

Mémoire de Fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème :

**L'effet de la température sur les
paramètres de la décharge couronne**

Présenté par :

Melle. ABDALI Sabrina
Mr. AIANE Cherif

Encadré par :

Mr. OUATAH El Hanafi
Mr. MEGHARFI Sofiane

Promotion 2017/2018

Dédicaces

A mes parents

Je remercie mon père pour tous les sacrifices qu'il a fait et les efforts qu'il fournit pour que je sois aujourd'hui ici.

Je remercie mon seul frère et sa femme qui ont été à mes cotés,

Je le dédie spécialement à ma mère parce qu'elle était mon école, mon enseignante, ma conseillère et mon soutien continu. A la plus chère du monde, à la femme dont je suis fière d'être sa fille.

Enfin Pour tous les sacrifices qu'ils ont fait et pour tout le soutien qu'ils ont offert tout au long de mes études.

Je remercie toute ma famille du grand au petit.

J'espère qu'ils puissent trouver dans ce modeste travail un témoignage d'amour et d'affection envers eux.

A mes amies

Pour leur encouragement, pour leur patience, et leur précieuse aide ainsi pour tous les bons moments qu'on a passé ensemble.

A. Sabrina

Dédicace

A mes parents

Aucun mot si sacré soit-il, ne suffira à apprécier à sa juste valeur, le soutien matériel et spirituel, les sacrifices que vous ne m'avez cessé d'employer.

On vous offre en guise de reconnaissance, ce modeste travail en vous souhaitant santé, bonheur et longue vie qu'on puisse combler à nous tour.

A mes chers frères et sœurs

Je vous dédie ce travail en témoignage des liens solides et intimes qui nous unissent et pour leurs soutiens, encouragements en vous souhaitant un avenir plein de succès et de bonheur.

A mes amis

Je remercie mes amis d'avoir été à mes côtés, vous m'avez donné le courage de continuer.

A. Cherif

Remerciement

On remercie Dieux le tout puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage pour mener à terme ce travail.

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à notre promoteur, **Mr. El Hanafi OUATAH**, pour avoir cru à nos capacités pour mener à bien ce travail qu'il a toujours dirigé avec une très grande rigueur scientifique. Sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et sa bonne humeur et sa compréhension ainsi que l'énorme patience qu'il a eu à notre égard.*

*Nous tenons aussi à remercier **Mr. BOUDISSA** qui a répondu à nos questions et qui nous a permis de comprendre un peu plus notre thème.*

Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres de jury pour avoir bien accepté d'examiner et de juger ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à tous nos professeurs qui ont déployé leurs efforts pour nous assurer une formation complète.

LISTE DES ABREVIATIONS

Symbole	Définition unité
d	La distance inter- électrode (mm)
E	Le champ électrique (kV/m)
E_c	Le champ critique du minimum d'ionisation
E_p	Le champ de la charge d'espace (kV/cm)
E_s	Le champ à la surface de l'onde (champ seuil)
i	Le courant collecté (μA)
l_c	Longueur critique (m)
J	La densité de courant (μA)
n	Le nombre d'électrons produit par avalanche
n₀	Le taux de production d'électrons primaires par seconde
n_j	La densité de porteurs de type <i>J</i>
n_p	La densité de particule chargée
P	La pression de l'air (hPa)
q	Charge individuelle (coulomb)
r	Rayon de courbure (μm)
T	La température de l'air ambiant ($^{\circ}\text{C}$)
V ou U	Tension appliquée au fil (kV)
V₀	La tension seuil (kV)
W_e	Energie cinétique (J)
W_i	Energie d'ionisation (J)
α	Coefficient d'ionisation primaire de Townsend (m^{-1})
γ	Coefficient d'ionisation secondaire de Townsend
δ	La densité de l'air (Kg/m^3)
μ	Le coefficient de la mobilité ionique ($\text{m}^2/\text{V.s}$)
ρ	Densité de la charge d'espace (C/m^3)

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1: Effet couronne sur différents éléments.....	3
Figure I.2: Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphérique.....	5
Figure I.3: Système d'électrodes à champ uniforme.....	7
Figure I.4 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive.....	13
Figure I.5 : Schématisation d'une décharge couronne continue négative.....	14
Figure I.6 : Configuration d'électrodes en décharge couronne.....	15
Figure I.7 : Effet de la distance inter-électrode sur les paramètres de la décharge couronne..	16
Figure I.8 : Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes.....	18
Figure I.9 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour.....	19
Figure I.10 : Système de neutralisation et de Charge des médias de type triode	20
Figure I.11: Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission	22
Chapitre II	
Figure II. 1 : Dispositif expérimental.....	25
Figure II. 2 : Schéma de la source haute tension utilisée.....	26
Figure II. 3 : Photo de la source basse tension SG1.....	27
Figure II. 4 : Photo de la source haute tension.....	27
Figure II. 5 : Cellule de décharge pointe-plan.....	28
Figure II. 6 : Photo de la cellule de décharge pointe-plan.....	29
Figure II. 7 : Photo et schéma de l'électrode active.....	30
Figure II.8 : Photo de la machine projecteur de profil.....	30
Figure II.9 : Voltmètre de crête.....	31

Figure II. 10 : Voltmètre électrostatique du laboratoire haut tension.....	32
Figure II. 11 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge..	32
Figure II. 12 : Photo du four utilisé.....	33
Figure II. 13 : Dispositif utilisé pour visualiser la forme d'onde du courant.....	34
Figure II. 14 : Photo de l'oscilloscope Tektronics TDS 1012 disponible au laboratoire de recherche de génie électrique de Béjaia (LGEB).....	35
 Chapitre III	
Figure III.1 : Variation du courant de décharge en fonction de la tension appliquée.....	37
Figure III.2 : Rapport (I/V) en fonction de V	38
Figure III.3 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes.....	39
Figure III.4 : Caractéristiques I-V en polarité négative avec diverses distances inter-électrodes.....	40
Figure III.5: Caractéristiques I-V en polarité positive avec diverses distances inter-électrodes.....	40
Figure III.6 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité négative avec diverses distance inter-électrodes.....	41
Figure III.7 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité positive avec diverses distances inter-électrodes.....	41
Figure III.8 : Variation du paramètre géométrique K en fonction de la distance inter-électrodes.....	42
Figure III.9 : Variation de la tension seuil V_0 en fonction de la distance inter-électrodes....	43
Figure III.10 : Influence du rayon de courbure sur la caractéristique I-V en polarité négative.....	44
Figure III.11 : Influence du rayon de courbure sur la caractéristique I-V en polarité positive.....	45

Figure III.12 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité négative avec variation du rayon de courbure.....	46
Figure III.13 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité positive avec variation du rayon de courbure.....	46
Figure III.14 : Variation de la tension de claquage avec la température.....	47
Figure III.15 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une décharge couronne négative.....	48
Figure III.16 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une décharge couronne positive.....	48
Figure III.17 : Ajustements linéaires des courbes I/V en fonction de V en polarité négative..	49
Figure III.18 : Ajustements linéaires des courbes I/V en fonction de V en polarité positive..	49
Figure III.19 : Variation du paramètre géométrique K en fonction de la température.....	50
Figure III.20 : Variation de la tension seuil V_0 en fonction de la température.....	51
Figure III.21 : Train d'impulsions observé à l'oscilloscope.....	52
Figure III.22 : Variation de la fréquence de répétition en fonction de la tension appliquée..	54
Figure III.23 : Ajustement linéaire de la courbe f/V en fonction de V	54
Figure III.24 : Différents régimes d'une décharge couronne négative, en fonction de la tension appliquée.....	55
Figure III.25 : Caractéristiques fréquence-tension ($f-V$) avec variation de la distance inter-électrodes.....	56
Figure III.26 : Ajustements linéaires des courbes f/V en fonction de V avec variation de la distance inter-électrodes.....	57
Figure III.27 : Influence du rayon de courbure sur la caractéristique fréquence-tension ($f-V$).....	58
Figure III.28 : Influence de la température sur la caractéristique fréquence-tension ($f-V$)....	59

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1: paramètres caractéristiques des décharges dans le gaz.....4

Chapitre III

Tableau III.1 : Résultats des ajustements linéaires à diverses distances inter-électrodes.....42

Tableau III.2 : Variation de la tension de claquage avec le rayon de courbure.....44

Tableau III.3 : Résultats des ajustements linéaires pour trois rayons de courbure.....47

Tableau III.4 : Résultats des ajustements linéaires avec variation de température.....50

Tableau III.5 : Résultats des ajustements linéaires des courbes f/V en fonction de V57

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Recherche bibliographique.	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique	3
I.3. Généralité sur les décharges électriques	4
I.4. Mécanismes de formation et processus physique des décharges	4
I.5. Décharge couronne	6
I.5.1. Théorie de Townsend.....	6
I.5.2. Théorie de Streamer	8
I.5.3 Seuil d'apparition de la décharge couronne	9
I.6. Mécanisme de formation des décharges couronnes	9
I.6.1. Conditions d'apparition	9
I.6.2. Processus élémentaires	10
I.7. Mouvement des charges dans un champ électrique.....	11
I.8. Densité de charge et de courant	11
I.9. Différents types de décharge couronnes.....	12
I.9.1. Décharge couronne positive.....	12
I.9.2. Décharge couronne négative	13
I.10. Géométries des électrodes	14
I.11. Facteurs influençant la décharge couronne.....	15
I.11.1. Facteurs géométriques.....	16
I.11.2 Rayon de courbure	16

I.11.3. Facteurs physiques	16
a. La température	16
I.11.3. Facteurs électriques	17
I.12. Applications de la décharge couronne dans le domaine industriel	17
I.12.1. Filtrage électrostatique	17
I.12.2. Séparation électrostatique	19
I.12.3. Neutralisation et charge des médias non-tissés	19
I.12.4. Paratonnerre	20
I.12.5. Générateur d’ozone	20
I.12.6. Autres applications	21
I.13. Problèmes liés à la décharge couronnes	21
I.13.1. Pertes dans les lignes de haute tension	21
I.13.2. Autres problèmes liés à la décharge couronnes	21
 Chapitre II: description du dispositif expérimental.	
II.1. Introduction	23
II.2. Description du dispositif expérimental	23
II.2.1. Source haute tension continue	24
II.2.2. Cellule de décharge	27
II.2.3. Appareils de mesure	30
II.2.4. Système de chauffage	32
II.2.5. Visualisation de la forme d’onde du courant	32
II.3. Conclusion	34

Chapitre III: Résultats et discussion

III.1. Introduction.....	35
III.2. Caractéristique courant- tension (I-V).....	35
III.3. Influence des divers paramètres sur les paramètres de la décharge.....	38
III.3.1. Distance inter-électrodes	38
III.3.2. Rayon de courbure	42
III.3.3. Température	46
III.4. Forme d'onde du courant de décharge	50
III.5. Influence des divers paramètres sur la fréquence de répétition.....	52
III.5.1. Tension appliquée à la pointe.....	52
III.5.2. Distance inter-électrodes	54
III.5.3. Rayon de courbure	56
III.5.4. Température	57
III.6. Conclusion	58
Conclusion générale.....	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	60

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.

La décharge couronne est une décharge électrique à faible courant qui se produit à une certaine tension entre les électrodes de rayons de courbures très différents, comme des configurations pointe-plan, fil-plan, 2fils-plan, fil-cylindre. Si la tension appliquée aux bornes des électrodes est inférieure à une certaine tension de quelques kilovolts, qualifiée de « tension seuil », l'air dans l'espace inter-électrodes peut être assimilé à un isolant. Le courant très faible, de l'ordre de nano ampère (nA), qui circule entre les électrodes est dû au drainage des paires électrons-ions qui sont créées naturellement (radioactivité, rayonnement cosmique...).

L'effet couronne qui apparaît 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 (LGEB) avec des électrodes de formes diverses (pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre, sphère-sphère, ...).

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

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 forme d'onde du courant de décharge.

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 et quelques perspectives.

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Introduction

Notre atmosphère contient des charges électriques libres, elles sont dues à certains agents ionisants extérieurs permanents tels que la radioactivité naturelle et les radiations cosmiques ; ce qui nous conduit à dire qu'il n'existe pas de gaz qui soient isolants électriques parfaits.

Dans l'air ambiant, ces charges dans leur mouvement, peuvent se multiplier par collision ionisantes avec les atomes et les molécules du gaz, on connaît ce phénomène sous le nom de la décharge couronne. Cette dernière désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité de gaz, dans l'environnement d'un conducteur, de faible rayon de courbure, porté à haute tension.

I.2. Historique

Les décharges électriques ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [1,2]. Les premières études décrivant leurs évolutions et proposant des mécanismes datent du début de XX^{ème} siècle [3]. En effet, les premières publications sur l'effet de la décharge couronne datent de 1911 avec les travaux effectués par un des génies de cette époque, M. F. Peek [4].

Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne autour des lignes de transport [5]. C'est ainsi que les premières expériences sur les fils conducteurs minces, portés à des tensions suffisamment élevées, ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet dont l'épaisseur augmente avec la tension (Figure I.1). C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression universellement employée de « décharge couronne » ou « corona effect » [6]. Plusieurs études ont été menées depuis pour expliquer les différents mécanismes mis en jeu lors de la formation, du développement et de la propagation de cette décharge.



Figure I.1: Effet couronne sur différents éléments

I.3. Généralité sur les décharges électriques

Une décharge électrique désigne tout mécanisme de passage d'un courant dans un gaz [7]. On dit qu'un gaz est ionisé lorsqu'il contient une certaine proportion d'électrons et d'ions positifs, l'existence de ces particules chargées confère au gaz des propriétés spéciales (conductivité électrique, émission de lumière et onde radioélectrique...etc).

La décharge luminescente ou ce qu'on appelle aussi la décharge *glow* est obtenue le plus souvent à basse pression (moins de 10 mbar) entre deux électrodes planes. Les électrons produits dans ce type de décharge sont fortement énergétiques. Ainsi, les atomes excités et les molécules génèrent une luminescence typique (tubes fluorescents par exemple) [8].

La décharge couronne est une décharge non homogène, générée dans un système d'électrodes fortement dissymétriques (pointe-plan, fil-plan...etc). Lors de la décharge, l'électrode de faible rayon de courbure soumise à une haute tension est le siège d'un fort champ électrique ainsi constituant le facteur essentiel dans l'ionisation des espèces neutres présentes dans le gaz.

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) sont connues depuis le milieu de XIX^{ème} siècle [9]. La première DBD à pression atmosphérique dans l'air a été obtenue par Von Engle et al [10]. Les premières expériences sur ce type de décharge ont été proposées par Siemens en 1857[11].

Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres caractéristiques des diverses décharges dans les gaz.

	Décharge glow	Décharge couronne	Décharge DBD
Pression	< 10 mbar à 1	1 bar	1 bar
Champ électrique	10 kV/cm	0.5-10 kV/cm variable	0.1-100 kV/cm variable
Champ électrique réduit	50 Td	2-200 Td, variable	1-500 Td

Tableau I.1: paramètres caractéristiques des décharges dans le gaz.

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

Un électron placé dans un champ électrique uniforme, par exemple, est accéléré et peut ioniser des atomes ou des molécules. L'ionisation d'une espèce conduit donc à la formation d'une particule chargée et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquiert une énergie suffisante pour ioniser une seconde particule. Ce mécanisme d'ionisation successif est connu sous le nom « d'avalanche électronique » ou « décharge de Townsend ».

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.

Nous avons représenté sur la figure I.2 une caractéristique courant-tension pour les décharges à haute pression et en champs inhomogènes [12].

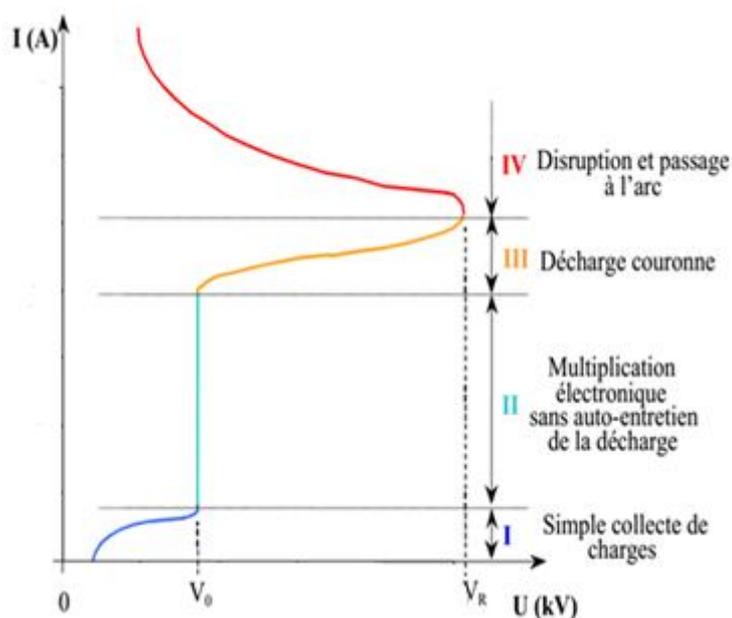


Figure I.2: Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphérique [13]

La figure I.2 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne :

- **Régime I- Collecte de charge**

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.

- **Régime II-Régime impulsionnel**

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 se déclenche alors sans que le critère d'auto-entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire. Car le courant reste faible.

- **Régime III-Régime luminescent « décharge couronne »**

Ici 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.

- **Régime IV- Régime disruptif**

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 [13].

I.5. Décharge couronne

La décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz au voisinage d'un conducteur porté à une tension dont le champ électrique environnant est intense mais non disruptif. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation. Ce type de décharge ne nécessite aucune source externe d'ionisation pour se développer, on dit que c'est une décharge auto-entretenu (autonome). Cependant, la présence d'un électron initial pour annoncer la décharge est nécessaire [14,15].

La décharge couronne qui, habituellement, a lieu à pression atmosphérique est souvent associée à deux électrodes asymétriques. L'électrode active de faible rayon de courbure (une pointe ou un fil mince) est portée à un potentiel élevé. L'électrode passive de rayon de courbure important (une plaque plate ou un cylindre), est mise à la terre [16,17]. La décharge peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode active. On rencontre une difficulté principale avec ce type de décharge qui est la transition à l'arc électrique.

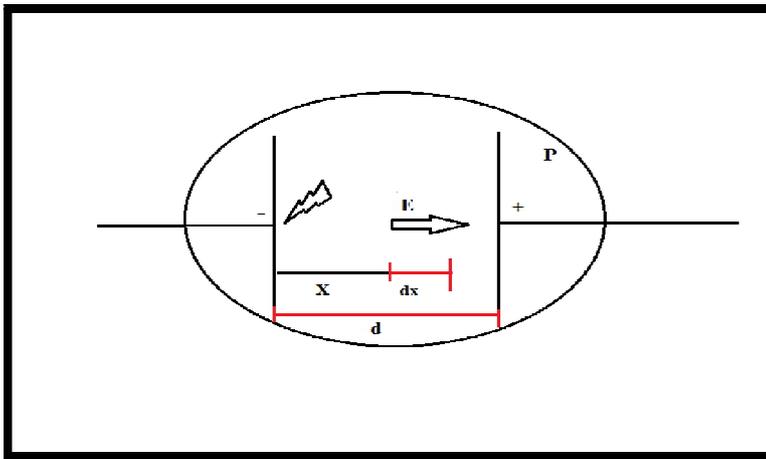
Les recherches antérieures ont conduit à distinguer deux processus de développement de la décharge :

- ✓ Le premier est la décharge de Townsend qui fait intervenir tout l'intervalle inter-électrodes.
- ✓ Le second correspond à l'apparition de lueurs dans l'intervalle prenant de filament ce qu'on appelle **streamer** [18].

