène sur toute la surface de la sonde, on peut écrire :

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

I_0 est le courant mesuré.

S_s est la surface de la sonde ($S_s=525.10^{-6} m^2$).

II.5.1. Mesure des conditions atmosphériques d'expérimentation

La décharge couronne est sensible aux paramètres physiques de l'air, particulièrement l'humidité. Ainsi, la mesure des conditions atmosphériques doit se faire systématiquement avant chaque série de mesure. De grandes variations des paramètres physiques de l'air faussent forcément l'analyse et le traitement des résultats de mesure. Dans ce cas, des facteurs de correction liés aux conditions atmosphériques doivent être utilisés [24, 25].

Pour mesure ces paramètres nous avons utilisé les appareils disponible au laboratoire, à savoir :

- ✓ 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).
- ✓ un hygromètre à cheveux dans la gamme ($0 \% \leq H_r \leq 100 \%$) pour mesurer l'humidité relative de l'air (Voir Figure II.12).
- ✓ un baromètre à mercure (Figure II.13) pour mesurer la pression de l'air ambiant, les valeurs relevées sont exprimées en hPa.



Figure II 11: Thermomètre à aiguille utilisé dans la mesure de température

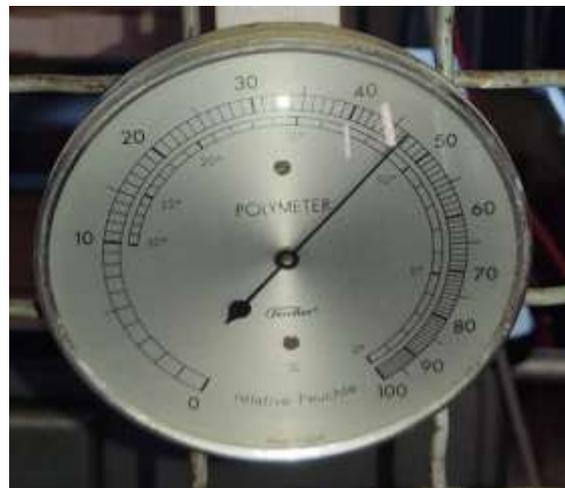


Figure II 12: hygromètre à cheveux utilisé dans la mesure d'humidité relative



Figure II 13: Baromètre à mercure disponible au laboratoire

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons le dispositif expérimental en montrant ses différents composants et en expliquant son principe de fonctionnement. Nous présentons également des méthodes de mesure des paramètres caractéristiques des décharges corona, tels que : la tension seuil de l'effet corona, le courant de décharge et la distribution de la densité de courant dans le plan. L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence de de quelques paramètres sur la décharge couronne (les caractéristiques courant-tension, les densités de courants)

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–plant en polarité positive et négative.

Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

III.1. Introduction

Notre travail expérimental consiste à caractériser le phénomène de décharge corona en mesurant le courant de décharge en fonction de la tension appliquée avec évolution de certains paramètres géométriques. Cela nous a permis de retracer les caractéristiques courant-tension de la décharge et de déterminer la tension seuil à laquelle l'effet couronne se produit.

Afin d'étudier la répartition de la densité de courant sur un plan, nous mesurons la densité de courant collectée par une sonde linéaire en connectant l'électrode plane à la masse. En divisant ce courant par la surface de la sonde, vous obtenez la densité de courant à différents emplacements de la sonde.

Dans le cadre de la dernière partie du travail expérimental, nous avons inséré une grille métallique entre les électrodes et étudié son effet sur la distribution de la densité de courant dans le plan.

III.2. Caractéristiques courant-tension (I-V)

Au cours de cette étape, une tension continue (V_a) est appliquée à l'électrode active et la quantité de courant capturée par le plan de mesure (I) est mesurée en augmentant la valeur de tension. La valeur de la tension doit être inférieure à la tension de claquage (au moins 5 kV). Les changements progressifs de tension sont effectués manuellement.

III.2.1. Influence de la polarité de tension

Dans la plupart des applications industrielles, la décharge négative est utilisée en raison de son efficacité et de sa stabilité par rapport à la décharge positive, ce qui nous donne une idée pour comparer la décharge corona négative et la décharge corona positive. Sur la figure (III.1) nous pouvons identifier l'effet de la polarité sur la courbe $I = f(V)$. Les tests ont été réalisés en utilisant une configuration géométrique ligne-plan, l'électrode active étant un fil d'un diamètre de $\varnothing_{\text{fil}} = 0,3$ mm et d'une distance inter-électrodes de $h = 5$ cm.

La figure montre clairement qu'au-delà d'une certaine valeur (V_0), le courant augmente progressivement avec la tension appliquée jusqu'à ce que le milieu gazeux se brise à la tension de claquage (V_c). Il est à noter que pour les hautes tensions (>30 kV), le courant de décharge est plus important lorsque le conducteur a une polarité négative, exemple pour une tension appliquée constante $V = 35$ kV, le courant de décharge $I = 375$ μ A pour la polarité négative, et $I = 325$ μ A pour la polarité positive.

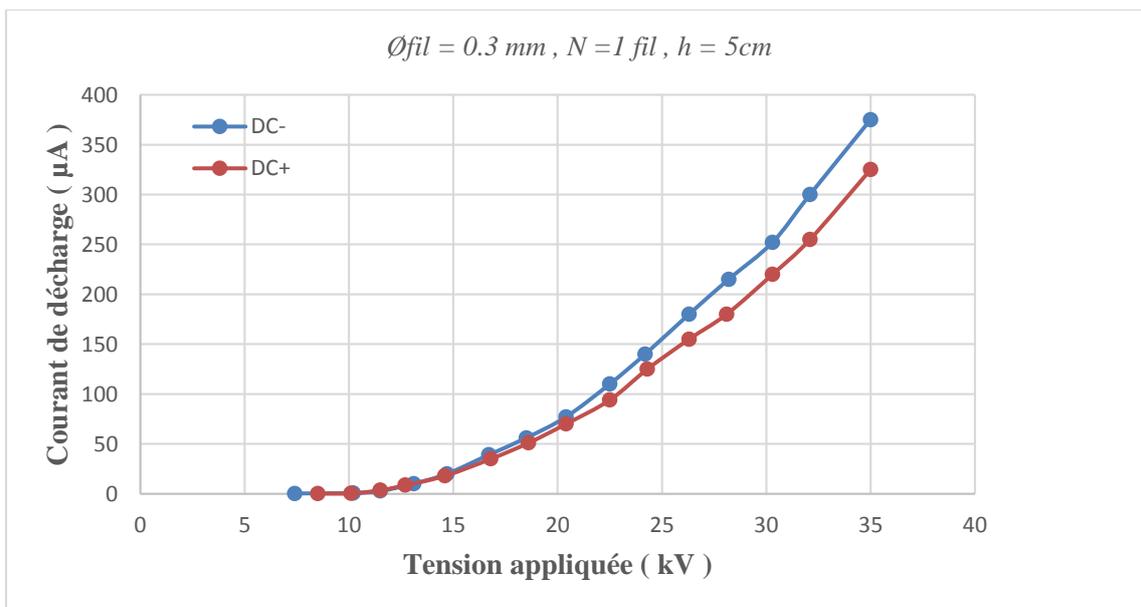


Figure III 1: Caractéristiques courant-tension pour les deux polarités

En général, la caractéristique I-V d’une décharge couronne décrite par la relation empirique de Townsend est sous la forme de I/V en fonction de V . Cette relation a été trouvée, à l’origine, pour la géométrie coaxiale fil-cylindre [26]. Plus tard, il a été démontré que cette relation peut être généralisée pour d’autres géométries, telles que pointe-plan [27,28] et pointe-grille. Le modèle de Townsend s’exprime par :

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

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	0.3763	0.4521
V₀	11.51	10.91

III.2.2. Influence de la distance inter-électrodes (hauteur H)

Pour étudier l'effet de la hauteur du fil (électrode active) par rapport au plan de masse, nous avons réalisé des tests expérimentaux sur plusieurs situations. Pour cela nous utilisons 1 fil comme électrode active. Les courbes III.2 et III.3 donnent les résultats obtenus.

