

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

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques
Présenté par

Samir BOUALLELI
Ahmed BENDOU

Thème

Etude expérimentale de la décharge couronne en géométrie multi pointes- plan sous tension continue

Mémoire soutenu publiquement le 27/06 / 2024 devant le jury composé de :

Melle Rahma KACHENOURA
M.C.B, UMMTO, Présidente

M M'hand MEKIOUS
M.C.B, UMMTO, Encadrant

Mme Ferroudja BITAM-MEGHERBI
Professeure, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

*Le travail de ce manuscrit a été effectué au sein de l'équipe "Matériaux diélectriques" du Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Electrique "LATAGE" sous la Direction de Monsieur **MEKIOUS M'hand**, Maître de Conférences B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Nous lui exprimons toute notre gratitude pour la confiance qu'il nous a fait pour diriger ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement Mademoiselle **Kachenoura Rahma** Maître de Conférences B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou, pour l'honneur qu'elle nous fait en présidant ce jury.*

*Nos remerciements vont également à Madame **BITAM-MEGHERBI Ferroudja**, Professeure à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou pour l'intérêt qu'elle a porté à ce manuscrit et pour avoir accepté de faire partie du jury.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents, qui m'ont toujours soutenu et encouragé pendant toute ma vie, qui ont sacrifié ce qu'ils avaient de cher pour me voir réussir, mes Cher parent aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude et profonde Affection.

A mes chers frères (Yacine , Lyes , Salim).

A mes deux sœurs (Samira et Fatiha),

A ma famille; mes chers ce qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A mon collègue de travail « Bendou Ahmed » .

A mes chers amis (Juba, Mustapha, Kamel, Arezki et ses frères)
que dieu exauce notre prière pour que le lien qui nous a uni demeure solide.

SAMIR

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents, qui m'ont toujours soutenu et encouragé pendant toute ma vie, qui ont sacrifié ce qu'ils avaient de cher pour me voir réussir, mes Cher parent aucun mot ne pourra exprimer ma gratitude et profonde Affection.

A Mon chère frère AREZKI
 Ma chère sœur DAHBIA
 Ma future femme OUIZA
 Ma famille; mes chers ce qui me donnent de l'amour et de la vivacité.
 Mon collègue de travail « Boualleli Samir » .
 Mes chers amis (Juba, Mustapha, Kamel, Arezki et ses frères)
que dieu exauce notre prière pour que le lien qui nous a uni demeure solide.

AHMED

Sommaire

Chapitre 1: Notions de base sur les décharges électriques dans les gaz

I.1-Introduction.....	2
I.2-Isolants gazeux	2
I.2.1-Propriétés particulières des isolants gazeux.....	2
I.2.2-Les principaux gaz isolants.....	2
I.3-Décharges électriques dans les gaz.....	3
I.4-Electrons primaires.....	3
I.5-Ionisation, recombinaison et attachement électronique	3
I.6-Mécanismes de formation des décharges électriques.....	4
I.6.1-Les décharges à basse pression	4
I.6.1.1-Mécanisme de l'avalanche électronique	4
I.6.1.2-Régimes de la décharge	5
I.6.2-Premier coefficient de townsend	6
I.6.3-Deuxième coefficient de townsend	8
I.6.4-Critère de claquage de type townsend	9
I.6.5-Limites de la théorie de townsend	9
I.7-Loin de pachen	10
I.8-Théorie des streamers	11
I.9-Conclusion	14

Chapitre 2 : Généralités sur les décharges couronne

II.1- Introduction.....	15
II.2- Définition.....	15
II.3- Caractéristiques des décharges couronne.....	16

II.3-1- Caractéristique courant-tension et régimes de décharges.....	16
II.3.2- Relations théoriques du courant de décharge couronne.....	17
II.4- Champ électrique et topographique de la décharge couronne en géométrie pointe-plan.	18
II.5- Décharge couronne.....	19
II.5.1- Décharge couronne positive	19
II.5.2- Décharge couronne négative	21
II.5.3- Effet couronne en tension alternative	22
II.6- Vent électrique.....	22
II.7- Facteurs influençant la décharge couronne	23
II.7.1- Facteurs géométriques	23
II.7.2- Facteurs physico-chimiques du gaz	25
II.7.3- Facteurs électriques	26
II.8- Applications industrielles des décharges couronne.....	26
II.8.1- Paratonnerre.....	26
II.8.2- Filtre électrostatique.....	27
II 8.3- Séparateur électrostatique	27
II 8.4- Neutralisation et charge des matériaux	28
II 8.5- Générateur d’ozone	28
II.9- Conclusion.....	29

Chapitre III: *Etude de la décharge couronne multi pointes-plan sous tension*
Continue

III.1- Introduction	30
III.2- Dispositif experimental.....	30
III.2.1- Les électrodes	31
III.2.2- La Source de tension.....	31

III.2.3- Les moyens de mesures électriques	32
III.2.4- Mode opératoire	32
III.3- Caractéristique courant-tension en configuration pointe-plan.....	32
III.3.1-Influence de la polarité de la tension appliquée	33
III.3.2-Influence de la distance inter-électrodes en pointe-plan.....	34
III.3.3- Effet de la pression en géométrie pointe-plan.....	35
III.4- Caractéristique courant-tension en configuration multi pointes-plan.....	37
III.4.1- Effet du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension.....	37
III.4.2- Influence de l'espacement entre les pointes	39
III.4.3- Influence de la pression sur la décharge couronne multi pointes-plan	40
III.4.3.1- Influence de la pression sur la décharge couronne multi pointes-plan	40
III.4.3.2- Influence du nombre de pointes pour une pression donnée sur la décharge Couronne multi pointes-plan.....	42
III.5- Conclusion.....	46
III.5. Conclusion générale.....	47

Liste des figures

Figure I.1 Dispositif de référence étudié par Townsend.....	4
Figure I.2 Courbe caractéristique de la décharge de Townsend	5
Figure I.3 Schéma représentatif de l'intervalle inter-électrodes.....	7
Figure I.4 Variation du courant en fonction de la tension appliquée.....	7
Figure I.5 Processus d'émission et d'ionisation dans une décharge électrique.....	8
Figure I.6 Courbes de Paschen pour différents gaz	11
Figure I.7 Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes.....	11
Figure I.8 Influence de la charge d'espace sur l'intensité du champ créée entre Deux.....	12
Figure I.9 Schéma de développement d'un streamer positif.....	12
Figure II.1 Zone d'ionisation et de dérive dans la décharge couronne pointe-plan	15
Figure II.2 Systèmes d'électrodes utilisés pour la production de la décharge couronne.....	16
Figure II.3 Caractéristique courant- tension d'une décharge couronne pointe-plan positive dans l'air à la pression atmosphérique, ($d = 13 \text{ mm}$).....	17
Figure II.4 Variation du champ électrique réduit en configuration pointe-plan ($d = 2,5 \text{ mm}$, $R_p = 10 \mu\text{m}$)	19
Figure II.5 Schéma d'une décharge couronne positive pointe-plan.....	20
Figure II.6 Schéma d'une décharge couronne positive pointe-plan	21
Figure II.7 Variation de la vitesse du vent électrique en fonction du courant de décharge ($U = 3,8 \text{ kV}$, $d = 4 \text{ mm}$, rayon de courbure $R_p = 50 \mu\text{m}$).....	23
Figure II.8 Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne	24
Figure II.9 Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes.....	24
Figure II.10 Caractéristique I-V en fonction de la température (a) dans l'air en polarité	

positive, (b) dans l'hélium à P =20 Bars.....	25
Figure II.11 Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression.....	26
Figure II.12 Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre.....	27
Figure II.12 Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.....	27
Figure II.14 Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour.....	28
Figure II.15 Principe de production d'ozone par décharge couronne.....	29
Figure III.1 Dispositif expérimental.....	30
Figure III.2 Electrodes utilisées (a): Forme et dimensions des pointes utilisées, (b): Porte électrodes multi –pointes, (c): Electrode plane.....	31
Figure III.3. Source Haute tension continue.....	31
Figure III.4 Appareils de mesures utilisés (a) : Multimètre (b) : Baromètre avec son capteur de pression, (c) : Hygromètre.....	32
Figure III.5 Influence de la polarité de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.....	33
Figure III.6 Influence de la distance inter-électrodes en polarité positive de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.....	34
Figure III.7 Influence de la distance inter-électrodes en polarité négative de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.....	35
Figure III.8 Tube à décharge.....	35
Figure III.9 Caractéristique de la décharge couronne négative pointe-plan pour différentes pression.....	36.
Figure III.10 Influence de nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative pour d=10mm.....	37
Figure III.11 Influence de nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative pour d =2cm.....	38
Figure III.12 Effet de l'espacement des pointes en polarité négative pour 3 pointes et d = 1 cm.....	39
Figure III.13 Effet de l'espacement des pointes en polarité négative pour 3 pointes et d = 2 cm.....	39

Figure III.14 Caractéristique de la décharge couronne négative 3 pointes-plan pour la distance ($d = 2 \text{ cm}$).....	40
Figure III.15 Caractéristique de la décharge couronne négative 5 pointes-plan pour la distance ($d = 20 \text{ mm}$).....	41
Figure III.16 Caractéristique de la décharge couronne négative 7 pointes-plan pour la distance ($d = 20 \text{ mm}$).....	41
Figure III. 17 Caractéristique de la décharge couronne négative 9 pointes-plan pour la distance ($d = 20 \text{ mm}$).....	42
Figure III. 18 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative ($P=400 \text{ hPa}$).....	42
Figure III. 19 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative ($P=500 \text{ hPa}$).....	43
Figure III. 20 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative ($P=600 \text{ hPa}$).....	43
Figure III. 21 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative ($P=700 \text{ hPa}$).....	44
Figure III. 22 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative ($P=800 \text{ hPa}$).....	44
Figure III. 23 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative ($P=900 \text{ hPa}$).....	45
Figure III. 24 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative ($P=1000 \text{ hPa}$).....	45

RESUME

Ce memoire concerne l'étude expérimentale d'un réacteur à décharge couronne en géométrie multi pointes-plan. L'étude a porté sur l'influence des paramètres électro-géométriques et de la pression sur les caractéristiques des décharges couronne, sous tension continue, pour cette configurations. Les paramètres considérés sont : la distance inter-électrodes, le matériau del'électrode active et la pression. L'étude a montré que l'acier représente un matériau de choix pour concevoir un réacteur à décharge couronne. L'étude du système multi pointes-plana porté sur une électrode circulaire composée d'une pointe centrale et huit pointes périphériques. La disposition des pointes périphériques peut prendre quatre positions dépendant de la distance entre elles et la pointe centrale. L'étude a montré que le courant augmente avec l'augmentation de la distance entre la pointe centrale et les pointes périphériques. Quand la distance inter-électrodes dépasse une certaine valeur, l'efficacité du réacteur à plasma diminue pour les grandes distances entre la pointe centrale et les pointes périphériques. Enfin, il intéressant de travailler à basse pression si l'on veut avoir un courant de décharge élevé avec une faible tension.

Mots clés

Décharge couronne, caractéristique courant-tension, courant moyen, tension moyenne , l'espacement des pointes, matériau d'électrode, multi pointes, effet de la pression, pointe centrale, pointes périphériques.

Introduction générale

Introduction générale

Les décharges électriques dans les gaz sont connues de l'homme depuis l'antiquité, à travers des phénomènes naturels comme la foudre. Avec l'arrivée de l'électricité au 19^{ème} siècle, on a commencé à les étudier au laboratoire [26, 30]. Mais les premiers travaux décrivant leur évolution et leurs mécanismes n'ont vu le jour qu'au début du 20^{ème} siècle, ce qui leur a donné un intérêt particulier.

Les décharges couronne sont des décharges électriques hors équilibre qui se développent dans l'intervalle gazeux, entre deux électrodes fortement asymétriques. A leur découverte, elles étaient connues surtout pour leurs effets indésirables [1]. Au fil du temps, les décharges couronne ont trouvé leur place grâce à la facilité de leur mise en œuvre qui nécessite peu d'équipements, et à leur reproductibilité. Plusieurs applications industrielles lui sont associées et ont vu le jour, à savoir [33]: les ozoneurs pour le traitement de l'air, les procédés de traitement des surfaces, le dépôt des couches minces et gravure en micro-électronique. Dans certaines applications industrielles, le traitement de surface des polymères est d'une grande importance, permettant ainsi de modifier les propriétés de cette surface sans affecter ses propriétés en volume. Plusieurs techniques ont été développées pour le traitement de matériaux polymères, telles que le traitement par l'ozone (produit par décharge couronne) et les traitements par décharges couronne. Les décharges couronne trouvent également leur place dans le domaine du biomédical.

Ce mémoire porte sur l'étude expérimentale de la décharge couronne en configuration multi pointes-plan. Nous considérerons, principalement, les différents paramètres qui peuvent influencer sur la décharge couronne.

Dans le premier chapitre, nous commençons par quelques rappels et généralités sur les décharges électriques dans les gaz à la pression atmosphérique. Nous y évoquons les différents mécanismes physiques impliqués dans les phases d'initiation, de développement et de propagation de ces décharges, interprétés sur la base du modèle de Townsend et celui des streamers.

Le second chapitre est consacré à une présentation générale, mais assez développée des aspects régissant les propriétés de la décharge couronne, principalement en géométrie pointe-plan. Nous mettons l'accent sur les différents types de décharge couronne, la caractéristique courant-tension de la décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique et le mécanisme de sa formation. Nous présentons également les paramètres influant sur la décharge couronne ainsi qu'un ensemble de ses applications industrielles et environnementales.

Le troisième chapitre est dédié à une étude électrique paramétrique d'une décharge couronne multi pointes-plan en fonction de certains paramètres électro-géométriques.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Notions de base sur les décharges électriques dans les gaz

Chapitre I: Notions de base sur les décharges électriques dans les gaz

I.1- Introduction

Durant deux siècles, il y a eu de nombreuses investigations sur les décharges électriques dans les gaz en vue de comprendre les processus fondamentaux impliqués. On peut distinguer grossièrement deux types de décharges : les décharges à faible et à forte valeurs du produit $p \cdot d$, appelées par abus de langage *décharges à basse et à haute pression* (où p et d désignent respectivement la pression du gaz et la distance inter-électrodes) [24].

L'objet de ce chapitre est d'effectuer une synthèse bibliographique succincte sur les décharges électriques. Nous allons tout d'abord décrire les mécanismes fondamentaux rencontrés dans tout type de décharge qu'elle soit à haute ou à basse pression: le phénomène d'avalanche électronique et le mécanisme de Townsend en particulier. Nous enchaînerons avec la description du second modèle qui est la théorie des streamers.

I.2- Isolants gazeux

Dans les conditions normales, un des meilleurs isolants connus est l'air qui nous entoure. Ses caractéristiques thermiques sont supérieures à celles des porcelaines; il peut aussi agir comme agent de refroidissement et ne coûte absolument rien.

I.2.1- Propriétés particulières des Isolants gazeux

Ces isolants gazeux ayant des propriétés particulières :

- Rigidité diélectrique variable suivant la nature de gaz ;
- Permittivité faible
- Phénomène d'ionisation des gaz ;
- Légers et inflammables.

I.2.2- Les principaux gaz isolants

Les principaux isolants gazeux sont :

- l'air atmosphérique ;
- L'azote ;
- Gaz rares ;
- L'hydrogène ;
- L'hexafluorure de soufre (SF_6) l'un des gaz les plus utilisés.

I.3- Décharges électriques dans les gaz

Une décharge s'oppose toujours à l'existence des charges libres soit à la surface du conducteur ou dans le volume de diélectrique (isolant).

Dans le cas des gaz, ces charges libres sont produites soit par un facteur ionisant extérieur tel que les rayons électromagnétiques, chaleur, etc...

Le cas d'une décharge dite non autonome ou sans l'intervention de ces facteurs, et la décharge alors est dite autonome est d'un champ uniforme ou non uniforme [12].

Dans la classification des décharges sont fondée sur les caractéristiques courant-tension, on y distingue les décharges luminescentes à basse pression et les décharges couronne à basse et haute pression [26].

Dans tous les cas, les décharges sont interprétées sur une base de deux modèles :

- Le premier modèle concerne des décharge a long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier **c'est la décharge de Townsend** ;
- Le second modèle, mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concerne les decharges à court rayon d'action **c'est la décharge par streamers**.

Il est tout à fait bien connu qu'aucune décharge électrique ne peut s'initier dans l'air sans la présence au moins d'un électron libre dans le volume de gaz couvrant l'espace inter- électrodes. Ils sont appelés communément *électrons germes* ou électrons primaires [31].

I.4- Electrons primaires

Ce sont des électrons qui permettent d'initier la première avalanche électronique sans laquelle aucun type de décharge ne peut prendre forme encore moins se maintenir. Ils peuvent être produits par radiation cosmique, par les sources naturelles d'ionisation, par les résiduelles issues des décharges précédentes ou encore par détachement des ions négatifs par effet de champs [11].

I.5- Ionisation, recombinaison et attachement électronique

L'existence d'une décharge électrique résulte du passage d'un courant dans le diélectrique gazeux et donc de la possibilité de créer des particules chargées, essentiellement des électrons à partir des atomes ou molécules neutres du gaz. Les principaux mécanismes régissant la génération des porteurs de charge dans les gaz sont: Les mécanismes d'ionisation, tendant à augmenter leur densité et les mécanismes de recombinaison et d'attachement, tendant à les réduire [11, 31].

Le procédé principal d'ionisation résulte des impacts d'énergie élevée entre les électrons et les atomes.



Lorsqu'un atome (ou une molécule) a absorbé suffisamment d'énergie pour qu'un de ces électrons s'échappe à l'infini, on dit que cet atome (ou cette molécule) a été ionisé, son énergie interne s'est accrue de l'énergie d'ionisation.



L'attachement électronique est d'autant plus important que la molécule présente une plus grande affinité électronique. Le processus d'attachement des électrons est le suivant :



B^* : atome excité par l'énergie libérée lors de l'attachement de l'électron avec l'atome A

La recombinaison a été beaucoup moins étudiée que son processus inverse, l'ionisation. Cependant elle reste d'une importance fondamentale pour la bonne compréhension des mécanismes de développement de la décharge et tout particulièrement pour ceux de sa phase d'extinction. La recombinaison est la neutralisation d'un ion positif par capture d'un électron ou d'un ion négatif suivant le schéma ci-dessous [1,7, 13].



I.6- Mécanismes de formation des décharges électriques

I.6.1- Les décharges à basse pression

Les premières études sur les mécanismes d'initiation de décharges ont été menées par Townsend [13]. Le dispositif étudié est composé de deux électrodes métalliques planes soumises à une tension continue V et séparées par une distance $d = 50$ cm. Le dispositif est placé dans une enceinte fermée, contenant un gaz (le néon) dont la pression p est de l'ordre du torr (1 Torr = 133 Pa = 1,33.10⁻³ atm). Ces deux électrodes sont reliées à un circuit composé d'un générateur de tension continue et d'une résistance variable (figure I.1).