I.5.1. Théorie de Townsend

Dans leur état normal, les gaz sont en général de bons isolants électriques mais, Soumis à des contraintes extérieures (rayonnement lumineux, chaleurs, champs électrique, ...), ils peuvent devenir conducteurs. La transition d'un gaz de son état isolant à un état conducteur sous l'action d'un champ électrique peut être décrite de manière simple par la théorie de Townsend [19-23]. Pour cet effet, considérons deux électrodes planes, séparées par un intervalle d dans un gaz à la pression P et contenu dans une enceinte (Figure I.3). Si l'on impose une différence de potentiel V entre ces électrodes, on fait apparaître dans l'intervalle un champ électrique uniforme d'intensité :

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



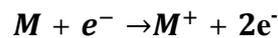
d : distance entre les électrodes.

P : pression du gaz.

E : champ électrique.

Figure I.3: Système d'électrodes à champ uniforme

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 W_e égale ou supérieure à l'énergie d'ionisation W_i des molécules M ($W_e \geq W_i$).



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.

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 :

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

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

$$n(d) = n_0 \cdot \exp(\alpha d) \quad (I.3)$$

La charge collectée à l'anode par unité de temps vaut :

$$e \cdot n(d) = e \cdot n_0 \cdot \exp(\alpha d) \quad (I.4)$$

D'où le courant collecté est :

$$i = i_0 \cdot \exp(\alpha d) \quad (I.5)$$

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) 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 [24].

I.5.2. Théorie de Streamer

Le streamer apparaît sur une photographie statique comme un étroit filament lumineux ; l'émission lumineuse, qui en résulte, provient essentiellement des photons créés en tête du streamer [24]. Dans ce cas, 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 peuvent émettre des photons avec une énergie supérieure à 13 eV, capables d'ioniser les molécules d'oxygène dont le potentiel d'ionisation n'est que de 12.2 eV. Les électrons produits vont créer de nouvelles avalanches secondaires selon le même mécanisme de multiplication électronique décrit par Townsend. Ces avalanches secondaires vont se développer 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.

Des critères ont été proposés par Meek et Raether pour estimer le champ électrique permettant la 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 $(\alpha - \eta = 0)$, distance ce critère s'écrit :

$$\int_0^{l_c} (\alpha - \eta) dx = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Électrons}$$

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 [25].

I.5.3 Seuil d'apparition de la décharge couronne

On entend par seuil d'effet couronne, la valeur du champ pour laquelle il y a apparition brusque d'une conductivité de l'air au voisinage immédiat d'un conducteur soumis à une tension croissante. Pendant longtemps, la loi de Peek qui date de 1929 a été généralement employée pour l'évolution du champ seuil E_s d'effet couronne. Peek observa que l'apparition de la couronne était une fonction du champ superficiel du rayon de courbure et de la densité de l'air. [12] Il donna la loi suivante :

$$E_s = 3,1 \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta \cdot R}}\right) \text{ (kV/cm)} \quad \text{(I.6)}$$

m est un facteur dépendant de l'état de la surface de l'électrode active. En particulier $m=1$ pour une électrode bien polie ;

r est le rayon de courbure en μm ;

$\delta = \frac{P}{760} \cdot \frac{298}{273+T}$ est la densité de l'air.

P : pression de l'air en hPa ;

T : la température de l'air ambiant en °C.

I.6. Mécanisme de formation des décharges couronnes

I.6.1. Conditions d'apparition

Dans un champ électrique intense, l'excitation de certaines particules du gaz ambiant peut devenir suffisamment élevée pour ioniser ce même gaz dans une région donnée, les électrons libres accélérés par le champ électrique intense sont à la base de ce processus. Lorsque leur énergie dépasse l'énergie d'ionisation de ces dernières, de nouveaux électrons sont alors produits et soumis au même champ. Lors de l'ionisation, des photons hautement énergétiques sont aussi produits pouvant contribuer à une réaction en chaîne appelée avalanche de Townsend. Le développement d'avalanches successives produit la décharge couronne. Les ions et les électrons ainsi créés se déplacent selon leur polarité et influencent à leur tour le champ électrique entre les électrodes. On appelle ces groupes de charges en mouvement « charges d'espace ».

I.6.2. Processus élémentaires

Les phénomènes qui ont lieu dans les milieux gazeux sont représentés par des mécanismes de collisions entre les particules de gaz. Lorsque l'énergie cinétique de ces particules, avant et après collision, obéit au principe de conservation de l'énergie, on parle de collision élastique. Dans le cas contraire où le bilan énergétique est retrouvé en faisant intervenir des changements d'énergies internes d'une ou plusieurs particules, on parle de collision inélastique. Ce sont ces dernières qui expliquent les phénomènes se produisant dans l'effet couronne [12].

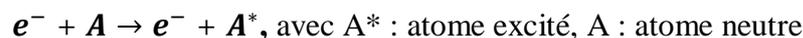
Les processus microscopiques impliqués dans une décharge couronne sont variés et complexes. Ils mènent à une série de régimes distincts du comportement de la décharge dépendant de trois classes de paramètre [26,27] :

1. Paramètre électrique : Nature (continue ou alternatif) et polarité (positive ou négative) de la tension appliquée à l'électrode active.
2. Paramètres géométriques : Forme, dimension et distance inter-électrodes
3. Paramètre du gaz inter-électrodes : Nature, pression, température et humidité [28].

Les divers types d'évènements qui modifient l'énergie interne des particules font tous intervenir leurs charges électriques. On distingue :

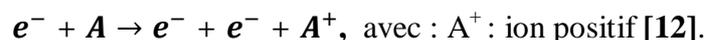
a. L'excitation atomique

Un atome neutre peut être excité soit par collision avec un électron, soit par absorption d'un photon. Dans le premier cas, la réaction s'écrit :



b. L'ionisation par collision électronique

L'ionisation d'un gaz par les électrons libres accélérés dans le champ électrique est le processus essentiel de la formation des ions positifs, ce phénomène est appelé processus α (ou avalanche). L'ionisation n'a lieu par choix électronique que lorsque l'énergie cinétique de l'électron incident est au moins égale à l'énergie d'ionisation de l'atome considéré. On écrit :



c. La photo-ionisation

Pour qu'un processus d'ionisation puisse se produire lors de l'absorption d'un photon par une particule gazeuse, il faut que l'énergie du photon incident soit au moins égale à l'énergie d'ionisation de la particule considérée [29]. La photo-ionisation peut aussi se produire comme suit : les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des molécules neutres qui reviennent à leur état fondamental avec émission d'un photon.

d. La recombinaison : soit deux types à considérer :

✚ **Recombinaison entre ions**

Ce phénomène est caractérisé par la présence de particules chargées différemment (ions positifs et négatifs) qui échangent leurs charges pour y revenir à l'état neutre. Dans l'effet couronne, ces réactions se produisent dans la région de champ électrique faible.

✚ **Recombinaison ions positif- électron**

Lorsqu'un électron se recombine avec un ion⁺ positif pour redonner un atome neutre, la réaction libère une énergie d'ionisation sous forme d'un photon. Les photons émis peuvent à leur tour ioniser le gaz à une certaine distance ce qui expliquerait le développement de streamers.

e. L'attachement

L'attachement d'un électron par un atome ou une molécule neutre conduit à la formation d'un ion négatif. Ce processus ne peut pas avoir lieu si les électrons sont trop énergétiques.

f. Le détachement

Un ion négatif perd son électron supplémentaire. Dans le cas de l'effet couronne, ce processus ne joue qu'un rôle négligeable. La neutralisation d'un ion négatif a lieu principalement par collision ou par absorption de l'électron par un conducteur [12].

I.7. Mouvement des charges dans un champ électrique

Les particules chargées subissent normalement un mouvement désordonné d'agitation thermique et de diffusion. En présence d'un champ électrique, ces particules sont soumises de plus à une force $\vec{F} = q\vec{E}$ qui leur communique une accélération dans la direction du champ. Sous l'effet de cet ensemble de forces, les particules acquièrent en définitive une composante de vitesse moyenne \vec{v} . Le mouvement des ions est alors régi par la loi simple [30,31].

$$\vec{v} = \mu \cdot \vec{E} \tag{I.7}$$

Le coefficient μ est appelé mobilité ionique (en $m^2/V.s$). Elle est principalement une caractéristique du milieu gazeux, et indépendante sur une grande marge de variation du champ réduit E/P [32].

I.8. Densité de charge et de courant

Dans un référentiel donné, la densité de charge \tilde{n} définit la répartition des positions des charges et la densité de courant J définit la répartition de leur vitesse dans le même référentiel. En effet la détermination de l'évolution d'une particule chargée demande la connaissance de sa position et de sa vitesse. Un milieu peut être constitué d'un seul type de porteurs de charge ayant tous la même charge individuelle q . La densité de particule chargée n_p caractérise la densité des porteurs par unité de volume :

$$dN_p = n_p(P, t) \cdot dV \text{ et } \tilde{n} = n_p q \quad (\text{I.8})$$

dN_p représente le nombre de particules dans le volume élémentaire dV situé autour du point P à l'instant t . Si le milieu contient des porteurs de différents types, alors la densité de charge s'écrit :

$$\rho = \sum n_j q_j = n_1 q_1 + n_2 q_2 + \dots \quad (\text{I.9})$$

Où n_j désigne la densité de porteurs de type j et q_j est la charge individuelle de chaque type. La charge totale dq qui traverse la surface S orientée, avec une vitesse v entre les instants t et $t+dt$ est :

$$d_q = \iint n_p q \vec{v} d\vec{s} dt \quad (\text{I.10})$$

L'intensité i qui traverse une surface \vec{s} à l'instant t est égale au flux, à travers cette surface, de la densité de courant J exprimée en Ampère par mètre carré ($A.m^{-2}$) :

$$i = i_s = \frac{dq}{dt} = \iint \vec{j} d\vec{s} \quad (\text{I.11})$$

Tel que : $\vec{j} = n_p q \vec{v}$

Dans le cas où le milieu contiendrait des porteurs de différents types, alors la densité de courant sera écrite sous la forme suivante :

$$J = \sum n_j q_j v_j = n_1 q_1 v_1 + n_2 q_2 v_2 \dots \quad (\text{I.12})$$

I.9. Différents types de décharge couronnes

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure.

I.9.1. Décharge couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand l'électrode haute tension est portée à un potentiel positif et la plaque (le plan) à la terre. Dans ce cas, dans la zone du champ intense autour de l'électrode active, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode. Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation ; zone pointillée de la (figure I.4). Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de l'électrode active (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible dans l'air à pression atmosphérique ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers le plan mis à la terre. Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs [33], est appelée région de « dérive » (Figure I.4). Pour cette décharge, il y a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode.

D'après les modélisations de Loiseau et al [34], la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de $2 \cdot 10^5$ m/s) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires. Goldman et al. [35] indique qu'un courant positif de 50 μ A se décomposerait en un courant unipolaire continu de 20 μ A, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à 30 μ A percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz.

✚ Stabilité du phénomène

Une succession d'avalanches se forment dans une certaine zone. Mais il est quand même difficile d'obtenir un phénomène stable [13].

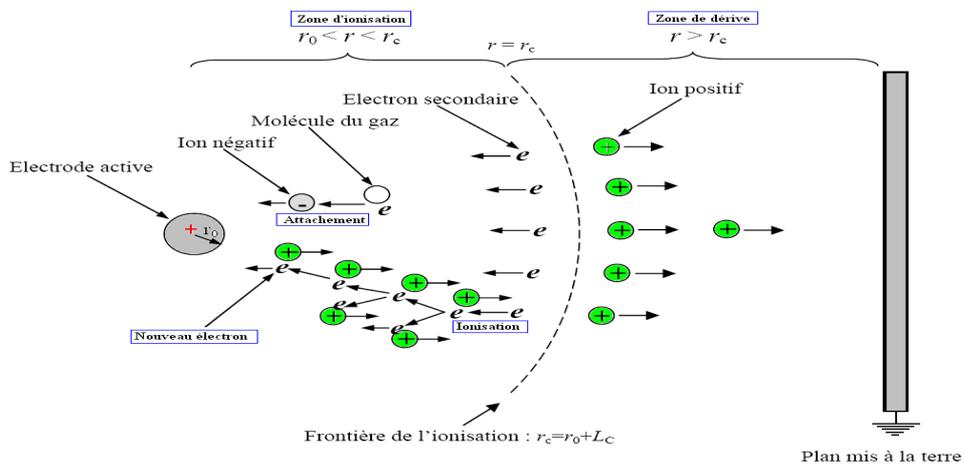


Figure I.4 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive [36].

I.9.2. Décharge couronne négative

Dans le cas où l'électrode active est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de l'électrode HT. Goldman et Sigmond [37], expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (Figure I.5).

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. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc.

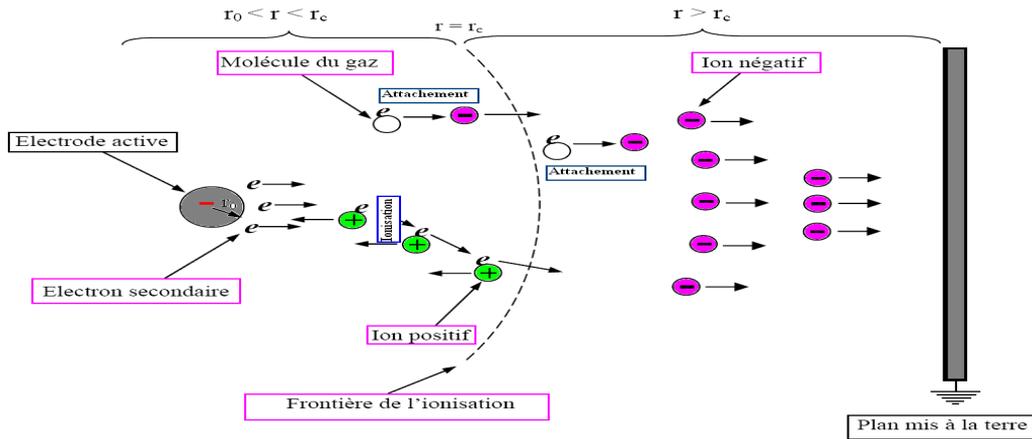


Figure I.5 : Schématisation d'une décharge couronne continue négative [36]

Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée [38].

⚡ Apparence lumineuse

Un courant de particules négatives part de l'électrode active (HT) vers l'électrode passive (mise à la terre), il atteint 1 à 100 μ A. On obtient (avec une pointe) une zone lumineuse en forme de champignon qui a la couleur bleue violacée dans l'air [39]. Cette couleur est due au spectre de l'azote et des composés oxygénés. Dans le cas d'un fil, celui-ci est bordé de petits champignons. Une gaine sera formée autour du fil quand on augmente la tension [13].

⚡ Stabilités du phénomène

Ce phénomène d'effluve négatif ne s'étend qu'à une faible distance de l'électrode HT, donc pas question de formation d'un canal entre électrodes ; on peut réduire leur distance sans qu'il se produise d'étincelle. L'effluve négatif ne tourne pas de lui-même à l'étincelle. C'est un phénomène stable qui se confine au voisinage de l'électrode HT [39].

I.10. Géométries des électrodes

Les décharges couronnes sont des décharges électriques prés-disruptives qui se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes dissymétriques.

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

En revanche, à ces mêmes pressions, les plasmas de gaz rares exempts d'impuretés évolueront pratiquement instantanément en arc. En outre, les décharges couronnes ont pour avantage d'être faciles à produire dans de bonnes conditions de stabilité et de reproductibilité.

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 (typiquement 500 A pendant 100 ns) 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 quelque kilovolt.

Le système d'électrode « fil-cylindre » est très utilisé pour la dépollution des gaz d'échappement. Il a l'avantage de permettre la dépollution des gaz au sein même de la conduite d'échappement du gaz. La répartition aléatoire des charges produites entre le fil et le cylindre permet une dépollution du gaz en volume [40].

Parmi les configurations d'électrodes les plus utilisées, on trouve les systèmes pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre, lame-plan ou cylindre-cylindre (Figure I.6).

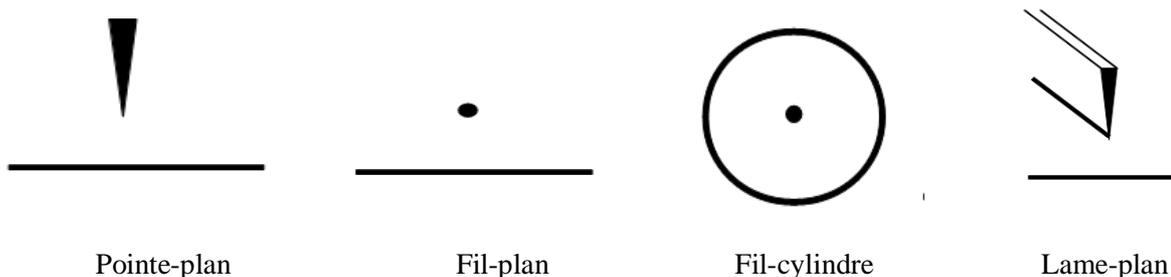


Figure I.6 : Configuration d'électrodes en décharge couronne

I.11. Facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne, on distingue trois facteurs essentiels :

- ✚ Facteurs géométriques,
- ✚ Facteurs physico-chimiques,
- ✚ Facteurs électriques.

I.11.1. Facteurs géométriques

a. Rayon de courbure

L'augmentation du rayon de courbure fait diminuer le champ électrique entre les électrodes engendrant une augmentation de la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne et la diminution du courant de décharge [41].

b. Distance inter-électrodes

La figure I.7 illustre l'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge couronne.

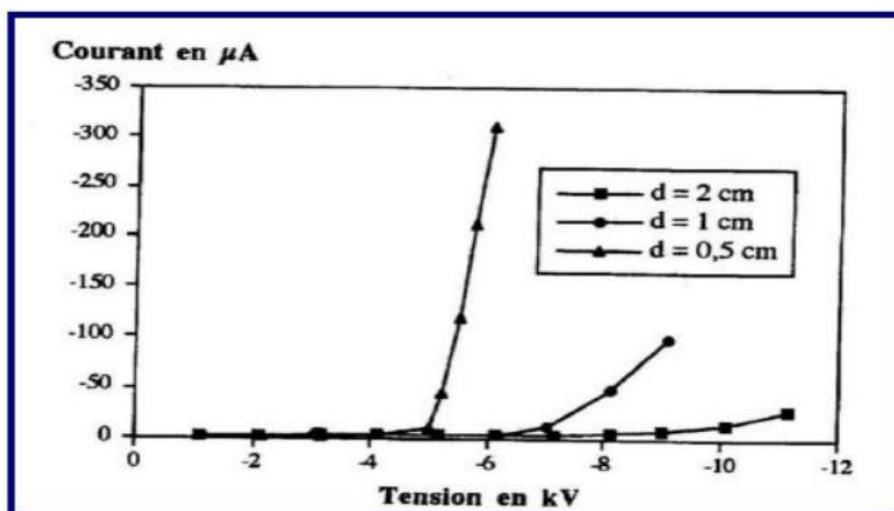


Figure I.7 : Effet de la distance inter-électrode sur les paramètres de la décharge couronne [42]

D'après cette figure, 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 de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites [42].

I.11.2. Facteurs physiques

a. La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [43]. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit « $p \cdot d$ ».

b. L'humidité

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons entête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [42]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

c. La pression

L'influence de la pression sur le courant de décharge fourni par la source d'ions est très marquée. Dans le domaine 0,1-1 bar, Nouri et al. [44] ont trouvé que l'effet de la pression sur le seuil est équivalent à celui de la distance inter-électrodes. D'après la loi de Paschen, plus la pression augmente, plus le nombre de particules dans l'espace inter-électrodes augmente, et les libres parcours moyens des particules chargées diminuent. Par conséquent, l'ionisation de l'air est réduite. Le seuil d'apparition de la décharge couronne augmente avec la pression, par contre la mobilité des porteurs de charges diminue [45].

I.11.3. Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continu ou alternative. Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [46].

I.12. Applications de la décharge couronne dans le domaine industriel

I.12.1. Filtrage électrostatique

Le principe de fonctionnement des précipitateurs électrostatiques (PES) est basé sur l'action du champ électrique sur les particules chargées. La force électrique agit directement sur les particules chargées à retenir ; donc ces forces sont des forces séparatrices. Ce phénomène de précipitation électrostatique se retrouve largement dans les filtres électrostatiques (appelés également dépoussiéreurs électrostatiques). Les électro-filtres

traitent des fumées de charbon, l'air pollué, des brouillards d'huile, des fumées de soudage, des gaz évacués par les moteurs diesel,...etc.