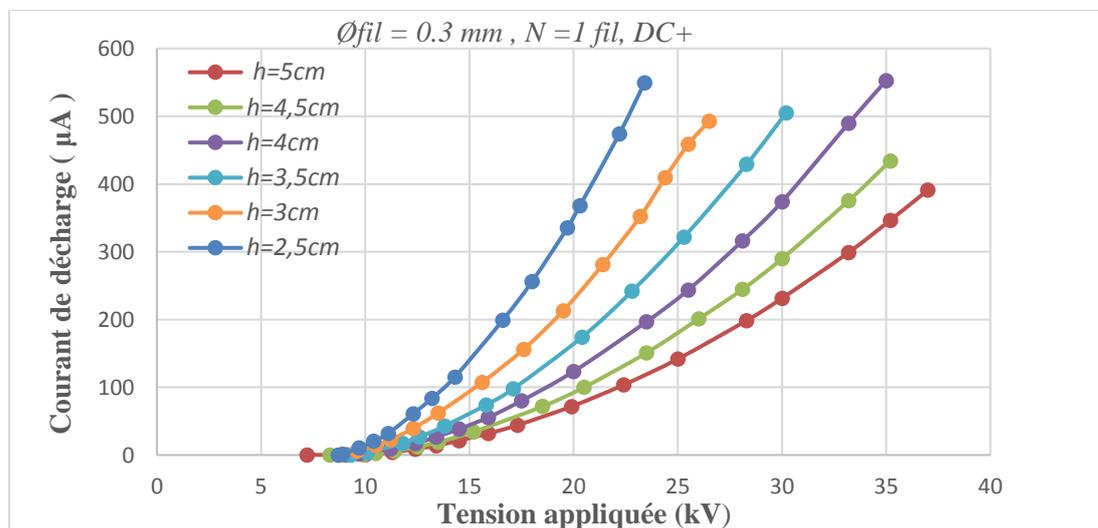


Figure III 2: Caractéristiques I-V en polarité positive pour différentes distances inter-électrodes

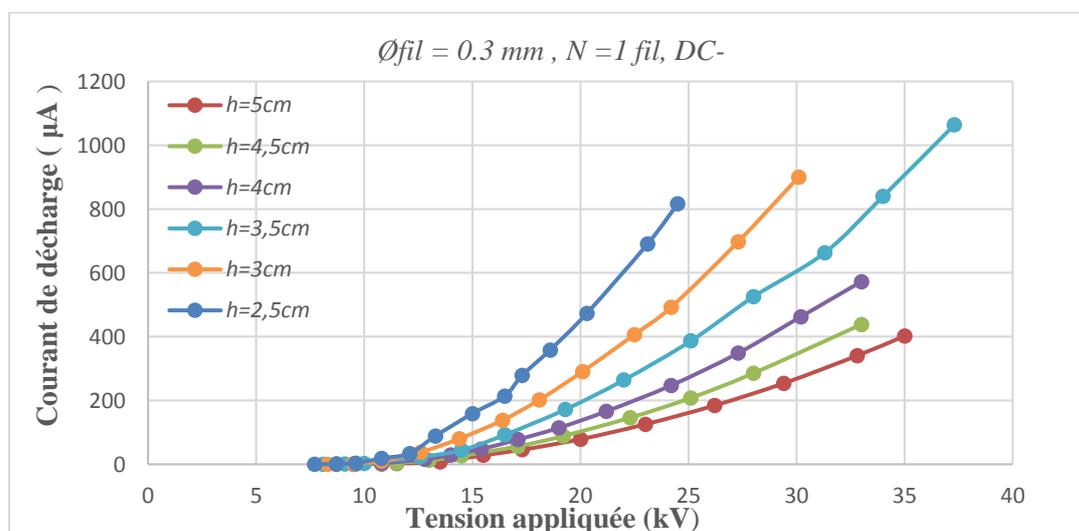


Figure III 3 : Caractéristiques I-V en polarité négative pour différentes distances inter-électrodes

De toute évidence, pour des distances inter-électrodes plus petites, le courant est plus important et augmente plus rapidement avec la tension appliquée. De plus, en cas de faibles distances entre les électrodes, des seuils de décharge corona avec des valeurs de tension plus faibles apparaissent.

Il apparait 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 faible distance 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.2.3. Influence du rayon de courbure

Dans le but de connaître l'influence du rayon de courbure de l'électrode active ; autrement dit le diamètre du fil ; nous avons fixé la distance inter-électrodes à 5 cm ($h=5\text{cm}$) et on a varié le diamètre du fils ($\varnothing_{\text{fil}}= 0.2, 0.5 \text{ et } 0.8 \text{ mm}$). Les essais ont été réalisés avec un seul fil et les résultats obtenus sont donnés dans les figures III.4, III.5.

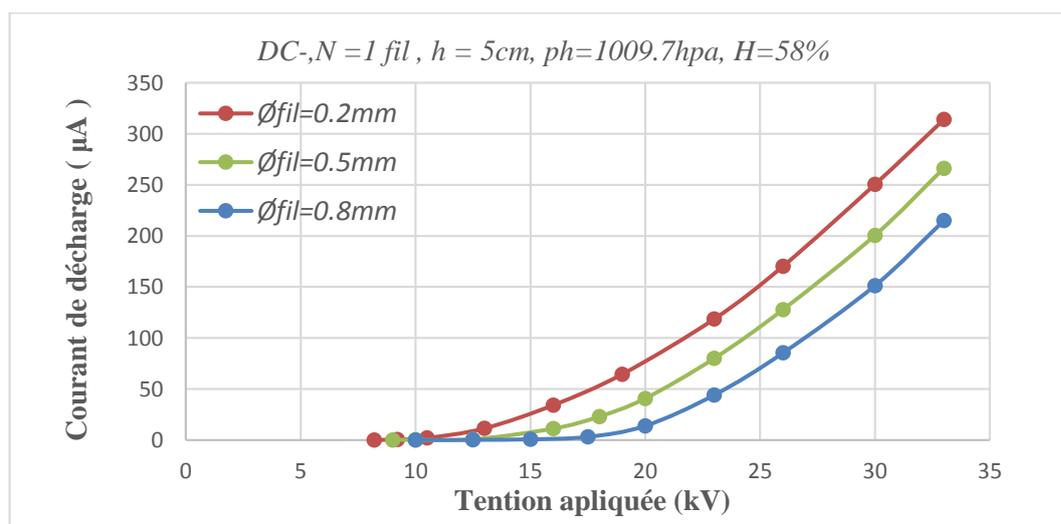


Figure III 4: Caractéristique I-V en polarité négative pour différents diamètres du fil

On constate que pour les deux polarités positive et négative, le rayon de courbure est un facteur important et a un effet similaire à celui de la distance inter-électrodes. En effet, pour une même hauteur h et lorsque le diamètre du fil diminue, le champ électrique à sa surface augmente engendrant une diminution de la tension seuil et une augmentation du courant de décharge.