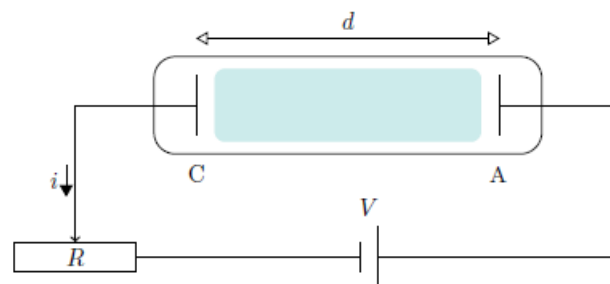


Figure I.1 Dispositif de référence étudié par Townsend [26].

I.6.1.1 Mécanisme de l'avalanche électronique

Sous l'effet du champ électrique généré par les électrodes, les électrons initialement présents

dans le système se mettent à dériver de la cathode vers l'anode et entrent en collisions avec les particules neutres du gaz. Si l'énergie cinétique qu'un électron acquiert entre deux collisions est suffisante, alors, il est capable d'ioniser un neutre en arrachant un des électrons de son nuage électronique. L'électron initial et le nouvel électron sont alors de nouveau accélérés sous l'effet du champ et le phénomène se reproduit à nouveau. Cet enchaînement est appelé *avalanche électronique* et son efficacité dépend du libre parcours moyen (*lpm*) des particules, de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée. En présence d'un gaz électronégatif, le processus d'attachement électronique s'oppose à ce phénomène [22].

I.6.1.2- Régimes de la décharge

Pour un gaz donné dans le dispositif (Figure I.1), nous pouvons observer quatre régimes de fonctionnement, classés par ordre croissant de densité de courant (Figure I.2) [7, 8, 12]:

- **Décharge non autonome (A-B)** : caractérisée par de faibles courants, ce type de décharge n'est pas capable de s'auto-entretenir. Le phénomène d'avalanche électronique n'est pas suffisamment efficace un apport externe d'électrons, le plus souvent par photo ionisation, est nécessaire.
- **Décharge de Townsend (B-C)** : il s'agit du premier régime de décharge dit auto-entretenu ou autonome. Suffisamment d'électrons sont produits par le bombardement ionique à la cathode pour que la décharge ne repose plus sur aucune autre source que le champ extérieur. Les densités électroniques sont faibles et les effets résultants de la charge d'espace sont négligeables.

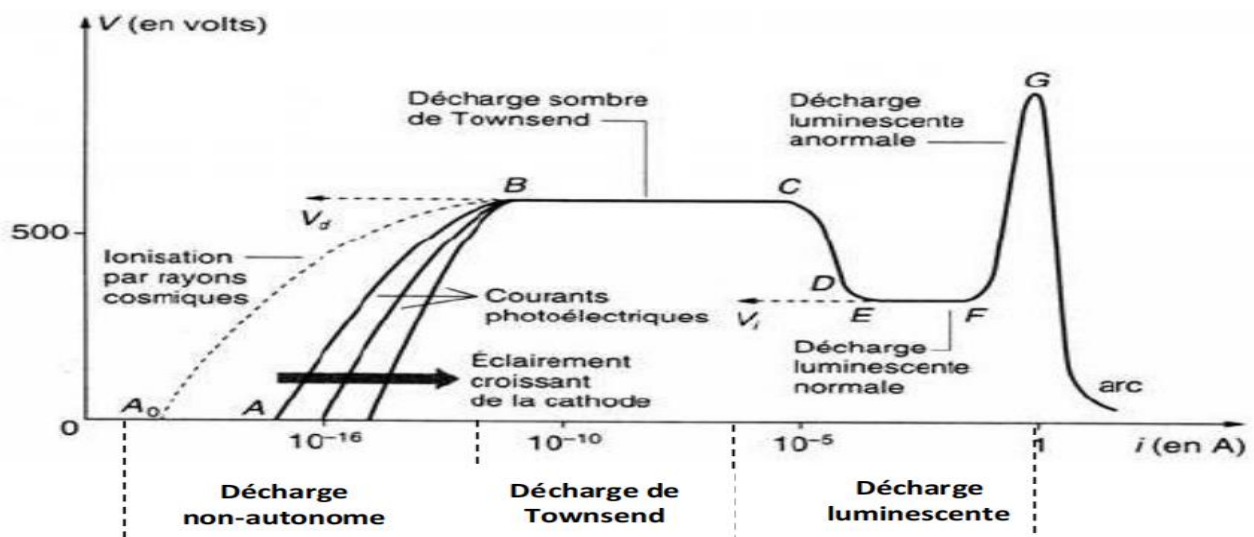


Figure I.2 Courbe caractéristique de la décharge de Townsend [7, 8, 12].

- **Décharge luminescente (C-D)** : ce type de décharge fonctionne selon les mêmes mécanismes que la décharge de Townsend mais caractérisé par de forts effets de la charge d'espace sous l'effet du champ électrique, les électrons se déplacent très rapidement et laissent les ions derrière eux. La décharge n'est plus alors dirigée par le champ extérieur

mais par le champ généré par la charge d'espace même si la tension appliquée nécessaire à l'entretien de la décharge diminue.

- **Régime d'arc** : ce régime appelé régime disruptif, présente une très faible tension de maintien et de grandes intensités de courant. De ce fait toute l'énergie passe par un canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. Il s'en suit des effets thermiques importants, aussi bien dans le gaz que sur les électrodes. Les arcs électriques peuvent être naturels, comme la foudre, ou générés de façon industrielle pour la soudure à l'arc par exemple. Le maintien de ce régime nécessite un matériel adapté pouvant supporter de fortes chaleurs et des courants.

I.6.2- Premier coefficient de Townsend

Considérons un gaz sous une pression p mis entre deux électrodes métalliques planes séparées par une distance d comme le montre la figure I.3. Si aucun champ électrique n'est appliqué, alors un équilibre est établi entre les électrons et les molécules du gaz. Cet équilibre est perturbé lorsqu'on applique un champ électrique E . Les électrons libres produits à la cathode se dirigent vers l'anode. Ils sont accélérés par le champ électrique. En théorie, lorsqu'ils acquièrent une énergie suffisante pour l'ionisation, il se produit de nouveaux électrons.

1 électron → 2 électrons → 4 électrons → 8 électrons → ...

Le premier coefficient de Townsend α représente le nombre moyen de chocs ionisants qu'un électron produit par unité de longueur dans la direction du champ électrique. Ce coefficient α peut être défini par les 2 équations I.1 et I.2 [21].

$$\alpha = \frac{\vartheta_i}{v_d} \quad (\text{I.6})$$

$$\frac{dn_e}{dx} = \alpha n_e \quad (\text{I.7})$$

Avec :

ϑ_i : la fréquence de collision ionisante

v_d : la vitesse de dérive des électrons

n_e : la densité électronique

dx : l'unité de longueur

Townsend a proposé en 1914 un coefficient d'ionisation α (appelé premier coefficient de Townsend) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation. L'inverse de ce coefficient représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes et dépend du champ réduit E/N (N désignant la densité du gaz) [21].

Townsend a étudié la variation du courant en fonction de la tension appliquée, il a trouvé que le courant augmente en augmentant la tension et reste constant et égal à i_0 qui correspond au courant de saturation. Pour de grandes valeurs de la tension appliquée, la variation suit une *loi exponentielle*. La variation du courant est représentée dans la figure I.3.

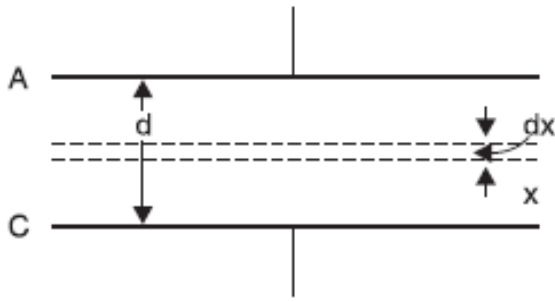


Figure I.5 Schéma représentatif de l'intervalle inter-électrodes [32].

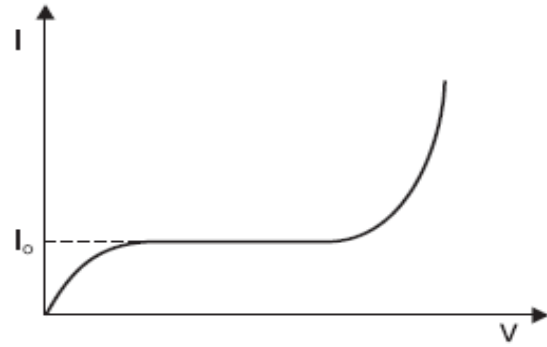


Figure I.6 Variation du courant en fonction de la tension appliquée [32]

Pour mieux comprendre le mécanisme de multiplication des électrons, Townsend a introduit un coefficient α qui représente le nombre de paires électron-ion produites par un électron par unité de longueur dans la direction du champ électrique.

Si n_0 est le nombre d'électrons émis par la cathode par unité de temps, n_x le nombre d'électrons traversant le plan d'abscisse x par unité de temps et d la distance inter-électrodes, l'augmentation de ce nombre sous l'effet de chocs ionisants sur un parcours dx , en admettant d constant (Figure I.5), va s'écrire [26, 32]:

$$\begin{aligned} dn_x &= \alpha n_x dx \\ \frac{dn_x}{n_x} &= \alpha dx \end{aligned} \quad (\text{I.8})$$

Sachant que l'origine des abscisses se trouve à la cathode:

$$n_x(x=0) = n_0$$

Si d est la distance inter-électrodes, le nombre d'électrons n arrivant sur l'anode est:

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (\text{I.9})$$

et le courant par unité de temps

$$I = ne^- = e^- n_0 e^{\alpha d}$$

ou encore :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (\text{I.10})$$

Avec : $I_0 = n_0 e^-$, le courant émis par la cathode sous l'effet du rayonnement extérieur ; e^- étant la charge élémentaire d'un électron.

Le coefficient d'ionisation α dépend de l'état dans lequel se trouve le gaz ainsi que de l'énergie des électrons. En d'autres termes, α dépend de l'intensité du champ électrique E , l'état du

gaz étant déterminé par sa pression et sa température qui restent pratiquement constantes lors de l'ionisation par les électrons car le transfert d'énergie vers le gaz est trop faible.

I.6.3. Deuxième coefficient de Townsend

En effet, en plus du phénomène d'amplification, un phénomène de régénération est nécessaire à l'entretien d'une décharge dans un volume fini car les charges sont ultimement collectées à l'anode et à la cathode. Ce phénomène de régénération existe et est décrit par le *deuxième coefficient de Townsend*. Ce coefficient dépend, comme le premier coefficient de Townsend, de la nature du gaz, de la géométrie du système et du champ réduit E/N . Il dépend également de la nature du matériau constituant la cathode [83].

Considérons une décharge entre une cathode et une anode. Lorsqu'un ion arrive sur la cathode, il peut expulser un électron secondaire par conversion de ses énergies cinétique et potentielle. Le nombre d'électrons secondaires pour un ion incident définit le coefficient (Figure I.7)

$$\gamma = \frac{\text{Nombre d'électrons secondaires}}{\text{Nombre d'ions incidents}}$$

Le second coefficient de Townsend γ doit couvrir un certain nombre de processus différents [88, 92, 94] tels que la libération d'électrons de la cathode par des ions positifs (γ_I), par l'effet photo électrique (γ_P), par des atomes neutres (γ_N), par émission de champ (γ_F), par photo émission dans le volume (γ_V) et par émission d'ions de l'anode (γ_A).

$$\gamma = \gamma_I + \gamma_P + \gamma_N + \gamma_A + \gamma_F + \gamma_V \quad (\text{I.11})$$

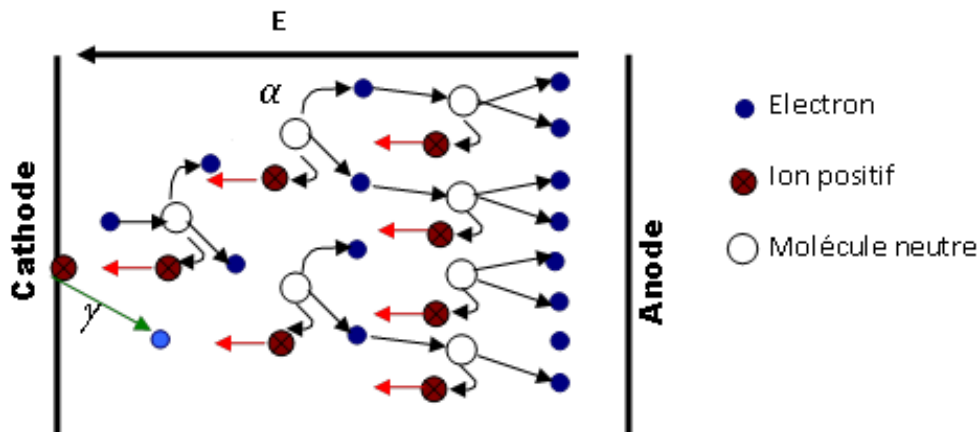


Figure I.7 Processus d'émission et d'ionisation dans une décharge électrique [26].

Soient :

n_0 : Le nombre d'électrons émis par le processus primaire à partir de la cathode (à $x = 0$) par seconde. En d'autres termes, n_0 électrons initiaux développant une avalanche dans un champ uniforme à la cathode.

n'_0 : Le nombre d'électrons secondaires produits à la cathode par seconde.

n''_0 : Le nombre total d'électrons quittant la cathode par seconde.

Ainsi :

$$n''_0 = n_0 + n'_0 \quad (\text{I.12})$$

Chaque électron quittant la cathode fait en moyenne $(e^{\alpha d} - 1)$ collisions dans l'espace inter-électrodes [32]. Par conséquent, le nombre total de collisions ionisantes par seconde sera $n''_0(e^{\alpha d} - 1)$.

Par définition, γ est le nombre d'électrons secondaires produits en moyenne à la cathode par collisions ionisantes dans l'espace inter-électrodes, puis,

$$n'_0 = n''_0 \gamma (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{I.13})$$

En remplaçant (I.8) dans (I.7), on aura :

$$n''_0 = n_0 + n''_0 \gamma (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{I.14})$$

Ou :

$$n''_0 = \frac{n_0}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.15})$$

D'après l'équation (I.4), le nombre d'électrons arrivant sur l'anode est donné par :

$$n = n''_0 e^{\alpha d} \quad (\text{I.16})$$

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.17})$$

Dans les conditions de régime permanent, le courant total dans l'espace inter-électrodes peut donc être donné par :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.18})$$

I.6.3- Critère de claquage de type Townsend

Mathématiquement, la condition de décharge autonome pour un gaz donné, à température constante, est exprimée par l'annulation du dénominateur de l'expression du courant I dans la relation (I.18), soit :

$$1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1) = 0 \Rightarrow \gamma (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (\text{I.19})$$

Comme $e^{\alpha d} \gg 1$, le critère Townsend peut s'écrire : $\gamma e^{\alpha d} = 1$

Cette équation représente *le critère de Townsend* pour la formation de l'étincelle.

- $\gamma e^{\alpha d} > 1$: L'ionisation produite par les avalanches successives est cumulative. Plus $\gamma e^{\alpha d}$ est grand plus la décharge étincelle se développe rapidement.
- $\gamma e^{\alpha d} < 1$: Le courant n'est pas maintenu (décharge non autonome) donc extinction de la décharge.

I.6.5- Limites de la théorie de Townsend

La validité du modèle de Townsend avec le développement d'une décharge par génération consécutive d'avalanches (mécanisme de Townsend) est limitée au cas sans charge d'espace. Cela signifie que la croissance des avalanches est limitée aux cas sans distorsion importante du champ initial. Pour l'air, la limite est donnée approximativement à $\alpha d = 20$, ce qui équivaut à une avalanche de $e^{20} \approx 10^8$ électrons. Le mécanisme de Townsend n'explique les phénomènes de claquage qu'à de faibles pressions, correspondant à des valeurs de p.d (pression de gaz x distance inter-électrodes) inférieures à 200 torr.cm [1, 26]. Cette théorie ne peut pas aussi expliquer le fait que la tension ne dépende pas du matériau de la cathode qui doit intervenir par l'intermédiaire du coefficient d'émissions secondaires γ [20]. Au-delà de cette limite, les décharges sont décrites par le modèle de la décharge par streamer [32].

I.7- Loi de Pachen

Le critère de Townsend $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ permet l'évaluation de la tension de claquage V_c de l'espace inter-électrodes d par l'utilisation de valeurs appropriées de α/p et γ . Ces dernières doivent correspondre à des valeurs de E/p associées à un courant faible ne pouvant pas endommager la cathode mais aussi il faut que la distorsion du champ liée à la charge d'espace soit minimale, c'est-à-dire [26, 32]:

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (\text{I.20})$$

$$e^{f\left(\frac{E}{p}\right).p.d} = \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (\text{I.21})$$

$$f\left(\frac{E}{p}\right).p.d = \text{Ln}\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = K \quad (\text{I.22})$$

En champ uniforme : $E = \frac{V_c}{d}$

On aura alors : $f\left(\frac{V_c}{p.d}\right).p.d = K \Rightarrow f\left(\frac{V_c}{p.d}\right) = \frac{K}{p.d}$

$$V_c = F(p.d) \quad (\text{I.22})$$

Cela montre que la tension de claquage V_c en champ uniforme est une fonction unique du produit de la pression p du gaz et de la distance inter-électrodes. Cette relation est connue sous le nom de "**Loi de Paschen**". Cette relation ne veut pas dire que la tension de claquage est directement proportionnelle au produit p.d, même si l'on constate qu'elle est linéaire pour une région du produit p.d (Figure I.8).

