



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES
en Electrotechnique

Présentée par

M'hand MEKIOUS

Thème

**Etude des paramètres influant sur les
caractéristiques de la décharge couronne**

Soutenue publiquement le 26/11/ 2023 devant le jury composé de :

Mr	RACHEK	M'hemed	Professeur	UMMTO	Président
Mme	BITAM-MEGHERBI	Ferroudja	Professeur	UMMTO	Rapporteur
Mr	MOULAI	Hocine	Professeur	USTHB	Examineur
Mr	BOUAZABIA	Slimane	Professeur	USTHB	Examineur
Mr	MOUDOUD	Mustapha	Professeur	UMMTO	Examineur
Mr	LEHOUIDJ	Bachir	M.C.A	USTHB	Examineur

Remerciements

L'écriture des remerciements est quelque chose de spécial. Paradoxalement, cette partie débute le manuscrit de thèse mais n'est rédigée qu'en dernier.

*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 Mme **Ferroudja BITAM-MEGHERBI**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou. Je lui exprime toute ma gratitude pour m'avoir fait confiance tout au long de ce travail et m'avoir fait partager son savoir. Sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et sa bonne humeur durant toutes ces années m'ont été d'une grande utilité.*

*Je tiens à remercier vivement Monsieur **M'hemed RACHEK**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi- ouzou, pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury.*

*J'adresse également mes remerciements à Monsieur **Hocine MOULAI**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène de Bab-Ezzouar pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en acceptant de participer à ce jury.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Slimane BOUAZABIA**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène de Bab-Ezzouar pour l'intérêt qu'il a porté à ce manuscrit et pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*Que Monsieur **Mustapha MOUDOUD**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, trouve ici le témoignage de mes sincères remerciements pour avoir bien voulu examiner ce travail en prenant part au jury.*

*Mes plus sincères remerciements vont à l'endroit de Monsieur **Bachir LEHOUIDJ**, Maître de Conférences Classe A à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène de Bab-Ezzouar pour son intérêt à ce travail et pour sa participation au jury.*

*Je ne peux oublier Monsieur **Mohammed MEGHERBI**, Professeur à la retraite de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou et membre du LATAGE avec qui j'ai fait l'essentiel du travail. Sur le plan humain aussi bien que scientifique, il a su répondre à mes nombreuses sollicitations avec efficacité. Qu'il trouve ici le témoignage de toute ma gratitude et lui souhaite une retraite heureuse car elle est bien méritée.*

*Je ne saurais terminer sans adresser mes plus vifs remerciements à mes chers collègues, vous vous reconnaitrez. Je vous dis "**Merci**" de m'avoir soutenu et surtout que ne pas cessé de m'encourager pour aller jusqu'au bout.*

Enfin, je ne remercierai jamais assez ma mère qui a tout donné pour voir son enfant épanoui. Je dédie cette thèse à mon épouse Michelle.

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I Notions de base sur les décharges électriques dans les gaz</i>	4
I.1 Introduction.....	4
I.2 Les décharges électriques dans les gaz.....	4
I.2.1 Description macroscopique d'une décharge continue : mécanisme d'avalanche électronique.....	5
I.2.2 Régimes de décharges et critère d'auto-entretien.....	5
I.2.3 Premier coefficient de Townsend α	6
I.2.4 Deuxième coefficient de Townsend γ	8
I.2.5 Critère de claquage de type Townsend.....	9
I.2.6 Critère de claquage de type Townsend pour un gaz électronégatif.....	10
I.2.7 Limites de la théorie de Townsend.....	11
I.3 Loi de Paschen.....	11
I.4 Théorie des streamers.....	13
I.4.1 Mécanisme de claquage.....	14
I.4.2 Critère de claquage.....	16
I.5 Conclusion.....	18
<i>Chapitre II Revue bibliographique sur les décharges couronne</i>	19
II.1 Introduction.....	19
II.2 Définition.....	19
II.3 Caractéristiques des décharges couronne.....	20
II.3.1 Caractéristique courant-tension et régimes de décharge couronne.....	20
II.3.2 Relations théoriques pour le courant de décharge couronne.....	21
II.4 Champ électrique et topographie de la décharge couronne en géométrie pointe- plan.....	22
II.5 Décharges couronne.....	24
II.5.1 Décharge couronne positive.....	25
II.5.2 Décharge couronne négative.....	27
II.5.3 Décharge couronne sous tension alternative.....	29
II.6 Vent électrique.....	30
II.7 Facteurs influençant la décharge couronne.....	32
II.7.1 Influence de la distance inter-électrodes.....	32
II.7.2 Influence des paramètres électriques.....	32
II.7.3 Influence des paramètres physico-chimiques.....	33
II.8 Applications industrielles des décharges couronne.....	34
II.8.1 Traitement des effluents gazeux.....	34
II.8.2 Générateurs d'ozone.....	35
II.8.3 Traitement des surfaces.....	35
II.9 Conclusion.....	35
<i>Chapitre III Etude de la décharge couronne dans l'air sous tension continue</i>	36
III.1 Introduction.....	36
III.2 Dispositif expérimental.....	36

III.2.1 Les électrodes.....	37
III.2.2 La source de tension.....	38
III.2.3 Les moyens de mesure.....	38
III.2.4 Mode opératoire.....	38
III.3 Caractéristique courant-tension en configuration pointe-plan.....	38
III.3.1 Influence de la distance inter-électrodes sur la caractéristique courant-tension.....	38
III.3.2 Influence de la polarité de la tension appliquée.....	40
III.3.3 Influence de la distance inter-électrodes sur la tension seuil.....	40
III.3.4 Influence de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée.....	42
III.3.5 Influence du rayon de courbure de la pointe.....	43
III.3.6 Influence de la pression.....	44
III.3.6.1 En polarité négative de la pointe.....	45
III.3.6.2 En polarité positive de la pointe.....	47
III.3.7 Influence du matériau d'électrode.....	50
III.3.7.1 En polarité négative de la pointe.....	50
III.3.7.2 En polarité positive de la pointe.....	52
III.4 Conclusion.....	53
Chapitre IV Etude électrique d'un réacteur à décharge couronne pointe-plan à la pression atmosphérique.....	54
IV.1 Introduction.....	54
IV.2 Dispositif expérimental et protocole d'essais.....	54
IV.3 Effet du matériau de l'électrode active.....	56
IV.4 Formes d'onde du courant.....	58
IV.4.1 Caractéristique courant-tension.....	58
IV.4.2 Forme du courant.....	59
IV.5 Conclusion.....	60
Chapitre IV Etude de la décharge couronne en géométrie multi pointes-plan dans l'air sous tension continue.....	62
V.1 Introduction.....	62
V.2 Dispositif expérimental et déroulement des essais.....	62
V.3 Décharge couronne positive multi pointes-plan.....	64
V.4 Décharge couronne négative multi pointes-plan.....	65
V.4.1 Effet du nombre de pointes sur la décharge couronne négative.....	65
V.4.2 Effet de l'espacement des pointes sur la décharge couronne négative.....	67
V.5 Effet de la pression sur décharge couronne multi pointes-plan.....	69
V.5.1 Effet de la pression sur la disposition des pointes.....	69
V.5.2 Effet de la pression et de la distance R entre la pointe centrale et les pointes périphériques.....	71
V.5.3 Effet de la distance d'écartement pour une pression fixée.....	72
V.5.4 Influence de la pression et de la distance d'écartement.....	74
V.5.5 Discussion des résultats.....	76
V.6 Conclusion.....	78
Conclusion générale	79
Références bibliographiques	81
Annexes	91

Principales notations utilisées

Lettres grecques

α_i	Degré d'ionisation
α	Premier coefficient de Townsend
γ	Second coefficient de Townsend
η	Coefficient d'attachement électronique
$\bar{\alpha}$	Coefficient net d'ionisation
λ	Libre parcours moyen
λ_e	Libre parcours moyen de l'électron
λ_i	Libre parcours moyen de l'ion
ϑ_i	Fréquence de collision ionisante
μ_e	Mobilité électronique
μ	Mobilité ionique
ϕ	Travail de sortie d'un métal
ϵ_0	Permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	Permittivité relative

Lettres latines

d	Distance inter-électrodes
x_c	Distance critique
E	Champ électrique
E_r	Champ électrique radial
E/N	Champ électrique réduit
E/p	Rapport du champ électrique sur la pression
h	Constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s
K	Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-24}$ J/K
k	Constante dépendant de la géométrie de la décharge et de la nature du gaz environnant
I	Courant moyen
J	Densité de courant
M	Facteur de multiplication
N	Densité du gaz
n_e	Densité électronique
n_0	Nombre d'électrons initiaux
R_p	Rayon de courbure de la pointe
V	Tension appliquée

V_0	Tension Seuil d'apparition de l'effet couronne
v_d	Vitesse de dérive des électrons

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	12
Figure I.7	Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes.....	14
Figure I.8	Etapas successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration pointe-plan	15
Figure I.9	Développement d'un streamer positif tel q'envisagé par Meek et Loeb	16
Figure I.10	Développement d'un streamer négatif comme il a été envisagé par Raether.....	17
Figure II.1	Principaux systèmes d'électrodes utilisés pour la production des décharges couronne	19
Figure II.2	Caractéristique courant- tension d'une décharge couronne pointe-plan positive dans l'air à la pression atmosphérique (d=13 mm).....	21
Figure II.3	Variation du champ électrique réduit en configuration pointe-plan (d=2,5 mm, $R_p = 10\mu\text{m}$).....	23
Figure II.4	Topographie de la décharge couronne en géométrie pointe-plan.....	23
Figure II.5	Représentation schématique d'une décharge couronne positive	23
Figure II.6	Caractéristique courant- tension d'une décharge couronne pointe-plan dans l'air à la pression atmosphérique	25
Figure II.7	Photographie des impulsions d'auto-stabilisation de la décharge Couronne positive ($R_p = 1\text{ cm}$, $V = 48\text{ kV}$).....	26
Figure II.8	Photographie de la décharge couronne positive en régime glow ($R_p = 1\text{ cm}$, $V = 76\text{ kV}$).....	26
Figure II.9	Photographie de la décharge couronne positive à courant impulsionnel ($R_p = 1\text{ cm}$, $V = 126\text{ kV}$).....	27
Figure II.10	Représentation schématique d'une décharge couronne négative	28
Figure II.11	Courant de décharge couronne en géométrie pointe-plan, alternance positive à gauche et alternance négative à droite (d = 15,5 cm).....	30
Figure II.12	Représentation des différentes composantes du courant de décharge couronne sous tension alternative à la pression atmosphérique en configuration pointe-plan.....	30
Figure II.13	Variation de la vitesse du vent électrique en fonction du courant de décharge (U = 3,8 kV, d = 4 mm, rayon de courbure $R_p = 50\ \mu\text{m}$).....	31
Figure II.14	Courbes courant-tension pointe-plan.....	32
Figure II.15	Caractéristique V-I pour une décharge couronne positive et négative dans l'air (d= 5 mm)	32
Figure II.16	Caractéristique I-V en fonction de la température	33
Figure II.17	Variation du courant de décharge en fonction de l'humidité relative pour des décharges couronne positive et négative.....	34
Figure III.2	Dispositif expérimental	37
Figure III.3	Electrodes utilisées.....	37
Figure III.4	Caractéristique courant-tension en fonction de la distance inter-électrodes en polarité positive de la pointe.....	39

Figure III.5	Caractéristique courant-tension en fonction de la distance inter-électrodes en polarité négative de la pointe	37
Figure III.6	Influence de la polarité de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne	38
Figure III.7	Tension seuil en fonction de la distance inter-électrodes dans les deux polarités de la pointe.....	39
Figure III.8	Evolution du courant moyen en fonction de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée.....	40
Figure III.9	Caractéristique I-V d'une décharge positive: Pointe en cuivre et plan en acier.....	41
Figure III.10	Caractéristique I-V d'une décharge négative: Pointe en cuivre et plan en acier.....	42
Figure III.11	Tube à décharge	42
Figure III.12	Baromètre et capteur de pression utilisés.....	42
Figure III.13	Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions de l'air (d = 10 mm).....	44
Figure III.14	Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions de l'air (d = 20 mm).....	44
Figure III.15	Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions de l'air (d = 25 mm).....	45
Figure III.16	Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions de l'air (d = 10 mm).....	46
Figure III.17	Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions de l'air (d = 15 mm).....	46
Figure III.18	Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions de l'air (d = 20 mm).....	47
Figure III.19	Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions de l'air (d = 25 mm).....	47
Figure III.20	Caractéristique I-V d'une décharge couronne négative (Plan en acier).....	49
Figure III.21	Caractéristique I-V d'une décharge couronne négative (pointe en acier).....	49
Figure III.22	Caractéristique I-V d'une décharge couronne positive (plan en acier).....	50
Figure III.23	Caractéristique I-V d'une décharge couronne positive (pointe en acier).....	50
Figure IV.2	Pointes utilisées	53
Figure IV.3	Caractéristique courant-tension : pointe (aluminium et cuivre) avec les 2 angles d'ouverture de 15 et 30° et plan en acier (d = 10 mm).....	54
Figure IV.4	Forme d'onde du courant pour le cuivre ($\alpha = 30^\circ$, $R_p=200 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).....	55
Figure IV.5	Forme d'onde du courant pour l'aluminium ($\alpha = 30^\circ$, $R_p=200 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).....	55
Figure IV.6	Forme d'onde du courant pour le cuivre ($\alpha = 15^\circ$, $R_p=100 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).....	55
Figure IV.7	Forme d'onde du courant pour l'aluminium ($\alpha = 15^\circ$, $R_p=200 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).....	55
Figure IV.7	Caractéristique courant-tension correspondant aux figures IV.4 à IV.7.....	58
Figure V.1	Dispositif expérimental utilisé pour caractériser la décharge couronne multi pointes-plan.....	63
Figure V.2	Système multi-pointes utilisé.....	63
Figure V.3	Caractéristique I-V de la décharge couronne positive multi pointes-plan (R = 3cm)..	64
Figure V.4	Caractéristique I-V de la décharge couronne positive multi pointes-plan (R = 4cm)..	65
Figure V.5	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (R = 2cm)..	66
Figure V.6	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (R = 3cm)..	66
Figure V.7	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (R = 4cm)..	67
Figure V.8	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (5 pointes)..	68
Figure V.9	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (9 pointes)..	68
Figure V.10	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition en peigne.....	69
Figure V.11	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition circulaire (R = 1 cm).....	70
Figure V.12	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour les dispositions en peigne circulaire.....	70
Figure V.13	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la	

	disposition circulaire ($R = 2\text{cm}$).....	71
Figure V.14	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition circulaire ($R = 3\text{cm}$).....	71
Figure V.15	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition circulaire ($R = 4\text{cm}$).....	72
Figure V.16	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P=1200$ hPa).....	73
Figure V.17	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P=1013$ hPa).....	73
Figure V.18	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P=800$ hPa).....	74
Figure V.19	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P=600$ hPa).....	74
Figure V.20	Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P=400$ hPa).....	75
Figure V.21	Evolution du courant moyen en fonction de la pression et de la distance d'écartement des pointes.....	75
Figure V.22	Tension appliquée en fonction de la pression nécessaire à la génération d'un courant de $100 \mu\text{A}$	77
Figure V.23	Humidité relative en fonction de la pression.....	78
Figure V.24	Tension en fonction de l'humidité.....	78

Liste des tableaux

Tableau III.1	Travail de sortie du cuivre et de l'aluminium.....	50
Tableau IV.1	Paramètres de la décharge couronne de l'équation IV.3 pour les électrodes en cuivre et en aluminium.....	57
Tableau IV.2	Paramètres du courant de l'équation IV.4 pour les électrodes en cuivre et en aluminium.....	58
Tableau V.1	Courant mesuré en fonction du nombre de pointes.....	64
Tableau V.2	Effet de l'espacement des pointes pour $V = 12 \text{ kV}$	67
Tableau V.3	Humidité relative pour différentes pressions.....	77

Introduction générale

"La seule vraie science est la connaissance des faits"
Georges-Louis Leclerc de Buffon

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 [Me-8, Mr-2]. 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 électriques à la pression atmosphérique, qui font l'objet d'une partie de ce travail, peuvent générer des plasmas non thermiques, chimiquement très actifs. Ce type de milieu ionisé est intéressant par son caractère hors-équilibre thermodynamique [Ab-1, Be-5]. En effet, l'énergie électrique est préférentiellement transférée aux électrons, ce qui permet de créer des espèces actives (radicaux, ions, espèces excitées et photons) avec un bon rendement sans chauffer le gaz qui reste à une température proche de la température ambiante. On a donc une bonne production d'espèces réactives avec un faible coût énergétique.