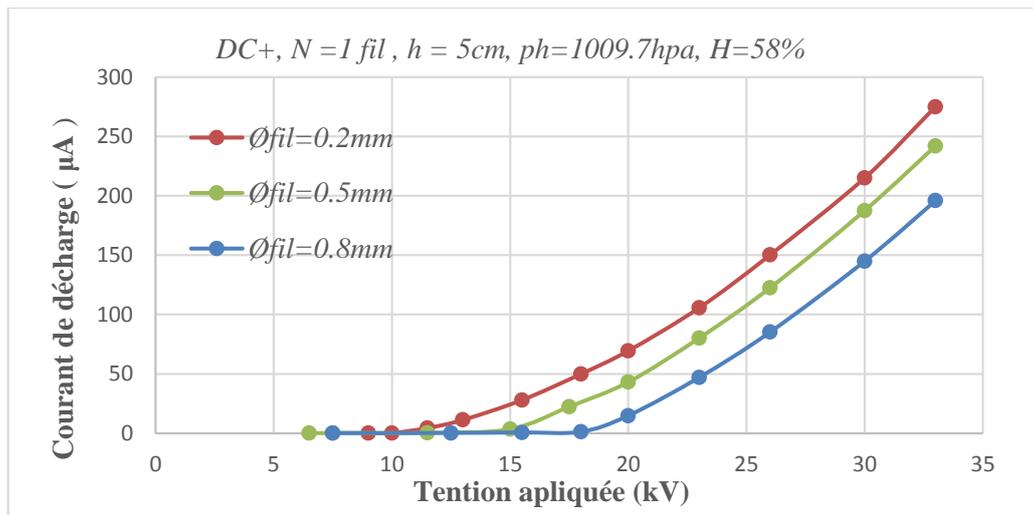


Figure III 5: Caractéristique I-V en polarité positive pour différents diamètres du fil

III.3. Nappe de fils plan

La géométrie nappe de fils-plan est une configuration courant pour générer une décharge couronne. Dans cette configuration, plusieurs fils fins sont disposés parallèlement à une électrode plane. Les fils sont généralement connectés à une source haute tension, tandis que l'électrode plane est mise à la terre.

Lorsque la tension est appliquée, un champ électrique est généré entre les fils et la plaque, ce qui provoque l'ionisation du gaz dans l'espace entre les deux. Les ions et les électrons résultants sont ensuite accélérés par le champ électrique et produisent la lueur caractéristique de la décharge couronne.

III.3.1. Tension de claquage en fonction de nombre de fils

La figure ci-après représente la variation de la tension de claquage en fonction du nombre de fils constituant l'électrode haute tension.

D'après cette figure, on constate que l'influence du nombre de fils sur la tension de claquage est insignifiante. Une très légère diminution est enregistrée pour les polarités.

la tension de claquage en polarité négative est supérieure à celle de la polarité positive.

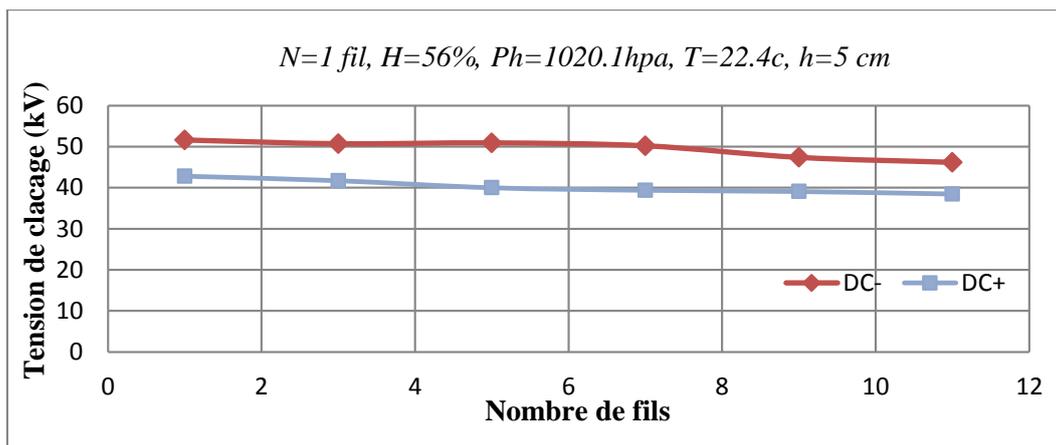


Figure III 6 : Tension de claquage en fonction de nombre de fils

III.3.2. Influence du nombre de fils sur le courant de décharge

Afin d'étudier l'effet du nombre de fils sur le courant collecté au plan de mesure, nous avons utilisé des fils de diamètre $\varnothing_{fil} = 0,3 \text{ mm}$ et une distance de 2 cm entre les fils. Les résultats de mesure sont représentés dans les figures III.7 et III.8.

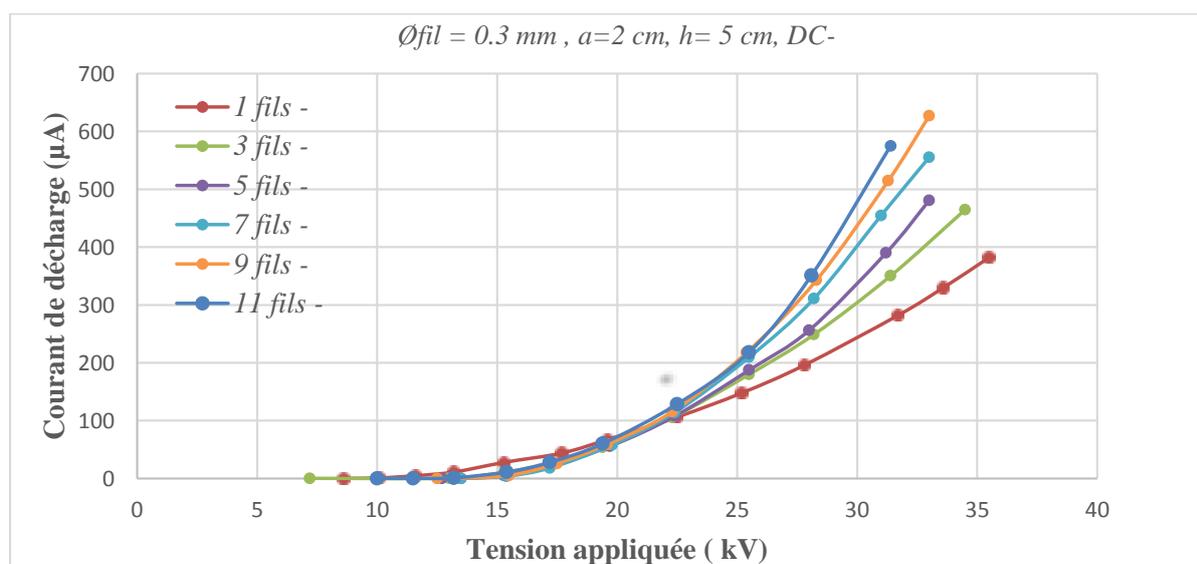


Figure III 7: Caractéristiques I-V en polarité négative pour différents nombres de fils

Nous remarquons que le courant de décharge augmente avec le nombre de fils 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).