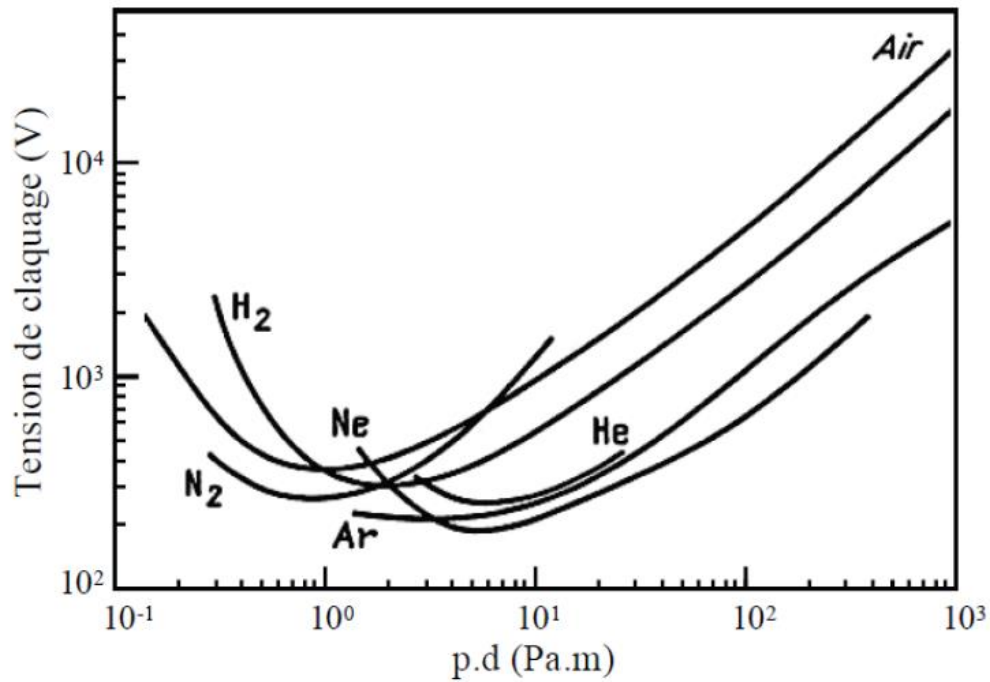


Figure I.8 Courbes de Paschen pour différents gaz [12, 261]

I.8- Théorie des streamers

Indépendamment, Meek, Loeb et Raether ont proposé la théorie des streamers vers 1940. Cette théorie prédit le développement de l'avalanche en un streamer. Ils ont proposé un modèle dans lequel la photo ionisation résultant des phénomènes d'excitation et de recombinaison dans l'intervalle inter-électrodes et la charge d'espace sont à la base du développement de la décharge (Figure I.9).

Selon ce modèle, la décharge se développe sous forme d'un canal très conducteur appelé *streamer*. Les mécanismes de cette théorie sont [20, 24]:

- La création d'une avalanche primaire du type Townsend engendrée par un électron germe,
- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la première avalanche,
- La photo ionisation du gaz à la tête de l'avalanche,
- La transition avalanche-streamer lorsque le champ de charge d'espace devient du même ordre de grandeur que le champ électrique appliqué.

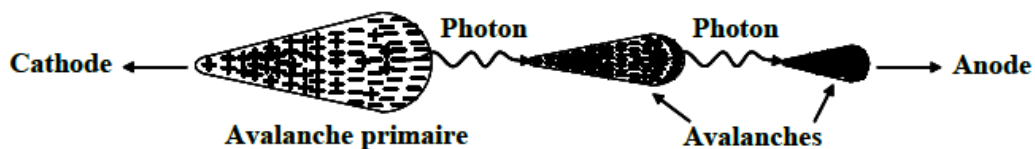


Figure I.9 Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes [12]

La figure I.10 représente la distribution des électrons et des ions dans une avalanche électronique

- Au niveau de l’anode, on voit que E se superpose à un champ local de même sens créé entre l’anode et la charge négative on est alors en présence d’un champ E₁ supérieur à E.
- Entre les charges positives et négative, le champ local créé s’oppose à E, d’où le champ résultant inférieur à E.
- Au niveau de la cathode, le champ local se superpose à E. il en résulte un champ E₃ supérieur à E.

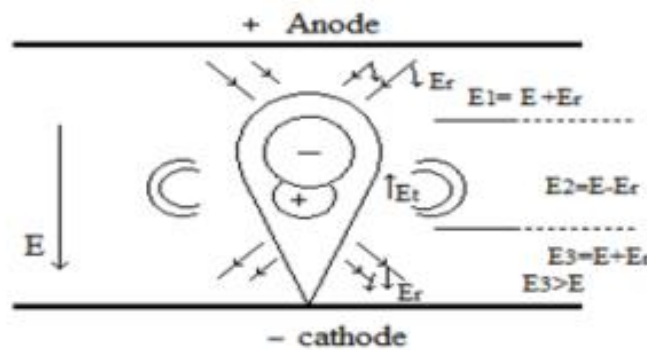


Figure I.10 Influence de la charge d’espace sur l’intensité du champ crée entre deux électrodes [32]

Leob et Meek estiment le champ de charge d’espace Er (champ radial) pour un streamer positif par la formule suivante [32] :

$$E_r = 5,27 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\alpha e^{\alpha x}}{(x/p)^{1/2}} \tag{I.25}$$

Le claquage se produit lorsque Er = E pour x = d

La formation des avalanches s’explique par le phénomène de photo-ionisation se produisant à l’intérieur de l’avalanche primaire. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collisions des molécules neutres. Les électrons ainsi produits se situant au voisinage de l’avalanche primaire, créeront une nouvelle avalanche, appelée avalanche secondaire toujours par le même phénomène de multiplication électronique [33]

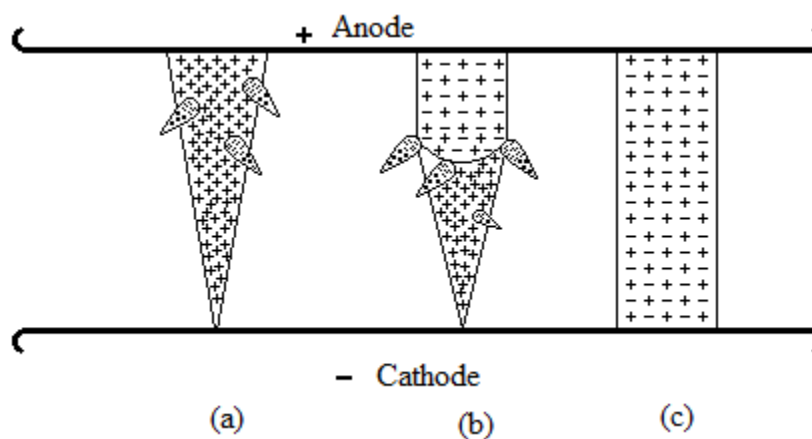


Figure I.10 Schéma de development d’un streamer positif [1, 33]

L'apparition du streamer est sous l'aspect d'un étroit filament lumineux provoqué par les photons en tête du streamer. Cependant, les photo-électrons sont produits non seulement en tête du streamer en direction du champ maximal, mais aussi dans une direction radiale par rapport à son avancement.

- **Version de Raether**

La grande vitesse à laquelle se produit la décharge est due au fait que *le streamer* négatif est conduit par plusieurs avalanches qui se développent simultanément entre les deux électrodes (Figure I.10). La formation des avalanches s'explique par le phénomène de photo-ionisation se produisant à l'intérieur de l'avalanche primaire. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collisions des molécules neutres. Les électrons ainsi produits se situant au voisinage de l'avalanche primaire créeront une nouvelle avalanche, appelée avalanche secondaire toujours par le même phénomène de multiplication électronique [32].

Raether a observé que lorsque la concentration de charge excède 10^8 électrons, le champ électrique se déforme à cause du champ de la charge d'espace et une décharge en forme de streamer (ou canal) apparaît:

$$n_0 e^{\alpha x_c} \approx 10^8 \quad (\text{I.26})$$

Pour une avalanche initiée par un électron ($n_0 = 1$), en champ uniforme, cela correspond à:

$$\alpha x_c \approx \alpha d_c = \ln 10^8 = 18 \div 20 \quad (\text{I.27})$$

Où x_c est la longueur de l'avalanche quand elle atteint sa taille critique.

Raether, après des investigations expérimentales, a développé une relation empirique pour le critère de décharge [1, 32]:

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln x_c + \ln \frac{E_r}{E} \quad (\text{I.28})$$

E_r : Le champ radial dû à la charge d'espace,

E : Le champ électrique appliqué.

La décharge électrique passe de l'avalanche au streamer quand $E_r \approx E$ (E_r du même ordre de grandeur que le champ appliqué E) ; on obtient alors:

$$\alpha x_c = 17,7 + \ln x_c \quad (\text{I.29})$$

Pour un champ uniforme, la tension de claquage par streamer est obtenue quand l'avalanche court-circuite les deux électrodes, l'équation (II.29) peut être réécrite :

$$\alpha d = 17,7 + \ln d \quad (\text{I.30})$$

Pour un champ uniforme, la tension de claquage par streamer est obtenue quand l'avalanche court-circuite les deux électrodes. Quand la distance critique $x_c > d$, la décharge par streamer est impossible.

I.9- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière bibliographique les mécanismes régissant les décharges dans les gaz en général et dans l'air en particulier. L'air est le milieu isolant le plus utilisé dans les installations électriques, pour son abondance et sa propriété auto-régénératrice après un claquage. Nous avons pu ainsi situer la décharge couronne qui est une décharge auto-entretenu et qui fera l'objet du chapitre qui va suivre.

Les mécanismes des décharges électriques dans les gaz sont interprétés selon deux modèles:

- Le modèle à court rayon d'action "*Théorie de Townsend*",
- Le modèle à long rayon d'action "*Théorie des streamers*", proposé par Meek , Loeb et Raether

Chapitre II

Généralités sur les décharges couronne

Chapitre II: Généralités sur les décharges couronne

II.1- Introduction

Les décharges couronnes apparaissent entre deux électrodes dissymétriques dans un milieu gazeux. Tout au long de sa propagation, la décharge électrique laisse derrière elle une traînée de plasma (canal ionisé), constituée d'espèces neutres excitées ou non et des espèces chargées (électron ou ions). La décharge de type couronne a été l'objet de beaucoup d'études relatives notamment aux réseaux électriques et au chargement des diélectrique.

Dans ce chapitre, une étude bibliographique est menée sur le phénomène d'effet couronne et les facteurs qui y influent.

II.2- Définition

En général, les décharges couronne, aussi connues sous le nom de décharges à effet couronne, se manifestent à une pression atmosphérique. La décharge couronne est une décharge électrique non destructive autoentretenu dans un gaz, qui peut se produire entre deux électrodes asymétriques, dont l'une avec un faible rayon de courbure reliée à une tension élevée, connue sous le nom d'« électrode active », et l'autre électrode, généralement plane, et reliée à la terre, connue sous le nom d'« électrode passive ». Le champ électrique inhomogène dans l'espace entre les électrodes est causé par la dissymétrie des électrodes, qui se divise en deux zones : une zone active (zone d'ionisation) et une zone de dérive [1, 26, 29].

Dans les environs de l'électrode avec un rayon de courbure faible appelée *zone active ou zone ionisée*, le champ est assez élevé, ce qui entraîne une ionisation du gaz et limite les phénomènes d'avalanche dans l'espace grâce à la diminution du champ électrique. On peut observer une seconde zone dite *zone de dérive ou unipolaire*, où les ions du même signe que l'électrode à faible rayon de courbure dérivent vers l'autre électrode [1, 29].

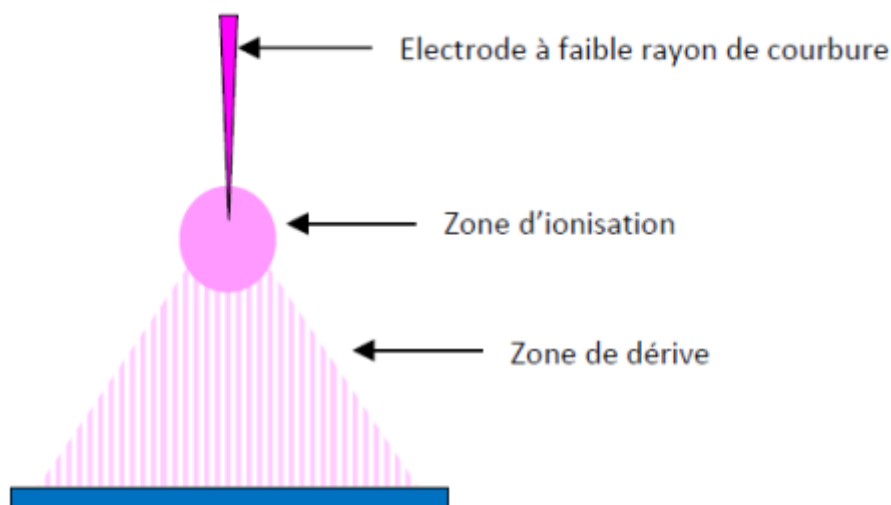


Figure II.1 Zone d'ionisation et de dérive dans la décharge couronne pointe-plan [3]

Il existe différentes configurations d'électrodes permettant de créer des décharges couronnes. La Figure II.2 montre les configurations les plus utilisées qui sont de types : fil-plan, pointe-plan, couteau-plan, et fil-cylindre.



Pointe/Plan Multipointe/Plan Couteau/Cylindre Fil/Cylindre Cylindre/Cylindre

Figure II.2 Systèmes d'électrodes utilisés pour la production de la décharge couronne [3, 6]

II-3- Caractéristiques des décharges couronne

II-3-1- Caractéristique courant-tension et régimes de décharges

Les décharges couronnes sont obtenues en utilisant un champ électrique avec des électrodes asymétriques. On distingue quatre régimes de décharge couronne en fonction du comportement de ce courant créé, en fonction de la valeur de la tension appliquée (Figure II.3).

- **Le premier régime :** Consiste en un ensemble de substances chargées présentes naturellement dans l'environnement. Ces substances sont produites par l'influence des rayons cosmiques ou de particules produites par la décomposition spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace compris entre les électrodes [12, 26].
- **Le second régime :** Qui se produit à partir d'une tension seuil V_0 , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge ; la décharge est qualifiée de *non autonome* car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée [12].
- **Le troisième régime :** L'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs. La décharge est auto-entretenu. C'est le régime de la *décharge couronne*, où apparaissent les dards, appelés aussi *streamers*, qui sont responsables de la composante impulsionnelle du courant [12].
- **Le quatrième régime :** Au-delà d'une tension appliquée V_T , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit E/N est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma [12].

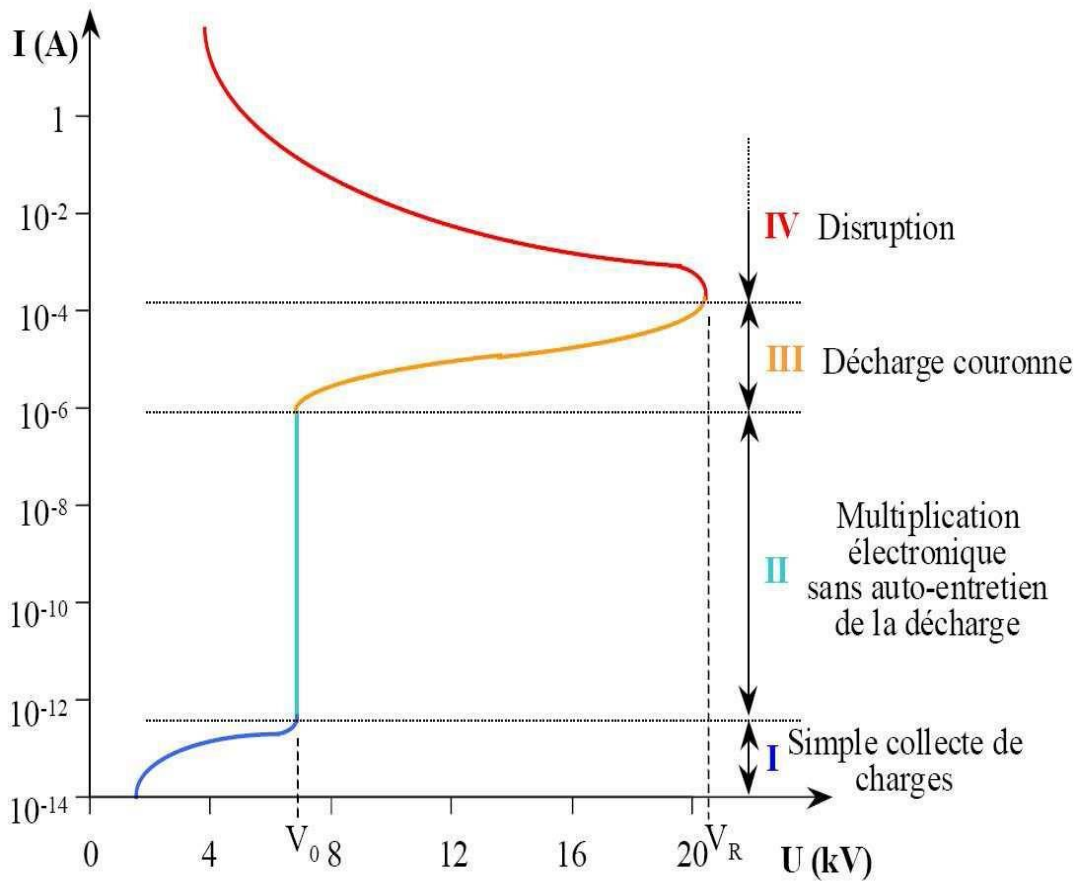


Figure II.3 Caractéristique courant- tension d'une décharge couronne pointe-plan positive dans l'air à la pression atmosphérique, ($d=13$ mm) [22, 26, 33].

II.3.2- Relations théoriques du courant de décharge couronne

L'analyse des décharges corona est généralement effectuée à l'aide de caractéristiques courant-tension, grâce auxquelles plusieurs paramètres peuvent être mesurés et quantifiés. La preuve de Warburg décrivait le courant en fonction de la tension appliquée. Cette relation est valable pour la géométrie pointe-plan [22, 26,3 33] :

$$I = k.V(V - V_0) \tag{II.1}$$

La tension d'allumage ou seuil d'ionisation V_0 est la valeur à partir de laquelle la décharge s'allume, tandis que k est une constante. La constante k varie en fonction de la configuration ou du système de décharge ainsi que de la nature du gaz environnant. Dans l'air et à pression atmosphérique : $0,1 < k < 1 \mu\text{A}/\text{kV}^2$ [22]

On peut aussi traiter cette relation différemment en utilisant le terme I/V qui rend la relation linéaire [8, 9,26]:

$$I/V = k.(V - V_0) \tag{II.2}$$

Une relation empirique de la même forme est proposée par Goldman moyennant une constante a [7,12]:

$$I = a \cdot \mu \cdot V(V - V_0) \quad (\text{II.3})$$

μ étant la mobilité des ions

La relation empirique quadratique en polarité négative de la pointe entre le courant et la tension est couramment employée pour de courtes distances entre les électrodes ($d \leq 1\text{cm}$) et se présente sous la forme [8, 9, 26]:

$$I = \frac{k}{\sqrt{d}} \cdot (V - V_0)^2 \quad (\text{II.4})$$

k est une constante qui dépend du rayon de courbure de la pointe, de la mobilité des ions et de la permittivité diélectrique du gaz.