Les décharges couronne font partie de la famille des plasmas froids non thermiques. Ce 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 [Ab-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 [Vi-1]: les ozoneurs pour le traitement de l'air, les procédés de traitement des surfaces, le dépôt des couches minces et gravure en micro-électronique.

Ces dernières années, énormément de travaux sur les décharges couronne ont été consacrés, pour la plupart, à des fins environnementales, à savoir le développement de réacteurs à décharge couronne pour le traitement des polluants engendrés par les gaz dégagés par l'industrie. On trouve également les précipitateurs électrostatiques, appelés également dépoussiéreurs électrostatiques ou électro-filtres, qui sont actuellement les plus utilisés par l'industrie, en particulier pour les grands débits gazeux. On les trouve, par exemple, dans les industries métallurgiques et chimiques ou les cimenteries ainsi que pour traiter les fumées produites par les centrales électriques brûlant du charbon pulvérisé [Ac-1]. On trouve également les décharges couronne dans la séparation électrostatique qui est une nouvelle technologie économiquement viable pour le recyclage des déchets des équipements électriques et électroniques. La séparation électrostatique est également utilisée pour la purification des minerais et des produits agro-alimentaires. Elle est en effet utilisée pour sa faible consommation d'énergie ses coûts réduits d'exploitation et d'entretien [Ac-1, Be-2, Ti-1].

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 [Be-2, Zi-1].

Les décharges couronne trouvent également leur place dans le domaine du biomédical. Ainsi, la recherche et l’évolution de la technologie des matériaux destinés au biomédical ne cessent de s’intensifier de plus en plus où, chaque année, plus de 30 millions d’implants et divers dispositifs médicaux sont implantés dans le corps humain afin de prolonger et d’améliorer l’intégrité et le confort de vie de personnes souffrant de problèmes fonctionnels [Am-1]. Cela est possible grâce à l’utilisation de la décharge couronne qui a un effet, principalement sur les propriétés électriques de films minces qui sont utilisés dans le domaine du biomédical.

Les décharges couronne ont trouvé leur place dans le traitement des polluants gazeux dans l’atmosphère comme les composés organiques volatils (COV) et les divers oxydes (NO_x , SO_x , ozone, ...). Ces polluants gazeux ont particulièrement un impact écologique (pluies acides, réchauffement climatique) et sont toxiques pour la plupart [Ab-1, Ja-1, Mr-2, Vi-1].

Cette thèse s’inscrit dans le domaine de l’étude et l’optimisation des réacteurs à décharge. Ces derniers sont l’objet de notre étude dans leur version pointe-plan et multi pointes-plan. Nous considérerons, principalement, les différents paramètres qui peuvent influencer sur la décharge couronne de ces réacteurs afin de dégager une configuration optimale.

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.

Au troisième chapitre, après avoir décrit le dispositif expérimental, les moyens de mesures et le mode opératoire, nous présentons dans une première partie les résultats expérimentaux concernant la caractérisation électrique de la décharge couronne produite en géométrie pointe-plan sous tension continue. Dans la seconde partie nous donnons les résultats expérimentaux mettant en évidence l’influence de la pression et du matériau des électrodes.

Le quatrième chapitre, quant à lui, consiste en l’étude électrique de la décharge couronne pointe-plan négative, mettant ainsi en évidence l’effet du matériau de l’électrode active pour deux rayons de courbure de la pointe.

Le cinquième chapitre est dédié à une étude électrique paramétrique d'un réacteur à décharge couronne multi pointes-plan en fonction de la pression.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale dans laquelle nous donnons les principaux résultats de notre étude. Nous y donnons également quelques perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre I

Notions de base sur les décharges électriques dans les gaz

"C'est une erreur capitale que de bâtir des théories tant qu'on n'a pas de données. Insensiblement, on se met à torturer les faits pour les faire cadrer avec les théories, au lieu d'adapter les théories aux faits".

Sir Arthur Conan Doyle

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 $p.d$, 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) [Me-1].

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. Les décharges électriques dans les gaz

Les premières études sur les mécanismes d'initiation de décharges ont été menées par Townsend [Ma-3]. 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 ($1 \text{ Torr} = 133 \text{ Pa} = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$). Ces deux électrodes sont reliées à un circuit composé d'un générateur de tension continue et d'une résistance variable (figure I.1).

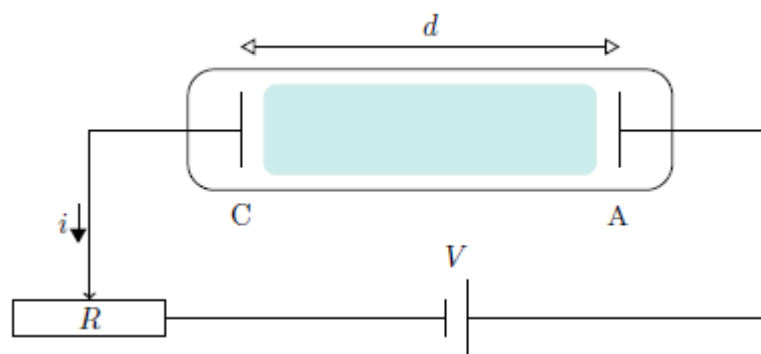


Figure I.1 Dispositif de référence étudié par Townsend [Se-1, Ma-3].

I.2.1 Description macroscopique d'une décharge continue: 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 collision 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) noté λ 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 [Se-1].

I.2.2 Régimes de décharges et critère d'auto-entretien

Pour un gaz donné dans le dispositif de la figure I.1, nous pouvons observer quatre régimes de fonctionnement, classés par ordre croissant de densité de courant [Ag-1, Ki-1, Se-1]:

- **Le premier régime (Décharge non autonome A-B) :** caractérisée par de faibles densités de courant ($\leq 10^{-12}$ A/cm²), dues à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou du rayonnement cosmique. Ce type de décharge n'est pas capable de s'auto-entretenir. Le phénomène d'avalanche électronique n'est pas suffisamment efficace et un apport externe d'électrons, le plus souvent par photo ionisation, est nécessaire.

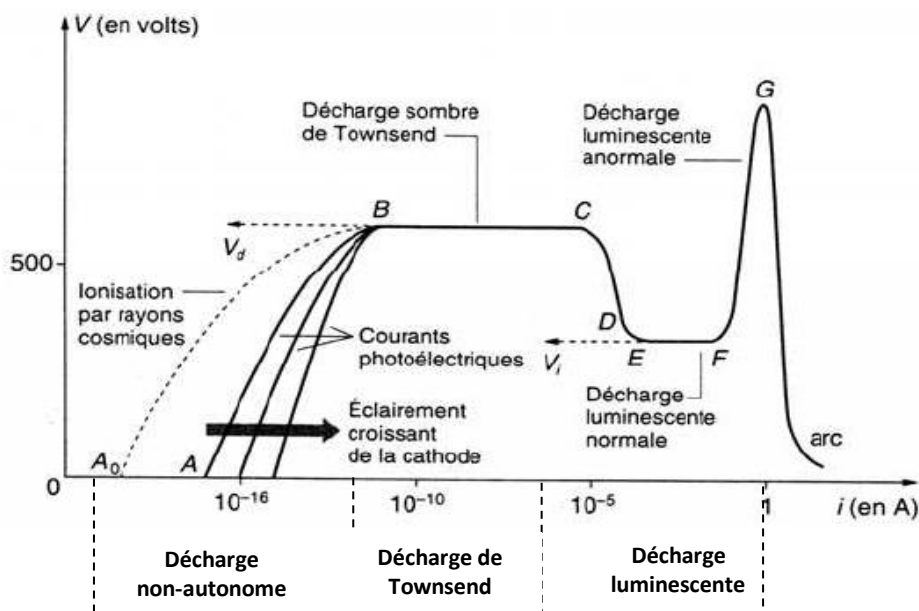


Figure I.2 Courbe caractéristique de la décharge de Townsend [Jo-1, Se-1].

- **Le second régime (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 de courant sont faibles ($\leq 10^{-9}$ A/cm²) et les effets résultant de la charge d'espace sont négligeables dit ILC (Courant limité par la charge d'espace).

- **Le troisième régime (Décharge luminescente)** : 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. C'est pourquoi on peut observer une chute du potentiel entre **C** et **D** sur la figure I.2.

- **Le quatrième régime (Régime d'arc)** : ce régime présente une très faible tension de maintien et de grandes intensités de courant. L'arc se présente alors sous la forme d'un filament incandescent dégageant une forte puissance thermique. Le régime d'arc est donc aussi caractérisé par d'importants effets thermiques qui se produisent à la cathode et dans le gaz [Ki-1, Mr-2].

I.2.3 Premier coefficient de Townsend α

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.

$$1 \text{ électron} \rightarrow 2 \text{ électrons} \rightarrow 4 \text{ électrons} \rightarrow 8 \text{ électrons} \rightarrow \dots$$

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 [Ja-1].

$$\alpha = \frac{\vartheta_i}{v_d} \quad (\text{I.1})$$

$$\frac{dn_e}{dx} = \alpha n_e \quad (\text{I.2})$$

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) [Bo-1].

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 ILC. Pour de grandes valeurs de la tension appliquée, la variation suit une *loi exponentielle*. La variation du courant est représentée dans la figure I.4.

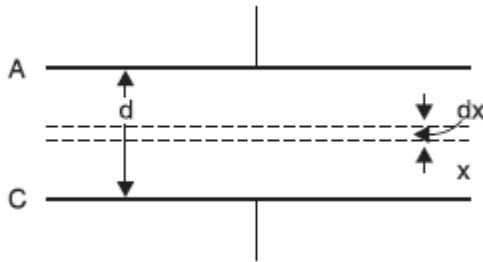


Figure I.3 Schéma représentatif de l'intervalle inter-électrodes [Ku-2, Wa-1].

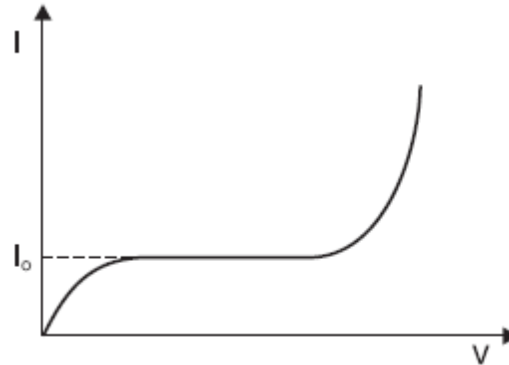


Figure I.4 Variation du courant en fonction de la tension appliquée [Co-1, Ku-2].

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.3), va s'écrire [Ab-3, Ku-2, Wa-1]:

$$\begin{aligned} dn_x &= \alpha n_x dx & (I.3) \\ \frac{dn_x}{n_x} &= \alpha dx \end{aligned}$$

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 :

$$n = n_0 e^{\alpha d} \tag{I.4}$$

et le courant par unité de temps :

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

ou encore :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \tag{I.5}$$

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.2.4 Deuxième coefficient de Townsend γ

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* γ . 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 [Bo-1].

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 γ (Figure I.5).

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

Le second coefficient de Townsend γ doit couvrir un certain nombre de processus différents [Ku-1, Me-2, Na-1] 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).

$$\gamma = \gamma_I + \gamma_P + \gamma_N + \gamma_A + \gamma_F + \gamma_V \quad (\text{I.6})$$

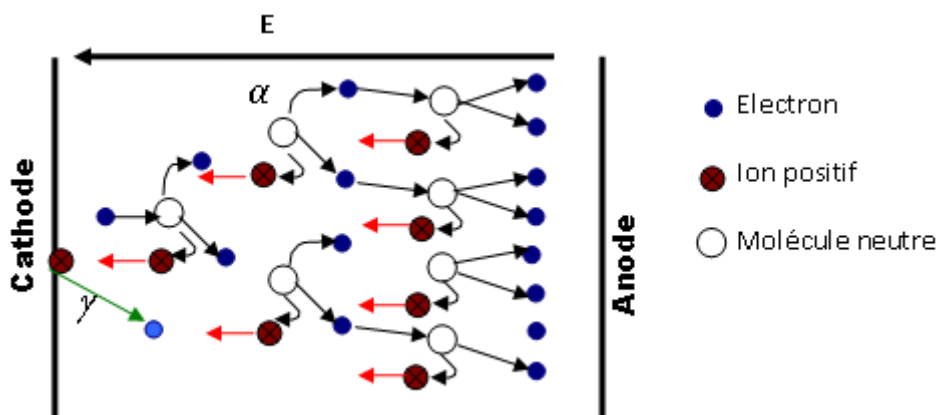


Figure I.5 Processus d'émission et d'ionisation dans une décharge électrique [Ya-1].