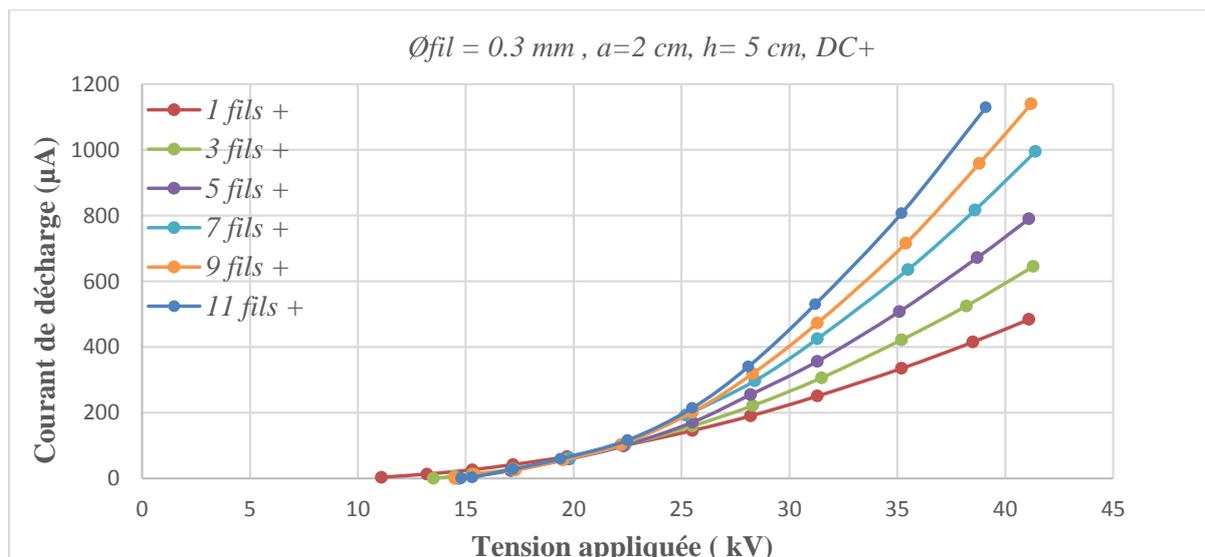


Figure III 8: Caractéristiques I-V en polarité positive pour différents nombres de fils

En polarité positive, nous avons enregistré que la polarité positive est supérieure à celle de la polarité négative. 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 inférieur à celui de la polarité négative.

III.3.3. Influence de la distance inter-fils

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.9 et III.10, en variant la distance inter-fils (a).

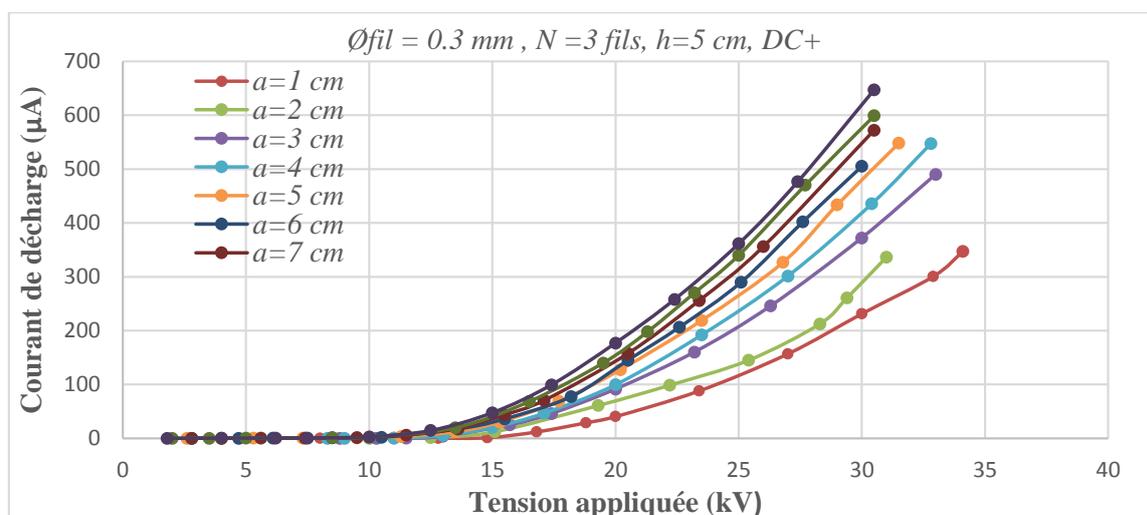


Figure III 9: Caractéristiques I-V en polarité négative pour différentes distances inter-fils

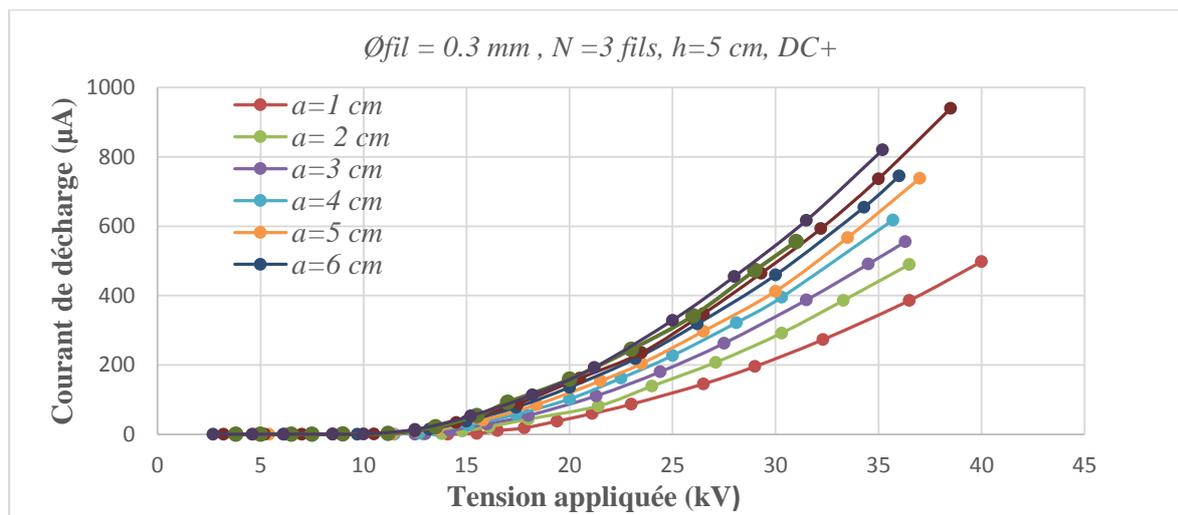


Figure III 10: Caractéristiques I-V en polarité positive pour différentes distances inter-fils

D'après les courbes III.9 et III.10, 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 éloignés le plus possible ($2a \gg h$).

III.4. Densité du courant

La densité du courant de décharge est déduite du courant collecté par la sonde. Elle est égale à la valeur du courant capté par la sonde divisée par sa surface. Dans notre cas ; comme indiqué dans le chapitre II ; nous avons utilisé une sonde linéaire rectangulaire de surface $300 \times 1.75 \text{ mm}^2$ 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 la déplaçant horizontalement avec un pas de 1 cm à partir de la position centrale ($x=0$).

III.4.1. Influence de la polarité de la tension sur la densité de courant

Les figures III.11 et III.12 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.