Pour une pointe négative-plan, Lama et Gallo ont obtenu pour des rayons de courbures de la pointe ($0,03 < R_p < 0,05$ mm) et des distances inter-électrodes entre 4 et 16 mm la relation [8, 9, 26]:

$$I = \frac{52}{d^2} \cdot V(V - V_0) \quad (\text{II.5})$$

II-4- Champ électrique et topographique de la décharge couronne en géométrie pointe-plan

Un champ électrique inégal dans l'espace entre les électrodes est causé par la dissymétrie des électrodes. En l'absence d'espace, ce champ est représenté en tout point sur l'axe de la décharge par différentes relation(15). Par conséquent, pour une approximation hyperboloïde-plan, nous citerons les relations les plus couramment employées :

- Lama et Gallo en 1974 proposent une expression du champ géométrique sans charge d'espace [23]:

$$E(x) = \frac{2V \cdot d}{(d \cdot R_p + 2dx - x^2) \ln \left[\frac{4d}{R_p} \right]} \quad (\text{II.6})$$

- Hartmann en 1977 [20] a proposé la relation qui a pour expression:

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{R_p}{2} \right) \ln \left[\frac{2d + R_p}{R_p} \right]} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$E(x)$: Champ électrique (V/m),

V : Tension appliquée (V),

x : Distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m),

R_p : Rayon de courbure de la pointe (m),

d : Distance inter-électrodes (m).

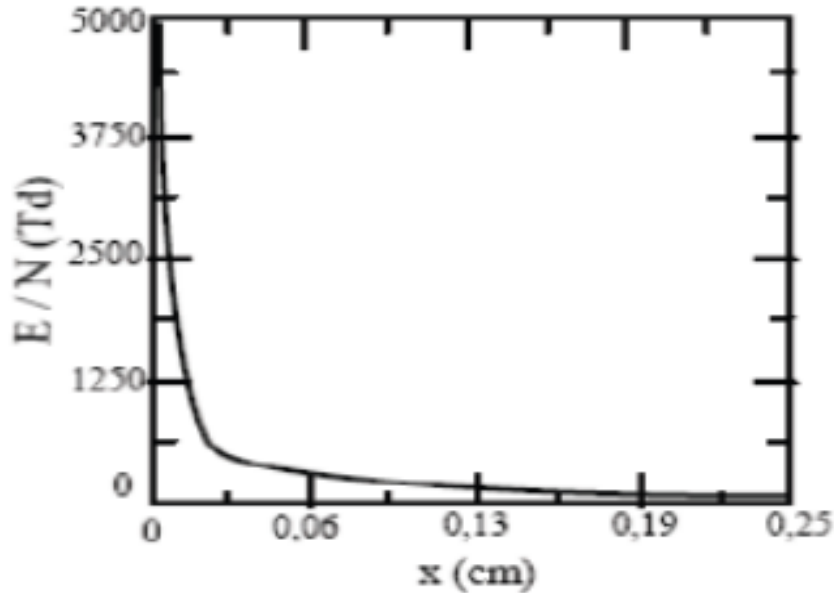


Figure II.4 Variation du champ électrique réduit en configuration pointe-plan ($d=2,5$ mm, $R_p=10\mu\text{m}$) [12]

La figure II.4 illustre comment le champ électrique géométrique réduit E/N (N étant la densité des particules). Pour une configuration pointe-plan et une tension appliquée à la pointe de 22 kV, **la densité des particules est de**. Il est évident que le champ s'effondre brusquement dès que l'on s'éloigne de la pointe. Cette courbe est obtenue en utilisant l'expression du champ géométrique proposée par Lama et Gallo.

E/N (Td) avec ($1 \text{ Td} = 1 \text{ Townsend} = 10^{-21} \text{ V.m}^2 = 10^{-17} \text{ V.cm}^2$)

II.5- Décharge couronne

Toutes les décharges pré-disruptives apparaissant sous la forme de lueurs diverses et qui prennent naissance au voisinage d'une électrode à faible rayon ou dans un champ non uniforme se qualifient de décharges couronnes. Deux types de décharge partielle, l'une en tension continue positive, l'autre en tension continue négative ont été distinguées. La décharge sous tension alternative est une combinaison des deux précédentes

I.5.1- Décharge couronne positive

La décharge couronne positive se produit lorsque l'électrode active, qui est une pointe, est portée à un potentiel positif et l'électrode passive, qui est une plaque mise à la terre. Dans cette

situation, on forme une zone avec un champ intense et une forte ionisation autour de la pointe, où des électrons sont générés par photo-ionisation et accélérés vers celle-ci [22, 26, 35].

Lorsqu'une électrode de faible rayon de courbure est soumise à une haute tension, une zone d'ionisation se forme à son voisinage où le champ est très fort. La photo-ionisation produit des électrons énergétiques qui sont accélérés vers l'anode. Au cours de leur voyage, d'autres électrons seront générés lorsque les molécules neutres du gaz inter-électrodes entrent en collision inélastique [22]. Les ions positifs générés seront éliminés de l'aire d'ionisation et se dirigeront vers la cathode. Le champ de la charge d'espace est identique au champ appliqué, il est dit que l'effet couronne se produit dans un champ croissant en polarité positive.

L'intérêt de la décharge couronne positive réside dans sa capacité à être utilisée avec tous les types d'alimentation électrique. La principale problématique avec ce genre de décharge est la transition vers l'arc électrique. Une augmentation significative du courant circulant dans la décharge et une augmentation de la température du gaz sont associées à cette transition [21, 22, 23].

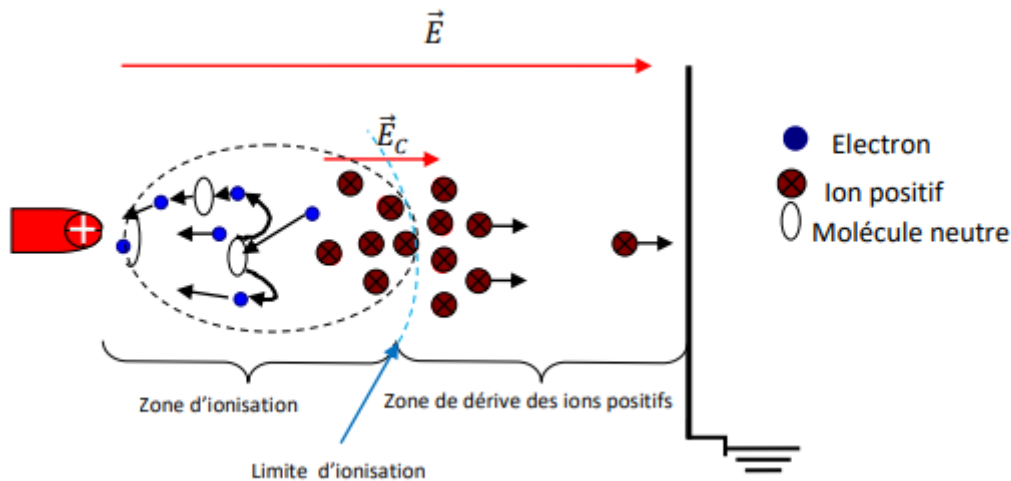


Figure II.5 Schéma d'une décharge couronne positive pointe-plan [26, 35]

La caractéristique courant-tension est divisée en trois zones distinctes correspondant à trois régimes de décharges couronne [1, 22]:

- La zone d'auto-stabilisation de la décharge couronne apparaît pour des tensions. Le courant de la décharge est impulsionnel. La décharge est dite en régime "**onset streamer**" ;
- La décharge couronne à courant continu apparaît pour des tensions. La décharge est dite en régime "**glow**" ;
- La décharge couronne à courant impulsionnel apparaît pour des tensions. La décharge correspond au régime "**breakdown streamer**".

II.5.2- Décharge couronne négative

À l'instar des décharges positives, les décharges couronne négatives se développent à partir d'une avalanche électronique s'initiant à proximité de l'électrode stressée. En raison de l'intensité du champ électrique, les ions positifs ainsi créés dérivent rapidement en direction de la cathode et provoquent une forte extraction d'électrons par émission secondaire [22]. Comme le champ de la charge d'espace est opposé au champ appliqué, on dit qu'en polarité négative l'effet couronne se déroule dans un *champ décroissant*. L'aspect lumineux est limité dans l'espace.

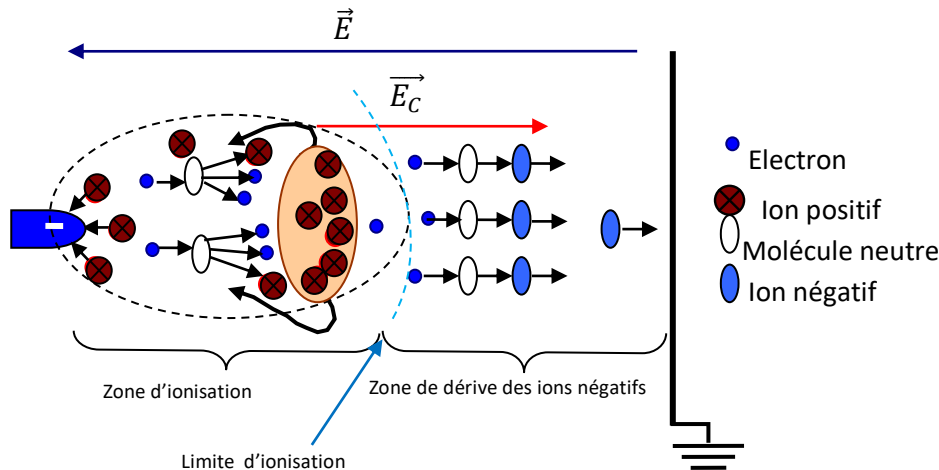


Figure II.6 Schéma d'une décharge couronne positive pointe-plan [22, 26, 35]

Lors de l'amorçage de la décharge couronne, les électrons primaires présents naturellement dans l'air sont accélérés au voisinage de l'électrode émissive sous l'effet du champ électrique. En tension négative, ils se propagent de la cathode (électrode de faible rayon de courbure) vers l'anode (électrode plane). Ils acquièrent alors assez d'énergie cinétique pour rentrer en collision inélastique avec les espèces neutres, leur arracher un électron et former de nouveaux électrons libres ainsi que des ions positifs. Les ions positifs, quant-à-eux, migrent vers la cathode ; ils forment une forte charge d'espace qui perturbe le champ électrique global [22, 26].

Dans une décharge couronne négative on peut observer trois régimes de décharges [1, 30]:

- **Impulsions de Trichel :** Dès que le champ critique est atteint au sommet de la pointe, on observe l'apparition des impulsions de Trichel. Elles constituent les premiers phénomènes d'ionisation décelables près de la cathode. Ces impulsions de mêmes amplitudes sont de très courte durée et apparaissent à intervalles réguliers sous la forme d'un cône lumineux. L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive [1,30].
- **Lueurs négatives :** En augmentant la différence de potentiel, on a davantage d'accumulation de charges d'espace et les impulsions de Trichel, décharges partielles intermittentes, sont remplacées par une décharge continue. Ainsi on observe un autre mode de décharge: la lueur

négative. Selon Giau et Jordan, il existe une fréquence critique des impulsions de Trichel qui correspond à la transition entre deux modes de décharge. Cette transition est accompagnée par un saut de l'intensité du courant de l'ordre de quelques dizaines de μA [30].

- **Effluves négatifs :** Pour une très haute tension, le claquage à la cathode peut être précédé par des effluves négatifs. L'apparition de ce mode de décharge implique une distance inter-électrode importante afin d'éviter un court-circuit du dispositif. L'existence de ce mode de décharge est peu probable sur les lignes aériennes [1, 30].

II.5.3- Effet de couronne en tension alternative

Lorsqu'une tension alternative est appliquée à des électrodes, on observe quelques différences en comparaison avec l'effet de couronne pour un **champ ce**. Cela est dû principalement à l'oscillation de la tension et au mouvement oscillatoire de la charge d'espace développée par l'effet de couronne [22, 33].

Il est à noter qu'on a choisi une configuration pointe-plan pour expliquer ce phénomène puisqu'elle s'apparente bien à une goutte d'eau, de plus elle peut être considérée comme une simple source de décharge couronne [33].

La première différence observée en comparaison avec l'excitation C.C pour cette configuration, est l'absence des impulsions au début pour la demi-alternance positive de la tension. Par contre, dans le cas où l'espace inter-électrodes est vraiment petit, la charge d'espace est alors évacuée avant que la polarité du champ soit inversée et on peut ainsi observer les impulsions au début du phénomène [26, 33].

II.6- Vent électrique

Les collisions élastiques entre deux particules se produisent lorsque l'énergie cinétique totale du système reste inchangée, ainsi que son énergie interne. Les seules collisions qui se produisent dans un gaz neutre sont ces collisions qui permettent l'équilibre thermodynamique. Dans les gaz ionisés, elles jouent un rôle actif dans la mise en place du régime permanent [22, 33].

Dans le cas où les collisions élastiques ne modifient que la vitesse des particules, les collisions inélastiques entraînent des modifications de l'énergie interne ou de la nature des particules [6, 33].

Quand un champ électrique est appliqué à un gaz, les électrons libres se déplacent dans le sens contraire au champ appliqué. Les électrons entrent en collision élastique avec les molécules du gaz, ce qui entraîne une augmentation de l'énergie cinétique et donc de la vitesse des électrons. Quand l'énergie cinétique des électrons augmente, ses collisions inélastiques peuvent se produire avec les atomes neutres du gaz [22, 33].

Une fois cette collision passée, il y a généralement un électron et un électron rapide qui apportent la plus grande partie de l'énergie cinétique non consommée dans la réaction. Le fait que les

électrons puissent accumuler l'énergie cinétique lors de plusieurs chocs entraîne une ionisation par impact entre les électrons et les molécules dans un champ électrique à faible intensité [6, 22, 33].

Une des conséquences des décharges de couronne est la création du vent ionique. Les ions créés par ces décharges sont accélérés par le champ électrique. La vitesse est transférée aux molécules du gaz ambiant par la collision, lui donnant un mouvement de la pointe de l'aspérité vers le milieu du gaz [6]

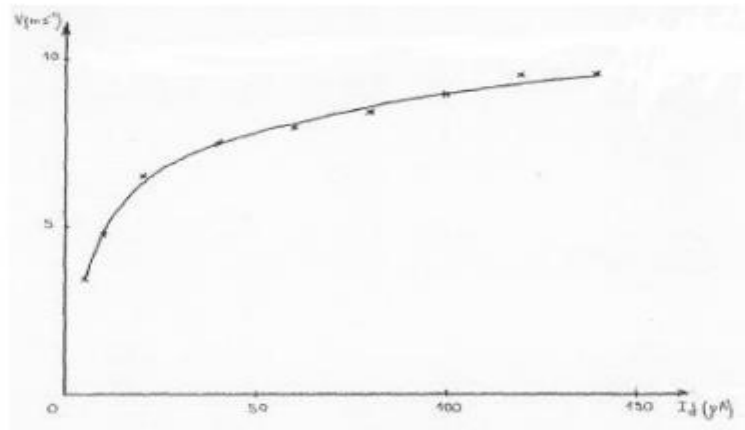


Figure II.7 Variation de la vitesse du vent électrique en fonction du courant de décharge ($U = 3,8$ kV, $d = 4$ mm, rayon de courbure $R_p = 50$ μm) [6, 22, 26, 33]

II.7- 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.

II.7.1- Facteurs géométriques

a- La distance inter-électrodes : Le courant de la décharge augmente lorsque la tension appliquée augmente pour une distance entre les électrodes spécifiées. Plus cette dernière augmente, plus le courant diminue pour la même tension appliquée.

Sur La figure II.8, il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes.

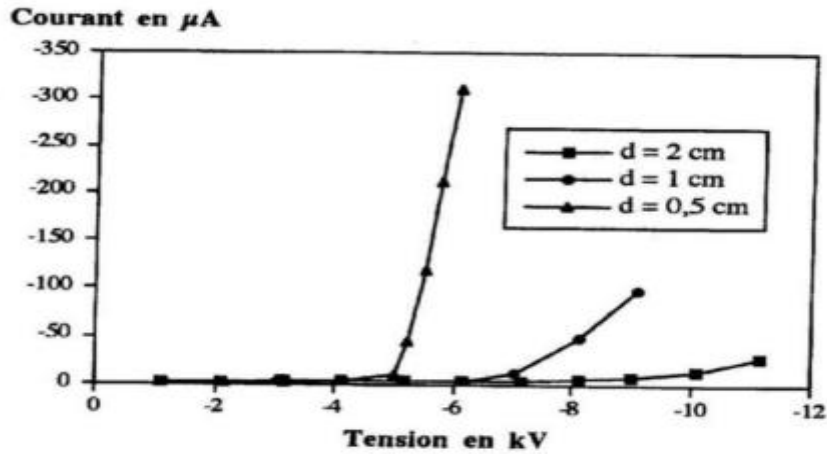


Figure II.8 Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [28]

b- La nature des électrodes : Les électrodes peuvent être de différentes natures (cuivre, aluminium, acier,...). La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique par exemple la mobilité ionique avec des électrodes et plus grande en acier qu'avec des électrodes en aluminium quelle que soit la polarité de la tension appliquée.

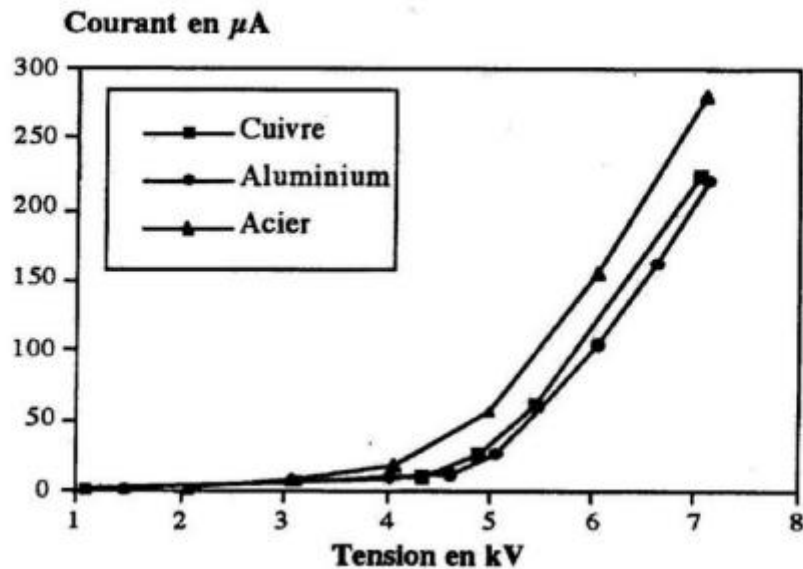


Figure II.9 Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes [3, 28]

c- Etat de surface : La détérioration de la surface des conducteurs joue un rôle crucial car plus elle se détériore, plus les pertes augmentent et plus le champ perturbateur est faible. La pollution végétale ou industrielle, ainsi que le suintement en surface de graisse de toronage, jouent un rôle crucial dans la dégradation, mais malheureusement difficilement contrôlable. De plus, l'effet couronne est amplifié par la pluie, car les gouttes d'eau suspendues aux conducteurs créent des aspérités qui augmentent le nombre d'aigrettes [3, 28]

II.7.2- Facteurs physico-chimiques du gaz

a- Effet de la température : La rigidité diélectrique de l'air diminue avec l'augmentation de la température, à la pression normale, ce qui entraîne une décharge de couronne. Cela s'explique par le fait que dans cette situation, la moyenne du libre parcours augmente. En revanche, si l'augmentation de la température entraîne une hausse de la pression, cela a donc un impact sur le produit [26].