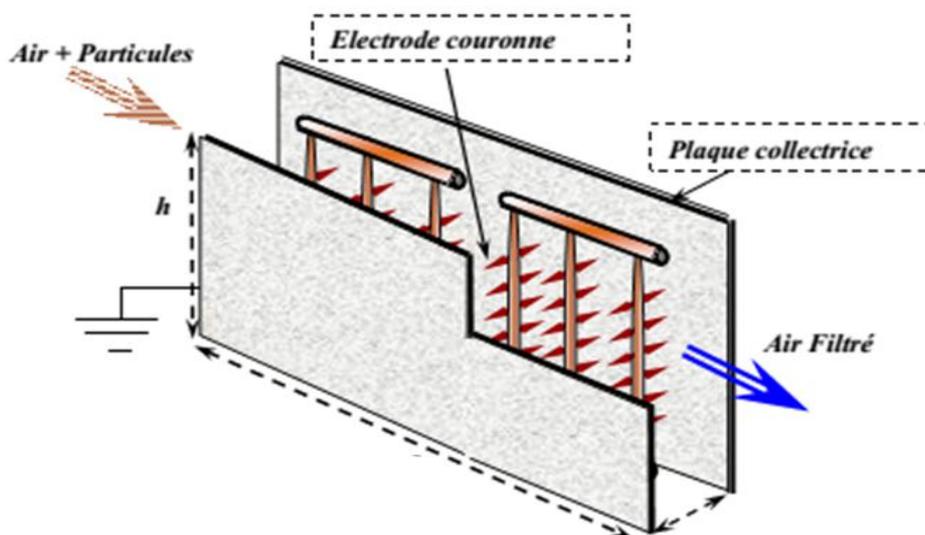


Figure I.8 : Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes

Le dépoussiéreur montré dans la figure I.8, se compose d'un ensemble de cylindres conducteurs sur lesquels il y a des électrodes pointues portées à un potentiel V , sont situées à mi-distance des deux électrodes planes parallèles qui sont au potentiel 0 (mise à la terre). Des décharges couronnes se forment au voisinage de l'extrémité des pointes et les ions qui ont la même polarité que la pointe sont repoussés vers le plan. Cela conduit à la formation d'une charge d'espace ionique ayant une densité très forte à proximité des pointes et qui décroît vers le plan collecteur. Certains de ces ions sont captés par les poussières en raison de la distorsion locale du champ électrique causée par la différence de la valeur entre la permittivité relative des particules et celle du gaz. Ainsi, les particules dans le gaz ou l'air seront chargées en captant les ions, jusqu'à atteindre une charge maximale. Ces particules sont soumises à la force électrique et se dirigent vers le plan où elles s'accumulent en formant une couche qui adhère à la paroi. Les vastes applications des filtres électrostatiques dans de nombreux domaines, posent des questions sur l'efficacité de collecte et sur le rendement industriel et économique de la précipitation électrostatique. Donc il faut bien comprendre le fonctionnement de ces appareils et les phénomènes physiques qui gouvernent cette application parce que la précipitation électrostatique met en jeu des phénomènes électriques et mécaniques des suspensions qui sont étroitement liés [13].

I.12.2. Séparation électrostatique

Le séparateur électrostatique à tambour est le modèle le plus utilisé dans l'industrie [47]. Il permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal avec des puretés très proches de 100% [48]. Dans ce type de séparateur, le champ électrique est créé entre deux électrodes (1 et 2) de la figure I.9 connectées à la source haute tension et l'électrode tournante (3) reliée à la terre. Deux mécanismes de charge sont simultanément employés « bombardement ionique » et « induction électrostatique ». Le premier est destiné aux particules isolantes ; le deuxième implique seulement les particules conductrices [49]. Chargées par bombardement ionique dans la zone de décharge couronne, les granules isolants adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique [50,51]. Ils tombent dans la partie du collecteur (7) qui leur est réservée lorsque la résultante des forces de pesanteur et centrifuge l'emportent sur la force d'image électrique. Pour assurer la chute de ces particules, certains séparateurs électrostatiques industriels sont équipés par une autre électrode couronne, appelée l'électrode de neutralisation (5), pour éliminer la charge acquise. Les particules qui restent collées sont séparées de la surface du tambour par une brosse (6).

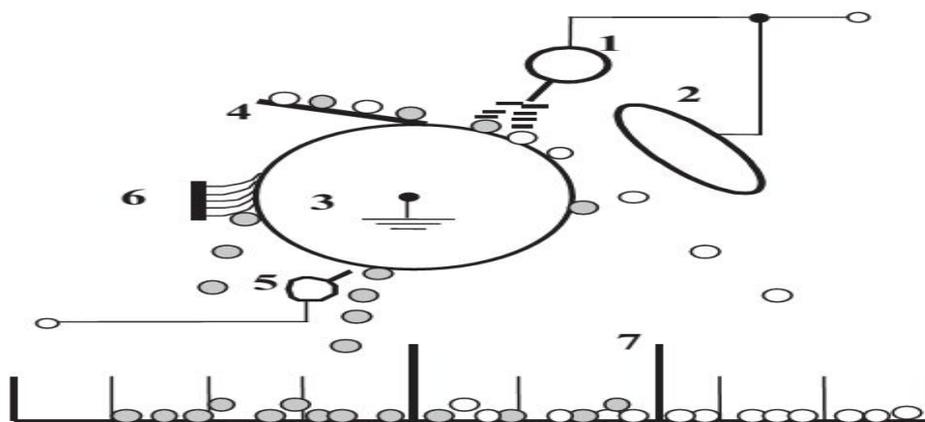


Figure I.9 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [52]

I.12.3. Neutralisation et charge des médias non-tissés

La présence de charges électriques à la surface des matériaux isolants est accompagnée assez souvent de nuisances électrostatiques non négligeables. Dans de nombreuses applications, telles que la manipulation de matières textiles, des feuilles de papier ou des films polymères, les forces électriques associées à ces charges peuvent coller les matériaux les uns aux autres ou à des surfaces métalliques. Les décharges électriques à partir d'éléments chargés représentent une importante source de danger dans le processus de

fabrication des dispositifs électroniques. La neutralisation de la charge électrique est couramment faite en utilisant la décharge couronne générée par de diverses configurations d'électrodes. Dans certains cas, afin de mieux contrôler la valeur du potentiel, et donc de la charge à la surface des matériaux à neutraliser, une configuration d'électrodes de type « triode » est employée (Figure I.10). Cette configuration est aussi utilisée pour la charge des films ou des médias non-tissés isolants. C'est pour cela que plusieurs recherches ont visé plus particulièrement cette classe d'applications du système d'électrodes « triode ». Un nombre d'études, menés par les industriels et les laboratoires de recherches, se sont focalisés sur la caractérisation de l'efficacité des filtres d'air réalisés en utilisant des médias non-tissés, soumis au préalable à l'action d'une décharge couronne [13].

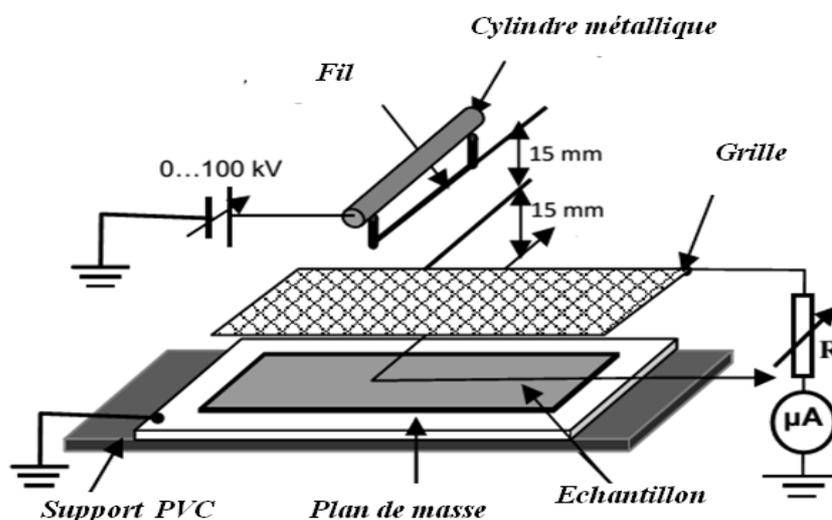


Figure I.10 : Système de neutralisation et de charge des médias de type triode [53]

I.12.4. Paratonnerre

Le paratonnerre est un dispositif de protection extérieure contre les coups directs de la foudre. Il est conçu comme un appât à foudre. Il est composé d'une pointe métallique placée sur un toit et reliée à la terre par plusieurs conducteurs. La pointe des paratonnerres sert à attirer la foudre. Lorsque la foudre tombe, elle choisit en effet le chemin le plus facile pour réunir les charges électriques entre un nuage d'orage et la terre. Les conducteurs de descente servent à écouler le courant électrique qui se crée entre le nuage et la terre.

I.12.5. Générateur d'ozone

Un des effets positifs de la décharge couronne et l'utilisation pour la production de l'ozone. L'ozone est produit à partir de l'oxygène en tant que résultat de la décharge couronne qui va rompre les molécules stables de l'oxygène ainsi forment deux radicaux d'oxygène. Ces

radicaux peuvent se combiner avec les molécules d'oxygène pour former l'ozone [54], qu'est utilisé dans le traitement des eaux au désinfectant.

I.12.6. Autres applications

Outre les applications citées précédemment, l'effet couronne est aussi utilisé dans l'élimination de l'électricité statique, dans les photocopieurs ou les imprimantes à jet d'encre [55].

I.13. Problèmes liés à la décharge couronnes

I.13.1. 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.11).

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 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].

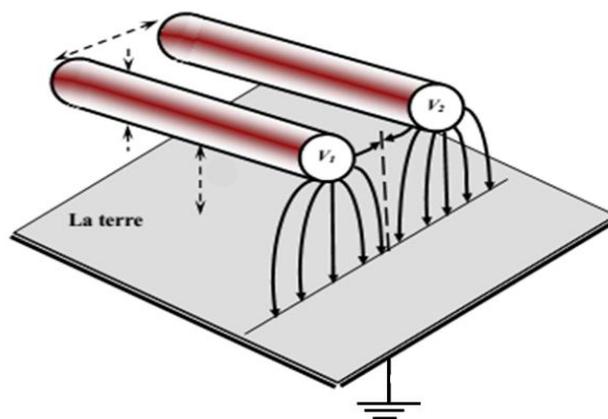


Figure I.11: Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission.

I.13.2. 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. Produire des vibrations (« le galop des lignes électriques ») [56], qui vont ajouter leurs effets à ceux des vibrations des câbles aériens [57] et accélérer le vieillissement des câbles, or, plus la surface d'un conducteur est dégradée, plus l'effet couronne sera important et plus le champ perturbateur sera élevé. Ces 3 phénomènes apparaissent notamment sous la pluie [58] ou par temps très humide « s'émettent à vibrer à la fréquence naturelle du conducteur, par faible vent sur les lignes à haute tension lorsque des gouttes d'eau sont suspendues sous les conducteurs en condition de pluie, de neige ou de brouillard intense » [59] ou de présence de gouttes d'eau suspendues sur le dessous d'un câble; « la présence intermittente de la charge d'espace [60-62] et du vent ionique situé à proximité immédiat des gouttes d'eau suspendues au conducteur sont les causes principales de ce phénomène »[56].L'ampleur et la localisation vont dépendre de plusieurs paramètres valeur et polarité du champ électrique à la surface du conducteur, intensité des précipitations, vitesse du vent transversal [56], température [63]
4. 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 [56].
5. Une pollution de l'air qui pourraient 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).

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les décharges électriques, plus particulièrement la décharge couronne.

Ensuite, nous avons décrit les différents mécanismes de la décharge et cité les différents types de décharge. Les paramètres influençant la décharge couronne ont été brièvement discutés. Enfin, nous avons donné quelque application de la décharge couronne dans le domaine industriel et les problèmes liés à cette dernière.

Le chapitre qui suit fera objet, d'une description du dispositif expérimental et des méthodes de mesure.

Chapitre II : Description du dispositif expérimental

II.1. Introduction

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés au sein du Laboratoire Haute Tension de l'Université A. Mira de Bejaia en collaboration avec le Hall de Technologie.

Au court de nos expérimentations, nous avons principalement opté pour un travail qui consiste à la détermination des paramètres de la décharge couronne tels que : la tension appliquée, le courant de décharge, la tension seuil et la tension de claquage ainsi que la fréquence de répétition des impulsions de Trichel.

Nous allons présenter dans cette partie une étude expérimentale de la mesure du courant et de la tension lors de la décharge couronne en géométrie pointe-plan.

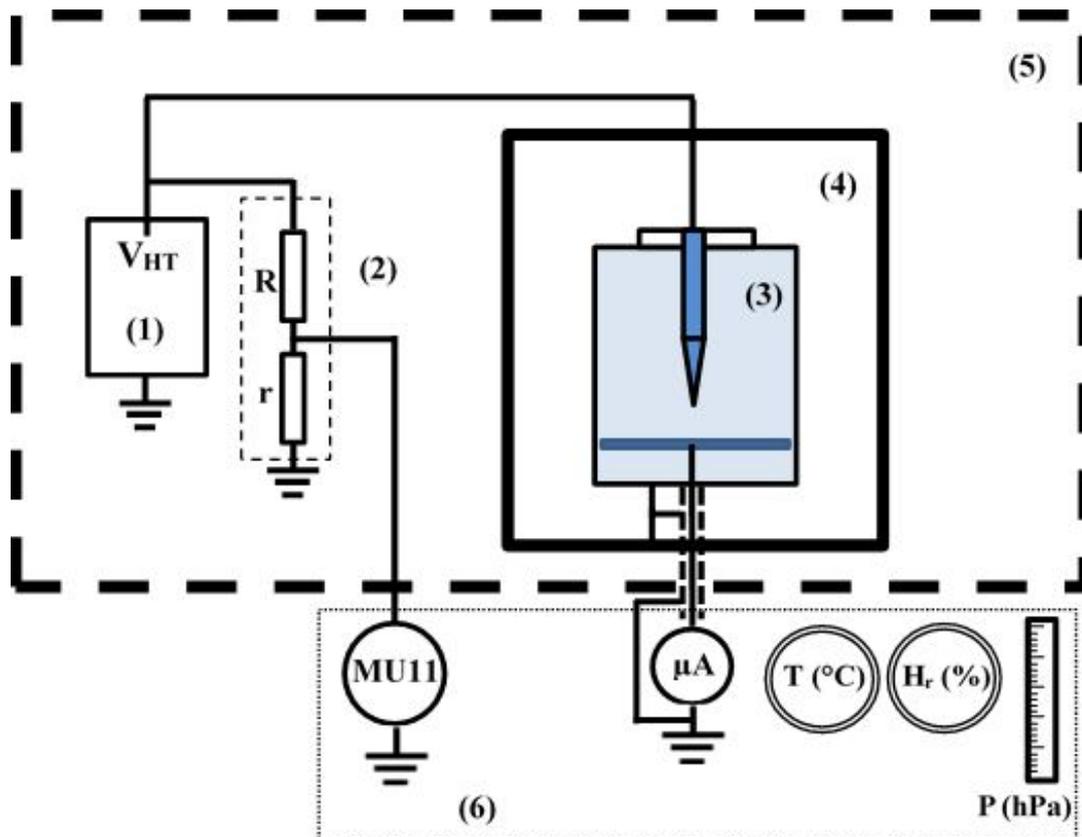
Notre étude consiste, dans un premier temps, à relever les caractéristique courant-tension de la décharge en mesurant la tension appliquée à l'électrode active ainsi que le courant de décharge à température ambiante en variant les paramètres géométriques (distance inter-électrode et le rayon de courbure).

II.2. Description du dispositif expérimental

Notre étude expérimentale consiste à appliquer une haute tension continue à une électrode de faible rayon de courbure (électrode haute tension ou encore électrode active) et mesurer le courant de décharge collecté par le plan.

Le schéma du dispositif expérimental adopté est représenté sur la figure II.1. Il est constitué d'une source d'alimentation, d'une cellule de décharge, d'une source de chaleur et des appareils de mesure.

Le système et les éléments mis sous haute tension sont séparés du manipulateur et des autres appareils de mesure basse tension par une grille de protection.



- | | | |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| (1) Source HT continue | (2) Diviseur résistif | (3) Cellule de décharge |
| (4) Système de chauffage | (5) Grille de protection | (6) Appareils de mesure |

Figure II.1 : Dispositif expérimental

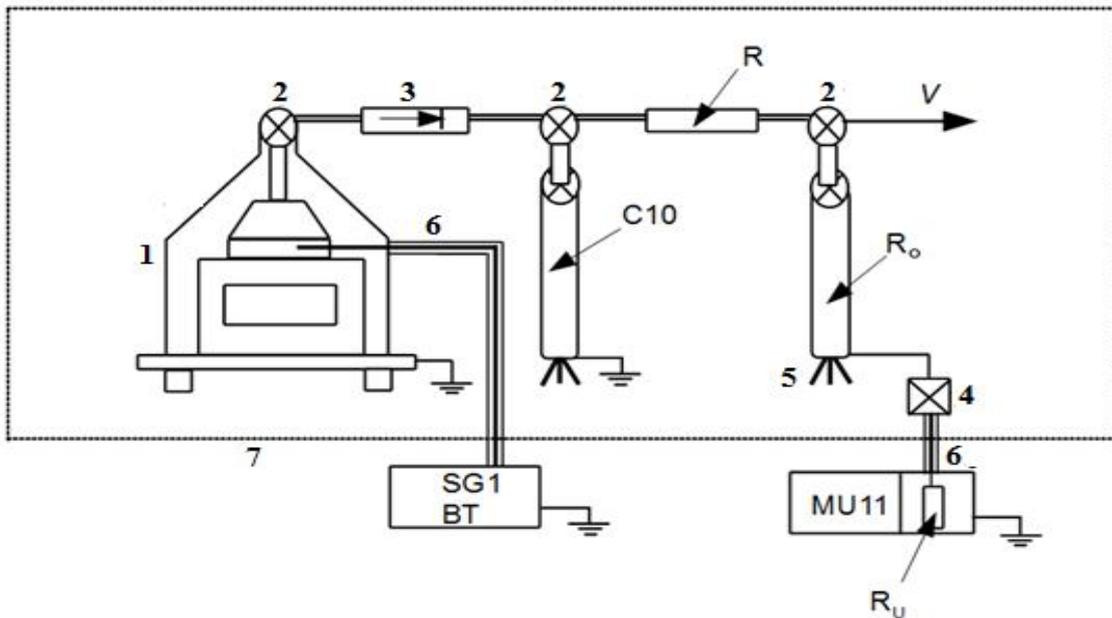
4. II.2.1. Source haute tension continue

Pour déterminer les paramètres de la décharge couronne positive et négative en géométrie pointe-plan, nous avons besoin d'une source capable de délivrer des hautes tensions pour les deux polarités. Pour cela, nous avons utilisé la source disponible au laboratoire haute tension de l'université de Bejaïa (Figure II.2). Cette dernière peut délivrer des tensions comprises entre 0 et 140 kV avec un courant maximal de 80 mA. Cette source est composée :

- ✓ d'une source basse tension SG1.
- ✓ d'un transformateur haute tension T100, alimentée par la source SG1.
- ✓ d'une diode haute tension G270.
- ✓ d'un condensateur de lissage C10 de 10 Nf.

L'enroulement primaire du transformateur haute tension T100 (1) est alimenté par la tension alternative variable délivrée par la source basse tension SG1. La variation de la basse tension SG1 peut s'effectuer en mode manuel ou bien en mode automatique par un moteur avec une rampe qu'on fixe sur l'appareil de commande (Figure II.3).