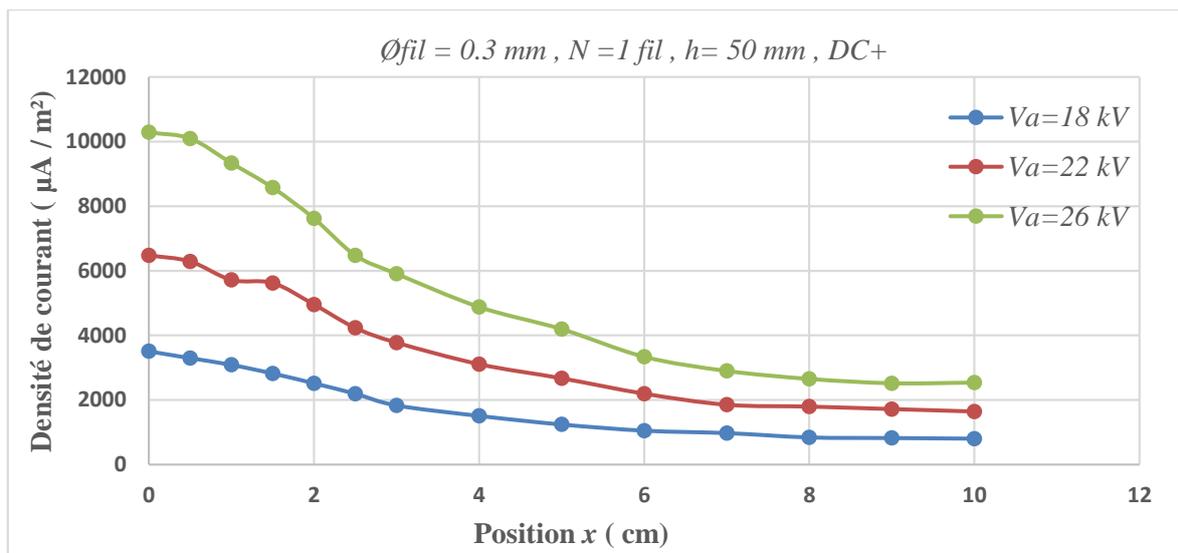


Figure III 11: Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive

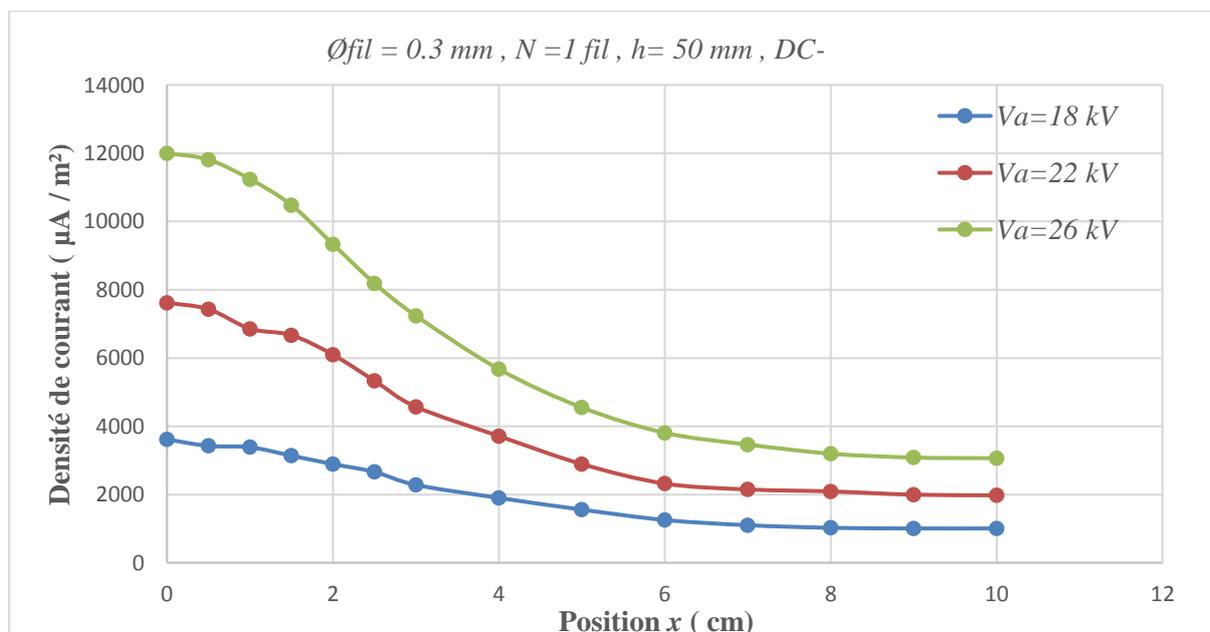


Figure III 12: Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative

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.11 et III.12, 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.13, 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 26 kV

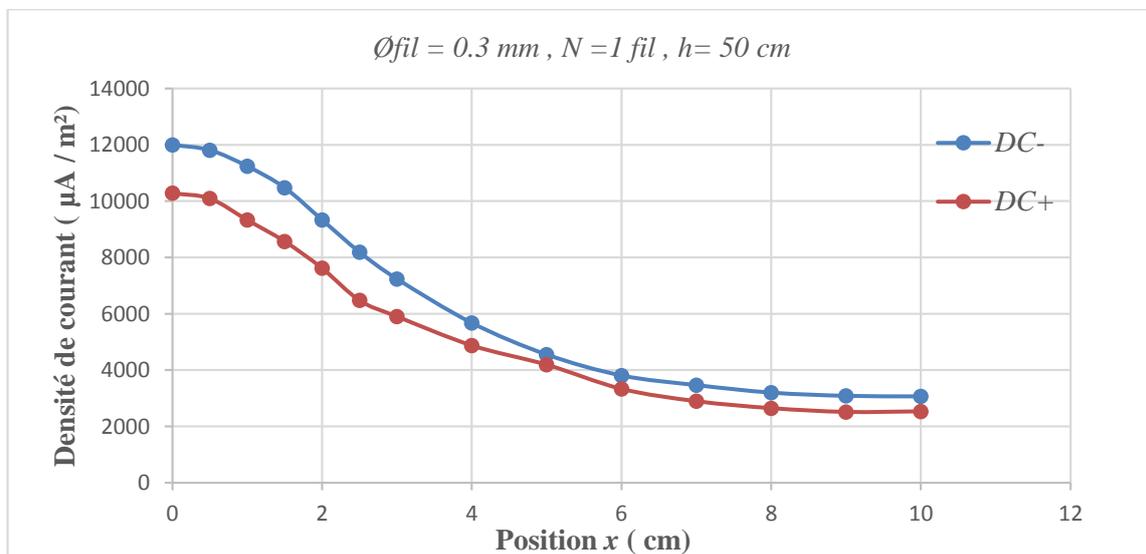


Figure III 13 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde pour les deux polarités (Va=26 kV)

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 [29]. Il rapporte que la distribution de la densité du courant ionique sur le plan $j(\theta)$ suit la loi *cosinus* dite la loi de Warburg. Cette loi a été utilisée pour d'autres géométries telles que fil-plan et lame-plan [30,31], elle suit la forme :

$$J(\theta) = J(0). \cos^m(\theta) \dots\dots\dots(III.2)$$

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

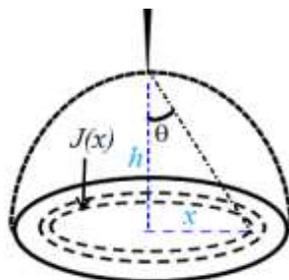


Figure III 14 : Schéma descriptif de la répartition de la densité du courant ionique au plan pour une géométrie pointe-plan

III.4.2. Influence du nombre de fils sur la densité de courant

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 $a=2\text{ cm}$ tout en fixant la distance inter-électrodes $h=5\text{ cm}$. 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.17 et III.18 les valeurs de la densité de courant en fonction de la position de la sonde pour une polarité positive et négative respectivement.