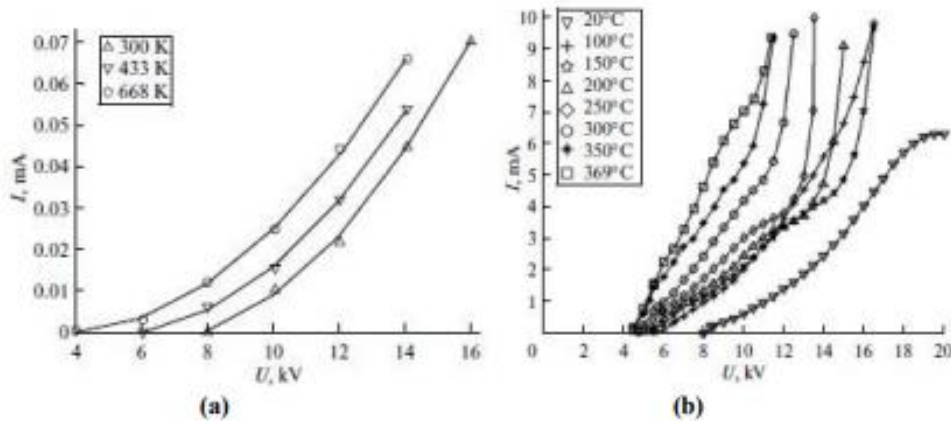


Figure II.10 Caractéristique I - V en fonction de la température (a) dans l'air en polarité positive, (b) dans l'hélium à $P = 20$ Bars [26]

b- Effet de l'humidité : L'humidité joue un rôle crucial dans la rigidité diélectrique de l'air, en particulier lorsque le champ électrique est inégal. D'une part, ce phénomène serait associé à une augmentation de l'attachement des électrons libres, en raison de la présence de vapeur d'eau dans l'air (électro-négation élevée) et d'autre part, à une absorption plus importante des photons en tête des streamers, dans la zone où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation [3, 28].

La décharge couronne se manifeste à des tensions toujours plus faibles pour 90% que pour 5% d'humidité relative. Cette disparité pourrait être due à une augmentation de la conductivité de l'air liée à l'augmentation de l'humidité relative de la cellule de décharge [28].

c- Effet de la densité de l'air : Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air [3, 28].

La tension U_d est proportionnelle à la densité de l'air:

$$U_{dn} = \frac{U_d k_h}{\delta} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

U_{dn} : Tension de claquage dans les conditions normales.

$\frac{k_h}{\delta}$: Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

d- Effet de la pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure II.11 montre l'effet de la pression sur la décharge [3].

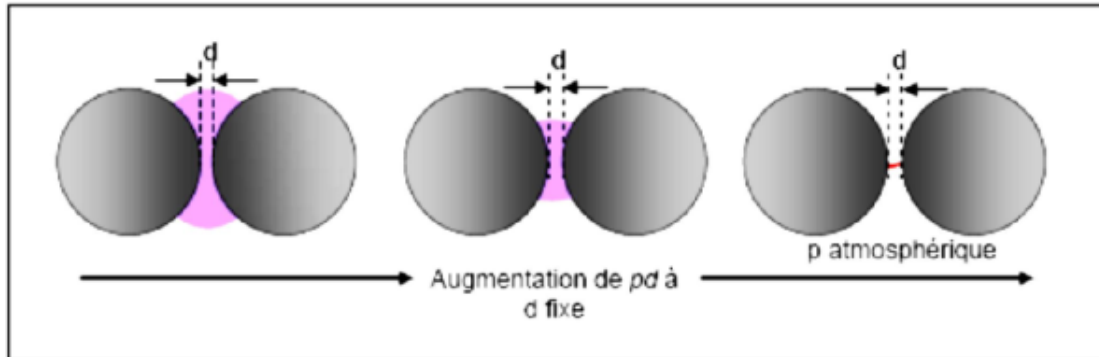


Figure II.11 Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [3, 28]

II.7.3- Facteurs électriques

L'effet couronne varie en fonction de l'application d'une tension continue ou alternative à un système d'électrodes. La tension continue présente les mêmes modes d'émission de charges que ceux qui ont été décrits en tension alternative, à la différence 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 tension continue, l'émission de charges est permanente [30].

II.8- Applications industrielles des décharges couronne

Les décharges couronne sont couramment employées dans les environnements industriels. Elles proposent une variété d'applications technologiques telles que les filtres électriques, la charge de matériaux isolants, la peinture électrostatique et le traitement des surfaces. Elles ont aussi de nombreuses autres applications commerciales et industrielles telles que [1, 22, 33] :

- Production d'ozone ;
- Traitement de surface de certains polymères ;
- Xérogaphie (Photocopieur) ;
- Laser à azote ;
- Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud).

II.8.1- 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 (Figure II.12).

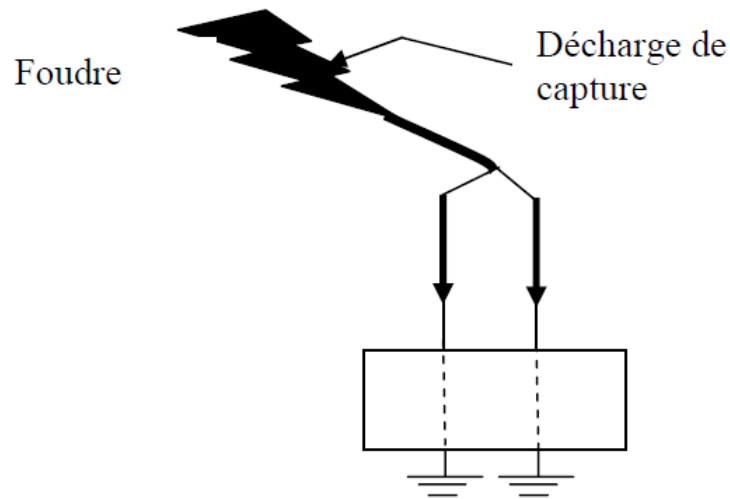


Figure II.12 Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre [3, 28]

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.

II.8.2- Filtre électrostatique

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (Figure II.13).

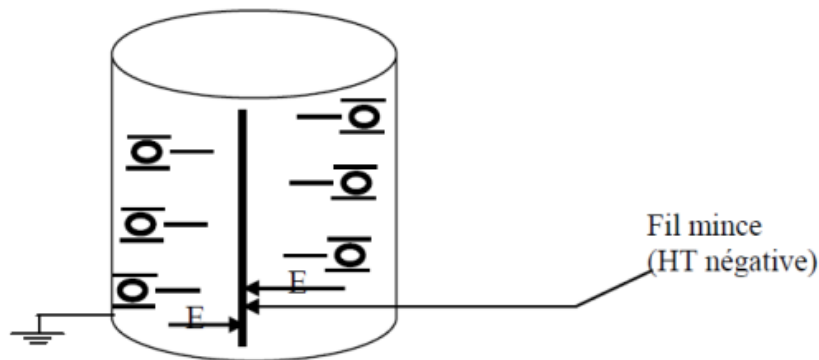


Figure II.12 Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique [3, 28]

8.3- Séparateur électrostatique

Le séparateur électrostatique à tambour est le modèle le plus utilisé dans l'industrie. Il permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal avec des puretés très proches de 100%. Dans ce type de séparateur, le champ électrique est créé entre deux électrodes (1 et 2) de la figure II.14 connectées à la source haute tension et l'électrode tournante [3, 28] 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. 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. 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 [3, 28].

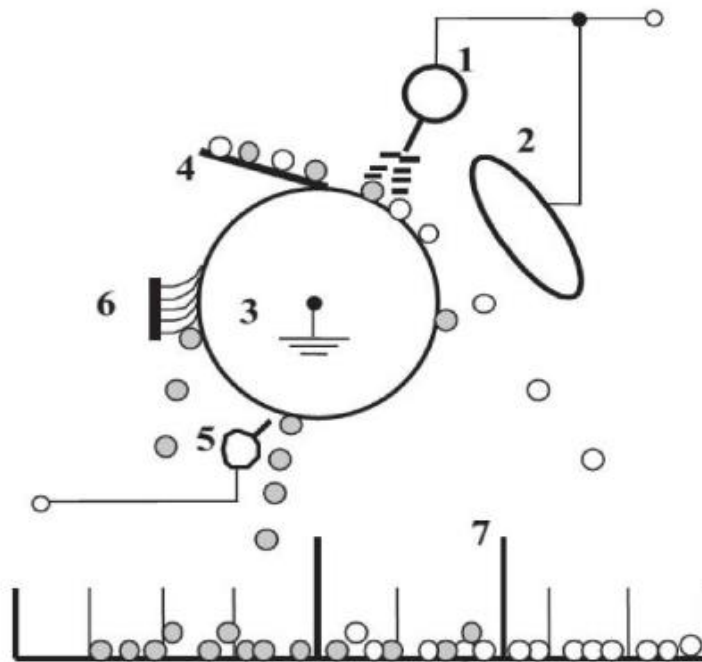


Figure II.14 Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [3, 28]

8.4- Neutralisation et charge des matériaux

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 [3].

8.5- 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, qui est utilisé dans le traitement des eaux au désinfectant.

La génération d'ozone dépend de la tension appliquée [3, 28]:

- Dans le cas d'une tension positive, la décharge apparaît entièrement dans l'espace inter-électrodes ;
- Dans le cas d'une tension négative, la décharge n'apparaît que près de la région de l'électrode active.

La polarité positive, représentée par le grand volume de décharge est plus effective pour la génération de l'ozone que la polarité négative.

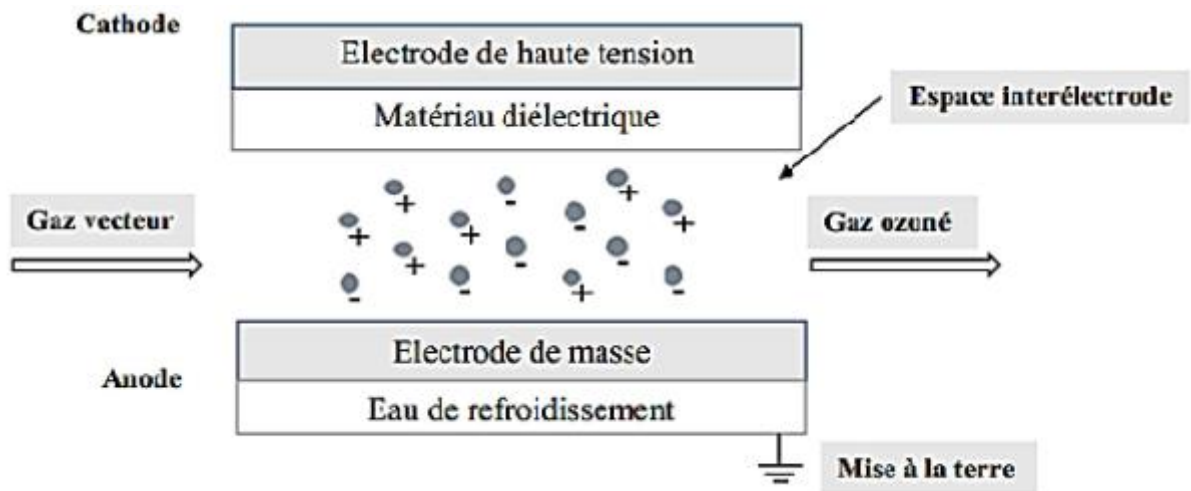


Figure II.15 Principe de production d'ozone par décharge couronne [3, 28]

II.9- Conclusion

Ce chapitre présente une vue d'ensemble de la décharge couronne. Nous avons exposé les divers mécanismes de la décharge ainsi que les diverses catégories. Les éléments qui ont un impact sur la décharge couronne ont été brièvement abordés. Finalement, nous avons présenté quelques exemples d'utilisation de la décharge couronne dans le secteur industriel.

Chapitre III

Etude expérimentale de la décharge couronne multi pointes-plan sous tension continue

Chapitre III: Etude expérimentale de la décharge couronne multi pointes-plan sous tension continue

III.1- Introduction

Les décharges couronne dans l'air à la pression atmosphérique ont fait l'objet des travaux de recherche bien connus de Loeb et Meek [24, 30] sur les phénomènes d'amorçage, de développement et de propagation de la décharge couronne. Beaucoup de travaux qui ont suivi concernent des études variées et approfondies sur les décharges couronne en modifiant plusieurs paramètres pour analyser leur influence sur le comportement de la décharge [1, 22, 26, 30].

Ce chapitre est consacré dans un premier temps, à l'étude expérimentale sous tension continue d'une décharge couronne pointe-plan puis à une décharge multi pointes-plan dans un second temps. Les principaux paramètres étudiés sont l'effet de la distance inter-électrodes, de la pression, du nombre de pointes et l'espacement entre deux pointes consécutives (disposition linéaire) et de la pression.

III.2-Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental permet une étude paramétrique de la décharge couronne en géométrie multi pointes-plan. La figure III.1, représente les principaux éléments le constituant, à savoir :

- L'enceinte,
- Les électrodes,
- La source Haute tension,
- Les moyens de mesures électriques.



Figure III.1 Vue globale du dispositif expérimental

III.2.1- Les électrodes

La configuration des électrodes utilisée dans le cadre de ce mémoire est le système "multi pointes-plan" en disposition dite linéaire ou en peigne. Chaque pointe est un cylindre de 4 mm de diamètre et de 40 mm de longueur ayant un angle d'ouverture de 30° . Les rayons des pointes utilisées varient entre 100 et 120 μm (Figure III.3a et b). Toutes les pointes sont en acier inoxydable.

L'électrode plane est un disque, de 4 mm d'épaisseur et 100 mm de diamètre, à bords arrondis afin de limiter d'éventuels gradients de champ électrique à proximité des bords. Comme pour les pointes, les électrodes planes utilisées dans nos essais sont également en acier inoxydable (Figure II.3c)

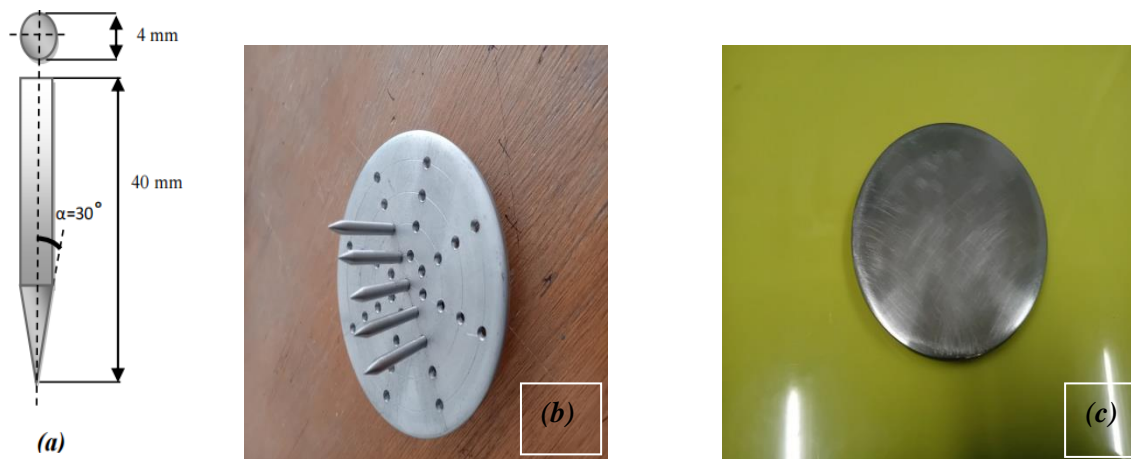


Figure III.2 Electrodes utilisées (a): Forme et dimensions des pointes, (b): Porte électrodes multi-pointes, (c): Electrode plane

III.2.2- La Source de tension

La source de tension est un générateur haute tension continue (Fug Elektronik HCN 700 65000) qui fournit une tension maximale de 65 kV et un courant de 10 mA.



Figure III.3 Source Haute Tension continue

III.2.3- Les moyens de mesures électriques

Les grandeurs électriques mesurées sont la tension appliquée entre les électrodes et le courant moyen. La tension appliquée est mesurée au moyen d'une sonde haute tension (PHILIPS PM 9246, rapport de conversion de 1 pour 1000, impédance de 600 M Ω , tension maximale de 30 kV en continu) disposée entre l'électrode active et la masse.

Les courants produits par la décharge couronne sont mesurés à partir de la tension aux bornes d'une résistance de 1 k Ω (résistance de mesure).



Figure III.4 Appareils de mesures utilisés (a) : Multimètre, (b) : Baromètre avec son capteur de pression, (c) : Hygromètre

III.2.4- Mode opératoire

Les électrodes sont nettoyées systématiquement à l'acétone avant et après chaque série d'essais. Les plans présentent parfois des traces d'usure visibles à l'œil nu, ils sont alors polis puis nettoyés à l'acétone. On observe parfois de multiples points d'érosion sur les pointes, dans ce cas ces dernières sont remplacées par d'autres pointes ayant le même rayon de courbure ou un rayon proche.

III.3- Caractéristique courant-tension en configuration pointe-plan

Dans la littérature, pour une configuration pointe-plan, le courant de décharge I augmente avec la tension appliquée V de façon parabolique suivant l'expression [26]:

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

V_0 étant la tension d'amorçage ou seuil d'ionisation à partir duquel la décharge s'allume. La

constante k dépend de la géométrie de la décharge et de la nature du gaz environnant.

III.3.1-Influence de la polarité de la tension appliquée

La Figure III.5 représente les caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne négative et positive. Cette courbe est obtenue dans les conditions suivantes :

$t = 21,9^{\circ}\text{C}$, $P = 100 \text{ hPa}$ et $H = 56.8\%$

D'une part, nous remarquons d'abord que le courant de décharge couronne négative est plus important que celui de la décharge positive pour une tension appliquée donnée.

D'autre part, la tension seuil V_0 de la décharge positive est plus élevée que celle de la décharge négative, ce qui indique que la décharge couronne se produit facilement lorsqu'une tension négative est appliquée à la pointe. C'est pour cette raison que la polarité négative est préférable dans la plupart des applications surtout dans la précipitation électrostatique [26]

Nous donnons dans ce qui suit les tensions seuil correspondant à la figure III.5.

- En polarité positive : $V_0 = 7.8 \text{ kV}$;
- En polarité négative : $V_0 = 8.4 \text{ kV}$.