Pour avoir des tensions de sortie continues, un redresseur mono-alternance est associé au transformateur. Le redresseur est composé d'une diode haute tension G270 (**3**) à base de silicium pouvant supporter une tension de 270 kV en inverse, d'un condensateur de lissage **C10** de capacité de 10 nF et d'une résistance d'amortissement **R** de 106 kΩ, son rôle est de protéger la diode des surintensités. Pour mesurer la tension, un diviseur résistif est inséré et il est constitué d'une résistance haute tension **R₀** de 248.5 MΩ et d'une résistance basse tension **R_u** de valeur 501 kΩ à laquelle il faut associer en parallèle la résistance du voltmètre de crête MU11 **R_e** de valeur 4.24 MΩ.



- | | |
|---|---|
| 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 | SG1 Alimentation basse tension |
| C10 Condensateur de lissage | MU11 Voltmètre de crête |
| R Résistance d'amortissement | R ₀ Résistance haute tension |
| R _u Résistance basse tension | |

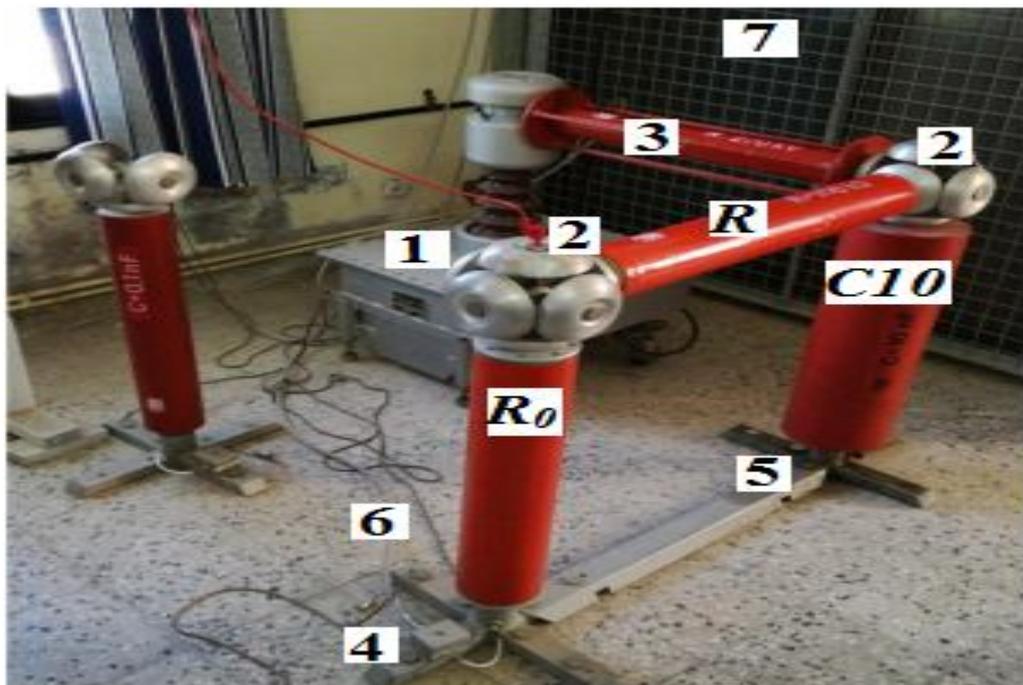
Figure II.2 : Schéma de la source haute tension utilisée

La figure II.3 représente la source basse tension **SG1**.



Figure II.3 : Photo de la source basse tension SG1

La figure II.4 représente une photo de la source haute tension utilisée.



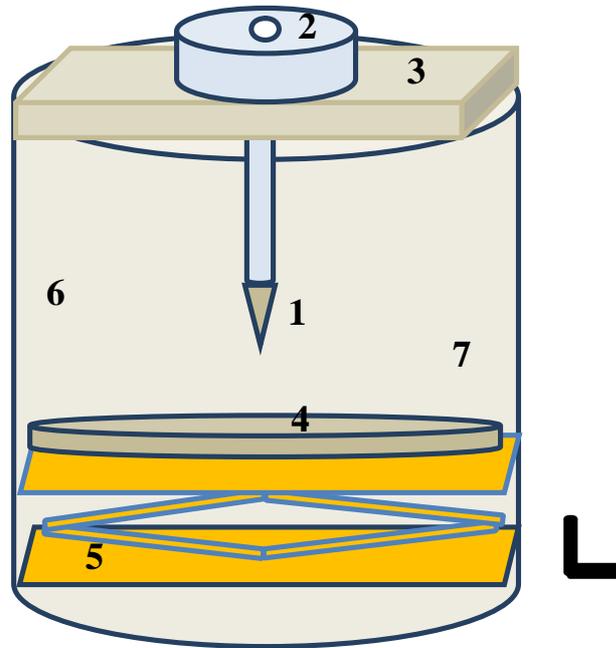
- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1 Transformateur haute tension (T100) | 2 Nœuds de liaison |
| 3 Diode haute tension (G270) | 4 Boite de connexion |
| 5 Support d'éléments | 6 Câble coaxial |
| 7 Grille de protection | C10 Condensateur de lissage |
| R Résistance d'amortissement | R ₀ Résistance haute tension |

Figure II.4 : Photo de la source haute tension

5. II.2.2. Cellule de décharge

La cellule de décharge est composée de 3 électrodes (Figure II.5) :

- ✓ L'électrode active,
- ✓ L'électrode passive,
- ✓ L'électrode de garde.

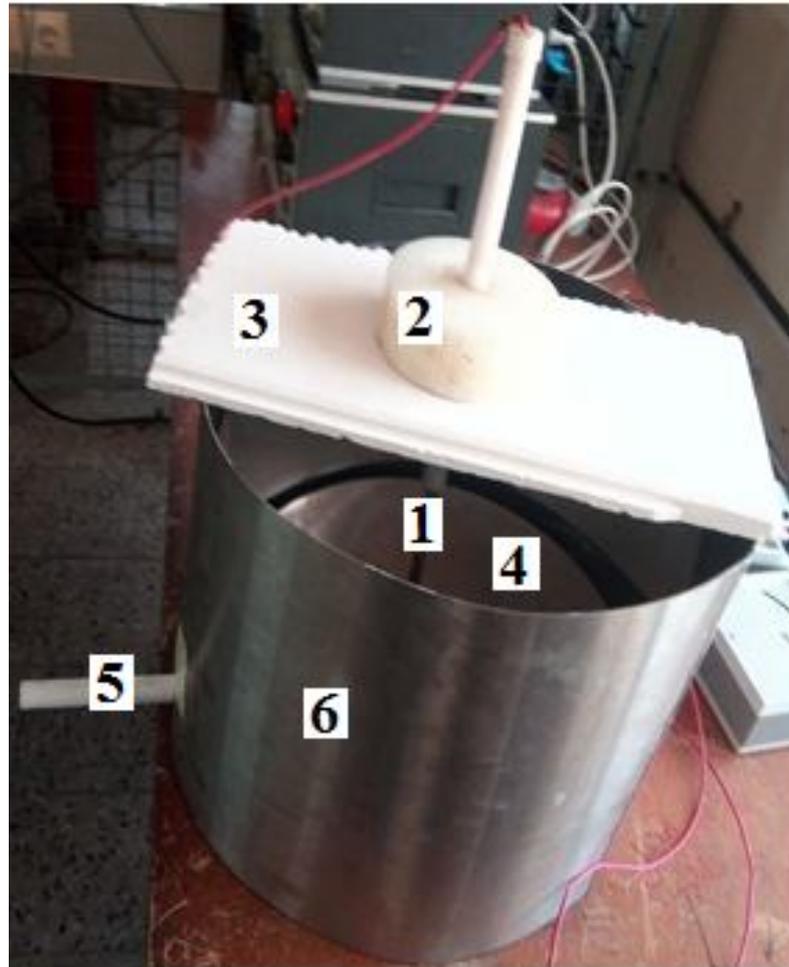


- | | |
|---|---------------------------------|
| 1 Electrode active (Pointe) | 2 Support en téflon |
| 3 Plaque de plâtre | 4 Electrode Terre (Plan) |
| 5 Cricquet variableur de distance inter-électrodes | 6 Electrode de garde (Cylindre) |
| 7 Règle de fixation de la distance inter-électrodes | |

Figure II.5 : Cellule de décharge pointe-plan

La pointe (1), jouant le rôle de l'électrode émissive, est fixée sur le support en téflon (2) et l'ensemble (pointe-support en téflon) est suspendu verticalement sur la plaque (3) en plâtre. En face de cet ensemble se trouve le plan circulaire (4), jouant le rôle de l'électrode terre, supporté par le cricquet (5), utilisé pour varier la distance inter-électrodes (pointe-plan). Tout le système est mis à l'intérieur du cylindre conducteur (6) mis directement à la terre, jouant ainsi le rôle d'une électrode de garde. La règle (7) est collée sur la face extérieure du cylindre, elle est utilisée pour fixer la distance inter-électrodes.

La figure II.6 montre la cellule de décharge utilisée dans nos expérimentations.



- | | |
|---|---------------------------------|
| 1 Electrode active (Pointe) | 2 Support en téflon |
| 3 Plaque de plâtre | 4 Electrode Terre (Plan) |
| 5 Cricquet variateur de distance inter-électrodes | 6 Electrode de garde (Cylindre) |

Figure II.6 : Photo de la cellule de décharge pointe-plan.

a. Configuration de l'électrode active

La photo et le schéma de l'électrode active utilisée lors de nos essais sont illustrés sur la figure II.7. Il s'agit d'une pointe en inox de diamètre fixe (D) de 10 mm et afin de varier le rayon de courbure des pointes, nous avons opté pour la variation de la longueur de la partie pointue (h). Nous avons réalisé 3 pointes de rayons de courbure : 40, 85 et 95 μm . Les rayons de courbure ont été mesurés à l'aide d'une machine nommée projecteur de profil disponible au hall de technologie qu'on peut voir ci-dessous (figure II.8).

Figure II.7 : qui montre la photo et le schéma de l'électrode active.

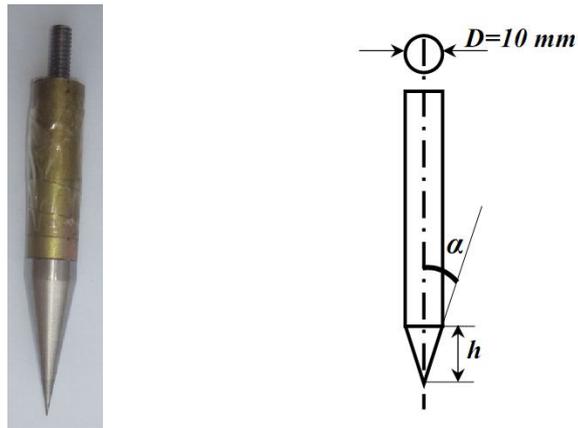


Figure II.7 : Photo et schéma de l'électrode active

La figure II.8 : montre la machine projecteur de profile.



Figure II.8 : Photo de la machine projecteur de profil

b. Configuration de l'électrode terre

L'électrode passive (terre) est un disque en acier inoxydable de diamètre 360 mm et de 3 mm d'épaisseur.

c. Configuration de l'électrode de garde

L'électrode de garde est un cylindre en inox de diamètre intérieur 390 mm, de 1 mm d'épaisseur et sa hauteur est de 350 mm. Il englobe la pointe et le disque afin de protéger le système des champs électromagnétiques extérieurs.

6. II.2.3. Appareils de mesure

a. Mesure de la tension appliquée

La mesure de la tension continue à la sortie de la source HT est effectuée à l'aide d'un voltmètre de crête (MU11) et d'un diviseur résistif décrit dans le paragraphe II.2.1 (Voir Figure II.2). Les résistances R_e et R_u sont reliées par un câble coaxial blindé. Le voltmètre de crête MU11 (Figure II.9) mesure la tension u aux bornes de la résistance basse tension et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée. $V = k.u$. Où k est le rapport du diviseur :

$$k = \left(\frac{R_0 + (R_e // R_u)}{R_e // R_u} \right) = \frac{R_0 R_e + R_0 R_u + R_e R_u}{R_e R_u} = 555.62$$

Ce rapport varie avec le vieillissement des éléments du diviseur. Cependant, l'étalonnage de la source a été effectué par le voltmètre électrostatique (0-30 kV) disponible au laboratoire haute tension (Figure II.10) afin de réajuster ce rapport.

La figure II.9 représente le voltmètre de crête.



Figure II.9 : Voltmètre de crête

La figure II.10 représente le Voltmètre électrostatique du laboratoire haute tension.



Figure II.10 : Voltmètre électrostatique du laboratoire haut tension

b. Mesure du courant de décharge

Pour mesurer le courant de décharge I , le plan de collecte est relié au microampèremètre à aiguille (Figure II.11) par un câble coaxial. La masse de ce dernier est reliés à l'électrode de garde (Voir Figure II.1).



Figure II.11 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge

c. Mesure des paramètres physiques de l'air

Les paramètres physiques de l'air influencent considérablement la décharge couronne, il est alors nécessaire de relever systématiquement ces paramètres avant chaque essai. Nous avons utilisé un baromètre à mercure pour la pression, un thermomètre à mercure pour la température, et un hygromètre à cheveux pour l'humidité (Figure II.1).

II.2.4. Système de chauffage

Pour étudier l'influence de la température sur la décharge couronne, notre cellule de décharge est mise à l'intérieur d'un four de volume $(800*600*480)$ mm³ avec lequel on peut atteindre 330°C disponible au laboratoire haute tension (Figure II.12). Ce dernier est équipé d'un thermostat pour assurer la régulation de température autour de la consigne et d'un thermomètre à mercure pour mesurer la température moyenne à l'intérieur du four.



Figure II. 12 : Photo du four utilisé

7. II.2.5. Visualisation de la forme d'onde du courant

Pour étudier la forme d'onde du courant de décharge, nous avons utilisé un oscilloscope qui mesure la tension aux bornes d'une résistance parcourue par le courant de décharge (Figure II.13). A partir de cette tension, on peut facilement déduire la forme d'onde du courant, en divisant cette dernière par la valeur de la résistance.

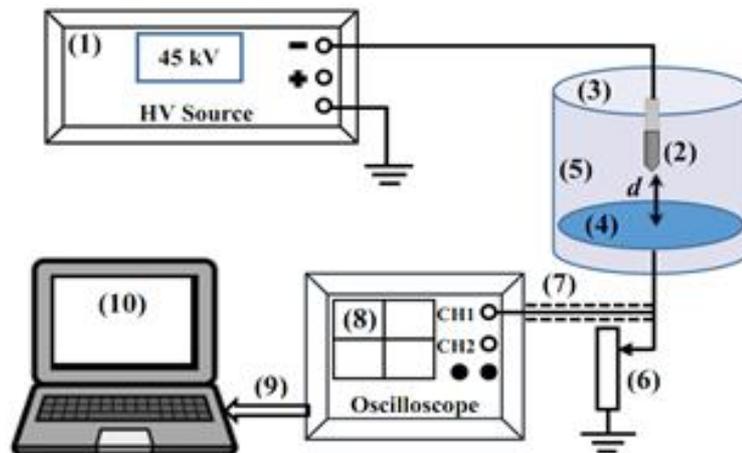


Figure II.13 : Dispositif utilisé pour visualiser la forme d'onde du courant

Ce dispositif est composé :

- ✓ de la source haute tension continue décrite précédemment,
- ✓ de la cellule de décharge, décrite précédemment aussi,
- ✓ du circuit de mise en forme,
- ✓ des appareils d'affichage et d'acquisition des données.

a. Circuit de mise en forme

Le circuit de mise en forme est composé de la résistance variable (6) R (0-22 k Ω) montée en parallèle avec le câble coaxial (7) de capacité $C=20$ pF connecter à l'oscilloscope. Lorsque le courant de décharge $I(t)$ traverse le circuit de mise en forme, il engendre une tension $u(t)$ aux bornes de ce dernier. Cette tension est composée d'une composante impulsionnelle et d'une composante continue. Les fronts de montée sont brefs et sont indépendant du circuit de mise en forme. Par contre, les temps de descente sont fortement liés aux caractéristiques du circuit de mise en forme, ils sont de forme exponentielle de constante de temps $\tau = RC$. La composante continue correspond à la tension continue entre deux impulsions successives.

b. Appareils d'affichage d'acquisition

Un oscilloscope Tektronics TDS 1012 (Figure II.14) muni d'une interface TDS2CMAX (9) est utilisé pour afficher et acquérir les données. L'ordinateur (10), relié à l'oscilloscope via le bus RS232 (11), est introduit pour l'enregistrement et le traitement des données.



Figure II.14 : Photo de l'oscilloscope Tektronics TDS 1012 disponible au laboratoire de recherche de génie électrique de Béjaia (LGEB)

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé le dispositif expérimental et son principe de fonctionnement. Nous avons présenté aussi la méthode de mesure des différents paramètres essentiels qui caractérisent la décharge couronne.

Dans le chapitre qui suit, nous procéderons à l'interprétation de l'étude expérimentale de la décharge couronne en géométrie pointe-plan avec variation de certains paramètres physiques et géométriques. Nous avons réalisé nos essais au laboratoire de haute tension de Bejaia, où nous y avons exploité les sources et appareils utiles pour nos mesures. Les divers résultats obtenus et leurs discussions font l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter et analyser et les résultats expérimentaux obtenus. L'objectif de ces analyses est de déterminer les paramètres de la décharge couronne en géométrie pointe-plan.

Nous allons commencer tout d'abord par relever la caractéristique courant-tension et étudier l'influence de certains paramètres physiques et géométriques sur cette dernière. Le principe consiste à mesurer simultanément la tension appliquée à l'électrode active et le courant de décharge collecté par le plan.

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

Pour relever la caractéristique I-V, nous avons utilisé le voltmètre de crête et le microampèremètre (décrits dans le chapitre II) pour mesurer respectivement la haute tension continue appliquée à la pointe et le courant de décharge. L'augmentation progressive de la tension appliquée est faite manuellement de la valeur 0 à la valeur V_I telle que $0 < V_0 < V_I$, où V_0 est la tension de début de l'effet couronne et V_I est largement inférieur à la tension de claquage V_c on laisse une marge de 8 à 10 kV entre les deux tensions (V_0 et V_c). La spécificité de la décharge DC positive ou négative est l'existence d'une zone de dérive des ions qui agit comme une impédance en série avec la zone d'ionisation et donne aux décharges couronnes leur stabilité [64]. Dans le cas d'une décharge négative, les ions positifs créés par ionisation peuvent revenir à la cathode assez rapidement, alors que les ions négatifs créés par attachement d'électrons migrent dans la zone de dérive où le champ est plus faible.

La figure III.1 illustre les caractéristiques I-V pour les deux polarités positives et négatives. Les essais ont été faits avec une pointe de rayon de courbure $r = 40 \mu m$ et une distance inter-électrodes $d = 50 mm$ dans les conditions atmosphériques de température $T = 30 \text{ }^\circ C$, pression $P = 1012 hPa$ et humidité $H = 65 \%$.

D'après cette figure, le courant continu qui traverse l'espace inter-électrodes augmente graduellement, d'une manière non linéaire, avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse une certaine valeur V_0 dite tension seuil de l'effet couronne et ce jusqu'à la rupture diélectrique du milieu gazeux à la tension V_c , dite tension de claquage ou de rupture.