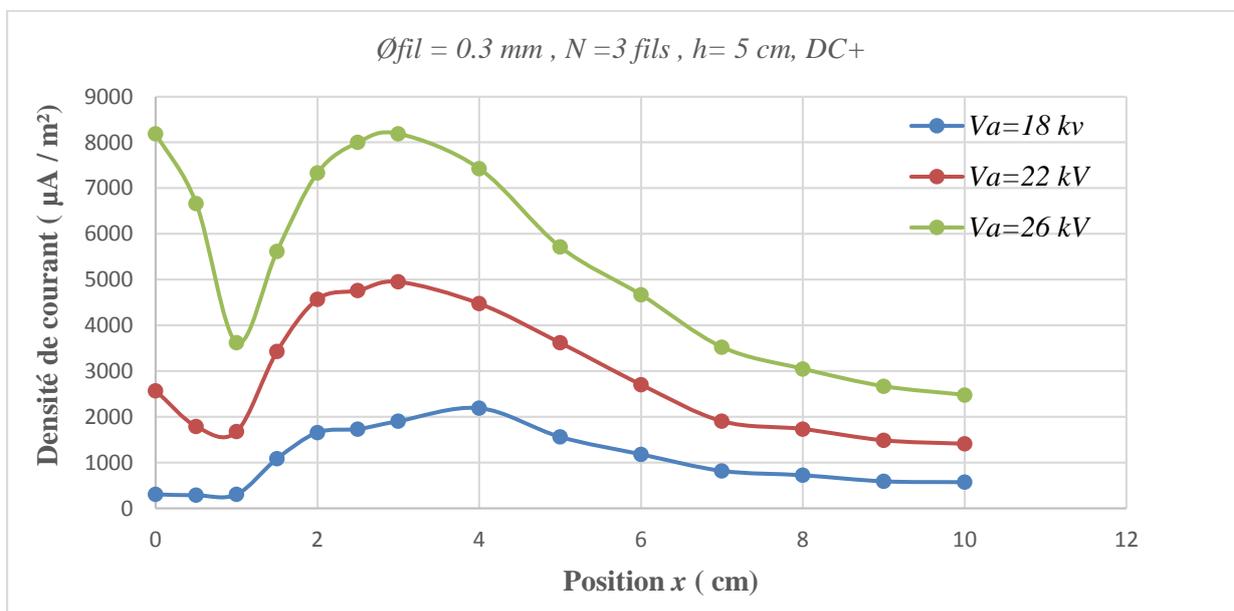


Figure III 15 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour un nombre de fils 3

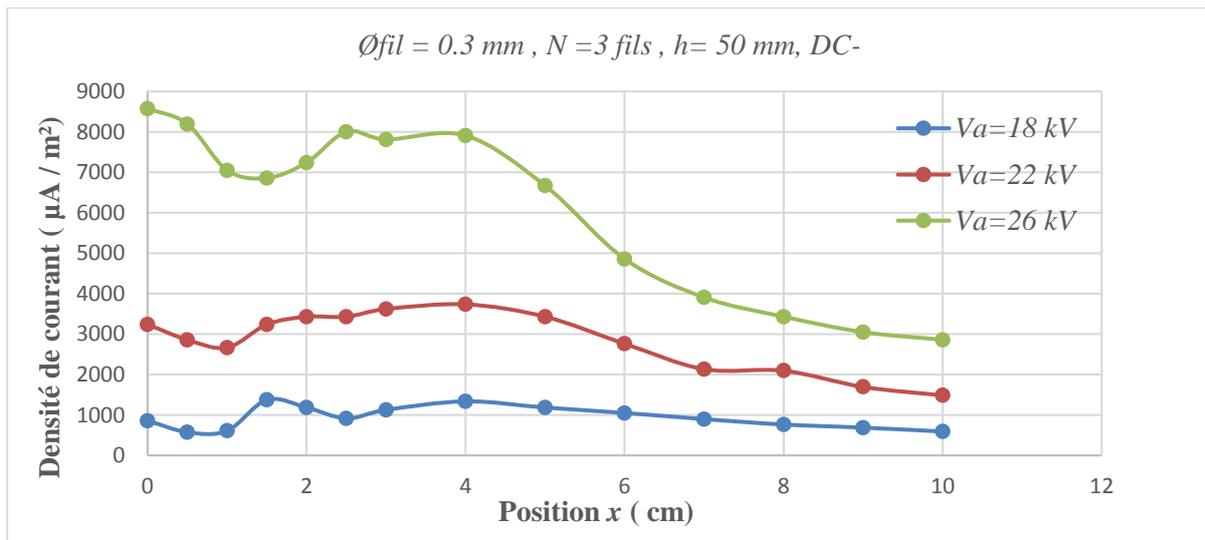


Figure III 16 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour un nombre de 3 fils-plan

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 ($x=1 \text{ cm}$), ensuite la densité de courant augmente pour atteindre sa valeur maximale en dehors de la zone en dessous des fils ($x=3 \text{ cm}$). 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.17 et III.18 les valeurs de la densité de courant en fonction de la position de la sonde pour une polarité positive et négative respectivement.

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.

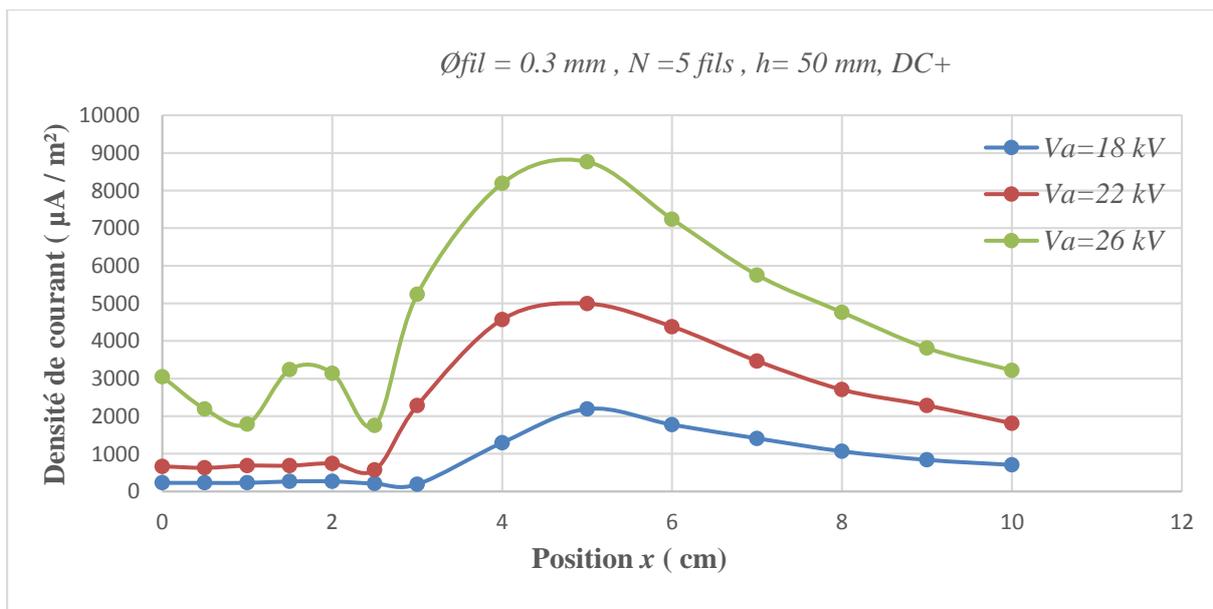


Figure III 17 : Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive pour une géométrie 5 fils-plan