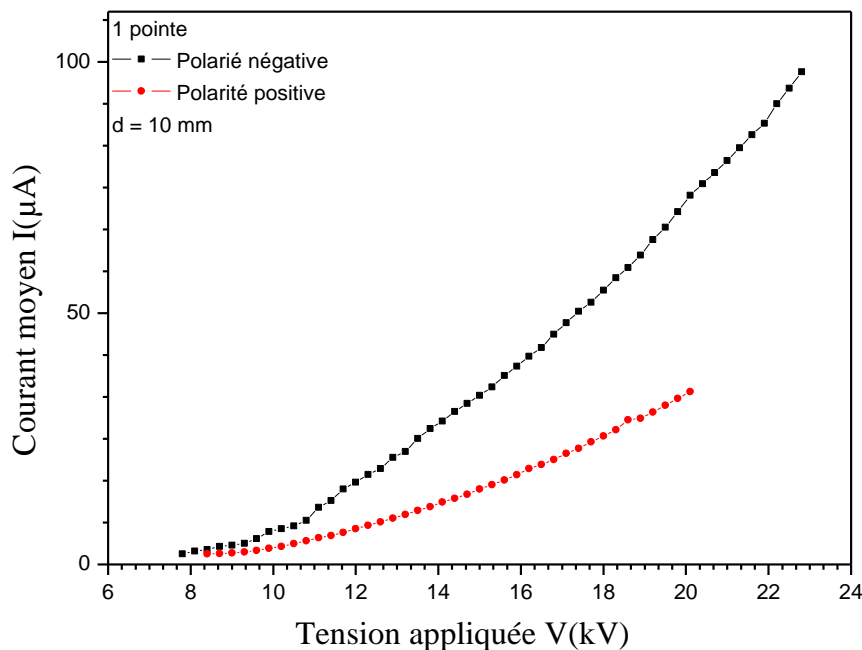


Figure III.5 Influence de la polarité de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.

III.3.2- Influence de la distance inter-électrodes en géométrie pointe-plan

Les caractéristiques courant-tension des figures III. 6 et III.7 sont tracées pour 5 distances inter-électrodes allant de 5 à 30 mm par pas de 5 mm dans les deux polarités de la pointe.

Sur les deux figures, on voit clairement la forme parabolique de la caractéristique courant-tension dans les deux polarités de la pointe pour les différentes distances inter-électrodes conformément à la relation III.1. Pour une distance inter-électrodes donnée, le courant moyen mesuré augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. Par contre pour une tension donnée, le courant diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes.

Il faut remarquer aussi que la décharge couronne positive est plus stable que la négative, cela se voit clairement sur la figure III.6.

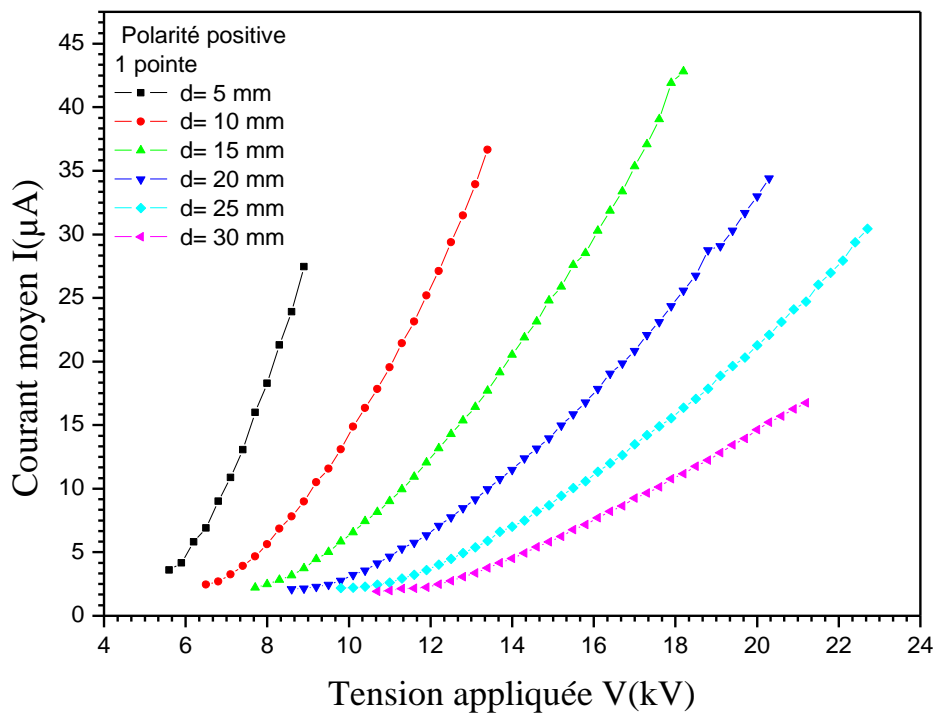


Figure III.6 Influence de la distance inter-électrodes en polarité positive de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.

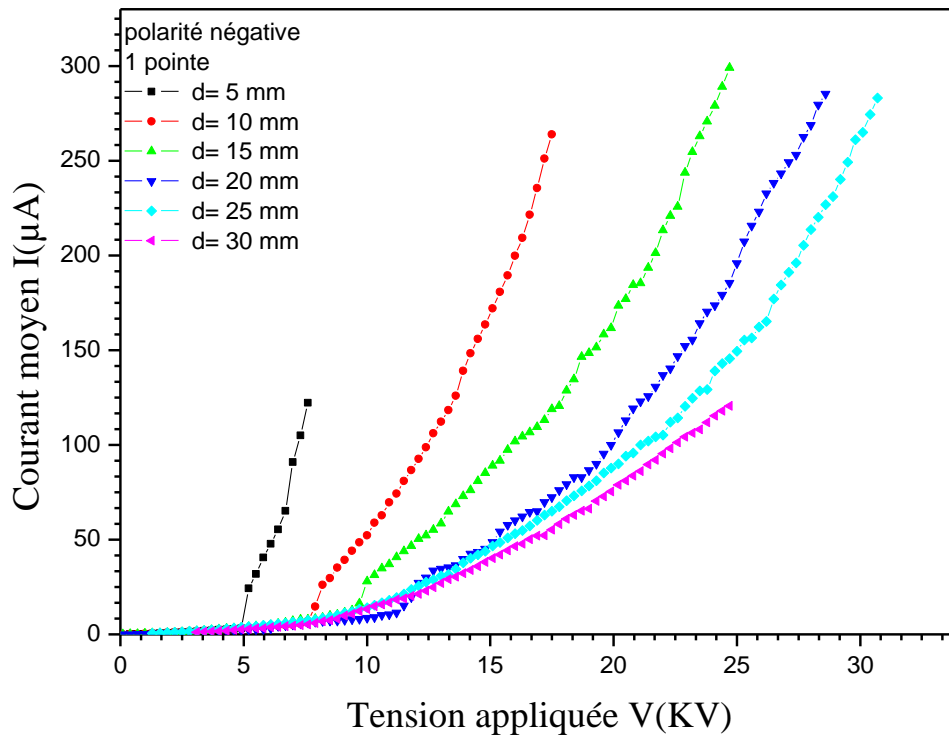


Figure III.7 Influence de la distance inter-électrodes en polarité négative de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.

III.3.3- Effet de la pression en géométrie pointe-plan

Cette partie est consacrée à l'effet de la pression sur les caractéristiques courant-tension en géométrie pointe-plan. Les essais sont réalisés à l'intérieur d'un tube à décharge (figure III.11). Pour faire varier la pression nous avons utilisé une pompe à vide. Dès que la pression voulue est atteinte, on coupe la pompe et on ferme les vannes d'évacuation d'air du tube à décharge. La pression est mesurée en hPa avec un baromètre associé à un capteur de pression. Ce système peut mesurer des pressions allant de 0 à 1300 hPa.



Figure III.8 Tube à décharge.

La figure III.9 montre que, pour chaque pression, nous obtenons des caractéristiques courant-tension comme prédit par la relation III.1. Ce comportement est similaire à celui obtenu dans des travaux antérieurs [26].

Pour la même variation de la tension appliquée aux pressions élevées et aux faibles pressions, l'augmentation du courant est plus faible dans le premier cas (pressions élevées) que dans le second. Cela est d'autant plus visible. En effet, cette figure montre qu'il y a une réduction du courant à mesure que la pression augmente.

Il ressort que, lorsque la pression augmente, le courant produit par la décharge couronne négative en géométrie pointe-plan diminue, ce qui est en accord avec d'autres travaux réalisés avec d'autres géométries [26]. Une explication possible de ce comportement est que l'augmentation de la pression entraîne une augmentation de la densité des molécules du gaz, ce qui réduit la probabilité d'ionisation de ce dernier et, par conséquent, l'intensité du courant diminue.

Nous pouvons expliquer ces résultats par le fait, que dans l'air, la densité moléculaire augmente avec la pression. Par conséquent, la distance moyenne entre les molécules d'air diminue et donc le libre parcours moyen λ est également réduit lorsque la pression de l'air augmente.

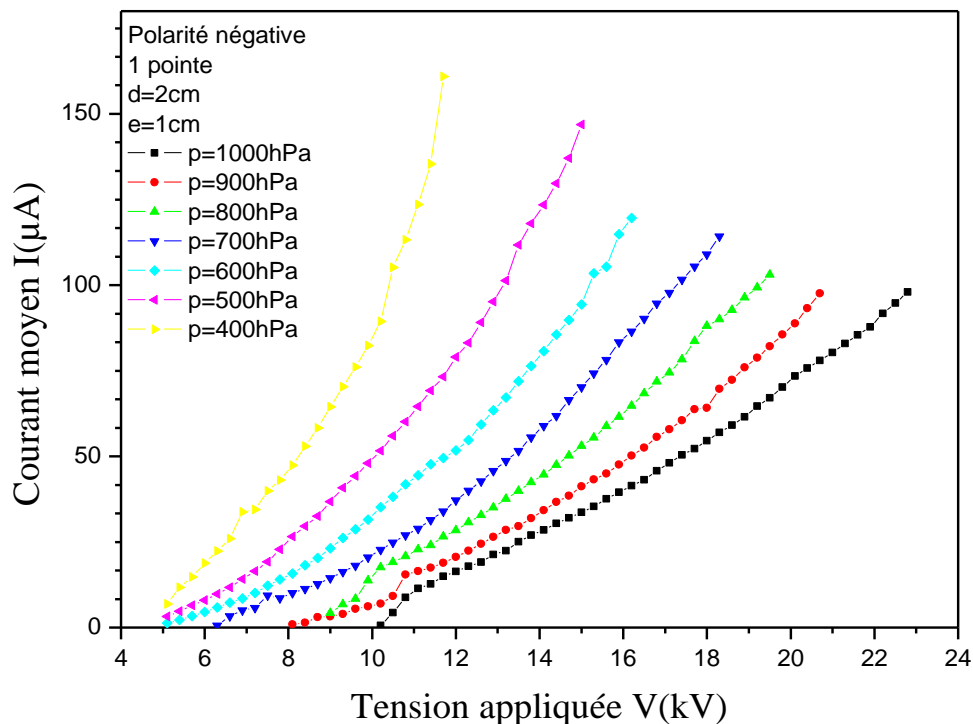


Figure III.9 Caractéristique de la décharge couronne négative pointe-plan pour différentes pressions

III.4- Caractéristique courant-tension en configuration multi pointes-plan

III.4.1- Effet du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension

La Figure III.10 représente la caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne en polarité négative en fonction du nombre de pointes, pour une distance inter-électrodes $d = 10$ mm. Cette courbe est obtenue dans les conditions expérimentales suivantes :

$t=25,6^{\circ}\text{C}$, $P=1012\text{hPa}$ et $H = 49,8\%$

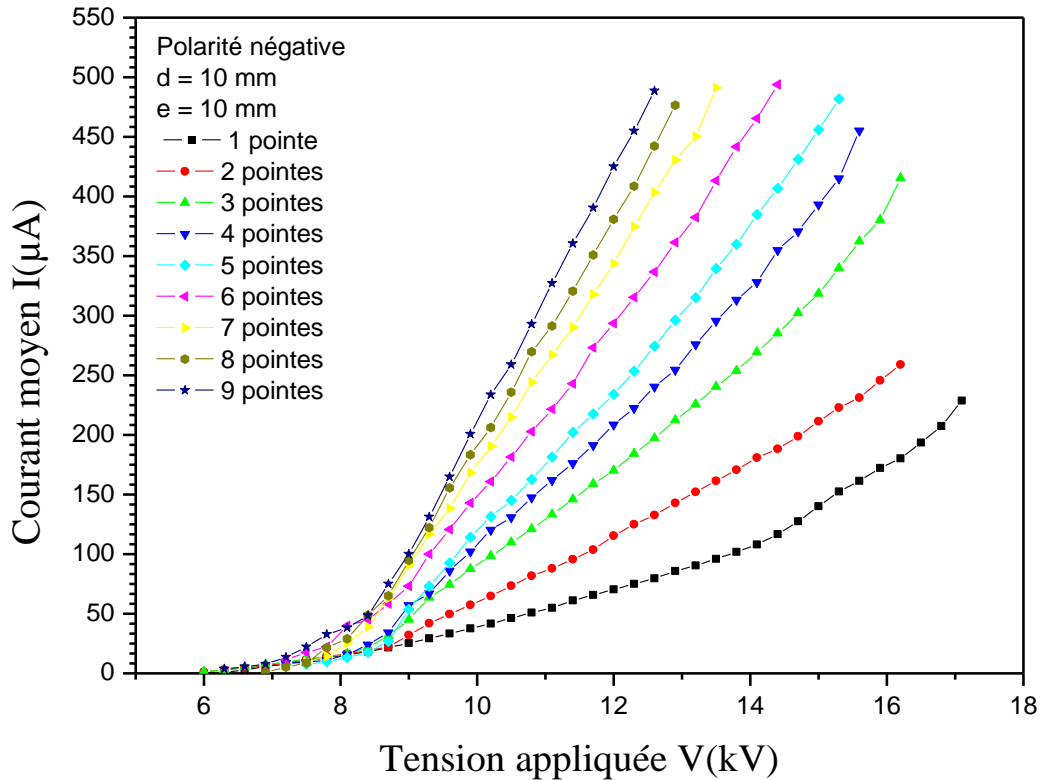


Figure III.10 Influence de nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative pour $d=10\text{mm}$.

La Figure III.11 représente la caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne en polarité négative en fonction du nombre de pointes, pour une distance inter-électrodes $d = 20$ mm, Cette courbe est obtenue dans les conditions expérimentales suivantes :

$t=26,7^{\circ}\text{C}$, $P=10012\text{hPa}$ et $H = 52,8\%$

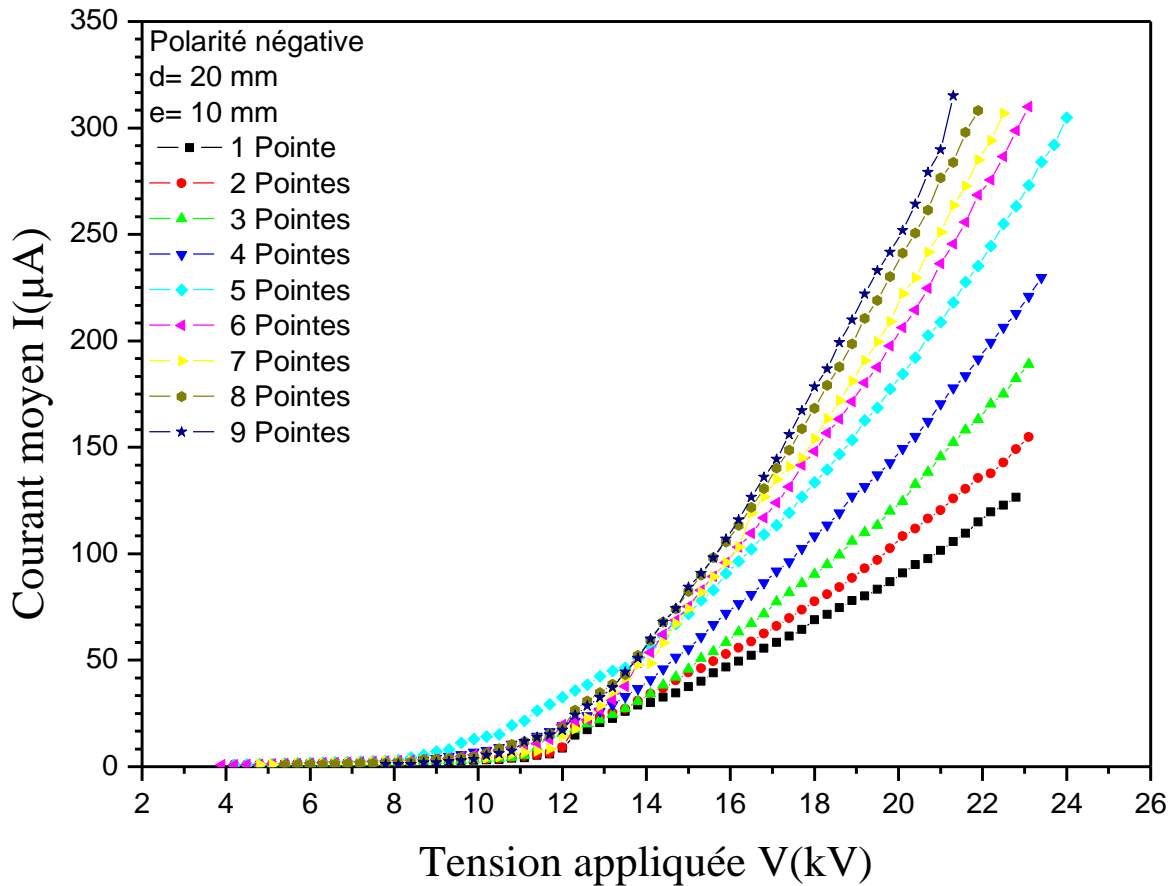


Figure III.11 Influence de nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative pour $d = 20 \text{ mm}$.

Les figures III.10 et III.11 illustrent l'influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge pour une distance inter-électrodes donnée (1 cm et 2 cm). On voit clairement que plus le nombre de pointes augmente plus le courant de décharge couronne engendré augmente de façon significative. Cela est dû à une densité de charge spatiale beaucoup plus élevée que celle produite par un système à une seule pointe. L'augmentation du nombre de pointes contribue à augmenter le courant de décharge en raison de la superposition des avalanches d'électrons provenant des différentes pointes [1, 26].

Il est donc intéressant d'augmenter le nombre de pointes pour avoir un courant de décharge couronne assez élevé et ce en agissant séparément ou simultanément sur le nombre de pointes et la distance de ces dernières par rapport à la pointe centrale. Comme il serait aussi judicieux de trouver une configuration optimale qui nous permettra d'avoir un courant élevé en alimentant le système multi pointes-plan avec une tension faible. Cette configuration représente une meilleure application dans le traitement des surfaces et dans la précipitation électrostatique.

III.4.2- Influence de l'espace entre les points

Les figures II.11 et 12 représentent caractéristique courant-tension en polarité négative pour 3 points pour des espacements e allant de 1 à 3 cm entre les points et des distances inter-électrodes d de 1 et 2 cm. L'essai est réalisé dans les conditions atmosphériques suivantes: $t = 25,8^{\circ}\text{C}$, $P = 1004\text{hPa}$ et $H = 58,5\%$.