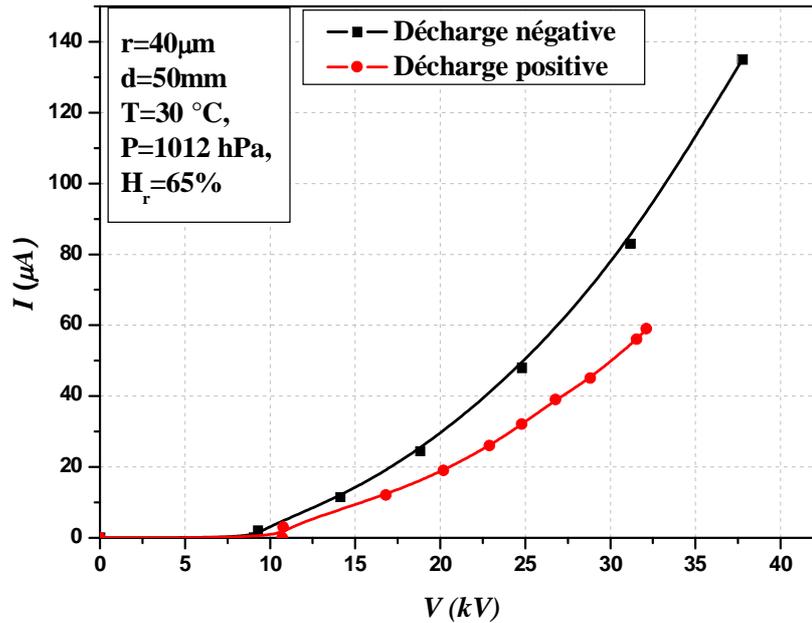


Figure III.1 : Variation du courant de décharge en fonction de la tension appliquée

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 [65]. Plus tard, il a été démontré que cette relation peut être généralisée pour d'autres géométrie, telles que pointe-plan [66] et pointe-grille [67]. Le modèle de Townsend s'exprime par :

$$I = KV(V - V_0) \quad (\text{III.1})$$

Où K est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la mobilité des porteurs de charges, de la température, de la pression et de l'humidité. V_0 représente la tension seuil de l'effet couronne.

Selon les travaux de Ferreira et al (1986) [68], la caractéristique courant-tension peut être représentée d'une manière encore meilleure par le modèle quadratique $K(V - V_0)^2$ dans le cas d'une décharge couronne négative en géométrie pointe-plan. En 2008, Meng et al [69] ont généralisé ce modèle sous la forme $K'(V - V_0)^n$.

Après avoir analysé les résultats par ces différents modèles, nous avons trouvé que le modèle le plus adéquat dans notre cas est celui de Townsend ($I = KV(V - V_0)$). Le traitement de tous nos résultats va se faire avec ce modèle.

Sur la figure III.1, on peut identifier aussi l'influence de la polarité de la tension sur la caractéristique I-V. La tension nécessaire pour maintenir le même courant de décharge est plus élevée avec une polarité positive. Par exemple pour avoir un courant de décharge constant $I = 50 \mu A$, on doit appliquer une tension $V = 30 kV$ en polarité positive alors qu'en polarité négative $V = 25 kV$. On remarque aussi que la tension seuil en polarité négative est supérieure. A celle en polarité positive.

Nous avons constaté aussi lors de nos essais de détermination de la tension de claquage (V_c) que cette tension est plus élevée en polarité négative. Par conséquent, la gamme de fonctionnement ($V_c - V_0$) est souvent plus grande dans une décharge négative.

Pour déterminer les paramètres du modèle de Townsend (K et V_0), nous allons tracer sur la figure III.2 le rapport (I/V) en fonction de la tension appliquée V , tel que :

$$I/V = K \cdot (V - V_0) \tag{III.2}$$

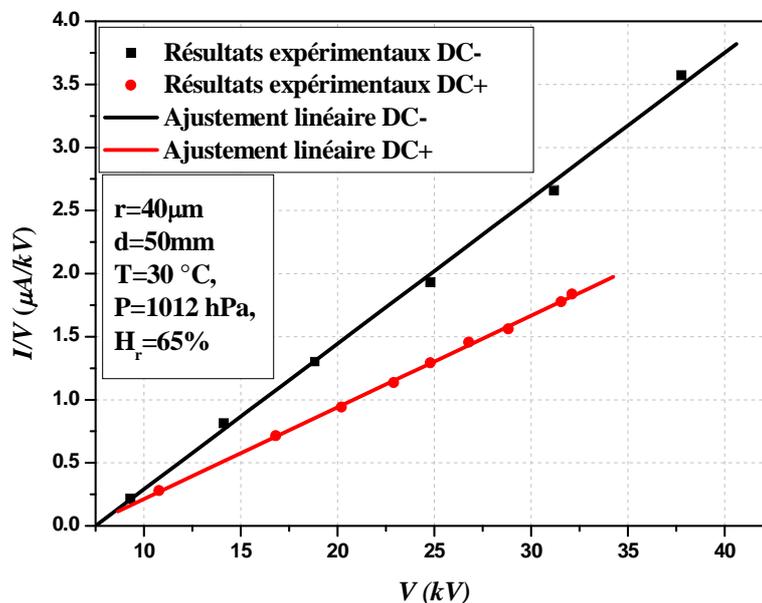


Figure III.2 : Rapport (I/V) en fonction de V

La courbe de variation du rapport (I/V) en fonction de la tension appliquée est (V) assimilée à une droite pour les deux polarités. La pente de cette droite est la constante K de l'équation III.2.

L'ajustement ou la régression linéaire (linear fit) des deux courbes nous donne les paramètres de l'équation III.1, tels que :

Type de décharge	$K (\mu A/(kV)^2)$	$V_0 (kV)$	R^2
Négative	$0,115380 \pm 2,84 \cdot 10^{-3}$	7.488 ± 0.607	0,99879
Positive	$0,07265 \pm 8,09895 \cdot 10^{-4}$	7.064 ± 0.276	0,99957

La constante géométrique K est proportionnelle à la mobilité apparente des porteurs de charge et elle est plus élevée dans le cas d'une polarité négative, et le R^2 c'est l'erreur calculer avec la méthode des moindres carré.

III.3. Influence des divers paramètres sur les paramètres de la décharge

III.3.1. Distance inter-électrodes

Lors de l'étude de l'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge couronne pour les deux polarités, nous avons utilisé la pointe de rayon de courbure $r = 40 \mu m$, fixé la température à $30 \text{ }^\circ C$ 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.

a. Tension de claquage

La figure III.3 représente la variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes en polarité négative et positive.

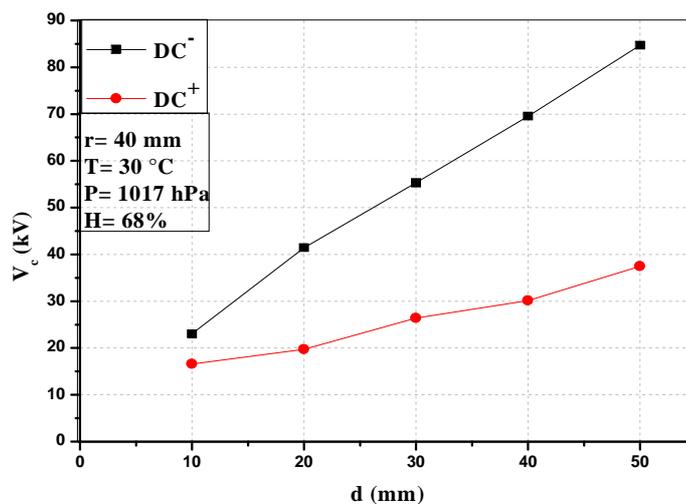


Figure III.3 : Variation de la tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes

La figure III.3 montre bien que la tension de claquage en polarité négative est nettement supérieure à celle de la polarité positive. Pour les deux polarités, la tension de claquage augmente avec la distance inter-électrodes.

b. Paramètres du modèle de Townsend

Les figures III.4 et III.5 représentent l'influence de la distance inter-électrodes sur la caractéristique I-V dans le cas d'une polarité négative et positive.

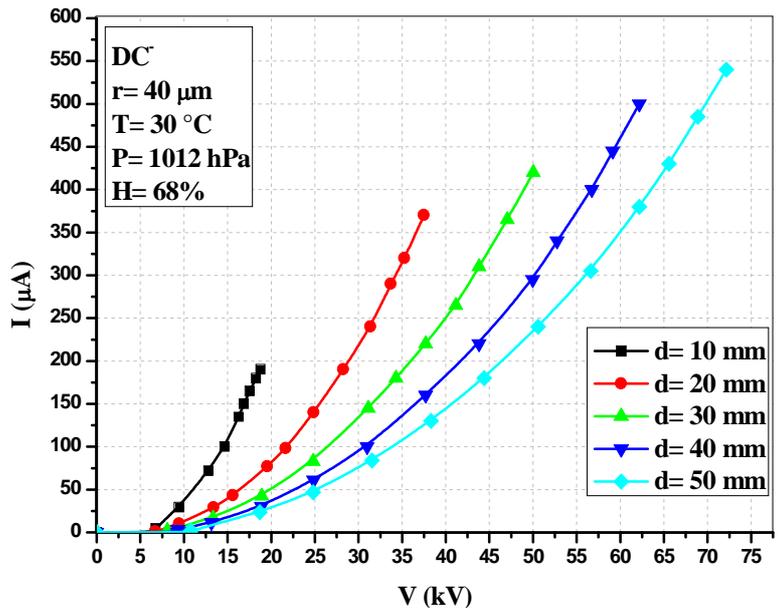


Figure III.4 : Caractéristiques I-V en polarité négative avec diverses distances inter-électrodes

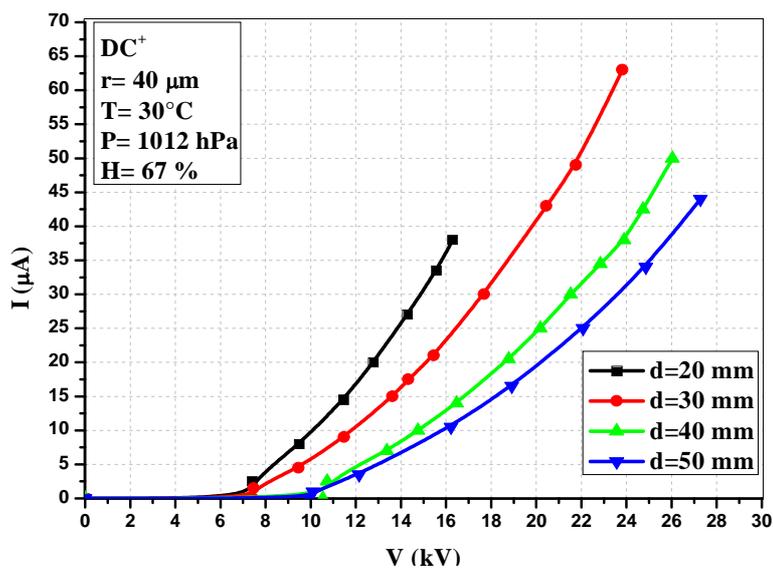


Figure III.5: Caractéristiques I-V en polarité positive avec diverses distances inter-électrodes

L'analyse de ces figures met en évidence la croissance rapide du courant de décharge avec la tension appliquée pour des faibles distances inter-électrodes. De plus, la tension seuil de l'effet couronne augmente avec la distance inter-électrodes.

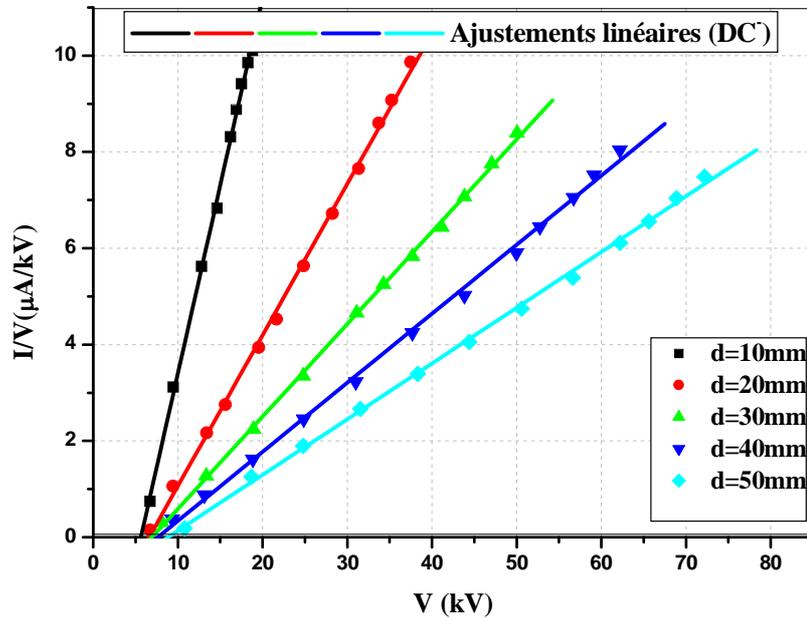


Figure III.6 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité négative avec diverses distances inter-électrodes

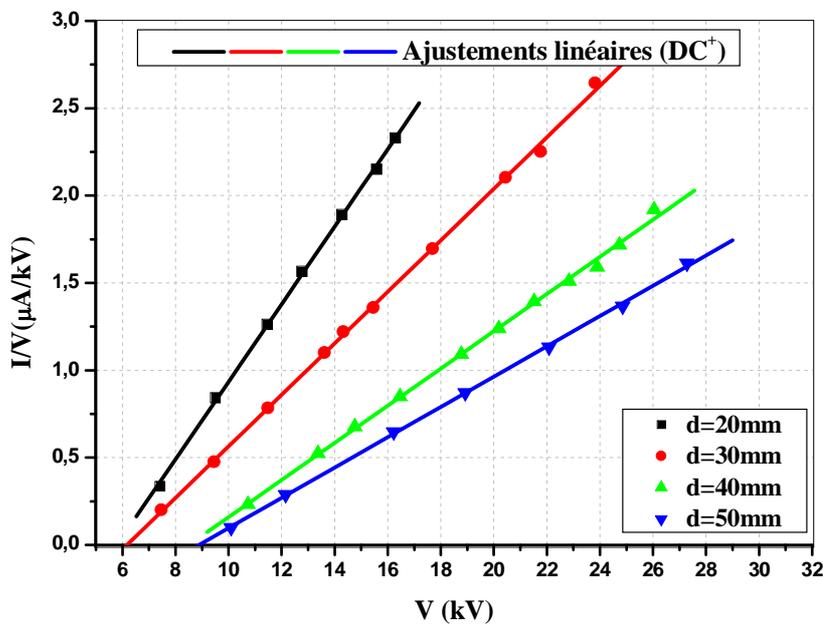


Figure III.7 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité positive avec diverses distances inter-électrodes

Les figures III.6 et III.7 montrent la variation du rapport (I/V) en fonction de la tension appliquée à l'électrode active V .

Les courbes de variation du rapport (I/V) en fonction de la tension appliquée V pour toutes les distances inter-électrodes et dans les deux polarités sont des droites. L'ajustement linéaire de ces courbes (fit linéaire) nous permet de déterminer les paramètres de l'équation III.1, à savoir le facteur géométrique K et la tension seuil V_0 . Le tableau ci-dessous récapitule les résultats des ajustements.

Tableau III.1 : Résultats des ajustements linéaires à diverses distances inter-électrodes

d(mm)	Constante géométrique $K (\mu A/(kV)^2)$		Tension seuil $V_0 (kV)$		R^2		K/K^+
	DC ⁻	DC ⁺	DC ⁻	DC ⁺	DC ⁻	DC ⁺	
10	0.780±0.011	/	5.64±0.17	/	0.998	/	/
20	0.313±0.003	0.222±0.002	6.61±0.09	5.79±0.02	0.998	0.999	1.409
30	0.191±0.001	0.147±0.001	6.93±0.06	6.17±0.02	0.999	0.999	1.299
40	0.143±0.002	0.106±0.001	7.63±0.08	7.50±0.03	0.997	0.997	1.349
50	0.115±0.001	0.086±0.000	8.81±0.06	8.7±0.01	0.998	0.999	1.337

Afin de faire une étude comparative entre la polarité positive et négative, nous avons tracé sur la figure III.8 le paramètre géométrique K pour les deux polarités et la tension seuil V_0 aussi pour les deux polarités sur la figure III.9.

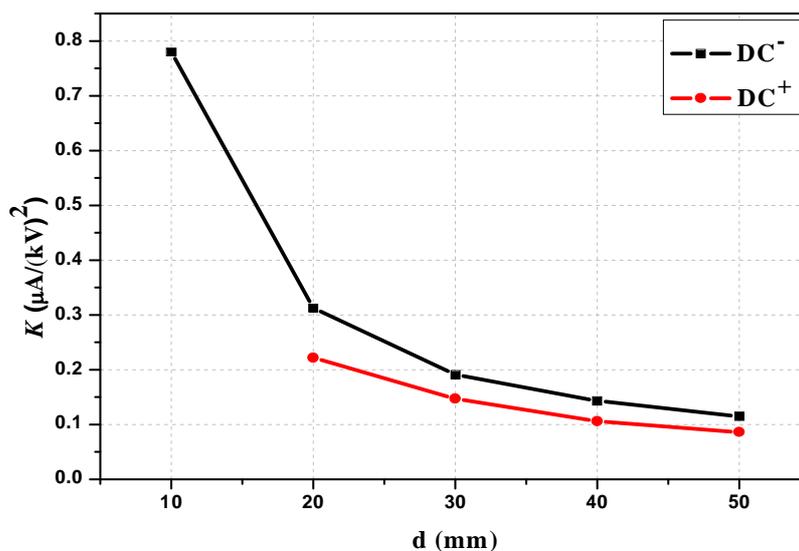


Figure III.8 : Variation du paramètre géométrique K en fonction de la distance inter-électrodes

La constante géométrique K est proportionnelle à la mobilité apparente des porteurs de charges et elle est plus élevée dans le cas d'une polarité négative. D'après cette figure, la constante géométrique K diminue avec les mêmes proportions pour les deux polarités. Cette constatation a été confirmée en calculant le rapport (K/K^+) qui est l'image du rapport de la mobilité des ions négatifs sur la mobilité des ions positifs (μ^-/μ^+) qui est presque constant en fonction de la distance inter-électrodes et tourne autour d'une valeur moyenne 1.348.

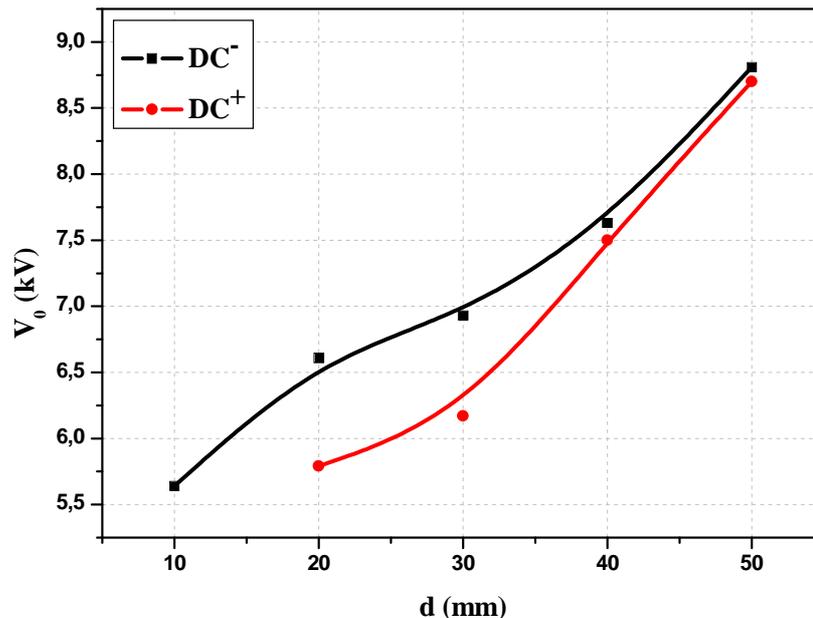


Figure III.9 : Variation de la tension seuil V_0 en fonction de la distance inter-électrodes

D'après la figure III.9, la tension seuil de l'effet couronne augmente avec la distance inter-électrodes pour les deux polarités. Il paraît clairement aussi qu'aux faibles distance (20 et 30 mm), cette tension est nettement supérieure en négatif par rapport au positif et pour de grandes distance (40 et 50 mm) elles sont presque égales.

III.3.2. Rayon de courbure

Afin d'étudier l'influence du rayon de courbure de l'électrode active sur la décharge couronne, nous avons fait des essais avec trois pointes de rayon de courbure 40, 85 et 95 μm .

a. Tension de claquage

Etant donné qu'on a manipulé avec trois pointes seulement, il nous est impossible de tracer les tensions de claquage en fonction du rayon de courbure. C'est pour cette raison qu'on a

préférée donner ces tensions dans le tableau ci-dessous ($d = 50 \text{ mm}$, $T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 1016 \text{ hPa}$ et $H = 64 \%$).