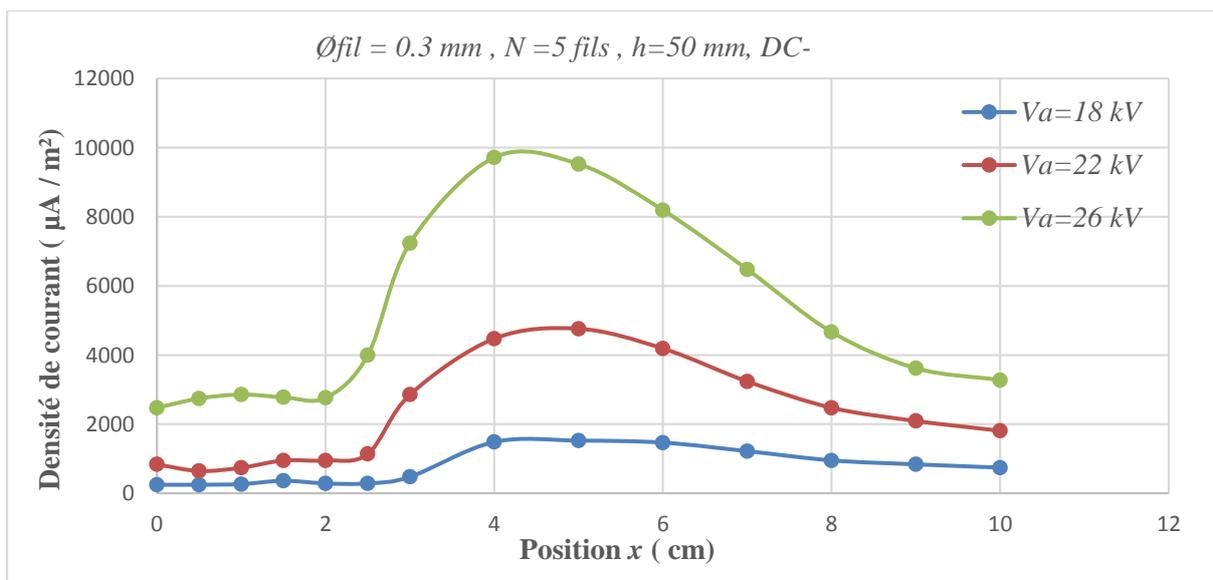


Figure III 18: Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative pour un nombre de fils 5

III.5. Système d'électrodes fils-grille-plan

III.5.1. Influence de la position de la grille sur la densité de courant

Dans cette partie de notre travail expérimental, nous étudier=é l'effet de l'insertion d'une grille métallique (conductrice) à potentiel flottant 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 distante du plan de 1 cm. La grille est centrée par rapport à sonde

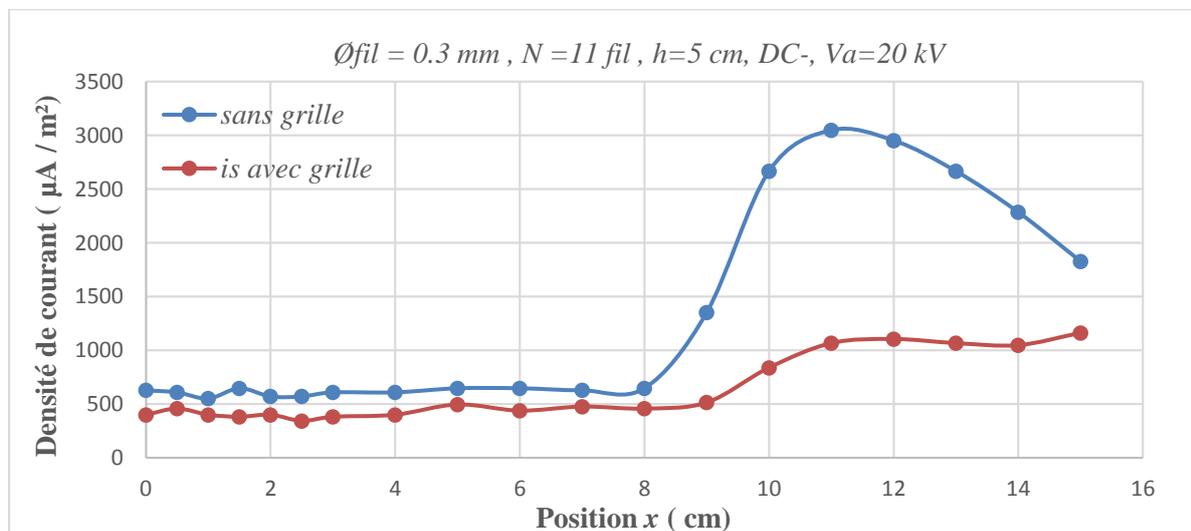


Figure III 19: Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité négative sans et avec grille

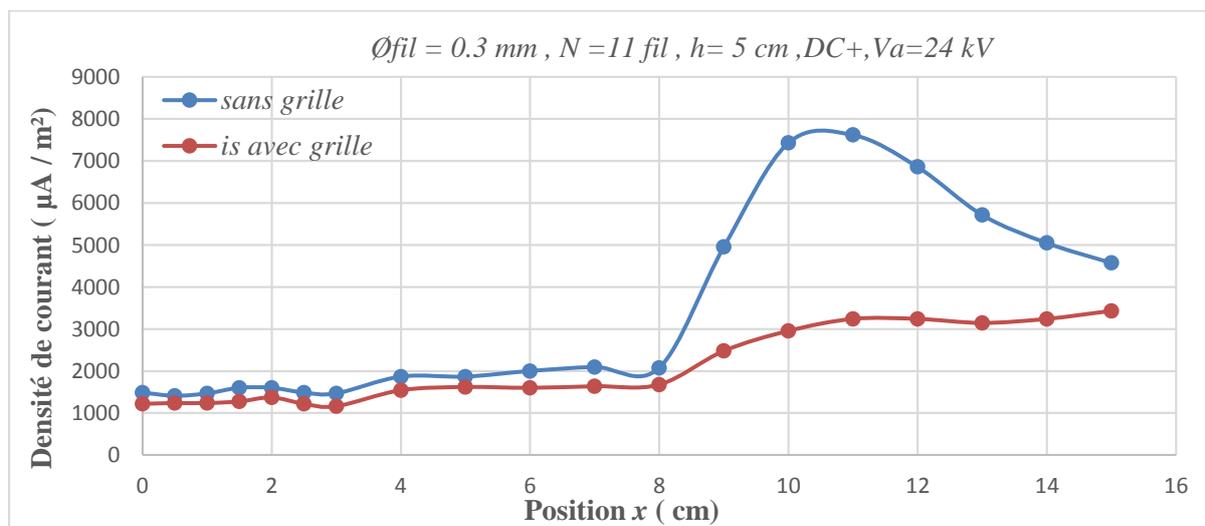


Figure III 20: Densité de courant en fonction de la position de la sonde en polarité positive sans et avec grille

Dans les deux cas, la présence de la grille diminue significativement la densité de courant, indiquant que la grille joue un rôle de filtre ou de barrière.

La polarité de la tension appliquée influence la densité de courant maximale atteinte. Pour la polarité positive (Figure III.20), la densité de courant maximale est plus élevée que pour la polarité négative (Figure III.19).

La tendance générale de la variation de la densité de courant en fonction de la position est similaire pour les deux polarités, montrant une stabilité initiale suivie d'une montée brusque et d'une diminution après le pic.

Donc ces graphes démontrent l'influence significative de la grille et de la polarité sur la distribution de la densité de courant. La grille réduit la densité de courant, et une polarité positive produit une densité de courant maximale plus élevée qu'une polarité négative.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux obtenus et leur interprétation. Les caractéristiques courant-tension des deux polarités en fonction de leur distance au plan ont été étudiées en absence et en présence de grille métallique. L'influence de certains paramètres, tels que le nombre de fils constituant les électrodes actives, la distance entre électrodes et la distance entre fils, sur cette propriété a été démontrée expérimentalement.