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 :

$$n''_0 = n_0 + n'_0 \quad (\text{I.7})$$

Chaque électron quittant la cathode fait en moyenne $(e^{\alpha d} - 1)$ collisions dans l'espace inter-électrodes [Ab-3, Na-1]. 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,

$$n'_0 = n''_0 \gamma (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{I.8})$$

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

$$n''_0 = n_0 + n''_0 \gamma (e^{\alpha d} - 1) \quad (\text{I.9})$$

Ou :

$$n''_0 = \frac{n_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.10})$$

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

$$n = n''_0 e^{\alpha d} \quad (\text{I.11})$$

$$n = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.12})$$

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

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.13})$$

I.2.5 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.13), soit :

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0 \Rightarrow \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (\text{I.14})$$

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.

En prenant le logarithme népérien de la relation (I.14), nous aurons:

$$\alpha d = \text{Ln} \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right) \quad (\text{I.15})$$

Le nombre de paires électron-ion produites dans l'espace inter-électrodes par l'avalanche électronique est suffisamment grand [Ab-3, Bh-1, Wa-1]. En bombardant la cathode, les ions positifs produisent des électrons secondaires, il s'ensuit le processus d'avalanche. La décharge est dite *autonome* [Na-1].

- $\gamma e^{\alpha d} > 1$: 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.2.6 Critère de claquage de type Townsend pour un gaz électronégatif

Le coefficient d'attachement η caractérise la propriété qu'ont certains gaz dits *électronégatifs* à capturer des électrons [Bh-1, Na-1]. Le courant I donné par la formule (I.13) devient:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{(\alpha - \eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta}}{1 - \frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} [e^{(\alpha - \eta)d} - 1]} \quad (\text{I.16})$$

Le critère de claquage est donné par :

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

Comme

$e^{\bar{\alpha}d} \gg 1$; $\alpha \gg \eta$ et $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ qui représente le coefficient d'ionisation efficace, on peut écrire alors :

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

Nous pouvons réécrire le critère de claquage de Townsend sous la forme :

$$\bar{\alpha}d = \text{Ln} \left(\frac{1}{\gamma} + 1 \right) = k \quad (\text{I.19})$$

k est une constante d'importance mineure dépendant de p et E [Ab-3].

Pour un champ uniforme et un gaz non électronégatif ($\eta = 0$), le critère de claquage de Townsend se réduit à la formule (I.14).

En champ non uniforme la relation (I.13) doit être modifiée pour tenir compte du coefficient d'ionisation qui dépend de la position pour devenir [Ab-3]:

$$\gamma \int_0^d \exp \left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] \alpha dx = 1 \quad (\text{I.20})$$

I.2.7 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 $p \cdot d$ (pression de gaz x distance inter-électrodes) inférieures à **200 torr.cm** [Ab-3, Me-2, Na-1]. 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 [Ha-2]. Au-delà de cette limite, les décharges sont décrites par le modèle de la décharge par streamer [Ku-1].

I.3 Loi de Paschen

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 [Ku-2, Wa-1]:

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (\text{I.21})$$

$$e^{f\left(\frac{E}{p}\right) \cdot p \cdot d} = \frac{1}{\gamma} + 1 \quad (\text{I.23})$$

$$f\left(\frac{E}{p}\right) \cdot p \cdot d = \text{Ln}\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = K \quad (\text{I.24})$$

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

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

$$V_c = F(p \cdot d) \quad (\text{I.25})$$

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 $p \cdot d$, même si l'on constate qu'elle est linéaire pour une région du produit $p \cdot d$ (Figure I.6).

Une expression analytique donnant le potentiel de claquage peut être obtenue en utilisant l'expression générale de α / p .

$$\frac{\alpha}{p} = Ae^{-Bp/E} \tag{I.26}$$

Les constantes A et B constituent les données de base pour étudier les processus d'ionisation dans les décharges électriques.

$$\alpha = p.Ae^{-Bp/E} = pAe^{-Bp.d/V_c} \tag{I.27}$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{e^{Bp.d/V_c}}{pA} \Rightarrow d.\frac{1}{\alpha d} = \frac{e^{Bp.d/V_c}}{pA}$$

Comme : $\alpha d = \text{Ln}\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)$

$$d = \text{Ln}\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \cdot \frac{e^{Bp.d/V_c}}{pA} \tag{I.28}$$

$$\text{Ln}\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = K$$

$$d = K \cdot \frac{e^{Bp.d/V_c}}{pA} \tag{I.29}$$

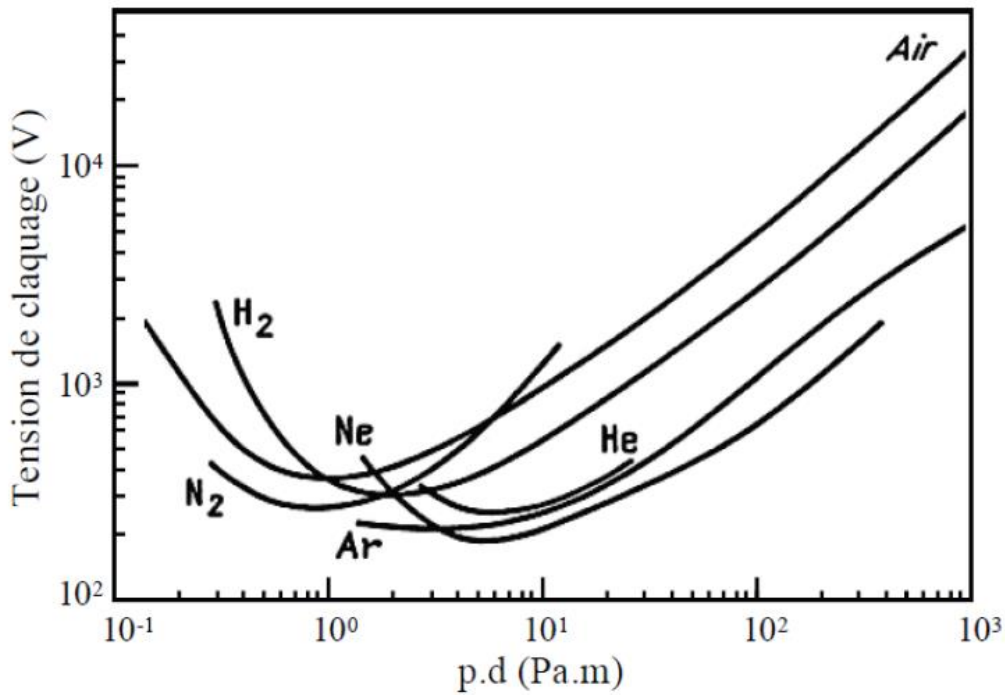


Figure I.6 Courbes de Paschen pour différents gaz [Ja-1, Vi-1]

Afin d'obtenir la tension minimum de claquage V_{cmin} , nous réorganisons l'expression ci-dessus:

$$V_c = F(p.d)$$

$$\frac{Apd}{K} = e^{Bpd/V_c} \Rightarrow \text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right) = \frac{Bpd}{V_c}$$

$$V_c = \frac{Bpd}{\text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right)} \quad (\text{I.30})$$

En dérivant V_c (I.30) par rapport à (p.d):

$$\frac{dV_c}{d(pd)} = \frac{\text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right) \cdot B - Bpd \cdot \frac{K}{Apd} \cdot \frac{A}{K}}{\left[\text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right)\right]^2} = \frac{B \cdot \text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right)}{\left[\text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right)\right]^2} - \frac{B}{\left[\text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right)\right]^2}$$

$$\frac{1}{\left[\text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right)\right]} = \frac{1}{\left[\text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right)\right]^2} \Rightarrow \text{Ln}\left(\frac{Apd}{K}\right) = 1 \quad (\text{I.31})$$

Donc :

$$\frac{Apd}{K} = 1 \Rightarrow (pd)_{min} = K \cdot \frac{e}{A}$$

D'où :

$$V_{cmin} = \frac{B(pd)_{min}}{A \cdot \text{Ln}\left(\frac{A(pd)_{min}}{K}\right)} = \frac{BKe}{A}$$

$$V_{cmin} = 2,718 \cdot \frac{B}{A} \left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (\text{I.32})$$

Connaissant les constantes A, B et γ , on peut déterminer $(pd)_{min}$ et V_{cmin} . Cependant, dans la pratique, ces valeurs sont obtenues par des mesures et les valeurs de certains des gaz sont données dans le tableau A.I.3 (Annexe I).

La tension de claquage pour des champs uniformes dans l'air pour une large gamme de pressions et de distances inter-électrodes, Sohst et Schroder ont proposé la formule suivante [Ku-2, Wa-1]:

$$V_c = 6,72 \cdot \sqrt{p \cdot d} + 24,36(pd) \quad (\text{I.33})$$

Le produit (p.d), pour cette expression s'exprime (en bar.cm) et V_c (en kV).

I.4 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.7).

Selon ce modèle, la décharge se développe sous forme d'un canal très conducteur appelé *streamer*. Les mécanismes de cette théorie sont [Ha-2, Me-2]:

- 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.

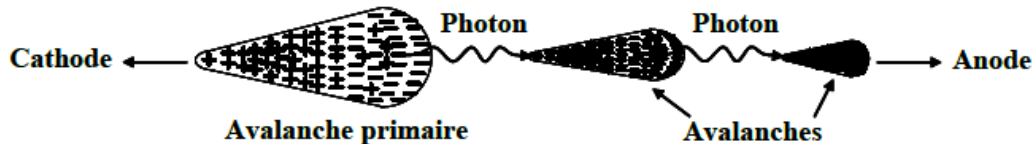


Figure I.7 Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes [Co-1]

I.4.1 Mécanisme de claquage

- **Streamer positif (cathode-directed streamer)**

Dans le *streamer positif*, le canal ionisé a la particularité de se propager de l'anode vers la cathode, en sens contraire des électrons ; il est dit "*cathode-directed streamer*" ou cathode directe.

Le premier stade d'évolution de la décharge en canal correspond à la création d'une avalanche dite primaire. Celle-ci prend naissance, par exemple, suite à des collisions ionisantes pour une valeur critique du champ électrique en un point quelconque de l'intervalle inter-électrodes. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace [Ha-2]. En effet, dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode alors que de l'autre côté, les ions positifs restent pratiquement sur place en raison de leur faible mobilité (la mobilité des électrons est 100 à 1000 fois supérieure à celle des ions). Le champ devient alors hétérogène et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice (Figure I.8a). Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ 10^8 électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur le front et la queue de l'avalanche [Co-1].

Dans l'avalanche, une partie des électrons et des ions se recombinent. L'énergie rayonnée peut provoquer la photo-ionisation des particules de gaz, se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'avalanche. Si le champ local est suffisamment intense, les nouveaux électrons créés peuvent, conduire par chocs ionisants, à la naissance de nouvelles avalanches, dites *secondaires* qui à leur tour créeront une charge d'espace positive en avant de la première (Figure I.8a). Ces avalanches secondaires entretiennent la décharge qui devient autonome et amplifient le nombre de porteurs de charges libres.

Chaque avalanche continue à se développer de façon très rapide. La première n'a pas fini de croître que toute une chaîne d'avalanches se créent. Alors que les électrons se déplacent vers l'anode, les autres avalanches progressent vers la cathode. L'ionisation se fait donc sans intervention de la cathode. La décharge prend alors la forme d'un canal dans la direction de l'axe des électrodes ; son développement dépend de la répartition du champ.

- **Streamer négatif (anode-directed streamer)**

Le développement d'un streamer négatif "anode directe" fonctionne sur un principe similaire à celui d'un streamer positif (Figure I.8b). Dans ce cas le filament lumineux, se déplace rapidement dans l'espace inter-électrodes, une tête négative, qui se propage donc dans le même sens que les électrons. Les électrons ainsi formés au voisinage de l'avalanche génèrent des avalanches secondaires, qui à leur tour créeront une charge d'espace positive en avant de la première, sans dire que les électrons qui se trouvent à l'arrière de la tête sont donc, dans une zone de champ plus faible et contribuent à la neutralisation du canal [Be-1].

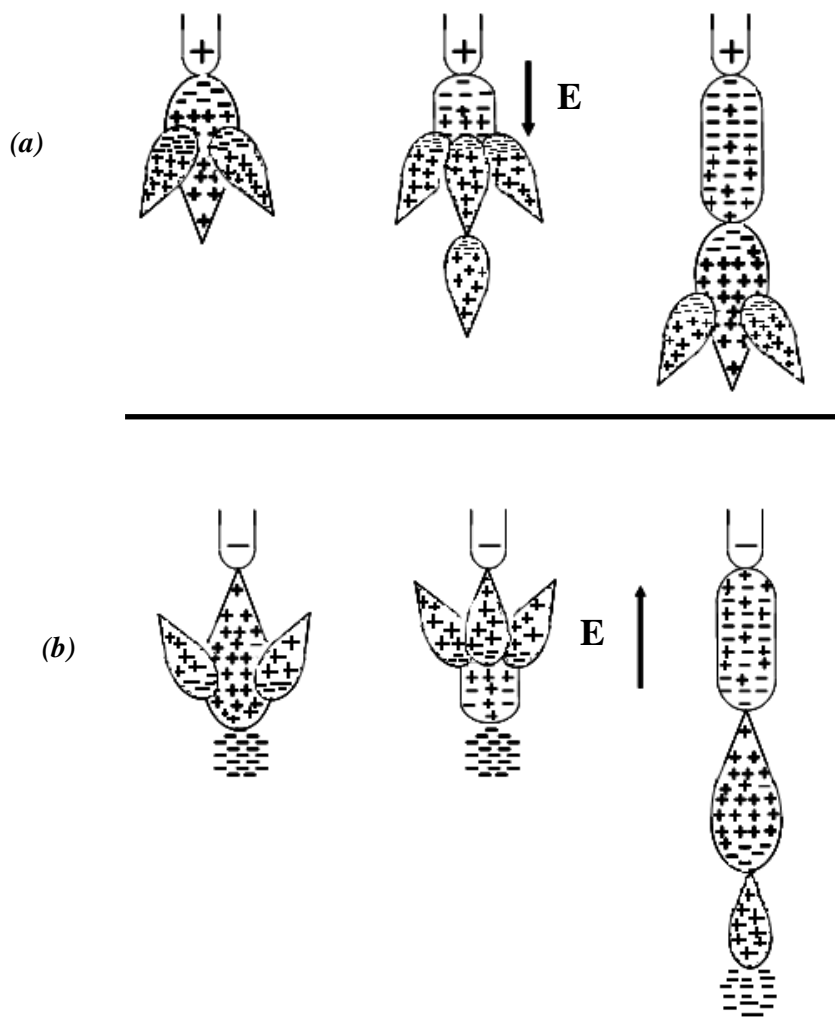


Figure I.8 Etapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration pointe-plan (a) pointe positive, (b) pointe négative [Co-1, Ku-2]

I.4.2 Critère de claquage

- **Version de Loeb et Meek**

Loeb et Meek estiment le champ de charge d'espace E_r (champ radial) pour un *streamer positif* (Figure I.9) par la formule suivante [Ab-3, Ku-2, Na-1, Wa-1]:

$$E_r = 5,27 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\alpha e^{\alpha x}}{(x/p)^{1/2}} \quad (\text{I.34})$$

Où :

x : distance (en cm) à laquelle l'avalanche a progressé (longueur du streamer),

p : pression du gaz en torr,

α : coefficient d'ionisation de Townsend (en m^{-1}),

E_r : champ radial (en V/m).