Tableau III.2 : Variation de la tension de claquage avec le rayon de courbure

$r \text{ (}\mu\text{m)}$	Tension de claquage (kV)	
	DC ⁻	DC ⁺
40	80.6	30.2
85	82.4	33.4
95	84.6	38.3

On constate bien que la tension de rupture du milieu gazeux augmente avec le rayon de courbure, car l'augmentation du rayon de courbure affaiblit le champ électrique entre les électrodes.

b. Paramètres du modèle de Townsend

Sur les figures III.10 et III.11, nous avons tracé les caractéristiques I-V pour les trois pointes et pour une distance inter-électrodes $d=40 \text{ mm}$, une température $T=30 \text{ }^\circ\text{C}$, une pression $P=1016 \text{ hPa}$ et une humidité relative $H=62 \%$.

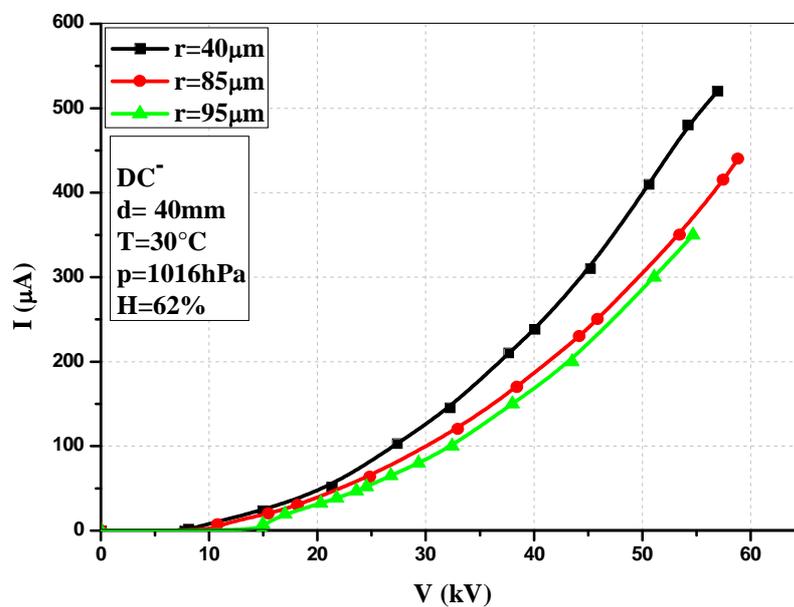


Figure III.10 : Influence du rayon de courbure sur la caractéristique I-V en polarité négative

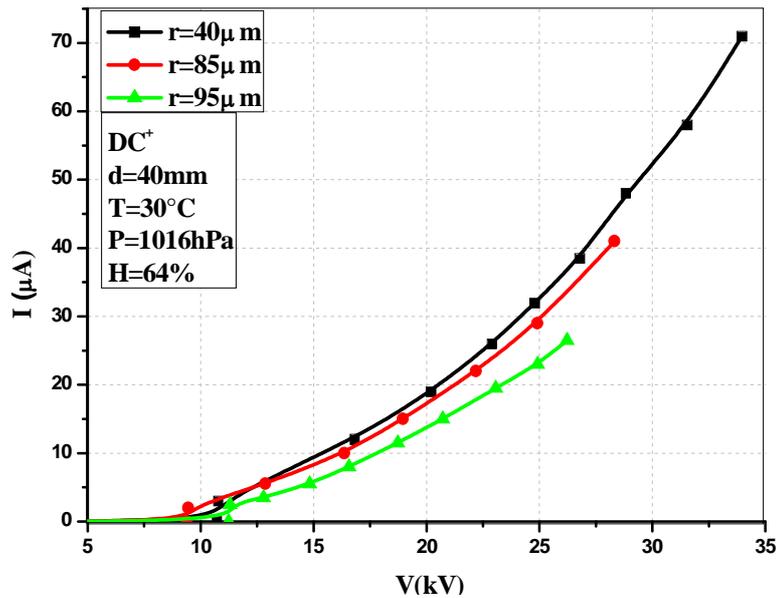


Figure III.11 : Influence du rayon de courbure sur la caractéristique I-V en polarité positive

D'après ces deux figures, il est clair que l'effet du rayon de courbure de l'électrode active est semblable à celui de la distance inter-électrodes. Tel que, l'augmentation du rayon de courbure translate la caractéristiques I-V vers des courants plus faible. Par exemple, pour une tension appliquée négative $V=50\text{ kV}$, le courant de décharge $I=410\text{ }\mu\text{A}$ pour la pointe de rayon $40\text{ }\mu\text{m}$, $I=305\text{ }\mu\text{A}$ pour un rayon de $85\text{ }\mu\text{m}$ et $I=290\text{ }\mu\text{A}$ pour un rayon de $95\text{ }\mu\text{m}$. Ce résultat est logique, étant donné que l'augmentation du rayon de courbure de la pointe engendre la diminution du champ électrique entre les électrodes causant ainsi la diminution du courant de décharge.

Pour déterminer les paramètres de l'équation III.1, nous avons tracé sur les graphes III.12 et III.13 les courbes de variation du rapport (I/V) en fonction de la tension appliquée (V) pour trois rayons de courbures et pour les deux polarités.

Les courbes de variation du rapport (I/V) en fonction de la tension appliquée (V) dans le cas de la décharge positive et négative et pour les trois rayons sont très proches de droites. L'ajustement linéaire de ces deux courbes nous permet de déterminer la constante géométrique K et la tension seuil V_0 .

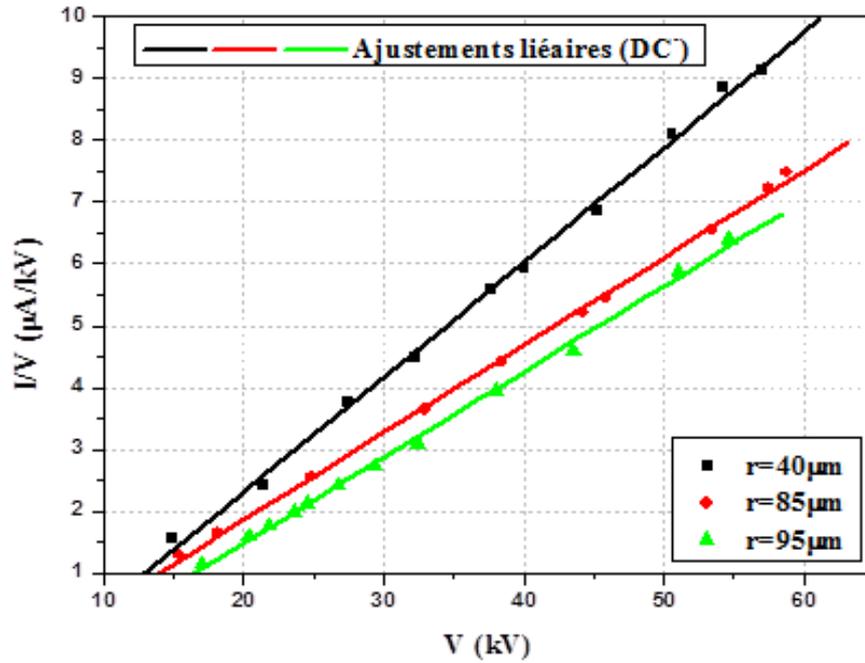


Figure III.12 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité négative avec variation du rayon de courbure

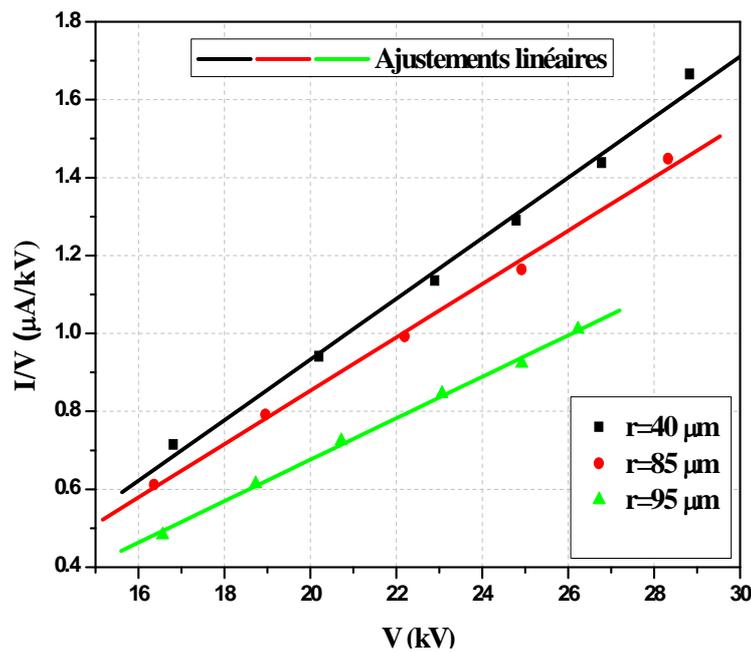


Figure III.13 : Rapport (I/V) en fonction de V en polarité positive avec variation du rayon de courbure

Le tableau III.3 représente les résultats des traitements de données. Il met en évidence la diminution de la constante géométrique K et l'augmentation de la tension seuil V_0 avec l'augmentation du rayon de courbure r . Dans ce cas, on ne peut pas parler de tracés $K = f(r)$ et $V_0 = f(r)$ car nous avons seulement trois points.

Tableau III.3 : Résultats des ajustements linéaires pour trois rayons de courbure

r(μm)	Constante géométrique K (μA/(kV) ²)		Tension seuil V ₀ (kV)		R ²	
	DC ⁻	DC ⁺	DC ⁻	DC ⁺	DC ⁻	DC ⁺
40	0.185±0.003	0.077±0.003	7.53±0.13	7.25±0.03	0.998	0.996
85	0.141±0.001	0.068±0.002	8.97±0.06	7.92±0.02	0.999	0.998
95	0.138±0.002	0.053±0.002	9.26±0.08	8.30±0.03	0.998	0.998

III.3.3. Température

Lors de nos expérimentations à température variable, tous les essais ont été fait avec la pointe qui a le plus faible rayon ($r = 40 \mu m$) avec une distance inter-électrodes $d = 50 mm$.

a. Tension de claquage

La courbe III.14 illustre la variation des tensions de rupture du milieu gazeux en fonction de la température pour la polarité positive et négative.

Le relevé des tensions de claquage en fonction de température se fait en variant la température du four de la température ambiante à 90 °C tout en faisant nos mesures rapidement afin minimiser la variation des deux autres paramètres physiques, en occurrence la pression et l'humidité.

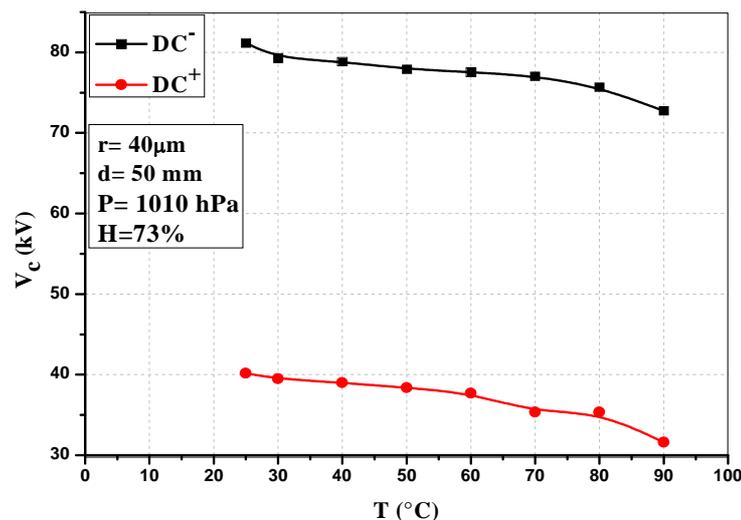


Figure III.14 : Variation de la tension de claquage avec la température

Cette figure montre une légère diminution des tensions de claquage avec la température dans les deux polarités positive et négative. On note aussi la grande supériorité des tensions de claquage négatives par rapport aux positives.

b. Paramètres du modèle de Townsend

Les figures III.15 représentent, respectivement, l'influence de la température sur la caractéristique I-V pour la décharge négative et positive.

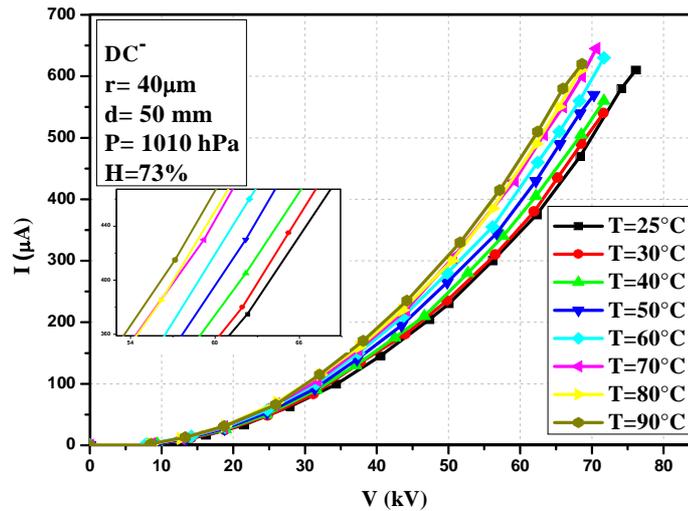


Figure III.15 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d’une décharge couronne négative

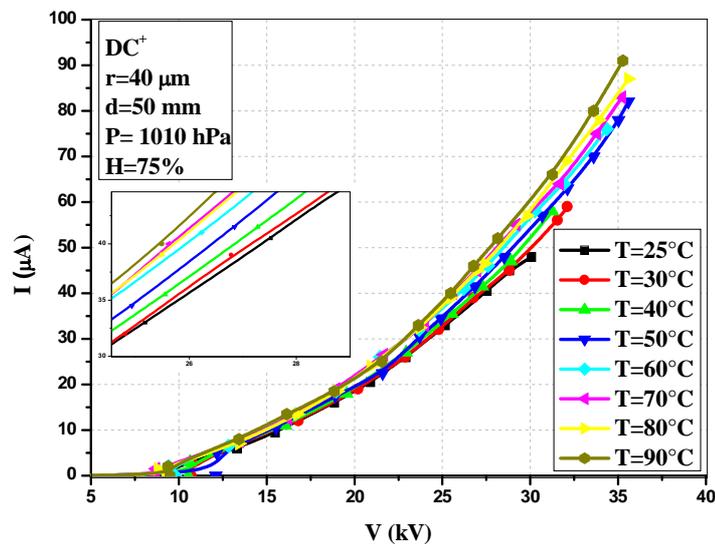


Figure III.16 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d’une décharge couronne positive

Les figures III.15 et III.16 montrent la variation du courant de décharge en fonction de la tension appliquée V pour différentes valeurs de la température T , cette variation à une forme

quadratique, et en bon accord avec la loi classique courant – tension formulée par Townsend. Nous observons que le courant augmente avec l’augmentation de la température. Lorsque la température du gaz augmente, le libre parcours moyen des molécules du gaz augmente et les électrons gagnent plus d’énergie pour former l’avalanche, ce qui en accord avec la prédiction de Peek [16].

Les figures III.17 et III.18 représentent les ajustements linéaires des courbes de variation du rapport (I/V) en fonction de la tension (V).

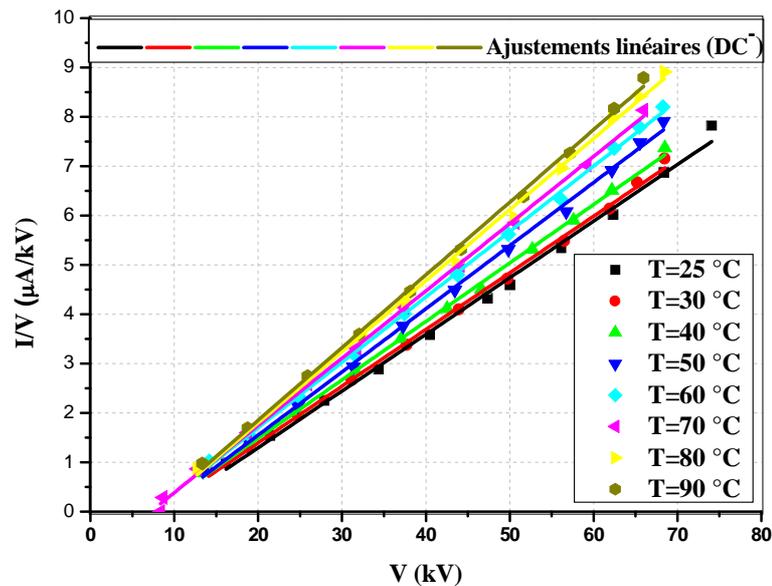


Figure III.17 : Ajustements linéaires des courbes I/V en fonction de V en polarité négative

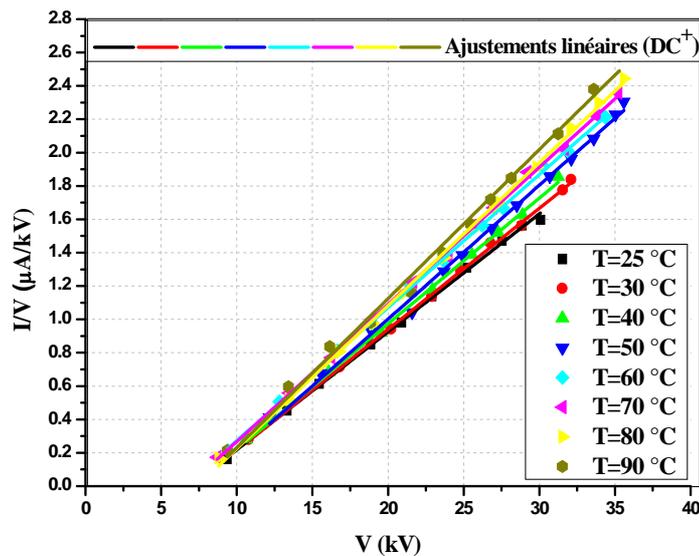


Figure III.18 : Ajustements linéaires des courbes I/V en fonction de V en polarité positive

Les résultats des ajustements sont récapitulés des ajustements dans le tableau III.4 :

Tableau III.4 : Résultats des ajustements linéaires avec variation de température

T (°C)	Constante géométrique $K (\mu\text{A}/(\text{kV})^2)$		Tension seuil $V_0 (\text{kV})$		R ²		K/K^+
	DC ⁻	DC ⁺	DC ⁻	DC ⁺	DC ⁻	DC ⁺	
25	0.115±0.001	0.070±0.000	8.80±0.08	7.91±0.01	0.996	0.998	1.642
30	0.116±0.001	0.072±0.000	8.03±0.06	6.86±0.02	0.998	0.999	1.611
40	0.120±0.001	0.075±0.001	7.96±0.05	6.85±0.02	0.998	0.998	1.6
50	0.129±0.001	0.078±0.001	7.23±0.05	6.51±0.03	0.998	0.996	1.653
60	0.133±0.001	0.079±0.000	7.16±0.05	6.57±0.01	0.998	0.999	1.683
70	0.140±0.001	0.082±0.000	7.10±0.06	6.57±0.01	0.998	0.998	1.707
80	0.143±0.001	0.085±0.000	7.47±0.07	5.74±0.02	0.998	0.998	1.682
90	0.148±0.001	0.089±0.002	6.80±0.06	5.21±0.05	0.998	0.993	1662

Le tableau III.4 montre bien l'augmentation de la constante K et la diminution de la tension V_0 avec la température. Pour voir la manière avec laquelle varient ces deux paramètres, on trace respectivement sur les figures III.19 et III.20 la constante K et la tension V_0 en fonction de la température pour les deux polarités.