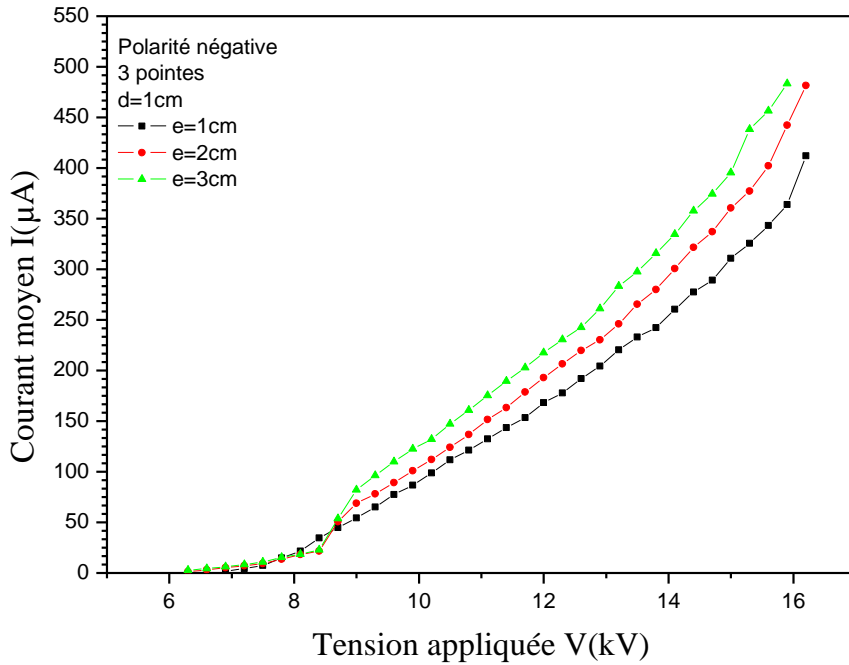


Figure III.12 Effet de l'espacement des pointes en polarité négative pour 3 pointes et $d = 1\text{ cm}$

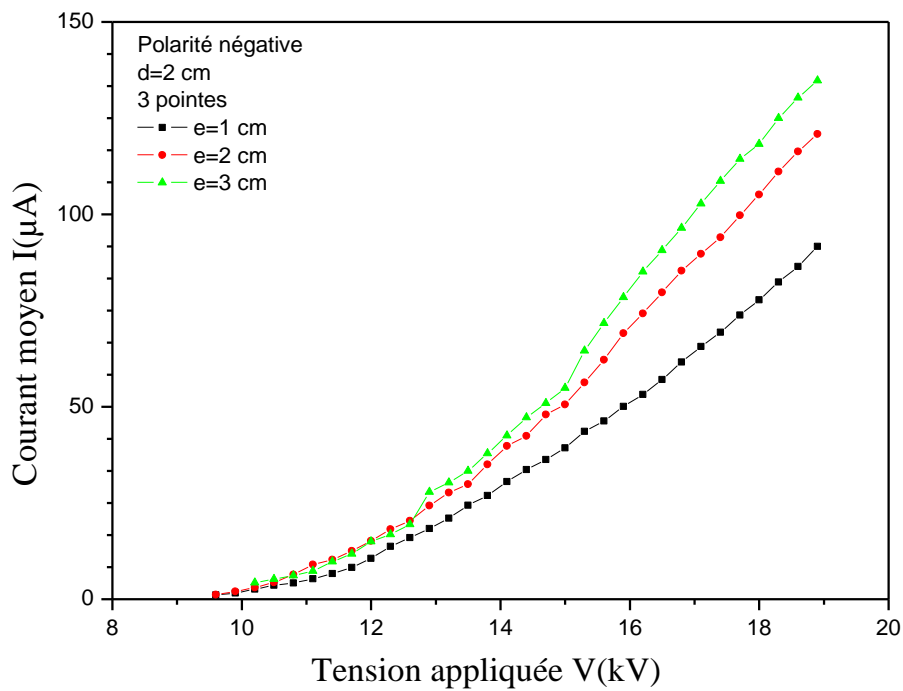


Figure III.13 Effet de l'espacement des pointes en polarité négative pour 3 pointes et $d = 2\text{ cm}$.

De l'examen de ces courbes, il ressort que pour une distance inter-électrode d donnée, le courant de la décharge couronne augmente avec l'augmentation de la distance séparant deux pointes consécutives. En d'autres termes, plus l'espacement entre les pointes augmente, plus le courant augmente pour une tension donnée. Néanmoins, à partir d'un certain espacement, le courant augmente faiblement, ce qui revient à dire qu'il existe un espacement critique, au-delà duquel la caractéristique courant-tension change très peu.

Nous remarquons aussi sur ces courbes que pour les différents espacements, le courant est plus important pour $d = 1$ cm par rapport à celui de 2 cm ;

III.4.3- Influence de la pression sur la décharge couronne multi pointes-plan

Le tube à décharge utilisé est de marque Phywe et présente les caractéristiques suivantes :

- Pression : de 0 à 3 bars,
- Max de tension d'essai : 150 kV,
- Gaz non corrosifs autorisés : air, N_2 , SF_6 et Hélium.

III.4.3.1- Influence de la pression sur la décharge couronne multi pointes-plan

Pour mettre en évidence l'effet de la pression sur la décharge couronne multi-pointes-plan, nous avons réalisé l'ensemble des essais avec 3, 5, 7 et 9 pointes (configuration qui nous donne le maximum de courant). Les essais sont réalisés pour des pressions allant de 400 à 1300 hPa par pas de 100 hPa en polarité négative et une distance inter-électrodes $d = 2$ cm.

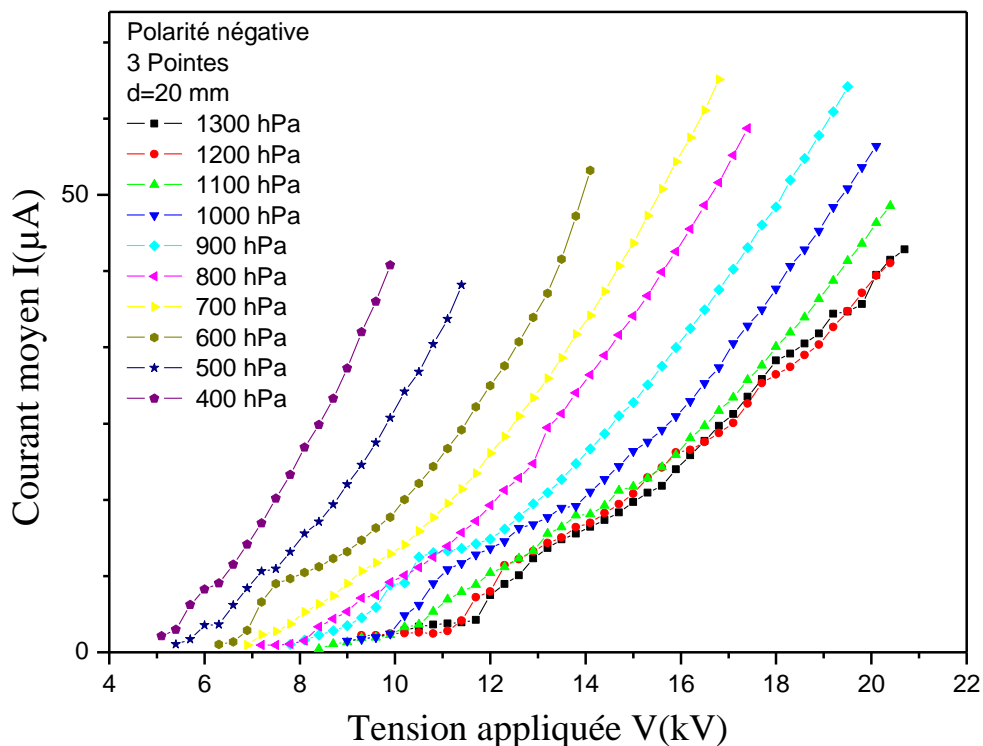


Figure III.14 Caractéristique de la décharge couronne négative 3 pointes-plan pour la distance ($d = 20$ mm)

Les conditions atmosphériques durant les essais sont :
 $t = 25,3^{\circ}\text{C}$ et $H = 61,5 \%$

Les résultats des essais sont consignés sont donnés par les figures III.14 à III.17. Ces figures montrent que le courant est d'autant plus important que la pression est faible. Cela est dû à la densité moléculaire qui augmente avec l'augmentation de la pression, ce qui réduit par conséquent le libre parcours moyen des électrons donc la probabilité d'ionisation devient faible.

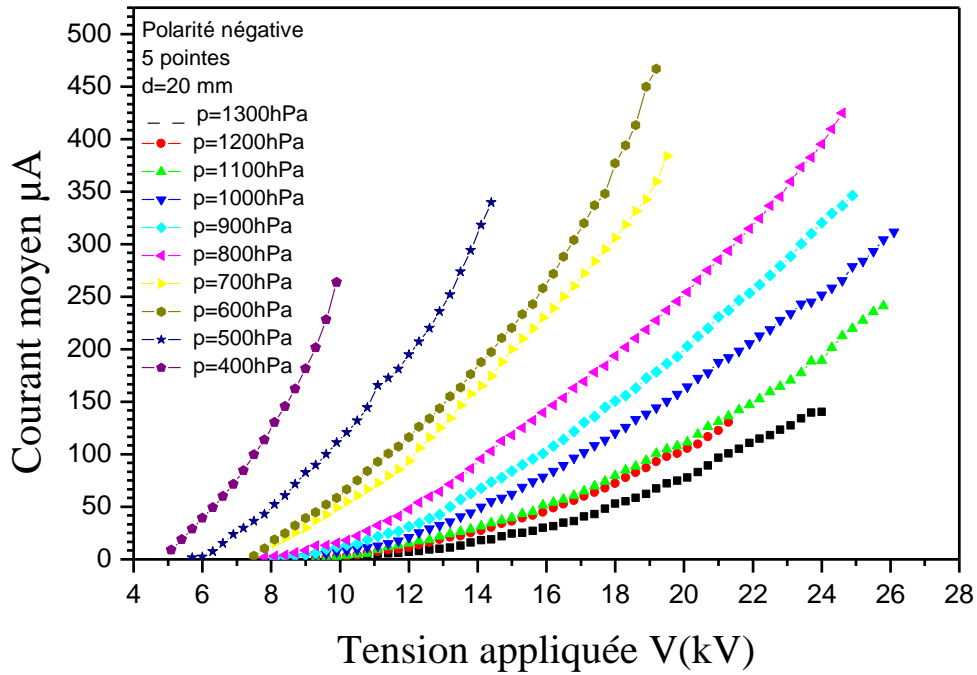


Figure III.15 Caractéristique de la décharge couronne négative 5 pointes-plan pour la distance ($d = 20 \text{ mm}$)

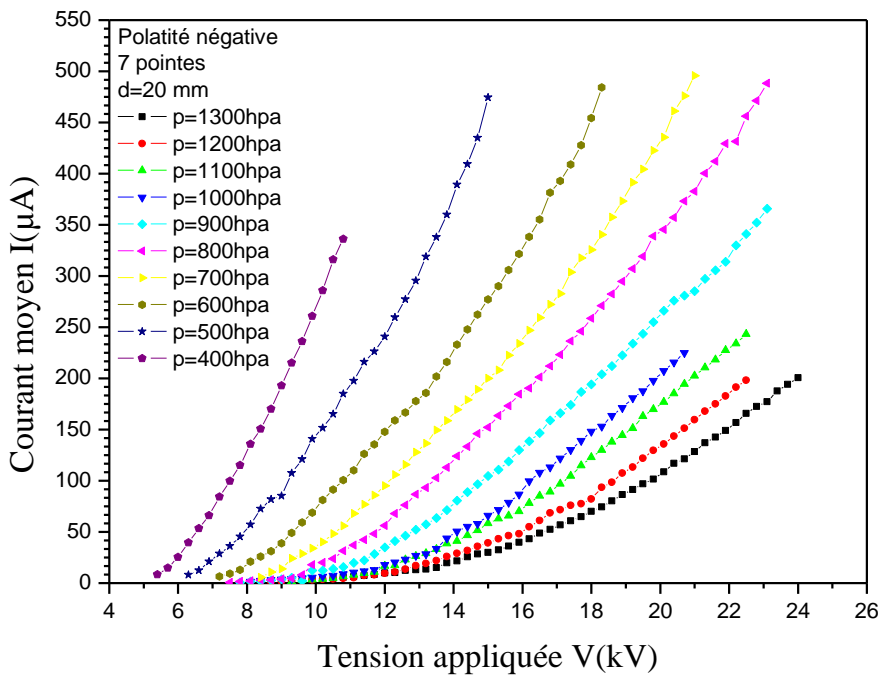


Figure III.16 Caractéristique de la décharge couronne négative 7 pointes-plan pour la distance ($d = 20 \text{ mm}$)

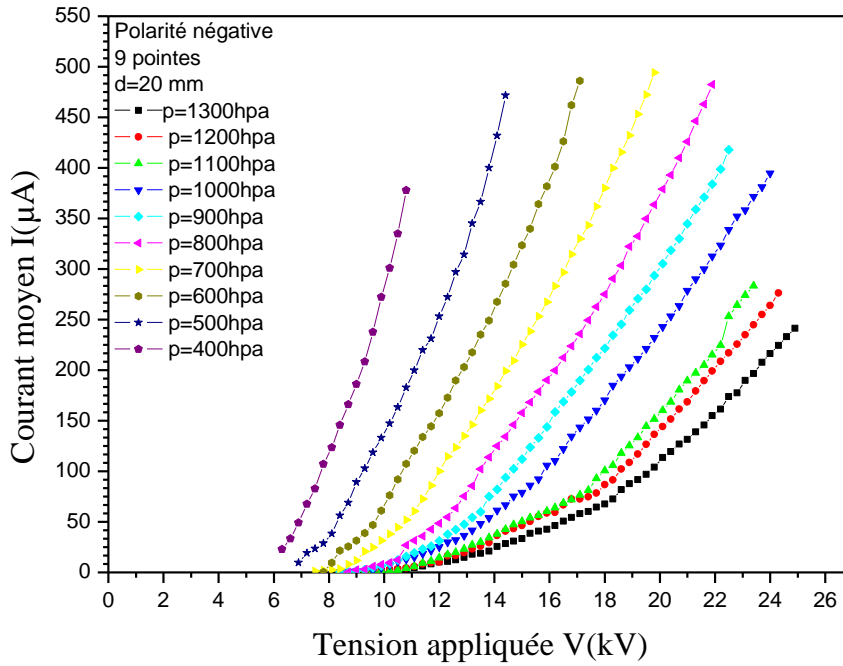


Figure III. 17 Caractéristique de la décharge couronne négative 9 pointes-plan pour la distance (d = 20 mm)

III.4.3.2- Influence du nombre de pointes pour une pression donnée sur la décharge couronne multi pointes-plan

Les figures III.18 à III.23 donnent la caractéristique courant- tension d’une décharge couronne négative pour 1, 3, 5, 7 et 9 pointes pour des pression allant de 400 à 1000 hPa. Comme pour la figure III.10, nous remarquons que pour une pression donnée, le courant augmente avec l’augmentation du nombre de pointes

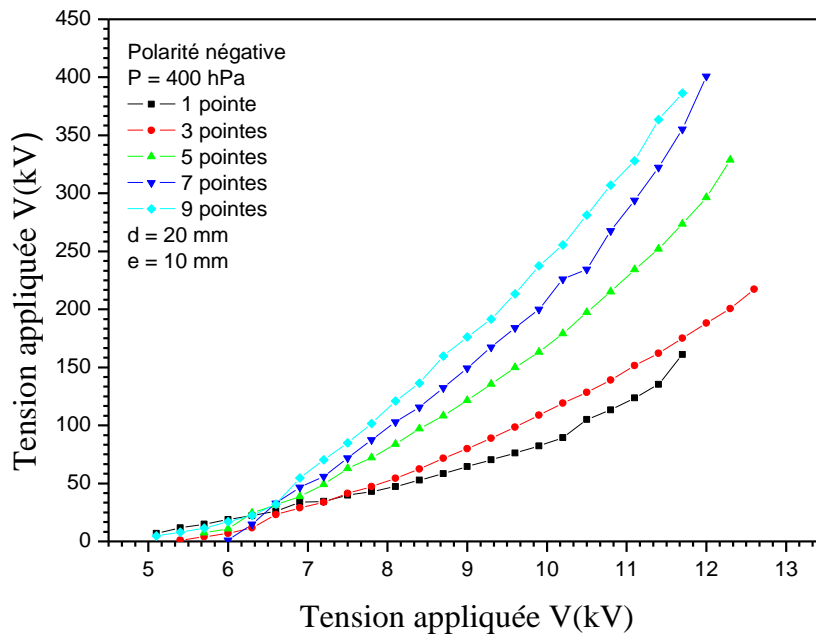


Figure III. 18 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative (P=400 hPa)

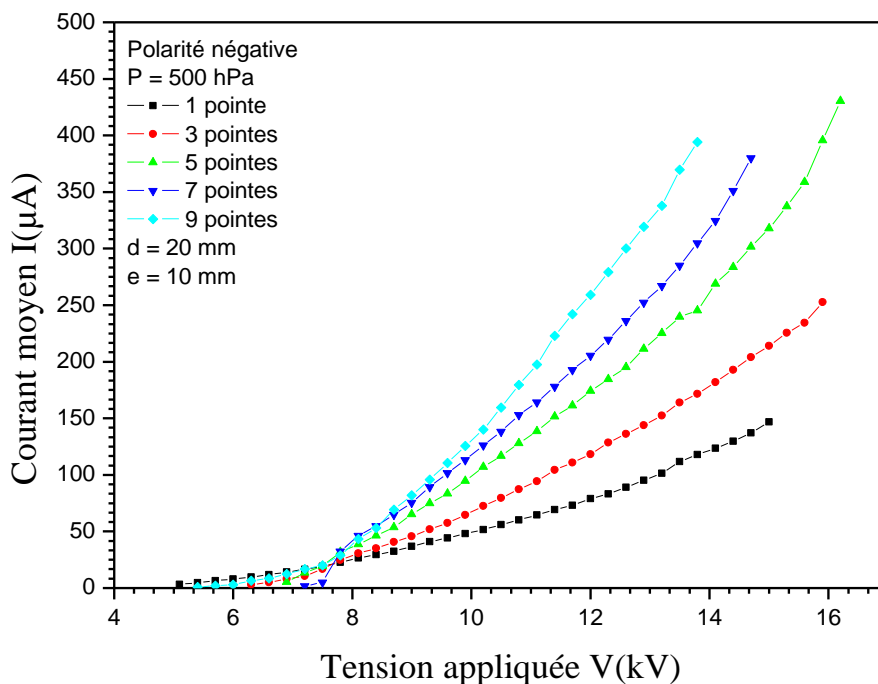


Figure III. 19 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative (P=500 hPa)