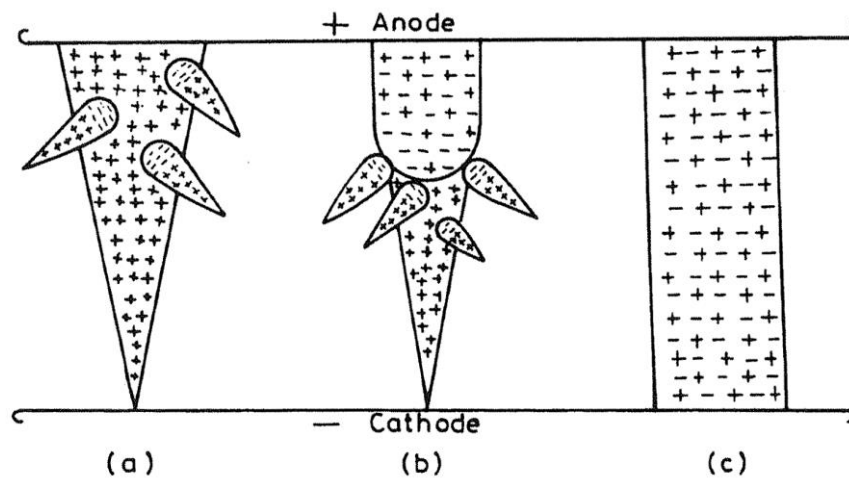


Figure I.9 Développement d'un streamer positif tel qu'envisagé par Meek et Loeb : (a) Initiation de l'avalanche, (b) Propagation du canal en direction de cathode, (c) Liaison complète établie [Ab-3, Be-1, Co-1, Ku-2].

Le claquage se produit lorsque le champ radial E_r est égal au champ appliqué E pour $x = d$. En substituant ces valeurs dans l'équation (I.27), on obtient:

$$E = 5,27 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\alpha e^{\alpha d}}{(d/p)^{1/2}} \quad (\text{I.35})$$

En prenant le logarithme népérien de l'équation, nous aurons :

$$\begin{aligned} \ln E &= -14,5 + \ln \alpha - \frac{1}{2} \ln \frac{d}{p} + \alpha d \\ \ln \frac{E}{p} &= -14,5 + \ln \frac{\alpha}{p} - \frac{1}{2} \ln \frac{d}{p} + \alpha d \end{aligned} \quad (\text{I.36})$$

Les valeurs de α/p et de E/p sont déterminées expérimentalement. Les valeurs de α/p correspondant à E/p à une pression donnée sont choisies jusqu'à ce que l'équation (I.36) soit satisfaite (Méthode d'essai et d'erreur) [Ku-2, Wa-1].

- **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.

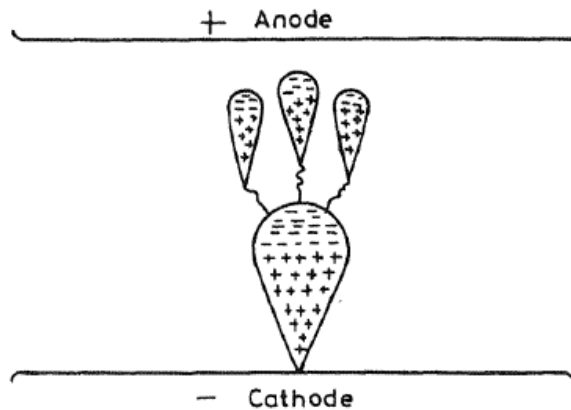


Figure I.10 Développement d'un streamer négatif comme il a été envisagé par Raether [Ku-2, Wa-1].

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 apparaît :

$$n_0 e^{\alpha x_c} \approx 10^8 \quad (\text{I.37})$$

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

$$\alpha x_c \approx \alpha d_c = \ln 10^8 = 18 \div 20 \quad (\text{I.38})$$

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 [Ab-3, Wa-1] :

$$\alpha x_c = 17,7 + \text{Ln} x_c + \text{Ln} \frac{E_r}{E} \quad (\text{I.39})$$

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 :

$$\alpha x_c = 17,7 + \text{Ln} x_c \quad (\text{I.39})$$

Pour un champ uniforme, la tension de claquage par streamer est obtenue quand l'avalanche court-circuite les deux électrodes, l'équation (II.39) peut être réécrite :

$$\alpha d = 17,7 + \text{Ln} d \quad (\text{I.40})$$

I.5 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

Revue bibliographique sur les décharges couronne

Les feux de Saint-Elme sont des phénomènes observés depuis plusieurs siècles. Ils sont provoqués par l'effet couronne, c'est-à-dire la décharge dans l'air des électrons accumulés sur les pointes. Cette libération d'électrons entraîne une ionisation des molécules contenues dans l'air (azote et oxygène principalement) : ils correspondent à une espèce d'halo scintillant observé le long des mâts des bateaux. Ce phénomène provient du personnage Saint Elme. Deux versions s'affrontent par rapport au personnage:

- *recueilli par un marin alors qu'il risquait la noyade, pour le remercier, il dit au marin qu'il enverra une boule de feu pour le prévenir de fortes rafales de vent dans l'immédiat ;*
- *patron des marins, qui aurait continué à prêcher après que la foudre eut frappé le sol près de lui ; il fut ensuite prié par les marins qui craignaient les orages en mer.*

Dans les deux cas, un feu de Saint-Elme est vu comme un signe de protection du saint

Chapitre II

Revue bibliographique sur les décharges couronne

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter, dans le cas des décharges couronne, les processus physiques qui conduisent à la production d'espèces réactives et à leur dispersion, qui seront largement décrits pour la géométrie pointe-plan.

Pour cela, nous nous intéresserons dans un premier temps aux aspects théoriques permettant d'étudier le comportement de la décharge couronne, puis aborderons les conditions d'obtention de la décharge couronne, ses différents régimes, le mode de propagation de la décharge sous tension continue ainsi que ses applications industrielles.

II.2 Définition

Les décharges couronne font partie de la famille des plasmas froids non thermiques. Ce sont des décharges électriques hors équilibre qui se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement asymétriques.

La décharge couronne est classiquement établie entre une électrode reliée à la haute tension dite *électrode active ou stressée* et une électrode reliée à la masse qui sert de collecteur de charges : on parle alors d'*électrode passive* [Vi-1].

Les configurations les plus couramment utilisées sont les systèmes pointe-plan, multi-pointes-plan, fil-plan, fil-cylindre, cylindre-cylindre et couteau-cylindre (figure II.1).

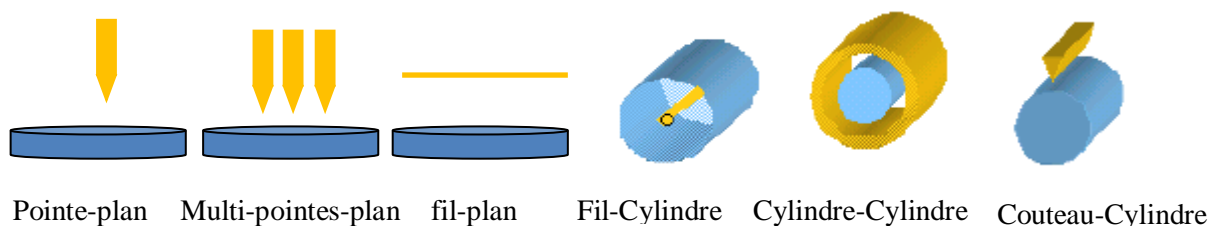


Figure II.1 Principaux systèmes d'électrodes utilisés pour la production des décharges couronne [Vi-1]

Du fait de cette dissymétrie, le champ entre les deux électrodes est non uniforme (divergent). Les décharges couronne peuvent s'appliquer à des milieux gazeux variés à des pressions allant de quelques torrs à quelques atmosphères. En outre, elles ont pour principal avantage d'être faciles à reproduire dans de bonnes conditions de stabilité et de reproductibilité.

Suivant les applications envisagées, la haute tension appliquée à l'électrode active, peut être continue de polarité positive ou négative, alternative ou pulsée. Les tensions de travail habituellement utilisées, varient de quelques kilovolts à une trentaine de kilovolts tandis que les puissances dépassent rarement les quelques kilowatts [Vi-1].

II.3 Caractéristiques des décharges couronne

II.3.1 Caractéristique courant-tension et régimes de décharge

La décharge couronne est générée en appliquant un champ électrique intense entre les deux électrodes. Le gaz, qui était initialement électriquement neutre, devient plus ou moins conducteur en raison de la création d'électrons et d'ions. La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité à laquelle l'électrode de faible rayon de courbure (dite stressée) est portée. La figure II.2 (Régime III) représente une caractéristique typique de décharge couronne (positive ou négative). Cette courbe met en évidence les différents régimes de la décharge lorsque la tension appliquée entre les électrodes augmente [Ma-2, Jo-1].

- **Régime I** : collecte des espèces chargées présentes dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter-électrodes.

- **Régime II** : ce régime de décharge se produit à partir d'une tension seuil V_0 . Il traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend. La décharge est qualifiée de non-autonome car elle a besoin d'une source externe pour s'entretenir; on dit que la décharge n'est pas encore auto-entretenu.

- **Régime III** : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter des phénomènes d'ionisation extérieurs : la décharge est auto-entretenu.

- **Régime IV** : les courants de décharge deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. C'est le régime des décharges disruptives tel que les arcs électriques.

Bien qu'il y ait des similitudes entre les caractéristiques courant-tension des deux décharges (positive et négative), la physique des décharges est complètement différente, du fait de la différence de masse entre les ions et les électrons. A titre d'exemple, une décharge couronne produit de l'ozone quelle que soit sa polarité, mais une décharge couronne négative en produit beaucoup plus qu'une décharge positive [Go-2, Da-2].

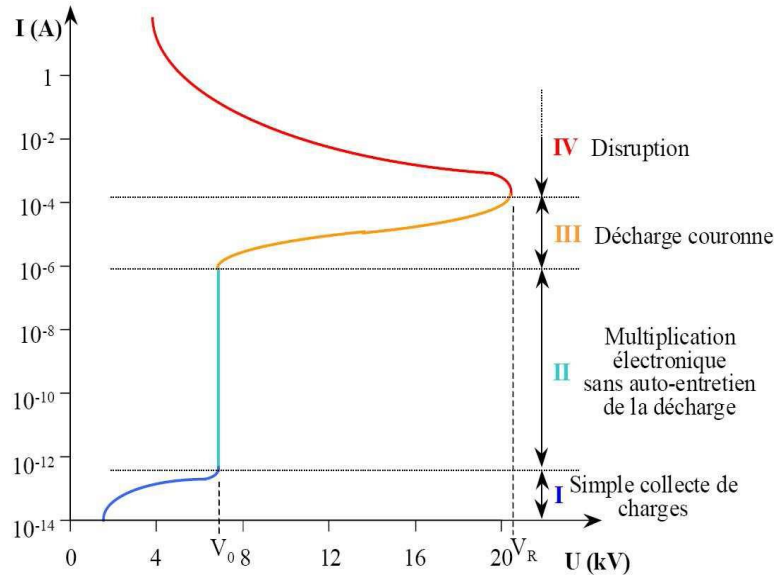


Figure II.2 Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne pointe-plan positive dans l'air à la pression atmosphérique, ($d=13$ mm) [Ma-1, Ma-2, Vi-1].

II.3.2 Relations théoriques du courant de décharge couronne

L'analyse de la décharge couronne se fait plus souvent par le biais de la caractéristique courant-tension avec laquelle on peut mesurer et quantifier plusieurs paramètres. Une relation décrivant le courant en fonction de la tension appliquée a été démontrée par Warburg. Cette relation s'applique à la géométrie pointe-plan [Ch-3, La-1]:

$$I = k \cdot V(V - V_0) \quad (\text{II.1})$$

Où V_0 est la tension d'allumage ou seuil d'ionisation à partir duquel la décharge s'allume et k une constante.

La constante k dépend de la géométrie ou du système de la décharge et de la nature du gaz environnant. Dans l'air et à pression atmosphérique, $0,1 < k < 1 \mu\text{A}/\text{kV}^2$ [La-1].

On peut aussi traiter cette relation différemment en utilisant le terme I/V qui rend la relation (II.1) linéaire [Ak-3, Ak-6, Gr-1]:

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

Une relation empirique de la même forme est proposée par Goldman moyennant une constante a [Bo-1, Go-2]:

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

μ étant la mobilité des ions.

Une autre relation empirique quadratique en polarité négative de la pointe entre le courant et la tension est généralement utilisée pour de petites distances inter-électrodes ($d \leq 1\text{cm}$) et s'exprime par [Ca-3]:

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

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 ($0,03 < R_p < 0,05\text{ mm}$) et des distances inter-électrodes entre 4 et 16 mm la relation [La-3, Bo-1]:

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

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

La dissymétrie des électrodes entraîne un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. En l'absence de charge d'espace, ce champ est décrit en tout point sur l'axe de la décharge par plusieurs relations [Me-1]. Ainsi, dans le cas d'une approximation hyperboloïde-plan, nous retiendrons les relations les plus utilisées :

- Expression du champ géométrique (sans charge d'espace) proposée par Lama et Gallo en 1974 [La-3]:

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

- La relation donnée par Hartmann en 1977 [Ha-3] 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).

La figure II.3 montre la variation du 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. On constate que le champ décroît brutalement dès que l'on s'éloigne de la pointe. Cette courbe a été obtenue à partir de l'expression du champ géométrique proposée par Lama et Gallo.