La distribution de la densité de courant dans le plan est également étudiée dans la géométrie plane des plaques métalliques. L'effet de l'insertion d'une grille métallique entre les électrodes sur cette densité a fait l'objet de certains travaux expérimentaux réalisés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'études a exploré en profondeur les décharges couronne en géométrie nappe de fils-plan, en examinant les paramètres influençant leur comportement et leurs caractéristiques. L'étude est réalisée sur la décharge couronne positive et négative, en évaluant des facteurs tels que la distance inter-électrodes, le nombre de fils constituant l'électrode haute tension, et l'insertion d'une grille métallique entre les électrodes.

A l'issus de ce travail, nous pouvons conclure :

- 1. Tension d'apparition et loi de Townsend :** La tension d'apparition de la décharge couronne varie en fonction de la distance inter-électrodes. Pour les deux polarités, la relation caractéristique I-V présente une forme quadratique, confirmant la loi de Townsend.
- 2. Influence de la polarité :** La tension d'apparition est généralement plus élevée pour la polarité positive que pour la négative. À un même niveau de tension, le courant de décharge est plus important en polarité négative.
- 3. Effet de la distance inter-électrodes :** La tension seuil de l'effet couronne augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes pour les deux polarités. Cependant, pour de faibles distances, le courant de décharge croît rapidement avec la tension appliquée.
- 4. Nombre de fils et écartement :** Le courant de décharge augmente avec le nombre de fils constituant l'électrode active. En géométrie 5 fils-plan, 7 fils-plan et 9 fils-plan, le courant mesuré est pratiquement le même. Par ailleurs, en géométrie 3 fils-plan, le courant de décharge augmente avec l'écartement des fils.
- 5. 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.
- 6. L'augmentation du nombre de fils fait agrandir la valeur de la densité de courant au plan.**
- 7. L'insertion d'une 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.**

Cette étude expérimentale sur les décharges couronne en géométrie nappe de fils-plan a permis de mieux comprendre les mécanismes et les facteurs influençant ces décharges. Les résultats obtenus offrent des perspectives prometteuses pour l'optimisation et l'application de cette

technologie dans divers domaines industriels. Les recherches futures basées sur ces conclusions contribueront à développer des solutions innovantes et efficaces, répondant ainsi aux besoins croissants de diverses industries.

Compte tenu des conditions expérimentales de nos travaux, nous pouvons dire que les résultats obtenus sont satisfaisants et cohérents avec plusieurs théories existantes (Townsend et Warburg...).

Références bibliographiques

- [1] M. HAMEL, B.SC.A. « Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne ». Thèse de doctorat de l'Université du Québec à Chicoutimi, 1991.
- [2] C. POTVIN, « Comportement et effet de la charge d'espace sur les mécanismes des vibrations induites par effet de couronne ». Mémoire d'ingénieur de l'université de Québec, 2000.
- [3] A. ABAHAZEM, « Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz ». Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III 3 Paul Sabatier Décembre 2009.
- [4] N. AMIOUR, « Contribution à l'étude de l'influence d'une décharge couronne sur les propriétés de films minces de polyimide en vue de leur utilisation dans le biomédical », Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2022.
- [5] A. MEGHAR, T. OUNNOUGHI, « Etude de la distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative'', Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, juin 2014.
- [6] S. ABDALI, C. AIANE, « Effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira –Bejaïa, 2017/2018.
- [7] L. PARISSI, « Étude d'un procédé de traitement d'air chargé en composés organiques volatiles par décharge moyenne fréquence avec barrière diélectrique : mécanisme mis en Suvre et recherche d'optimisation », Thèse de doctorat de l'université de Paris VI, 1999.
- [8] A. BENBOUABDALLAH, C. KACI, « Calcul numérique du champ et potentiel électriques dans l'air en configuration pointe-plan'', Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, 2012.
- [9] M.KACI, Thèse de doctorat, « étude et caractérisation des électrets par la méthode de cartographie de surface », Université ABDERRAHMANE. MIRA -BEJAIA, 2016.
- [10] P. SEIMANDI, Thèse de doctorat, « Modélisation mathématique et numérique de décharges couronnes Pour le contrôle d'écoulements », Université Toulouse III, Paul Sabatier, 2010.
- [11] A.C.A. NDONG, « Décharges à barrière diélectrique pulsées de volume et de surface appliquées à la précipitation électrostatique et à la régénération de surface », (n.d.) 209.
- [12] D. TIFAOU, A. LADJEL, « Etude de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continue », Mémoire de Fin d'Etudes en Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2016.

- [14] B. MEDJDOUB, Y. AISSOU, « Décharge couronne fil –plan en polarité positive », Mémoire de fin d'étude en Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2021.
- [15] S. MIHOUBI, H. KERDOUSSI, « Décharge Couronne en Configuration Coaxiale : Application à la neutralisation des charges », Mémoire de fin d'études en Master, Université 8Mai 1945, Guelma, 2020.
- [16] T. LACHAUX, « Etude des effets de la haute pression sur la structure et la dynamique des flammes turbulentes de pré mélangé pauvre de méthane-air », Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2004.
- [17] H. KADI, « influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [18] F. KOLIATENE, « contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [19] CNHT'97 « Acte de la deuxième conférence nationale sur la haute tension », Université de Tizi-Ouzou 1997.
- [20] A. VALT, « Etude de deux procédés de polymérisation d'un précurseur gazeux dans un plasma radiofréquence basse pression et liquide déposé sur un substrat activé par décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique : application aux propriétés antifouling ». Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, 2008.
- [21] H. BOUSLIMANE, en Master « Caractérisation de certains isolants utilisés dans les équipements électriques », Mémoire de fin d'études, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2021.
- [22] H. BOUSLIMANE, mémoire de fin d'études, en Master «Caractérisation de certains isolants utilisés dans les équipements électriques », Université ABDERRAHMANE MIRA, BEJAIA, 2021
- [23] I. FOFANA, « Modélisation de la décharge positive dans les grandes intervalles d'air », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 1996.
- [24] M. PASCAL ORTEGA, « De la décharge de laboratoire à la décharge atmosphérique ». Dossier d'habilitation à diriger des recherches, Université de la Polynésie française, 2007.
- [25] E. PAUL-QUENTIN, « Interaction plasma-écoulement en régime supersonique : stabilisation d'une instationnarité de choc par une décharge de faible puissance ». 5èmes Journées des Doctorants MFE/IDF-Nord de l'ONRA, Châtillon 2007.
- [26] B. L. HENSON, « A space-charge region model for micro-scopic steady coronas from points », J. Appl. Phys., Vol. 52, 1981, pp. 709-715.

- [27] K. YAMADA, « An empirical formula for negative corona discharge current in point-grid electrode geometry », *J. Appl. Phys.* 96, 2004, pp. 2472–2475.
- [28] E. OUATAH, S. MEGHERFI, B. BENDAHMANE, Y. ZEBBOUDJ, « Effect of Room's Temperature and Electrode Gap on Current of Negative Corona Discharge in Rod-Plane Electrode Configuration », *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, Vol. 9, No. 2, 2022, pp. 298-304, <https://doi.org/10.18280/mmep.090202>
- [29] E. WARBURG, « Characteristic des spitzenstromes », Thèse de doctorat, *Handbuch der Physi*, Vol. 14, Berlin, Springer, 1927.
- [30] Z. REZAOUI, H. KROUN, « Etude expérimentale de la configuration Triode pour formation d'électret », Mémoire de Master en Electrotechnique, Univeristé de Béjaia, 2013.
- [31] H. NAIT IGHIL, « Caractérisation de la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique en larmes-plan ». Mémoire de Master en Electrotechnique, Univeristé de Béjaia, 2014.