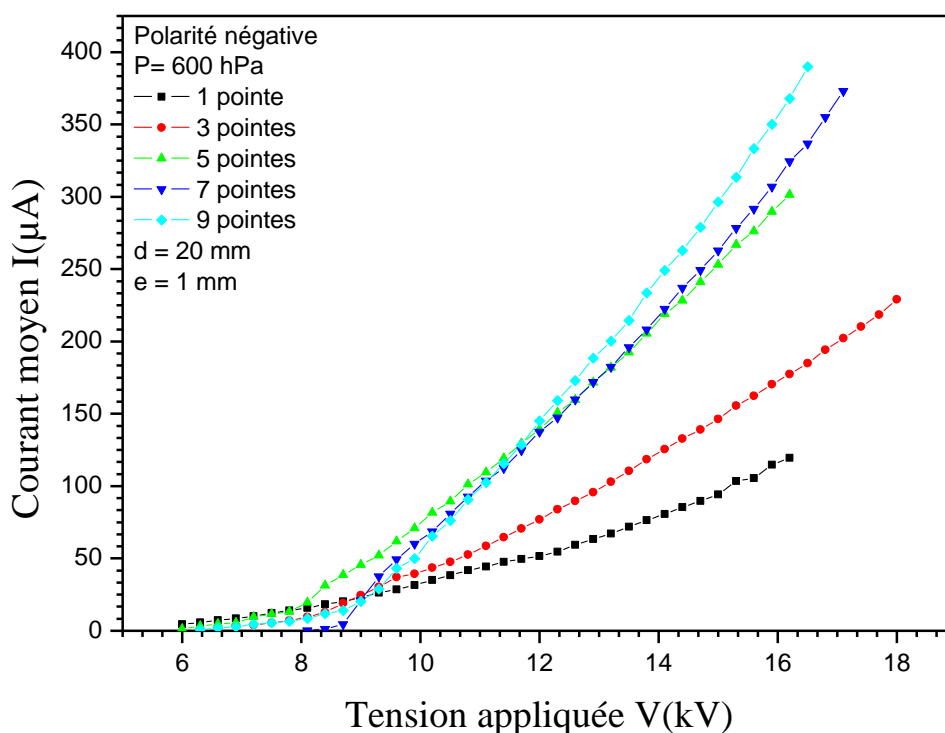


Figure III. 20 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative (P=600 hPa)

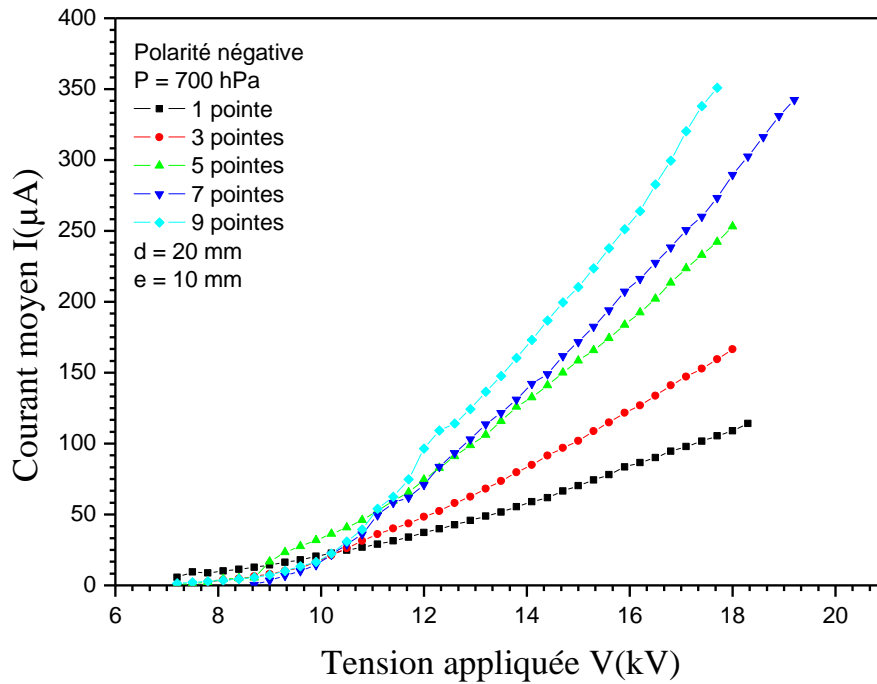


Figure III. 21 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative (P=700 hPa)

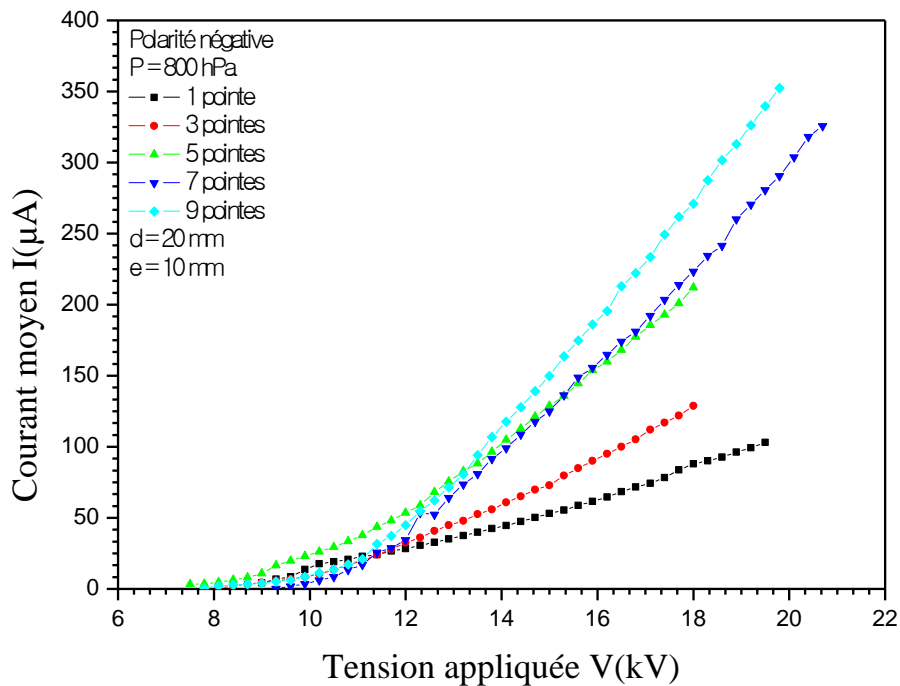


Figure III. 22 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative (P=800 hPa)

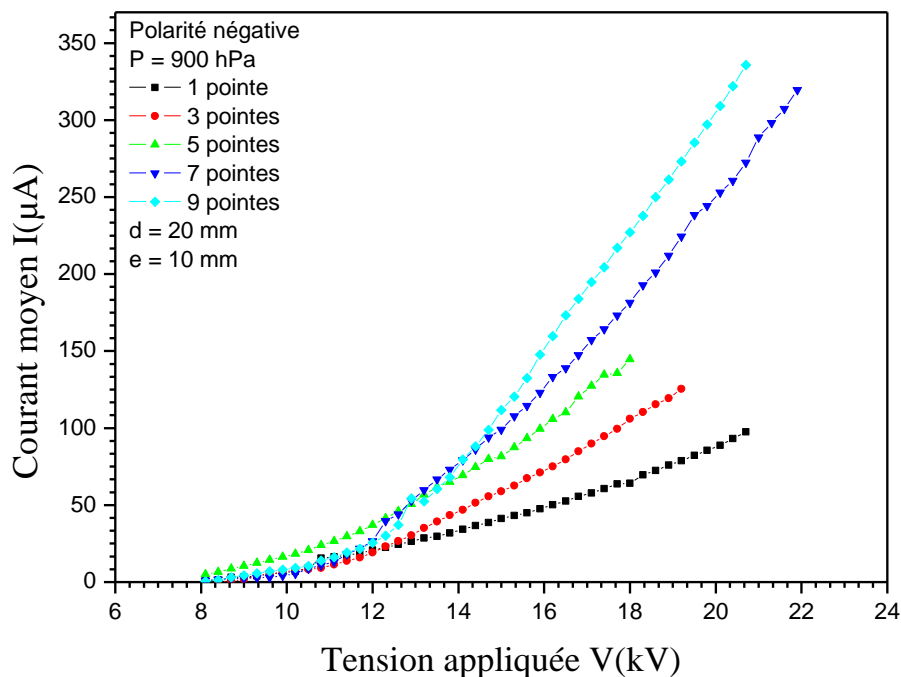


Figure III. 23 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative (P=900 hPa)

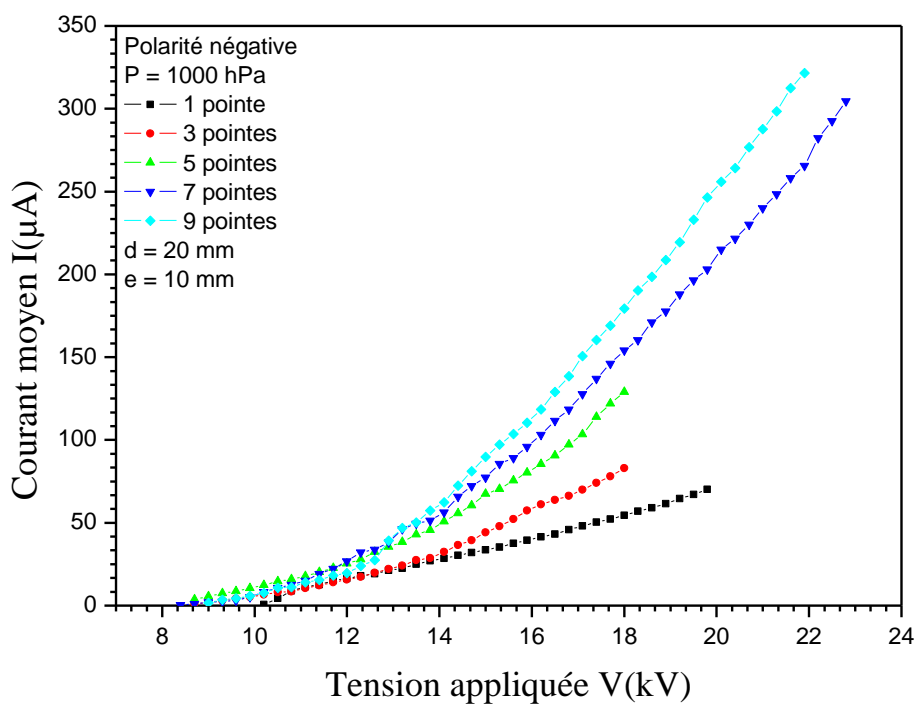


Figure III. 24 Influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne négative (P=1000 hPa)

III.5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé un dispositif multi pointes-plan pouvant accueillir 9 pointes au maximum en disposition linéaire . Nous avons d'abord mis en évidence l'effet du nombre de pointes sur les caractéristiques courant-tension associées à la décharge couronne négative. Plus le nombre de pointes est élevé, plus le courant engendré est important.

La variation de l'espacement e entre les pointes nous a permis de conclure que, plus e est grand, plus le courant de décharge augmente et ce pour toutes les pressions considérées. Il ressort de cette étude que la meilleure efficacité est pour des distances inter-électrodes inférieures à 20 mm.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'étude expérimentale de la décharge couronne principalement en géométrie multi pointes-plan. L'étude a porté sur l'influence des paramètres électro-géométriques et atmosphériques sur les caractéristiques des décharges couronne, sous tension continue.

Dans la géométrie pointe-plan, il a été établi que pour les deux polarités, négative et positive de la pointe, le courant augmente avec l'augmentation de la tension.

L'étude de la décharge couronne dans la géométrie d'électrodes multi pointes-plan a été menée avec un maximum de neuf pointes. L'étude a montré que :

- Le courant augmente avec l'augmentation de l'espacement entre les pointes .
- Quand la distance inter-électrodes dépasse une certaine valeur, l'efficacité diminue pour les grandes distances entre les pointes périphériques.
- La pression affecte sensiblement la décharge couronne multi pointes-plan. En effet, le courant de décharge diminue avec l'augmentation de la pression, ceci étant dû au fait que pour les fortes pressions, les molécules sont proches les unes des autres, ce qui limite le libre parcours moyen donc le phénomène d'ionisation. Par ailleurs, nous avons montré que pour obtenir un courant donné, il suffit de travailler avec de pressions basses si l'on veut travailler avec des tensions faibles.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **A.ABAHAEZM**, "*Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz*", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, 2009.
- [2] **S.ABDALI et C.AIANE**, "*L'effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne*", Mémoire de Master de l'Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2018.
- [3] **S. AHMERLAINE et H.BENDJAKHOUNE**, "*Etude de la décharge couronne en configuration Multi-Pointes et Fil-Cylindre*", Mémoire de Master de l'Université 8 Mai 1945, Guelma, 2021.
- [4] **Yu.S.AKISHEV, M.E.GRUSHIN, V.B.KARAL'NIK & N.I.TRUSHKIN**, "*Pulsed mode of a Negative corona in nitrogen : I. Experiment*", Plasma physics Reports, Vol.27, N° 6, pp. 550-562, 2001.
- [5] **Yu. S. AKISHEV, M. E. GRUSHIN, V. B. KARL'NIK, A. E. MONICH & N. I. TRUSHKIN**, "*Shape of the current tube of a negative point-to-plane corona in air*", Plasma. Phys.Report, Vol.29, N°8, pp.775-784, 2003.
- [6] **P.BALLEREAU**, "*Etude du vent électrique, contribution à l'étude et à la réalisation d'un détecteur de pollution*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris-sud (Orsay), 1980
- [7] **M.S.BENDILMI**, "*Etude expérimentale de la décharge couronne multi-pointe pour applications à la modification de surfaces de matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique*", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers et de l'Université des Frères Mentouri, Constantine 1, 2022
- [8] **A.BOUAROURI**, "*Développement d'un chargeur à décharge couronne pour la mesure à 10 Hz de la concentration d'aérosol atmosphérique*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris sud, 2014.
- [9] **K.CASTOR**, "*Caractérisation des sources acoustiques associées aux décharges couronnes négatives*", Thèse de Doctorat de l'Université du Maine, Le Mans, 2001.
- [10] **J.CHEN**, "*Direct current corona-enhanced chemical reactions*", PhD Thesis, University of Minnesota, 2002.
- [11] **L.CHEN**, "*Etude expérimentale de la décharge couronne pour le traitement de l'air intérieur de l'air: COV et Particules*", Thèse de Doctorat de la communauté Université Grenoble, Alpes, 2018.
- [12] **M.L.COULIBALY**, "*Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide-Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 2009.
- [13] **D.DUBOIS**, "*Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des*

études sur la dépollution des gaz d'échappement", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, 2006.

[14] **H.FEKIER** , " *Electrodes dissymétriques Décharges Électriques couronne et production d'Ozone* ", Mémoire de Master de l'Université Ibn khaldoun, Tiaret, 2022.

[15] **C.GARY**, " *Effet couronne sur les réseaux électriques aériens* », Techniques de L'ingénieur, D4440, 1998.

[16] **C.GARY**, " *Effet couronne en tension alternative* ", Edition Eyrolles, 1977.

[17] **A.GOLDMAN, M.MEGHERBI, G.BERGER & O.BELABED**, " *Influence of Humidity on Phenomena at The Low-Field Electrode in SF₆ Coronas* ", Sixth Interna. Sympo. on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, August 28-September 1, 1989.

[18] **F.P GROSU, A.M.BOLOGA, M.K.BOLOGA & O.V.MOTORIN**, " *Generalization of the Townsend current–voltage characteristics of a corona discharge* ", Surface Enginer.and Appl. Electrochemistry, Vol. 50, N°4, pp. 306–310, 2014.

[19] **M.HAMEL**, " *Influence de la variation de la Température Ambiante sur les vibrations induites par effet de Couronne* ", Mémoire de la Maitrise de l'Université du Quebec à Chicoutimi, 1991.

[20] **G.HARTMNN**, " *Spectroscopie de la décharge couronne : Etudes des mécanismes de collisions dans le dard* ", Thèse de Doctorat de l'Université Paris XI, 1977.

[21] **H.KADI**, " *Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension* ", Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.

[22] **A.LABERGUE**, " *Etude des décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneur plasmas-Application au contrôle de décollements d'écoulements* ", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2005.

[23] **W.L. LAMA & C.F. GALLO**, " *Systematic study of the electrical characteristics of the Trichel current pulses from negative needle to plane coronas* ", J. Appl. Phys.D, Vol.45, pp. 103-113, 1974.

[24] **J.M.MEEK**, " *Electrical breakdown of gases* ", The International Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, 1953.

[25] **A. MEGHAR et T.OUNNOUGHI**, " *Etude de la distribution du potentiel de surface de film en PVC chargé par décharge couronne négative* ", Mémoire de Master de l'Université abderrahmane Mira, Béjaia, 2014.

[26] **M.MEKIOUS**, " *Etude des paramètres influant sur les caractéristiques de la décharge couronne* ", Thèse de Doctorat de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi-ouzou, 2023.

- [27] **X.MENG, H.ZHANG, J.J.ZHU**, "A general empirical formula of current-voltage characteristics for point-to-plane geometry corona discharges", *Journal of Physics D : Applied Physics*, Vol.41, N° 6, pp. 1-10, 2008.
- [28] **S.MIHOUBI et H.KERDOUSSI**, "*Décharge couronne en configuration coaxiale: Application à la neutralisation des charges*", Mémoire de Master de l'Université 8 Mai 1945, Guelma, 2020.
- [29] **A. MOUSSAOUI**, "*Etude des phénomènes de charge et de neutralisation des milieux diélectrique granulaire en utilisant la décharge à barrière diélectrique*", Thèse de Doctorat de l'Université 8 Mai 1945, Guelma, 2019.
- [30] **A.MRAIHI**, "*Réalisation, caractérisation et bilan énergétique de réacteurs corona mono et multi-pointes dans l'air à la pression atmosphérique pour application à la décontamination*", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, 2012.
- [31] **J.H.RAKOTONANDRANSANA**, "*Modélisation de la décharge négative dans les grands intervalles d'air – Application à la foudre* ", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2013.
- [32] **D.TIFAOUI et A.LADJAL**, "*Etude de la décharge couronne en géométrie Pointe-Plan sous tension continue*", Mémoire de Master de l'Université Mouloud Mammeri, Tizi- ouzou, 2016.
- [33] **A.VINCENT**, "*Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans les effluents marqués par un isotope*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 2002.
- [34] **C.L.WADHWA**, "*High voltage engineering*", Second edition, New Age International Publishers, 2007.
- [35] **B.YAHIAOUI**, "*Dépôt et neutralisation des charges électriques par décharge couronne sur la surface d'un diélectrique fibreux*", Thèse de Doctorat de l'Université A.Mira de Bejaia, 2016.