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

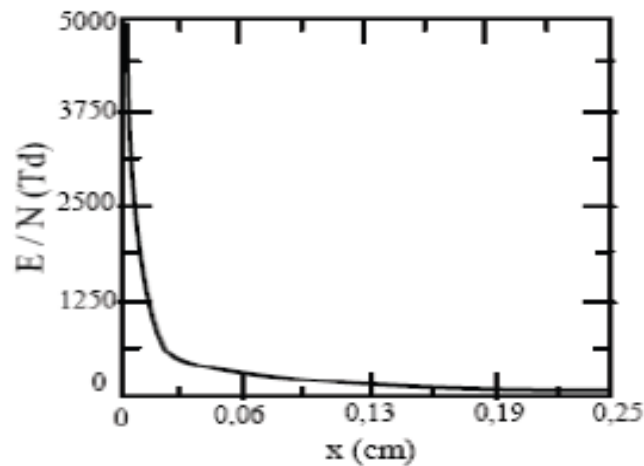


Figure II.3 Variation du champ électrique réduit en configuration pointe-plan ($d=2,5$ mm, $R_p=10\mu\text{m}$) [Co-1].

Le long de l'axe inter-électrodes x , le champ électrique est très important au niveau de la pointe où une zone d'ionisation se forme (figure II.4) et il diminue vers le plan. On distingue trois zones [Go-1, Go-4]:

- **Zone d'ionisation** : Elle est située au voisinage de l'électrode active là où le champ électrique géométrique est le plus intense. L'ionisation du gaz s'effectue préférentiellement dans cette zone. Cette zone est le siège de la production des électrons et des ions.

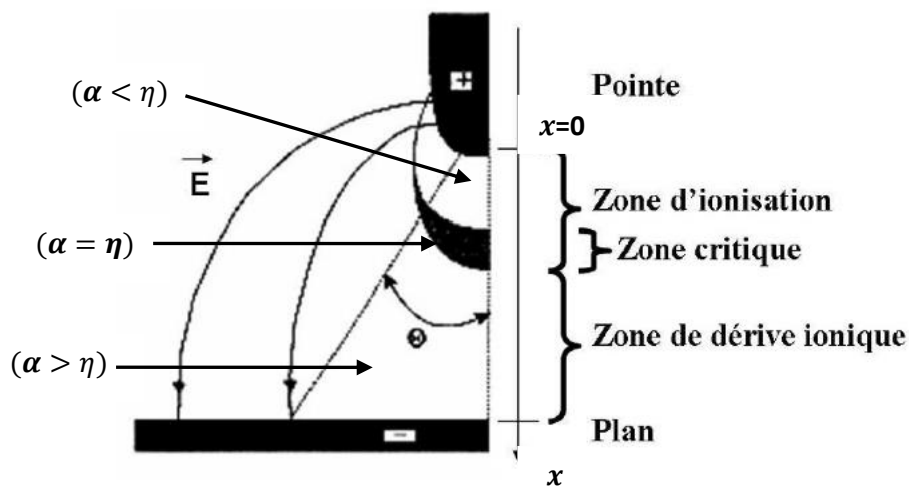


Figure II.4 Topographie de la décharge couronne en géométrie pointe-plan [Go-1].

- **Zone de dérive ionique** : Elle est spécifique à la décharge couronne, où le champ électrique géométrique est trop faible pour permettre l'ionisation du milieu. Cette zone est passive du point de vue électrique mais elle est le siège d'une activité physico-chimique complexe et intense. Elle joue le

rôle d'une impédance en série avec la zone d'ionisation et confère aux décharges leur stabilité, caractéristique intrinsèque.

- **Zone critique** : Elle est située entre les deux zones précédentes. Dans cette zone, la multiplication électronique est stoppée dans le cas d'une décharge couronne négative ($\bar{\alpha} = \alpha - \eta$) mais elle devient au contraire l'origine de la multiplication électronique en décharge positive.

II.5 Décharges couronne

Les phénomènes élémentaires de développement et de propagation de la décharge couronne sont décrits pour la géométrie pointe-plan. Cette configuration est en effet plus simple et permet une reproductibilité parfaite des mesures. En tension continue, on distingue deux cas : l'application d'une tension positive ou négative à la pointe. En appliquant une tension alternative, les mécanismes élémentaires sont alternativement les mêmes que pour les décharges positives et négatives à quelques exceptions près [Gi-1, Vi-1].

II.5.1 Décharge couronne positive

Lors de l'application d'une haute tension à une électrode de faible rayon de courbure, une zone d'ionisation se développe à son voisinage où le champ est très intense. Les électrons énergétiques produits par photo-ionisation sont accélérés vers l'anode. Durant leurs parcours, ils rentrent en collision inélastique avec les molécules neutres du gaz inter-électrodes, ainsi d'autres électrons seront créés [Be-3]. Les ions positifs créés seront repoussés hors la zone d'ionisation et dérivent vers la cathode. Le champ de la charge d'espace a le même sens que le champ appliqué (Figure II.5), on dit qu'en polarité positive l'effet couronne se déroule dans un **champ croissant**. L'aspect lumineux s'étend dans l'espace.

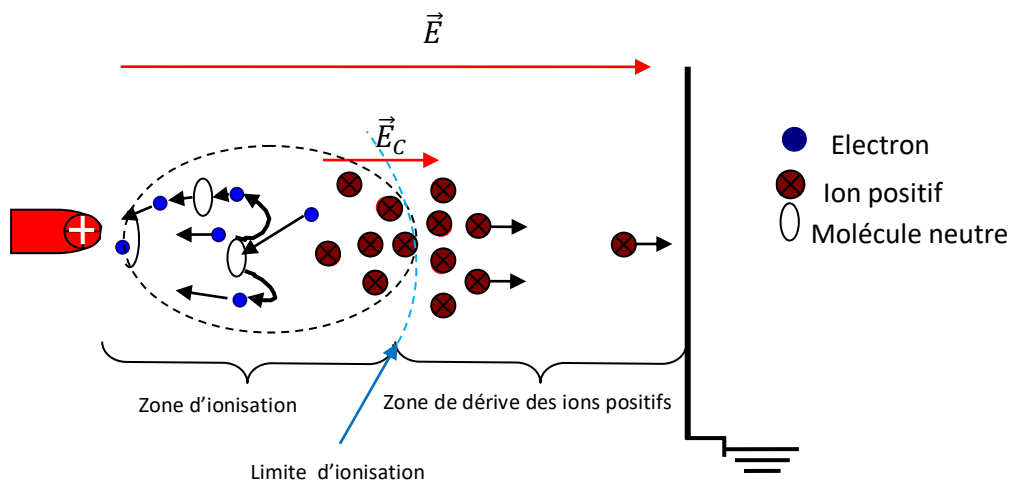


Figure II.5 Représentation schématique d'une décharge couronne positive [Ch-2, Ch-3, Ya-1].

L'avantage de la décharge couronne positive est de pouvoir fonctionner avec tous les types d'alimentation électrique.

La difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc électrique. Cette transition est accompagnée par une forte augmentation de courant circulant dans la décharge et une hausse de la température du gaz [Ab-1, Du1, Me-6].

II.5 .1.1 Régimes de la décharge couronne positive

Dans tout ce qui va suivre l'étude se fera dans le domaine III de la figure II.2. Un zoom type de la caractéristique courant-tension de ce domaine est présenté par la figure II.6 qui montre la variation du courant lorsque l'on augmente la tension appliquée. Les mesures ont été effectuées dans l'air synthétique (80% d'oxygène et 20% d'azote) à pression atmosphérique et température ambiante ($R_p = 20\mu\text{m}$, $d = 7\text{ mm}$) [Ka-1, Me-8].

La figure II.6 montre qu'en dessous d'une tension seuil (zone 1), le courant est trop faible pour être détecté, et au dessus d'une tension seuil de claquage (zone 5), on observe un phénomène de disruption avec l'augmentation brusque du courant et le passage à un régime de décharge *spark* (étincelle). Entre ces deux zones limites, la caractéristique courant-tension est divisée en trois zones distinctes correspondant à trois régimes de décharges couronne:

- La zone d'auto-stabilisation de la décharge couronne apparaît pour des tensions (zone 2). 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 correspondant à la zone 3. La décharge est dite en régime "*glow*";
- La décharge couronne à courant impulsionnel apparaît pour des tensions (zone 4). La décharge correspond au régime "*breakdown streamer*".

a- Régime "onset streamer": zone d'auto stabilisation de la décharge

Le régime "onset streamer" apparaît lorsque les impulsions ont une amplitude supérieure au bruit de fond du courant. Ces impulsions de courant sont dites de *démarrage*, *d'auto-entretien* ou encore "*burst pulses*" [Go-1, Ka-1].

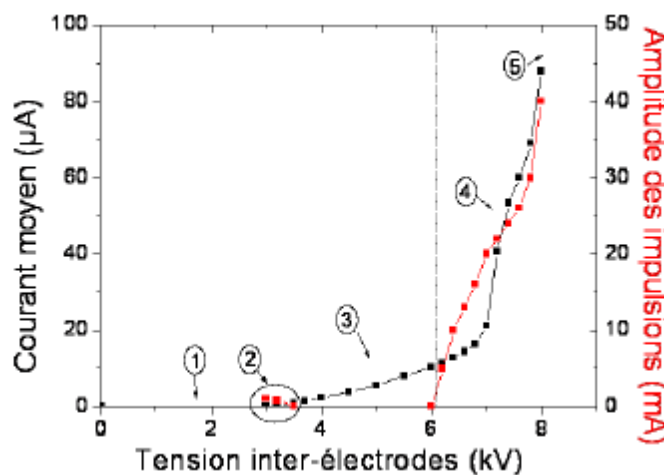


Figure II.6 Caractéristique courant- tension d'une décharge couronne pointe-plan dans l'air à la pression atmosphérique [Du-1, Ka-1, Me-8].

Ce régime de décharge est caractérisé par de faibles impulsions de courant avec un faible courant moyen (autour du microampère). Ces impulsions apparaissent de manière irrégulière avec une fréquence moyenne de quelques kHz. Elles ont des temps de montée rapides (20 à 40 ns) et un temps de décroissance beaucoup plus lent (100 ns). L'amplitude de ces impulsions est de l'ordre du milliampère pour des pointes fines [Du-1, Me-8].

Les impulsions de courant proviennent du développement et de la propagation de décharges filamenteuses qui restent localisées au voisinage de la pointe. Une avalanche se déclenche près de l'anode et se développe en direction de la cathode. Les électrons sont évacués rapidement et laissent derrière eux une charge positive qui s'accroît avec le temps. Éventuellement, l'avalanche se transforme en streamer et le champ électrique devient alors trop faible pour entretenir la décharge. Les électrons sont alors absorbés à l'anode ou s'attachent aux particules neutres et les ions positifs dérivent en direction de la cathode jusqu'à ce que la charge d'espace diminue suffisamment pour qu'un nouveau pulse puisse s'initier. Le taux de répétition des impulsions augmente avec la tension appliquée jusqu'à un maximum où elles cessent d'apparaître. L'intervalle de tension où l'on peut observer ce mode de décharge est très réduit et dépend de la géométrie des électrodes et de la distance inter-électrodes [Du-1]. La figure II.7 est une photographie de la décharge couronne en régime "onset streamer".

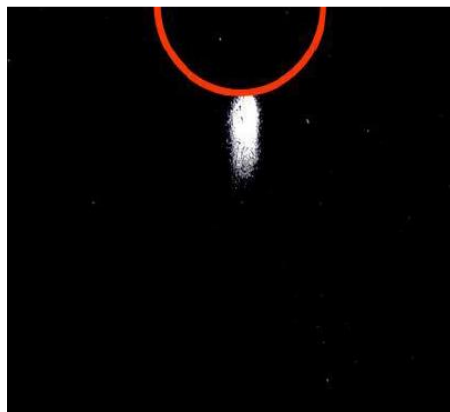


Figure II.7 Photographie des impulsions d'auto-stabilisation de la décharge couronne positive ($R_p = 1 \text{ cm}$, $V = 48 \text{ kV}$) [Na-2, Du-1].

b- Régime "glow": zone de la décharge à courant continu

En augmentant davantage la tension appliquée, les impulsions de courant disparaissent laissant place à un halo lumineux stable autour de la pointe, visible à l'œil nu figure II.8. Le courant de la décharge est continu [Ka-1].

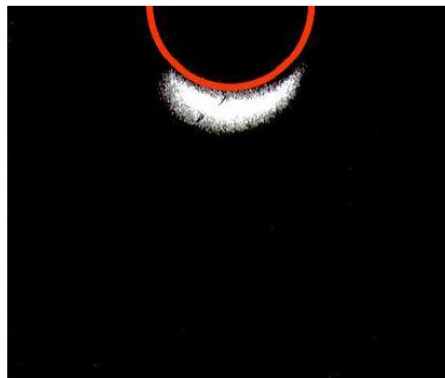


Figure II.8 Photographie de la décharge couronne positive en régime glow ($R_p = 1 \text{ cm}$, $V = 76 \text{ kV}$) [Na-2, Du-1].

c- Régime "breakdown streamer": zone d'effluves positifs

Dans ce régime, il y a apparition des impulsions avec des amplitudes plus importantes (plusieurs dizaines de mA) que celles observées dans le premier régime. L'augmentation du courant

est due au fait que des impulsions de courant apparaissent et se superposent au régime " glow ". Leur fréquence de répétition est relativement stable (une dizaine de kHz) et leur durée de vie est de l'ordre de cent nanosecondes. Chaque impulsion de courant représente la propagation d'un streamer de la pointe vers le plan. Les streamers positifs se propagent dans le sens inverse du déplacement naturel des électrons. L'augmentation de la tension favorise le développement des streamers énergétiques qui peuvent traverser l'espace inter-électrodes et atteindre la cathode. Ce sont des streamers qui précèdent le claquage [Na-2].

L'examen de la photographie de la figure II.9 montre que le streamer s'apparente à la propagation d'une boule lumineuse de faible dimension (quelques dizaines de micromètres de rayon) et de très grande vitesse (10^7 à 10^8 m/s) [Ma-2].



Figure II.9 Photographie de la décharge couronne positive à courant impulsionnel ($R_p = 1$ cm, $V = 126$ kV) [Du-1, Na-2].

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 [Ch-3]. 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.

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 [Ch-3].