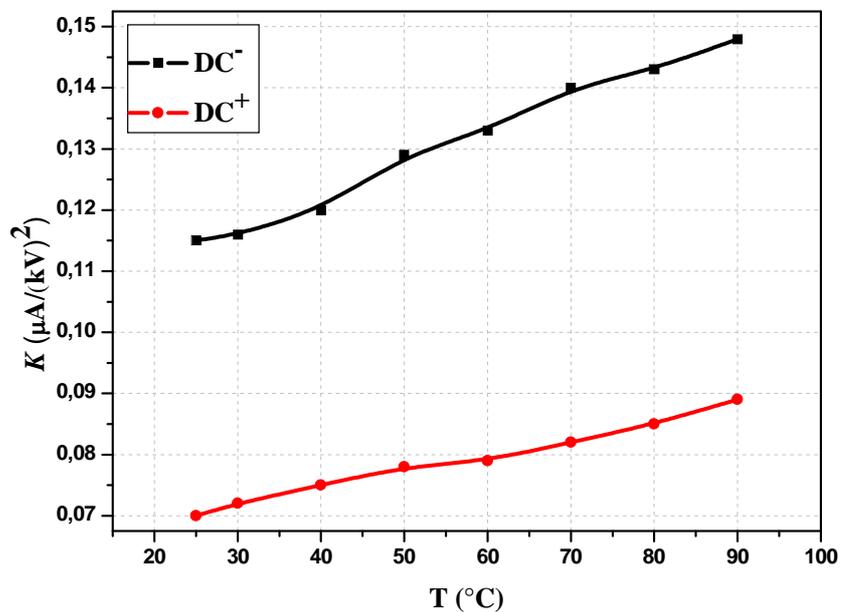


Figure III.19 : Variation du paramètre géométrique K en fonction de la température

Cette figure montre bien l'augmentation du paramètre géométrique K avec la température, ce qui justifie l'augmentation du courant de décharge avec la température. Les deux facteurs (en polarité positive et négative) augmentent de la même manière avec des

variations presque linéaires, ce qui nous a conduit, une autre fois, à calculer le rapport (K/K^+) qui fluctue autour d'une valeur moyenne qui est égale 1.655.

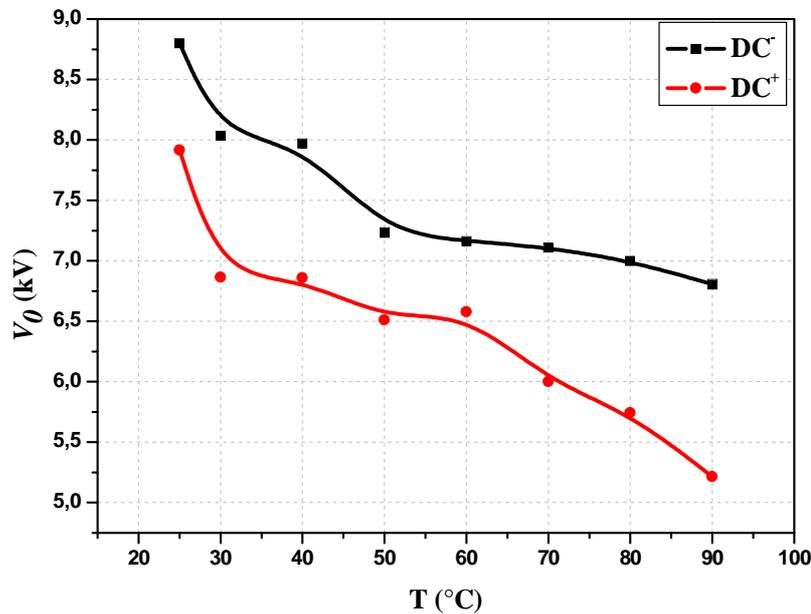


Figure III.20 : Variation de la tension seuil V_0 en fonction de la température

Cette figure met en évidence la diminution de la tension seuil de l'effet couronne avec la température. L'équation de variation du champ seuil connue avec le nom de la loi de Peek, a désigné l'influence de la température sur cette grandeur, tel que le champ seuil diminue avec la température. Alors, si nous avons les paramètres géométriques et les grandeurs physiques sont constants, le champ ne dépend que de la tension appliquée. Cependant la diminution du champ seuil avec la température engendre la diminution de la tension seuil de l'effet couronne.

III.4. Forme d'onde du courant de décharge

Dans cette partie du travail expérimental, nous avons relevé la forme d'onde du courant de décharge seulement en polarité négative. En polarité positive, le courant de décharge est très instable et la détection de la forme d'onde de ce dernier avec un oscilloscope s'est avérée impossible.

La figure III.21 illustre le train d'impulsions observé sur l'oscilloscope pour une tension supérieure à la tension seuil, $r = 40 \mu m$, $d = 20 mm$, $T = 30 \text{ }^\circ C$; $H = 58\%$ et $P = 1012 hPa$.

Le courant de décharge est constitué d'une composante continue de faible amplitude sur laquelle se superposent des impulsions brèves de Trichel (figure III.21). Les impulsions sont asymétriques et régulières avec une fréquence de répétition de l'ordre du kHz [70,71].

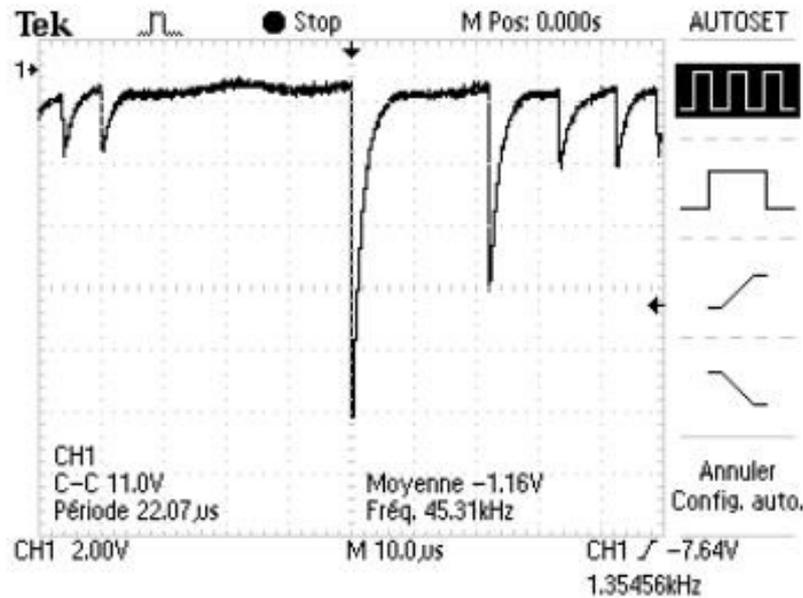


Figure III.21: Train d'impulsions observé à l'oscilloscope

Le courant de décharge en polarité négative est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée [38]. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle de temps entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode. Cet intervalle de temps correspond à la fréquence de répétition.

En polarité négative, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. En 1982, Goldman et Sigmond expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode [72]. Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers le plan.

Les mécanismes physico-chimiques au sein des décharges couronnes sont assez complexes et sont encore amplement étudiés par les physiciens des plasmas, car ils ne sont pas encore totalement connus. On peut par exemple citer les travaux de Loeb [17-74] ou Dascalescu [38].

Selon Sattari et al [75], le comportement de la première impulsion du train diffère du reste des impulsions. Habituellement, l'amplitude de la première impulsion est beaucoup plus élevée par rapport aux autres impulsions et son intervalle de temps est plus long. Ce phénomène est dû au fait que d'une part la première impulsion est toujours produite dans un espace à charges libres, en d'autres termes, il n'y a aucune charge négative significative dans l'espace pour supprimer le champ électrique dans la région d'ionisation ; d'autre part, le nombre d'ions négatifs produits lors de la première impulsion est beaucoup plus grand et donc, le temps nécessaire pour que ces ions négatifs dérivent vers le plan de masse est plus grand.

III.5. Influence des divers paramètres sur la fréquence de répétition

III.5.1. Tension appliquée à la pointe

La figure III.22 illustre la variation de la fréquence de répétition des impulsion de Trichel en fonction du potentiel appliqué à l'électrode active (pointe). Les essais ont été effectués avec la pointe de rayon de courbure $r = 40 \mu m$ pour une distance inter-électrodes $d = 20 mm$ dans les conditions de température $T = 30 \text{ }^\circ C$, pression $P = 1013 hPa$ et humidité relative $H = 59 \%$.

Même en polarité négative, la majorité des travaux ont été orienté vers la caractéristique courant-tension, sans étudier les caractéristiques spécifiques de l'impulsion comprenant la fréquence de répétition, l'amplitude, le temps de montée, et la durée des impulsions. En 1974, Lama [76] a effectué une série de mesures et a systématiquement étudié les caractéristiques électriques des impulsions de Trichel. Pour la fréquence de répétition des impulsions, il l'a exprimée en fonction de la tension appliquée et de la tension de seuil avec la même loi de variation utilisée par Tawsend en courant de décharge (Eq. III.1) :

$$f = K'V(V - V_0) \tag{III.3}$$

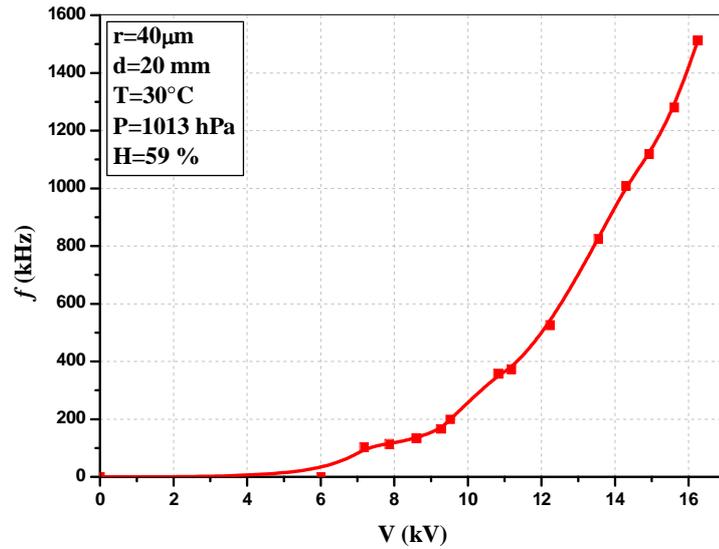


Figure III.22 : Variation de la fréquence de répétition en fonction de la tension appliquée

Pour faciliter le traitement des résultats, on trace sur la figure III.23 le rapport (f/V) en fonction de la tension appliquée (V).

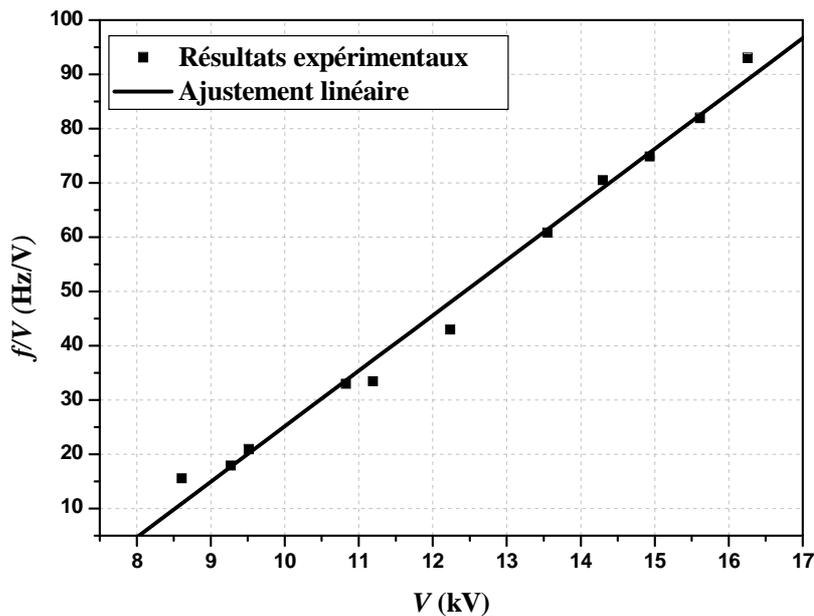


Figure III.23 : Ajustement linéaire de la courbe f/V en fonction de V

La courbe de variation du rapport (f/V) en fonction de la tension (V) est assimilée à une droite dont l'ajustement nous donne les paramètres de l'équation III.3 représentés sur le tableau ci-dessous.

K' (kHz/kV ²)	V_0 (kV)	R^2
10,21931±0,35164	7.5393±0.445	0,99471

Enfin, dans les conditions d'expérimentation ($r = 40 \mu m$, $T = 30 \text{ }^\circ C$, $P = 1013 \text{ hPa}$ et $H = 59 \%$) on peut donner une formule approximative :

$$f(\text{kHz}) = 10.21(V - 7.53), V(\text{kV})$$

L'augmentation progressive de la tension appliquée à la pointe permet d'observer les différents régimes de Trichel. Ils sont repérés schématiquement sur la figure III.24 :

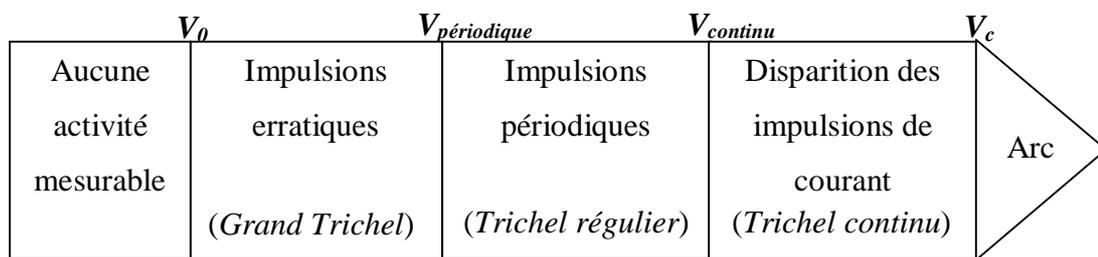


Figure III.24 : Différents régimes d'une décharge couronne négative, en fonction de la tension appliquée

- ✚ $V < V_0$: aucune activité n'est décelable avec les moyens expérimentaux utilisés ;
- ✚ $V = V_0$: lorsque la valeur de la tension atteint la tension seuil, une première impulsion de courant est enregistrée, elle est suivie d'autres de plus grande amplitude et erratiques, Loeb [17] les nomme *Grand Trichel* ;
- ✚ $V_{\text{périodique}} < V < V_{\text{continu}}$: des impulsions de courant, de plus faible amplitude et périodiques sont enregistrées, il s'agit du régime de Trichel régulier. L'augmentation de la tension appliquée entraîne l'apparition d'un courant continu mesurable qui se superpose aux impulsions. On note que l'augmentation du niveau de courant continu est proportionnelle à la diminution de l'amplitude des impulsions.
- ✚ $V_{\text{continu}} < V < V_c$: les impulsions de courant ont disparu au profit de la seule composante continue, il s'agit du régime de Trichel continu.

III.5.2. Distance inter-électrodes

La figure III.25 représente l'influence de la distance inter-électrodes sur la caractéristique fréquence-tension ($f-V$).

Contrairement à l'effet du potentiel appliqué à la pointe sur la fréquence de répétition des impulsions de Trichel, l'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne la diminution de la fréquence de répétition (figure III.25). Selon G. Trichel, la fréquence de répétition est étroitement liée au champ électrique sur la pointe. Or, ce champ en géométrie pointe-plan est

inversement proportionnel à la distance inter-électrodes. Alors le champ électrique entre les électrodes et la fréquence de répétition des impulsions de Trichel diminuent avec l'augmentation de la distance qui sépare l'électrode haute tension (pointe) et l'électrode terre (plan).

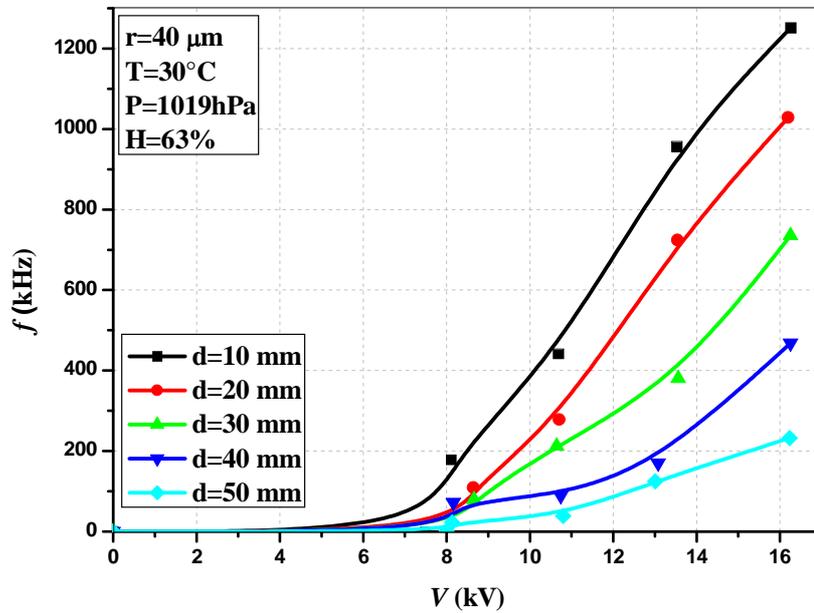


Figure III.25 : Caractéristiques fréquence-tension (f - V) avec variation de la distance inter-électrodes

Les ajustements linéaires des courbes f/V en fonction de V avec variation de la distance inter-électrodes sont représentés sur la figure III.26

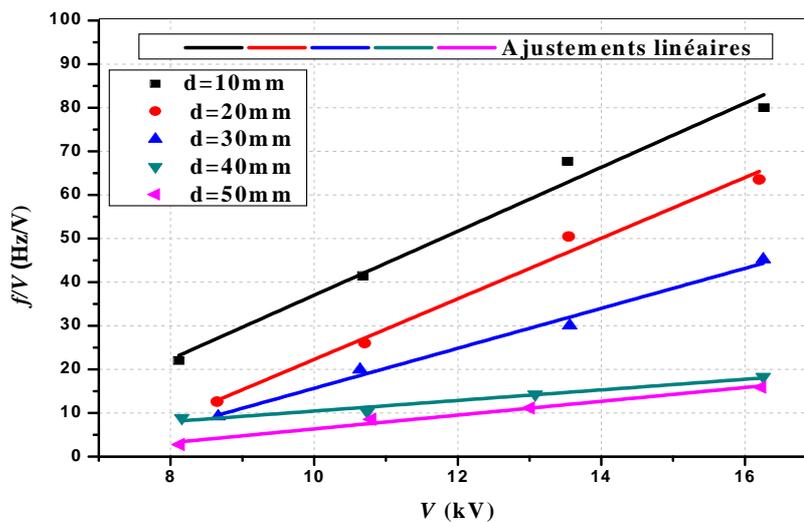


Figure III.26 : Ajustements linéaires des courbes f/V en fonction de V avec variation de la distance inter-électrodes

Les résultats des ajustements sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau III.5 : Résultats des ajustements linéaires des courbes f/V en fonction de V

d (mm)	K' (Hz/kV ²)	V_0 (kV)	R^2
10	7,33712±0,67084	4.95648±0.123	0.97533
20	6,9518±0,51616	6.79580±0.253	0,99453
30	4,58344±0,31343	6.58258±0.137	0,99536
40	1,21519±0,15255	1.4074±0.023	0,9846
50	1,58376±0.14072	5.9937±0.34560	0,9922

Les résultats des ajustements mettent en évidence la diminution de la constante K' sauf à $d=50\text{ mm}$ où nous avons enregistré une augmentation par rapport à $d=40\text{ mm}$. Concernant la tension V_0 , elle doit augmenter avec la distance d , alors que dans nos ajustements des parfois elle augmente et parfois elle diminue. En plus du caractère aléatoire de la décharge couronne, il faut noter que la fréquence de notre signal est de quelques kHz, alors un simple bruit peut perturber la mesure à l'oscilloscope.

III.5.3. Rayon de courbure

La figure III.27 montre l'influence du rayon de courbure de l'électrode active sur la caractéristique $f-V$.