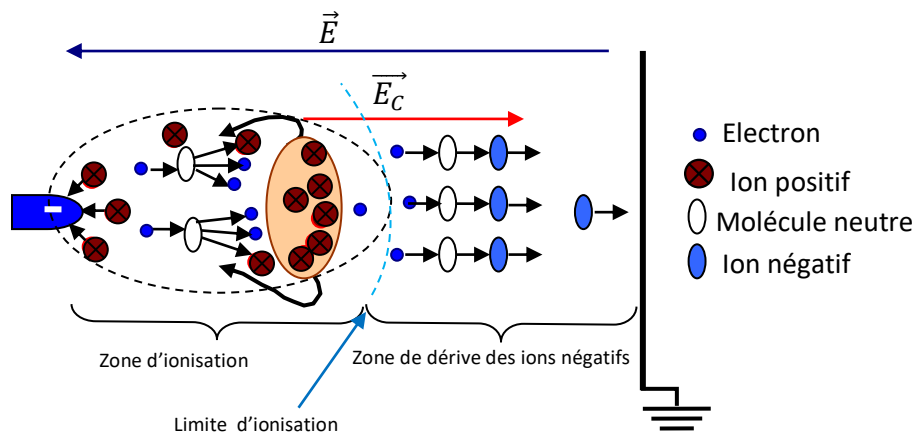


Figure II.10 Représentation schématique d'une décharge couronne négative [Ch-2, Ch-3, Ya-1].

Dans une décharge couronne négative on peut observer trois régimes de décharges selon la tension appliquée

a- Impulsions de Trichel

Elles constituent les premiers phénomènes d'ionisation décelables près de la cathode. Dès que le champ critique est atteint au sommet de la pointe, on observe l'apparition des impulsions de Trichel [Go-1]. Ces impulsions de mêmes amplitudes sont de très courte durée et apparaissent à intervalles réguliers sous la forme d'un cône lumineux. La fréquence de ces impulsions dépend du temps nécessaire aux ions positifs pour atteindre la cathode [Go-2]. Les électrons sont extraits par bombardement ionique de la cathode, se multiplient par le mécanisme d'avalanche électronique et dérivent vers les régions à faible champ électrique. Plusieurs électrons s'attachent alors aux molécules neutres pour former des ions négatifs qui s'accumulent jusqu'à former une charge d'espace négative suffisamment importante pour réduire le champ électrique appliqué. L'ionisation ne peut plus avoir lieu, les populations d'électrons et d'ions diminuent et un nouveau pulse peut alors être initié. L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive.

b- Lueur négative (décharge luminescente)

L'augmentation du potentiel augmente la charge d'espace accumulée et réduit le temps entre deux impulsions. Après une certaine fréquence, les impulsions de Trichel, décharges partielles intermittentes, transitent vers une décharge continue entretenue par les mécanismes de décharge de Townsend. On observe ainsi une autre décharge appelée décharge luminescente. Cette transition est accompagnée par un saut de l'intensité du courant de l'ordre de quelques dizaines de μA [Ch-3].

c- Effluves négatifs

En augmentant davantage la différence de potentiel, des streamers peuvent apparaître et précéder le passage à l'arc, comme dans le cas de la décharge couronne positive. Cependant, ce mode de décharge apparaît seulement si l'espace inter-électrodes est suffisamment grand.

II.5.3 Décharge couronne sous tension alternative

En appliquant une tension alternative aux électrodes, plusieurs différences seront observées par rapport à l'effet couronne sous tension continue. Il existe deux principales sources de ces différences :

- Oscillation de la tension,
- Mouvement oscillatoire de la charge d'espace développée par la décharge couronne.

La première différence observée, en comparaison avec la tension continue pour cette configuration, est l'absence d'impulsions au début de la demi-alternance positive de la tension (Figure II.11). Par contre, dans le cas de petites distances inter-électrodes, la charge d'espace est évacuée avant que la polarité du champ ne soit inversée et on peut ainsi observer des impulsions au début du phénomène [Gi-1].

La distance maximale d_{max} entre deux électrodes planes, nécessaire pour que la charge d'espace produite pendant une alternance soit évacuée, avant que la polarité du champ ne soit inversée est donnée par [Fa-1]:

$$d_{max} = \frac{\mu \cdot E_{max}}{2\pi f} \quad (\text{II.8})$$

Où f est la fréquence du champ électrique, μ la mobilité des ions et E_{max} l'amplitude maximale du champ.

Lorsque la distance inter-électrodes est inférieure à d_{max} , on observe les mêmes modes de décharge qu'en tension continue. Par contre pour des distances supérieures à d_{max} , il y aurait accumulation de la charge d'espace (les ions positifs n'ont pas le temps d'être évacués pendant l'alternance positive), ce qui entraîne le mode de décharge suivant à une tension plus faible [Fa-1]. Cette accumulation de charges d'espace entraîne aussi une baisse de la tension de passage à l'arc.

Goldman et al [Go-3] ont identifié trois composantes du courant dans le cas d'une tension alternative :

- Un courant capacitif dû à l'intervalle gazeux entre les électrodes qui joue le rôle des plaques d'un condensateur,
- Un courant synchrone, continu et en phase avec la tension appliquée,
- et un courant impulsionnel, somme des impulsions « *streamers* » pour les alternances positives et des impulsions de « *Trichel* » lors des alternances négatives (Figure II.12).

Par contre, d'après Giau et al [Gi-1, Ri-1], les impulsions de Trichel ne sont pas observées sous tension alternative, car leur gradient d'apparition est supérieur à la tension associée au claquage qui se produit pendant l'alternance positive.

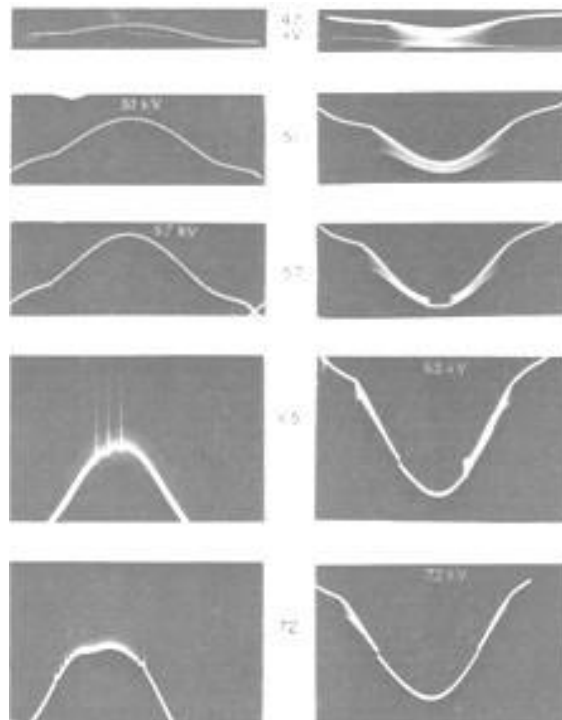


Figure II.11 Courant de décharge couronne en géométrie pointe-plan, alternance positive à gauche et alternance négative à droite ($d = 15,5$ cm) [Gi-1].

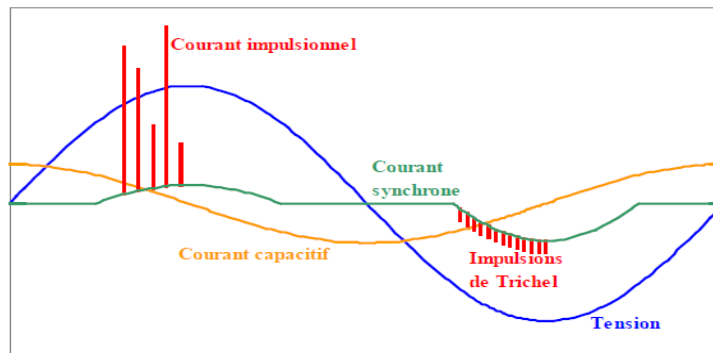


Figure II.12 Représentation des différentes composantes du courant de décharge couronne sous tension alternative à la pression atmosphérique en configuration pointe-plan [Vi-1].

II.6 Vent électrique

Lorsqu'un gaz ionisé est soumis à un champ électrique, les ions subissent la force de *Coulomb*, migrent en suivant les lignes de champ et heurtent les molécules neutres présentes. Ces collisions induisent un mouvement de tout le gaz environnant. Ce phénomène est appelé *vent électrique* ou *vent ionique* [La-1, Vi-1, Dr-1].

Dans le cas d'une décharge pointe-plan, le vent électrique représente le mouvement du gaz induit par les collisions ions-molécules dans la région proche de la pointe. Ce vent se propage en cône, de la pointe au plan, quelle que soit la polarité de la pointe [Dr-1, Jo-1].

En 1961, Robinson a établi pour la première fois la relation liant la vitesse du vent électrique au courant moyen de décharge, son expression [Ro-2]:

$$v_G = A \sqrt{\frac{I}{\rho\mu}} \quad (\text{II.9})$$

avec

v_G : vitesse du vent en m/s

I : courant moyen de décharge

A : constante dépendant principalement de la géométrie des électrodes

ρ : masse volumique du gaz

μ : mobilité moyenne des ions.

Cette expression montre que la vitesse du vent électrique varie avec la racine carrée du courant moyen de décharge.

Par la suite, de 1970 à 2000, Goldman [Go-3], Ballereau [Ba-1] et Parissi [Pa-2] ont beaucoup travaillé sur la décharge couronne en redonnant une expression plus précise que celle de Robinson pour le vent électrique [Jo-1]:

$$v_G = \sqrt{\frac{I \cdot d}{\rho\mu A_G}} \quad (\text{II.10})$$

Où d est la distance inter-électrodes et A_G la section de la décharge couronne.

La figure II.13 montre l'évolution du vent ionique en fonction du courant de décharge [Ba-1, La-1, Vi-1].

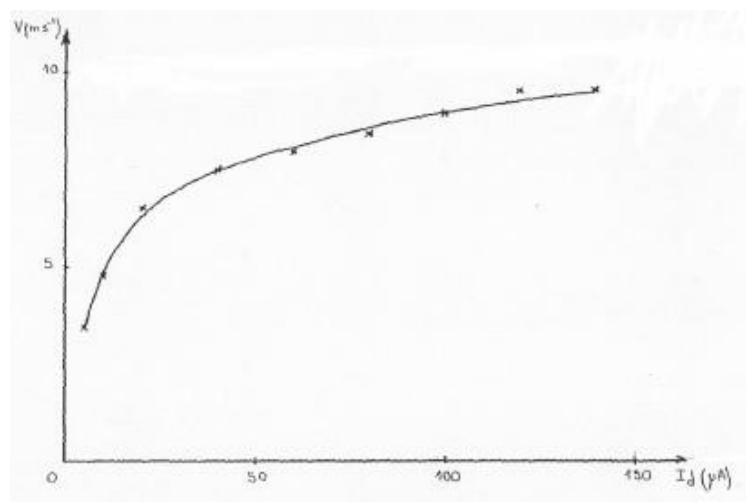


Figure II.13 Variation de la vitesse du vent électrique en fonction du courant de décharge ($U = 3,8 \text{ kV}$, $d = 4 \text{ mm}$, rayon de courbure $R_p = 50 \mu\text{m}$) [Ba-1].

II.7 Facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil de la décharge couronne, dont on distingue trois facteurs essentiels [Me-2] :

- Facteurs géométriques,
- Facteurs électriques,
- Facteurs physico-chimiques du gaz (la densité de l'air, la température et l'humidité).

II.7.1 Influence de la distance inter-électrodes

Le courant de la décharge augmente avec l'augmentation de la tension appliquée pour une distance inter-électrodes donnée, plus cette dernière augmente plus le courant diminue pour la même tension appliquée [Li-2].

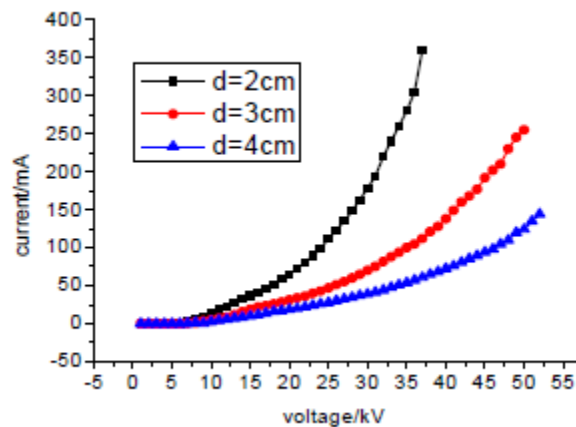


Figure II.14 Courbes courant-tension pointe-plan [Li-2].

II.7.2 Influence des paramètres électriques

La nature de la tension appliquée (alternative, continue, impulsionnelle, haute fréquence,...) joue un rôle important sur les caractéristiques de la décharge. La figure II.15 montre l'effet de la polarité de la tension sur le courant de décharge en géométrie pointe-plan [At-1].

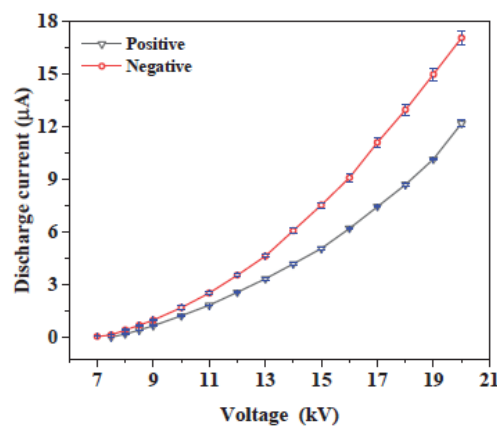


Figure II.15 Caractéristique V-I pour une décharge couronne positive et négative dans l'air ($d=5\text{ mm}$) [At-1].

II.7.3 Influence des facteurs physico-chimiques du gaz

a- Effet de la température

La figure II.16a montre les caractéristiques courant-tension pour l'air en géométrie coaxiale et la figure II.16b celle de l'hélium pour différentes températures et une pression constante de 20 Bars [Gr-2]. On voit bien aussi que la tension d'allumage par décharge couronne $V_0(T)$ de l'air et de l'hélium diminue avec l'augmentation de la température.

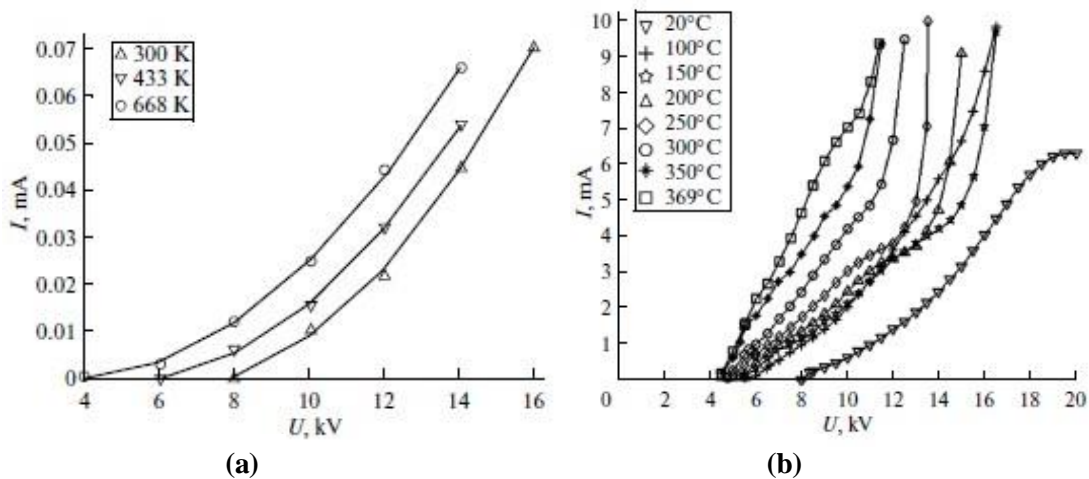


Figure II.16 Caractéristique I-V en fonction de la température (a) dans l'air en polarité positive, (b) dans l'hélium à $P = 20$ Bars [Gr-2].

b- Effet de l'humidité

Plusieurs auteurs ont consacré leurs travaux à caractériser le comportement de la décharge couronne sous tension continue en fonction de l'humidité relative de l'air. Ils ont rapporté que le courant de décharge est parfois fortement affecté par le taux d'humidité relative de l'air.

La figure II.17 illustre la variation du courant moyen en fonction de l'humidité pour différentes tensions appliquées [Ya-4]. On voit bien que pour une tension appliquée donnée, une augmentation de la valeur de l'humidité entraîne une augmentation du courant et ce pour les deux polarités de la tension appliquée.

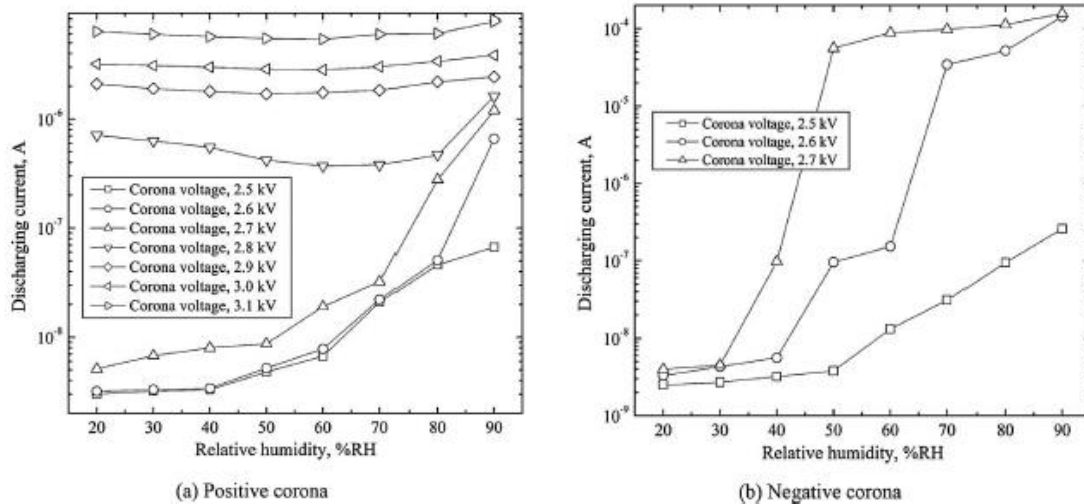


Figure II.17 Variation du courant de décharge en fonction de l'humidité relative pour des décharges couronne positive et négative [Ya-4].

II.8 Applications industrielles des décharges couronne

Les décharges couronne sont largement utilisées dans les milieux industriels. Elles offrent de larges applications technologiques telles que les filtres électriques, la charge de matériaux isolants, la peinture électrostatique, le traitement de surfaces [Be-2] etc...

Ainsi, dans le domaine de la peinture et de l'impression en général, l'application de la peinture par charge électrique des gouttelettes et leur guidage électrostatique est aujourd'hui un procédé industriel répandu. Des processus analogues sont également utilisés pour les photocopieurs ou les imprimantes laser.

II.8.1 Traitement des effluents gazeux

a- Les précipitateurs électrostatiques

Le principe de fonctionnement des précipitateurs électrostatiques est basé sur l'action du champ électrique sur les charges ou les particules chargées. La force électrique agit directement sur les particules chargées à retenir et représente une force séparatrice. Ce phénomène de précipitation électrostatique se retrouve largement dans les filtres électrostatiques (appelés également dépoussiéreurs électrostatiques) [Ac-1, Vi-1]. Les électro-filtres traitent les fumées de charbon, l'air pollué, les brouillards d'huile, les fumées de soudage, les gaz évacués par les moteurs diesel, etc...

b- Destruction des polluants.

Les oxydes d'azote sont des oxydants puissants et très toxiques même à de faibles concentrations. Outre la participation des NO_x pour la formation d'ozone, ils entrent dans la composition des pluies acides, des smogs (nuages de pollution) et contribuent à l'aggravation de l'effet de serre. En effet, 48% des NO_x sont émis par les transports [Du-1].

Les décharges électriques vont permettre de générer de nombreux radicaux. En présence d'eau et d'oxygène, des radicaux oxygène et hydroxyle sont produits. Ils entraînent l'oxydation, voire la dissolution de certains oxydes d'azote. Les oxydations successives peuvent donner lieu à la formation (non souhaitée) d'acides nitriques ou d'oxydes nitreux (protoxyde d'azote) en sous-produits du traitement [Ja-1, Ka-1].

II.8.2 Générateurs d'ozone

Lors de la décharge couronne, le générateur d'ozone va fractionner les molécules d'oxygène présentes dans l'air ambiant. Toute décharge électrique va créer de l'ozone en divisant une molécule d'oxygène (O_2) qui va créer un atome d'oxygène (O). Ce dernier va immédiatement se greffer à une molécule d'oxygène (O_2) pour créer de l'ozone (O_3). L'utilisation d'un générateur d'ozone est efficace pour désinfecter l'air et les surfaces des bureaux ainsi que les chambres des hôtels [Be-4].

II.8.3 Traitement des surfaces

Le traitement de surface des matériaux polymères et assimilés est pratiqué via des décharges couronne qui permettent de renforcer les propriétés d'accrochage des supports électroniques, photographiques ou magnétiques [Ka-1]:

- Nettoyage et érosion de surface,
- Dépôt de films,
- Modification de la chimie de surface.

Les décharges couronne sont utilisées dans de nombreux domaines où elles remplacent des techniques souvent plus polluantes (utilisation de solvants). Elles sont donc une technologie d'avenir qu'il est nécessaire de mieux comprendre et maîtriser.

II. 9 Conclusion

La décharge couronne est une décharge électrique auto-entretenu se produisant en géométrie d'électrodes asymétriques générant un champ électrique local assez élevé. Elle comprend:

- Une électrode active à fort champ entourée d'une région d'ionisation où des charges libres sont produites,
- Une région inter-électrodes à faible champ dite zone de dérive permettant la stabilité de la décharge couronne,
- Une électrode passive à champ faible qui est considérée comme un collecteur de charges.

Nous avons tenté de fournir une présentation globale de la décharge couronne mais assez développée sur certains points caractéristiques comme ses différents régimes selon le type de tension utilisé. Les paramètres influant sur ses caractéristiques sont mis en avant. Nous avons ensuite présenté quelques domaines où elle trouve son application que ce soit dans le milieu industriel ou environnemental.

Chapitre III

Etude de la décharge couronne dans l'air en géométrie pointe-plan sous tension continue

"L'art est fait pour troubler. La science rassure"
Georges Braque

Chapitre III

Etude de la décharge couronne dans l'air en géométrie pointe-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 [Lo-1] et Meek [Me-1] 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 couronne [Ab-1, Ba-1, Be-3, Bo-1, Du-1, Me-8, Mr-2].

Ce chapitre est consacré à l'étude électrique sous tension continue dans les deux polarités de la pointe en faisant varier plusieurs paramètres électro-géométriques (distance inter-électrodes, rayon de courbure de la pointe, matériau constituant les électrodes...). Dans un premier temps, nous allons nous atteler à décrire succinctement le dispositif expérimental, le protocole suivi durant les essais ainsi que les moyens mis en œuvre.

III.2 Dispositif expérimental

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

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

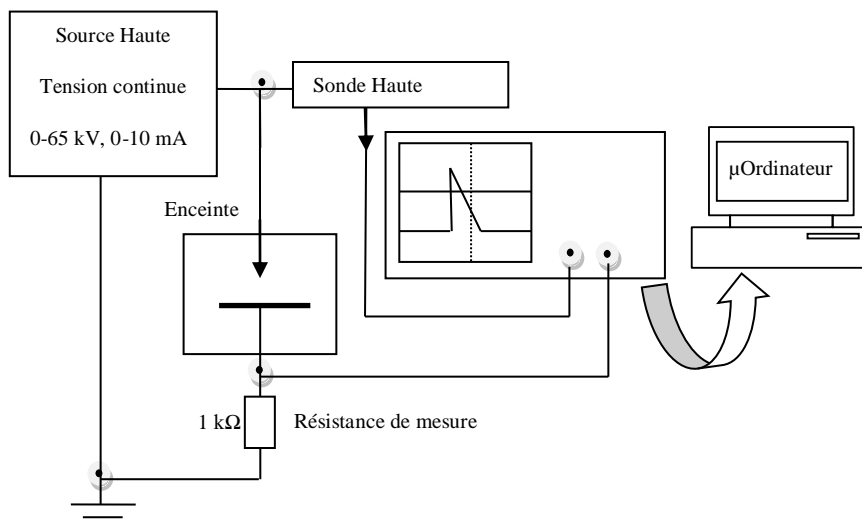


Figure III.1 Schéma global du dispositif expérimental.

La figure III.2 montre une photographie du dispositif expérimental utilisé dans cette partie du travail.

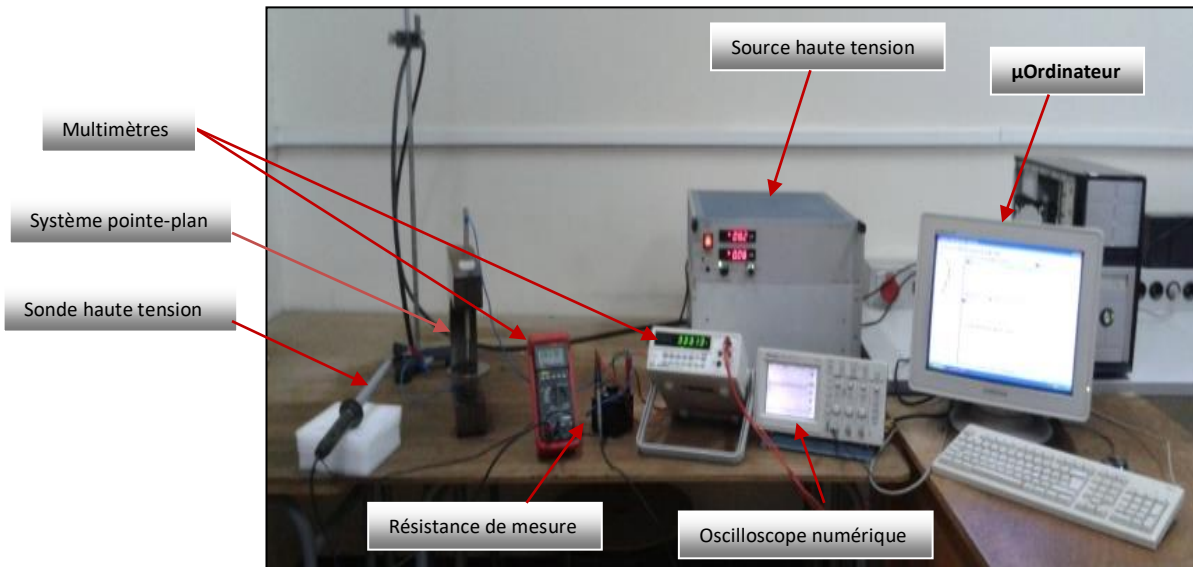


Figure III.2 Dispositif expérimental.

III.2.1 Les électrodes

La configuration des électrodes utilisées dans le cadre de cette thèse est le système "pointe-plan". L'électrode pointue 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 70 et 800 μm (Figure III.3a et b). Les pointes ont été usinées à partir de trois matériaux différents à savoir : le cuivre, l'aluminium et l'acier. 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 plans utilisés dans nos essais sont en cuivre, en aluminium et en acier (Figure II.3c).

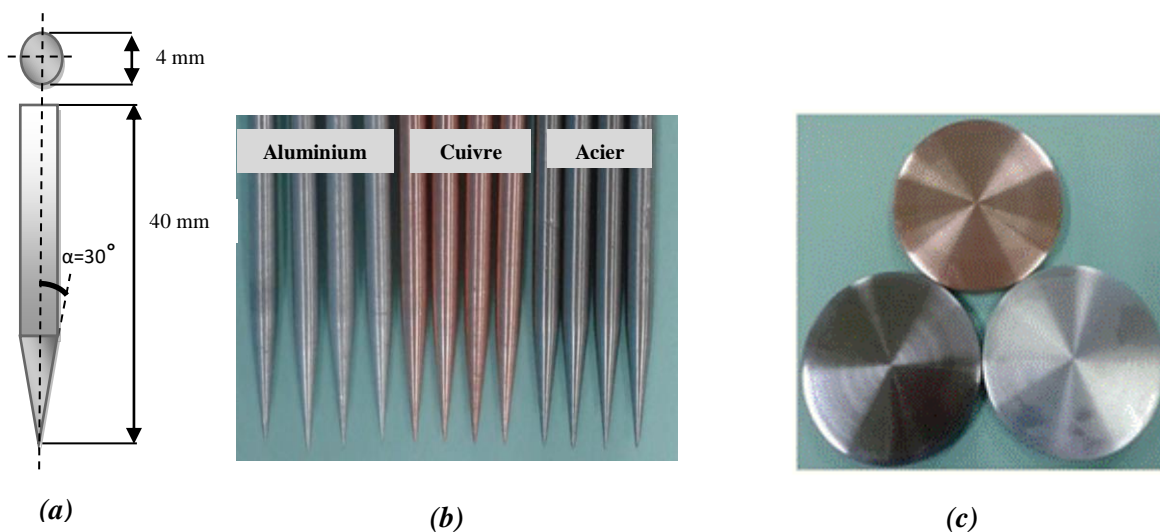


Figure III.3 Electrodes utilisées (a) : Forme et dimensions des pointes utilisées (b) : Pointes utilisées. (c) : Electrodes planes avec les différents matériaux utilisés

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.