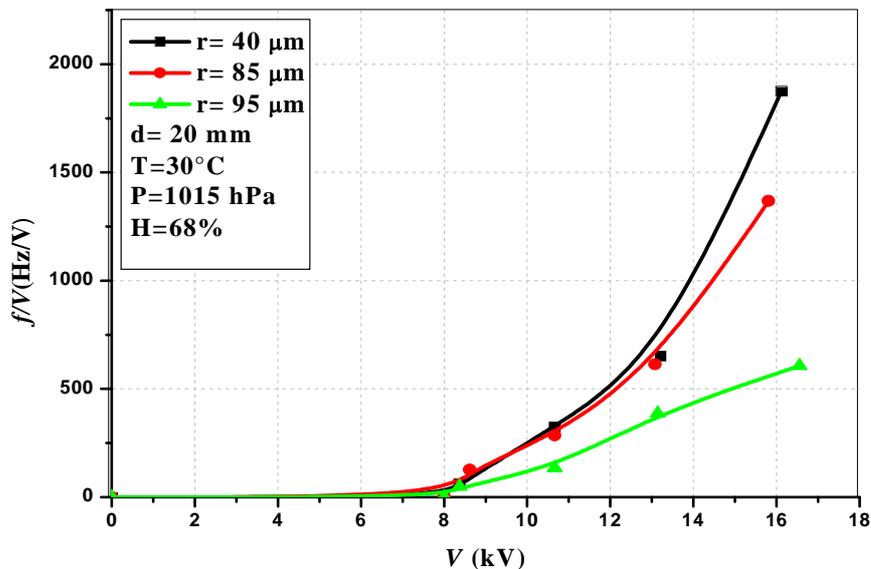


Figure III.27 : Influence du rayon de courbure sur la caractéristique fréquence-tension ($f-V$)

Il paraît très clairement que l'augmentation du rayon de courbure engendre la diminution de la fréquence de répétition des impulsions de Trichel. L'augmentation du rayon

de courbure de l'électrode HT induit une diminution du champ électrique entre les électrodes, ce qui va causer la diminution de la fréquence de répétition.

Concernant les ajustements des courbes f/V en fonction de V , nous pouvons les faire. Mais avec, seulement, trois rayons de courbure on ne peut pas faire une analyse fiable des résultats.

III.5.4. Température

Sur la figure III.28, nous avons tracé les caractéristiques $f-V$ avec variation de la température du milieu gazeux.

Les résultats obtenus sont très difficiles à traiter, car parfois on enregistre des augmentations avec la température et d'autres fois des diminutions.

De plus, l'augmentation de la température favorise la conduction du milieu gazeux avec l'augmentation du courant de décharge. Donc, logiquement, l'augmentation de la température va causer l'augmentation de la fréquence de répétition, résultats qu'on n'a pas pu illustrer peut-être à cause de la sensibilité des mesures où n'importe quelle source de bruit peut influencer nos mesures

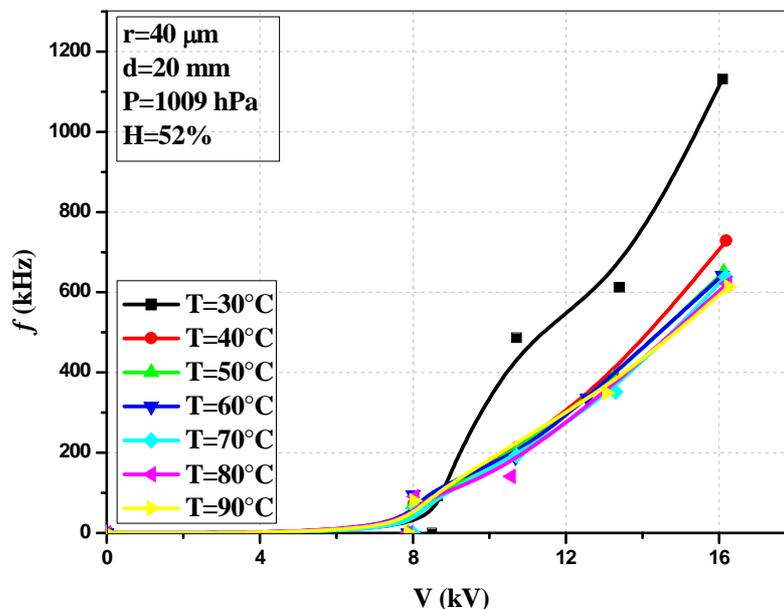


Figure III.28 : Influence de la température sur la caractéristiques fréquence-tension ($f-V$) .

III.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations. La caractéristique courant-tension a été étudiée avec variation de deux paramètres géométriques, à savoir la distance inter-électrodes et le rayon de courbure de l'électrode haute tension et un paramètre physique qui est la température. La forme d'onde du courant de décharge a été étudiée aussi avec les trois paramètres cités ci-dessus.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à une étude expérimentale de la décharge couronne en géométrie pointe-plan. Le but recherché est de caractériser cette décharge en deux polarités avec variation deux paramètres géométriques (distance inter-électrode et rayon de courbure de l'électrode active) et un paramètre physique qui est la température.

Dans la première partie du travail expérimental, on s'est intéressé à la caractéristique courant-tension, dont on peut conclure :

- ✓ Pour le même gaz et les mêmes conditions extérieures, la valeur de la tension de claquage est nettement inférieure en polarité positive. La tension nécessaire pour maintenir le même courant de décharge est plus élevée avec une polarité positive.
- ✓ L'intensité du courant de décharge augmente avec la croissance de la tension appliquée, et les valeurs négatives du courant de décharge sont plus élevées que celles positives pour la même tension appliquée. Ce courant continu qui traverse l'espace inter-électrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée. La caractéristique $I-V$ a une forme quadratique et elle confirme la loi de Townsend.
- ✓ La tension seuil V_0 augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes et le rayon de courbure de l'électrode active.
- ✓ La constante géométrique K est proportionnelle à la mobilité apparente des porteurs de charge et plus élevée dans le cas d'une polarité négative. En outre, il semble que la mobilité apparente augmente avec la distance inter-électrodes et le rayon de courbure pour les deux polarités. Par contre, le rapport entre les facteurs $(K^-/K^+) = (\mu^-/\mu^+)$ est indépendant de la distance inter-électrodes.
- ✓ L'augmentation de la température favorise la conduction du milieu gazeux. Ainsi, la tension de claquage et de la tension seuil diminuent légèrement dans les deux polarités.
- ✓ La constante géométrique de la loi de Townsend augmente d'une manière linéaire avec la température.
- ✓ Le rapport entre les facteurs (K^-/K^+) est indépendant de la température.

La deuxième partie de notre travail expérimental concerne la forme d'onde du courant de décharge en polarité négative, dont on peut conclure :

- ✓ Le courant de décharge observé sur l'oscilloscope est constitué d'une composante continue et une autre impulsionnelle (Impulsions de Trichel).
- ✓ Les impulsions observées sont asymétriques, régulières avec une fréquence de répétition qui augmente d'une manière non linéaire avec le potentiel appliqué à la pointe.
- ✓ La fréquence de répétition des impulsions de Trichel diminue avec la distance inter-électrodes et le rayon de courbure.
- ✓ L'effet de la température sur la fréquence de répétition des impulsions de Trichel n'a pas été mis en évidence lors de nos essais.

Les résultats expérimentaux obtenus sont en bon accord avec les travaux antérieurs et la loi de Townsend semble être le modèle le plus adéquat dans notre cas que ce soit pour le courant de décharge ou pour la fréquence de répétition des impulsions de Trichel.

En perspectives du présent travail, il est recommandé de faire des mesures de courant et de fréquence de répétition avec action conjuguée des trois paramètres physiques : température, pression et humidité. Développer des travaux numériques pour une éventuelle comparaison des résultats.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. Faehi, C Morel, G. cheron, « Matières plastique & adjuvant hygiène et sécurité », INRS, ED638, 2006.
- [2] M. Handala. Mohand-Amokrane, « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air/solide », thèse de doctorat d'état, UMMTO, 2007.
- [3] Julien. Jarrige « étude expérimental des décharges électriques impulsionnelle. Application aux traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface », thèse de doctorat de l'université de Rouen, 2008.
- [4] Myriam. Hamel, B.SC.A, «Influence de la variation de la température ambiante sur les variations induites par effet de couronne », thèse de doctorat de l'université de Québec à Chicoutimi, 1991.
- [5] Carl. 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, mars 2000.
- [6] Brahim. Benamar, « la faisabilité de l'électrode-filtration d'une atmosphère chargée en poussière de bois étude expérimental et numérique », thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, 2008.
- [7] Anne-Marie Pointu, « décharge électrique », Technique de l'ingénieur, D322,1980.
- [8] C. Marteau, M. Haidara, A. Denat, « dispositif d'étude des décharges électrique », Revue de physique appliquée.
- [9] Cédric. Noel, « plasma micro-onde d'argon à la pression atmosphérique : diagnostics et applications au nettoyage des surface », thèse doctorat d'I.N.P.L Nancy- université, 2009.
- [10] Jérôme Jolibois, « étude et développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique-application au control d'écoulement sur profil d'aile », thèse doctorat de l'université de poitier, 2008.
- [11] Katia. Allegrand, « Décharge à barrière diélectrique de surface : physique et procédé », thèse doctorat de l'école polytechnique, 2009.
- [12] Aissou Massinissa, « Influence des paramètres physiques de l'air sur la décharge couronne bipolaire », thèse de doctorat, de l'université Béjaia, 2013.
- [13] Ait Said Hakim, «Influence de l'humidité sur la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique d'aérosols », thèse de doctorat, de l'université de Bejaia, 2015/2016.
- [14] G. Berger, thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-Sud, Centre d'Orsay, 1988.

- [15] C. GARY, Effet couronne sur les réseaux électriques aériens, Technique de l'ingénieur, D4440, pp. 1-25.
- [16] F. W. Peek, Dielectric phenomena in H.V. Engineering, Mc Graw Hill, pp. 52-80,1929.
- [17] L. B. Loeb, Electrical coronas : Their Basic physical mechanisms, Berkeley, university of california Press, 1965.
- [18] T.Ounnoughi et A.Meghar, étude de la distribution du potentiel de surface de films en pvc chargé par décharge couronne négative , mémoire, l'université A.mira de Bejaia, 2014.
- [19] Townsend J.M. , 1902, Phil. Mag,vol. 3, p.557.
- [20] Mouhoubi S, 1996, Thèse de Magister de l'université A. mira de Bejaia.
- [21] TassickerO.J. , 1974, Proc. IEE, vol. 121, p. 213-220.
- [22] Townsend J.M. , 1903, Phil. Mag. , vol. 6, p. 389.
- [23] Townsend J.M., 1914, Electricity in gases, Oxford University press.
- [24] S. Ait-Amar, « étude de la décharge couronne positive en géométrie nappe de fil-plan », thèse de magistère en génie électrique, option technique de haute tension de l'université A. Mira Bejaia.
- [25] Ikene Razik , « influence des paramètres physique de l'air et de la distance inter-«électrode sur la décharge couronne positive en géométrie fil-plan », Magister l'université A. mira de Bejaia décembre 1997.
- [26] A. J. Medlin, 1998, Ph. D. Thèse, uni. New South, Wales.
- [27] A. Kassdi, « étude théorique et expérimentale de la décharge couronne », thèse de doctorat de l'université A. mira de Bejaia, 2007.
- [28] C. Gary, 1984, Les propriétés diélectriques de l'air dans les lignes hautes et les très hautes tensions, Eyrolles.
- [29] G. Le Roy, B. Hutzler, J. Lalot et C. Dubanton, 1984, Les propriétés diélectriques de l'airles très hautes tensions, Eyrolles.
- [30] E. Kuffel, W. S. Zaengl, 1984, High-Voltage Engineering : Fundamentals, PergamonPress, New York, pp. 366.
- [31] L. B. Loeb, 1947, Fundamental Processes of ElectricalDischarge in Gases, John Wiley&Sons,Inc., New York.
- [32] A. Lacoste, D. Pai, C. Laux, Ion windeffect in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air, AIAA Reno, pp. 354, 2004.

- [33] J.F. Loiseau, J. Batina, F. Noel, R. Peyrous, Hydrodynamical simulation of the electricwindgenerated by successive streamers in a point-to-plane reactors, J. Phys. D : Appl. Phys. Vol. 35 pp. 1020-1031, 2002.
- [34] M. Goldman ; A. Goldman and R. S. Sigmond, the corona discharge, itspropreties and specific uses, Pure &Appl. Chem, 57, (1985) 1353-1362.
- [35] Tsrong-Yi Wen, Hsiu-Che Wang, Igor Krichtafovitch, Alexander V. Mamishev, Novel electrode of an electrostatic precipitator for air filtration, Journal of Electrostatics 73,117-124, 2015.
- [36] M. Goldman, R.S. Sigmond, Corona insulation, IEEE Trans. Elec. EI. 12/2, pp. 90-105, 1982
- [37] L. Dascalescu, An introduction to ionized gases, theory and applications, Toyohashi University of Technology, 1993.
- [38] B. Khaddour, Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée, Thèse de doctorat de L'INPG, France, 2006.
- [39] S.BENABDELMALEK, R. MESSAOUDI, Simulation numérique de la cinétique chimique d'une mixture $N_2/O_2/NO$ par décharge couronne, mémoire master, physique, 2011
- [40] M. Rezzouga, A.Tilmatine, R.Gouri, k.Medles, L.Dascalescu, « Experimental modiling of high-voltage corona dischargeusing design of experiments », front, electr, electron, eng, 2, pp, 139-143, 2007.
- [41] M.P. Panaget, « Etude en laboratoire des effets physico-chimiques induits par les pertes de transport à haute tension », Thèse de doctorat de l'université Paris 6, 1997.
- [42] K. Hamoumeche, « Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan », Thèse de magister, UMMTO, décembre 2009.
- [43] H .Nouri, « Influence des paramètres physiques de l'air sur le précipitateur électrostatique d'aérosols », Thèse de doctorat, université de Bejaia ,2010
- [44] B.Tassadit, M. Nardjes, Caractérisation de la Décharge Couronne dans un Système à Configuration Triode, 2017.
- [45] BEDJAOUI Tassadit et MEDJEKDOUD Nardjes, « Caractérisation de la Décharge Couronne dans un Système à Configuration Triode », mémoire master, université de Bejaia, 2017.
- [46] M. Kaci, H. Ait Said, A.Laifaoui, M.Aissou, Hamou Nouri, Y. Zebboudj, Investigation on the corona discharge in blade-to-plane electrode configuration, Braz. J. Phys., 45 (2015) pp. 643-655.

- [47] G. Hartmann, A. Robledo-Martinez, R. T. Waters, in gaz discharge and their application, Université pressleeds, (1985) pp. 157.
- [48] F. Gensdarmes, les processus de charge électrique : Des aérosols non radioactifs en milieu fortement ionise, des aérosols radioactifs artificiels émetteurs beta, Thèse de doctorat, Université PARIS 8 (2000).
- [49] H.Israël Atmosphäriche Elektrizität. Teil 2, Leipzig Akademische Verlagsgesellschaft Geest&Portig (1961).
- [50] J. Bricard, M. Cabane, G. Madeline, D. Vigla, Spectre de mobilité des petits ions de l'air. J. de recherche Atmospheriques. (1961) 107-113.
- [51] A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani, L. Dascalescu, séparation électrostatique : complément des procédés mécanique de recyclage des déchets industriels, Journal of Electrostatics, 61, 21-30, 2004.
- [52] B. Yahiaoui, B. Tabti, M. Megherbi, A. Antoniu, M. C. Plopeanu, L. Dascalescu, AC corona neutralization of positively and negatively charged polypropylene non-wovenfabrics, IEEE TDEI, 20, pp, 1516-1522, 2013.
- [53] BENYAMINA Mokhtaria « Etude de la production de l'ozone dans les décharges couronne » Thèse de doctorat à Université d'Oran, 2014.
- [54] BENCHERIF Nabil et DJOUADI Toufik « Etude expérimentale de la décharge couronne continue en polarité positive et négative dans la configuration fils-plans », mémoire à Université 2017.
- [55] J.Michel .Toussaint, "Le galop des lignes électriques Mesures en soufflerie et simulations", Travail de fin d'études, université de Liège, 1998)
- [56] Sayah H, Brahami m, Bendaoud A &Rahli M (2004) "Vibrations éoliennes des câbles aériens", La 1re Conférence Nationale sur l'Electrotechnique et ses Applications, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Mai 2004.
- [57] M.Farzaneh, "Effects of the intensity of precipitation and transverse wind on the corona induced vibration of HV conductors", IEEE, Vol. 7, No. 2, April 1992
- [58] Gourbi, Abdelkader (2008) Mécanisme des vibrations induites par effet de couronne ; Université Djillali Liabes de Sidi bel Abbes - Magister 2008
- [59] Carl Potvin, " Comportement et effet de la charge d'espace sur le mécanisme des vibrations induites par effet de couronne ", Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, université de Chicoutimi, Canada, mars 2000.

- [60] Farzaneh M & Teisseyre Y (1988), "Mechanical vibration of HV conductors induced by corona: roles of the space charge and ionic wind", *IEEE*, VOL, 3, 3 July 1988
- [61] Farzaneh M & Phan LC (1985) "On the Role of the Space Charge Produced by Hanging Water Drops in the Mechanism of the Corona-Induced Vibration of H.V. Conductor", *J. of electrostatics*, Vol. 17, pp. 235-244]
- [62] Myriam Hamel, "Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne", Mémoire comme exigence partielle de La maîtrise en ingénierie, université de Chicoutimi Canada, août 1991.
- [63] Y. Zebboudj, G. Hartmann, « Current and electric field measurements in coaxial system during the positive DC corona in humid air », *Eur. Phys. J. AP* 7, pp, 167-176, 1999.
- [64] J. S. E. Townsend, "Electricity in Gases", Clarendon Press, 1915.
- [65] B. L. Henson, "A space-charge region model for microscopic steady coronas from points", *J. Appl. Phys.*, Vol. 52, 1981, pp. 709-715.
- [66] K. Yamada, "An empirical formula for negative corona discharge current in point-grid electrode geometry," *J. Appl. Phys.* 96, 2004, pp. 2472–2475.
- [67] G. F. L. Ferreira, O. N. Oliveira, and J. A. Giacometti, "Point-to-plane corona: Current-voltage characteristics for positive and negative polarity with evidence of an electronic component," *J. Appl. Phys.* 59, 1986, pp. 3045–3049.
- [68] X. Meng, H. Zhang, and J. J. Zhu, "A general empirical formula of current voltage characteristics for point-to-plane geometry corona discharges", *J. Phys. D* 41, 065209, 2008.
- [69] E. Ouatah, « Etude du signal de décharge partielle dans les câbles de transmission », Thèses de doctorat, université de Béjaïa, 2015.
- [70] El hanafi Ouatah, Soufiane Megherfi, Karim Haroun, Youcef Zebboudj, « Characteristics of partial discharge pulses propagation in shielded power cable », *Journal of Electric Power System Research* 99 (2013) 38-44.
- [71] M. Goldman., R.S. Sigmond, "Corona insulation", *IEEE Transaction on Electrical Insulation*, Vol. 12, N° 2, pp. 90 – 105, 1982.

- [72] L. B. Loeb, A. F. Kip, G. G. Hudson, W. H. Bennett, “Pulses in negative point-to-plane corona”, *Physical Review*, Vol. 60, pp. 714-722, 1941.
- [73] L. B. Loeb, “The mechanism of the negative point corona at atmospheric pressure in relation to the first Townsend coefficient”, *Physical Review*, Vol. 71, N°. 10, pp. 712-714, 1947.
- [74] P. Sattari, C.F. Gallo, G. Castle, K. Adamiak, “Trichel pulse characteristics-negative corona discharge in air”, *Journal of Physics D-Applied*, Vol. 44, pp. 2011.
- [75] W. L. Lama and C. F. Gallo, “Systematic study of the electrical characteristics of the “Trichel” current pulses from negative needle-to-plane coronas,” *J. Appl. Phys.* 45, 1974, pp. 103–113.