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 MΩ, tension maximale de 30 kV uniquement en continu) disposée entre l'électrode active et la masse.

Les signaux des courants produits par la décharge couronne sont obtenus à partir de la tension aux bornes d'une résistance de 1 kΩ (résistance de mesure). Ces signaux sont visualisés sur un oscilloscope TDS 220 (TEKTRONIX), qui possède une bande passante de 100 MHz et une fréquence d'échantillonnage de 1Gs/s. L'oscilloscope nous permet d'obtenir la valeur moyenne du courant (à partir de la tension aux bornes de la résistance de mesure).

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.

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 [Lo-1] :

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

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 distance inter-électrodes sur la caractéristique courant-tension

Les caractéristiques courant-tension des figures III. 4 et III.5 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. Les essais ont été réalisés dans les conditions atmosphériques suivantes :

Température : $t = 14.6^\circ\text{C}$.

Pression : $P = 1006 \text{ hPa}$.

Humidité relative : $H = 56.5 \%$

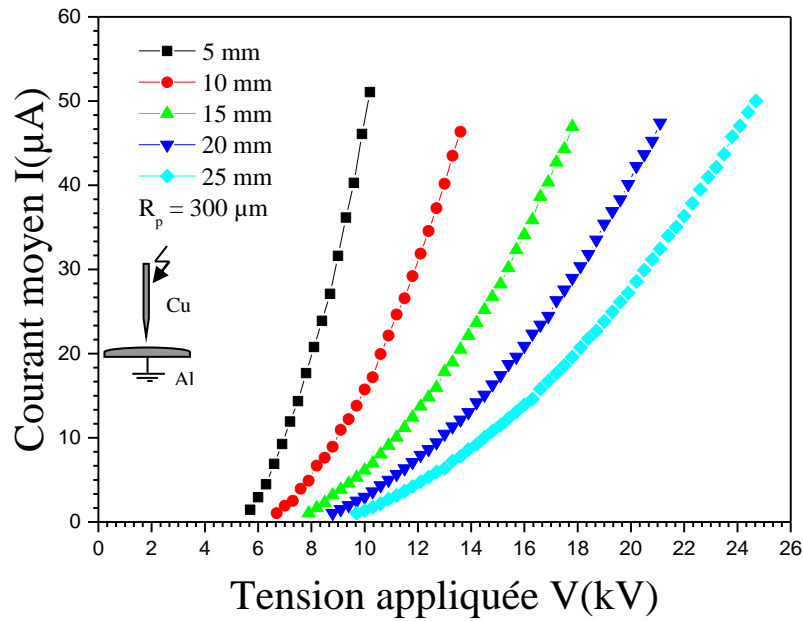


Figure III.4 Caractéristique courant-tension en fonction de la distance inter-électrodes en polarité positive de la pointe.

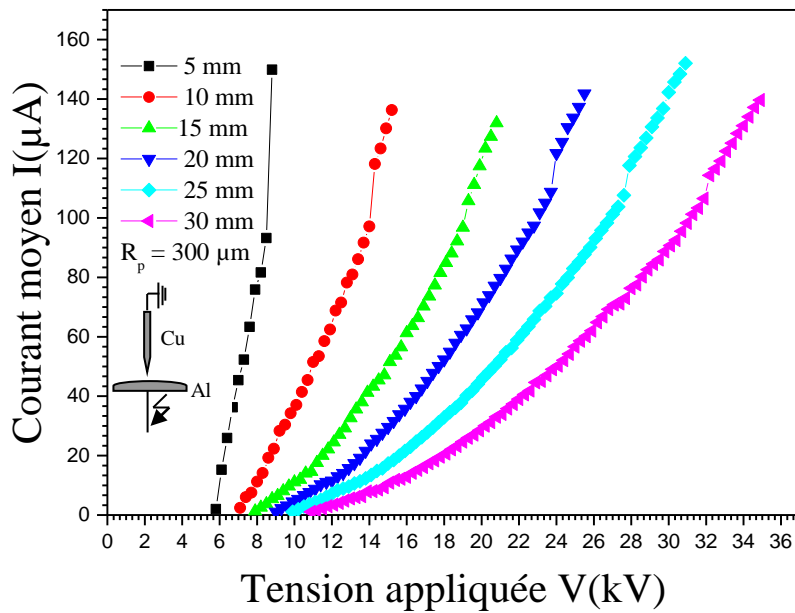


Figure III.5 Caractéristique courant-tension en fonction de la distance inter-électrodes en polarité négative de la pointe.

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

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.

III.3.2 Influence de la polarité de la tension appliquée

La variation du courant de décharge couronne en fonction de la tension appliquée est illustrée sur la figure III.6. 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 [Dr-1].

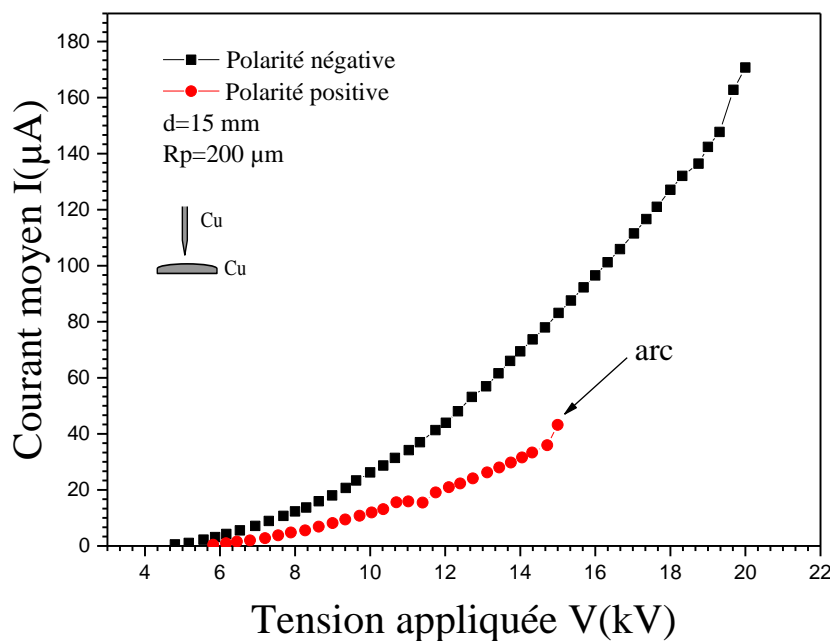


Figure III.6 Influence de la polarité de la pointe sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.

Nous donnons dans ce qui suit les tensions correspondant à la figure III.6.

- En polarité positive : $V_0 = 5.82\text{ kV}$,
- En polarité négative : $V_0 = 4.80\text{ kV}$.

III.3.3 Influence de la distance inter-électrodes sur la tension seuil

La figure II.7 représente la tension seuil V_0 en fonction de la distance inter-électrodes dans les deux polarités de la pointe. L'essai est réalisé dans les conditions atmosphériques suivantes :

Température : $t = 16^\circ\text{C}$.

Pression : $P = 1000\text{ hPa}$.

Humidité relative : $H = 48\%$.

Nous remarquons d'une part que la tension seuil V_0 augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. D'autre part, la tension seuil en polarité positive de la pointe est plus élevée qu'en polarité négative pour une distance donnée, cela trouve son explication dans le processus de développement de la décharge couronne.

En effet, en polarité positive de la pointe, l'ionisation par impact peut avoir lieu à proximité de la pointe à tension faible. Les électrons s'éloignent de la pointe, la probabilité d'ionisation par impact décroît et, dans beaucoup de gaz, le phénomène d'attachement prend place pour former des ions négatifs. Ces derniers se déplacent lentement par rapport à la vitesse des électrons. Ce qui induit une accumulation de charges d'espace et provoque une distorsion du champ principal. Le claquage ne peut avoir lieu que si la tension est augmentée [Mo-1].

Par contre, en polarité négative, l'initiation de la décharge dépend de la photo-ionisation des électrons dans une région proche de la pointe. La distance doit être suffisante pour qu'il y ait une ionisation importante. Les ions positifs, ainsi formés, constituent un prolongement de la pointe et renforcent le champ principal.

Ce qui nous amène à conclure que l'initiation de l'avalanche électronique est plus difficile en polarité positive qu'en polarité négative. Ceci explique le fait que la tension d'apparition des décharges en polarité positive est plus élevée que celle en polarité négative. Par contre, le développement de la décharge est plus facile en polarité positive qu'en polarité négative, ce qui explique le fait que la tension de claquage en polarité négative est supérieure à celle en polarité positive (Figure III.6).

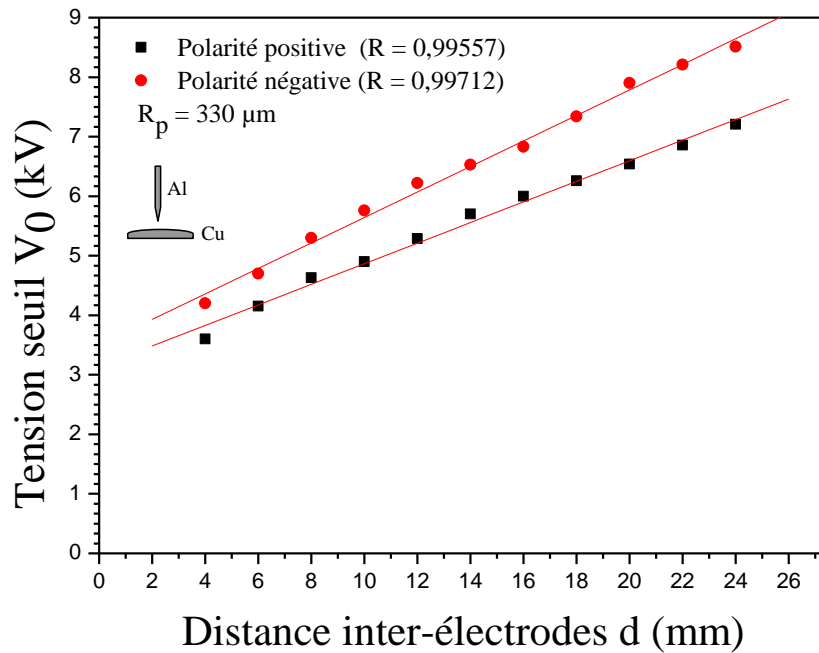


Figure III.7 Tension seuil en fonction de la distance inter-électrodes dans les deux polarités de la pointe.

III.3.4 Influence de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée

La figure III.8 nous donne le courant moyen en fonction de la distance inter-électrodes pour plusieurs niveaux de tension appliquée. Nous fixons une tension et faisons varier la distance inter-électrodes de 5 à 20 mm avec un pas de 1 mm. Les essais ont été réalisés en polarité négative de la pointe pour une distance inter-électrode $d = 20$ mm, dans les conditions suivantes :

Température : $t = 18^\circ\text{C}$.

Pression : $P = 1003$ hPa

Humidité relative : $H = 53.7\%$

Sur la figure III.8, on voit clairement que pour une tension appliquée donnée, le courant moyen mesuré diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. Cela peut s'expliquer par le fait que lorsque la distance inter-électrodes augmente pour une tension fixée, le champ électrique décroît dans l'espace inter-électrodes, ce qui fait baisser en même temps le pouvoir ionisant des électrons.

Par contre, pour une distance inter-électrodes donnée, nous remarquons que le courant moyen augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. La raison à cela est due à l'augmentation de l'efficacité d'ionisation des électrons pour une tension plus élevée. Cela conduit donc à l'augmentation du courant de charge d'espace dans l'intervalle inter-électrodes qui entraîne forcément l'augmentation du courant.

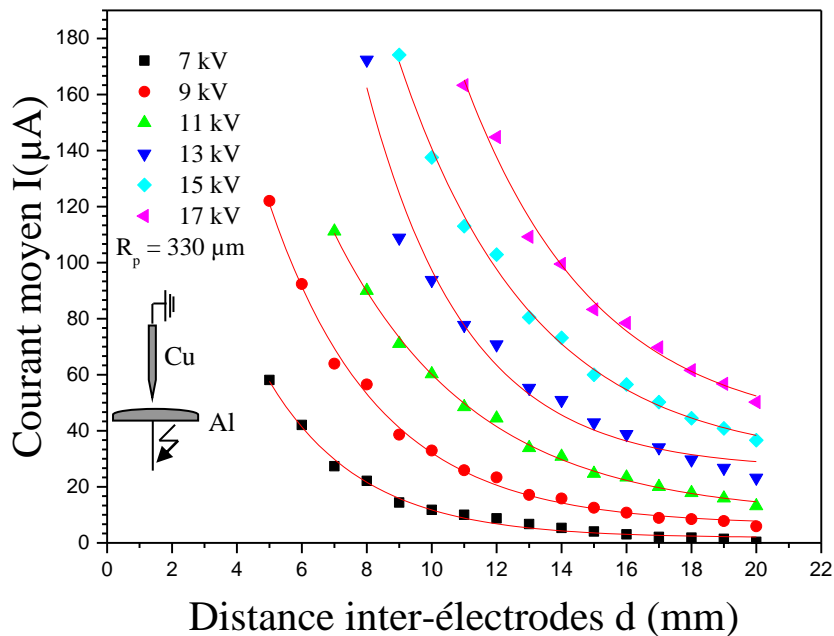


Figure III.8 Evolution du courant moyen en fonction de la distance inter-électrodes et de la tension appliquée.

III.3.5 Influence du rayon de courbure de la pointe

Les figures III.9 et III.10 illustrent des essais réalisés avec des pointes en cuivre présentant des rayons de courbure de 76 μm , 150 μm , 300 μm et 535 μm . L'électrode plane est en acier. Les essais ont été réalisés dans les conditions atmosphériques suivantes :

Température : $t = 15.5^\circ\text{C}$.

Pression : $P = 1005 \text{ hPa}$

Humidité : $H = 55.7 \%$

En polarité positive de la pointe (Figure III.9), en plus de l'allure parabolique des différentes caractéristiques, nous voyons que plus le rayon de courbure de la pointe est petit, plus le courant moyen est grand pour une tension appliquée donnée (pouvoir de pointes). Cela peut s'expliquer par le fait que le champ électrique est plus intense autour des pointes ayant le rayon de courbure le plus faible.

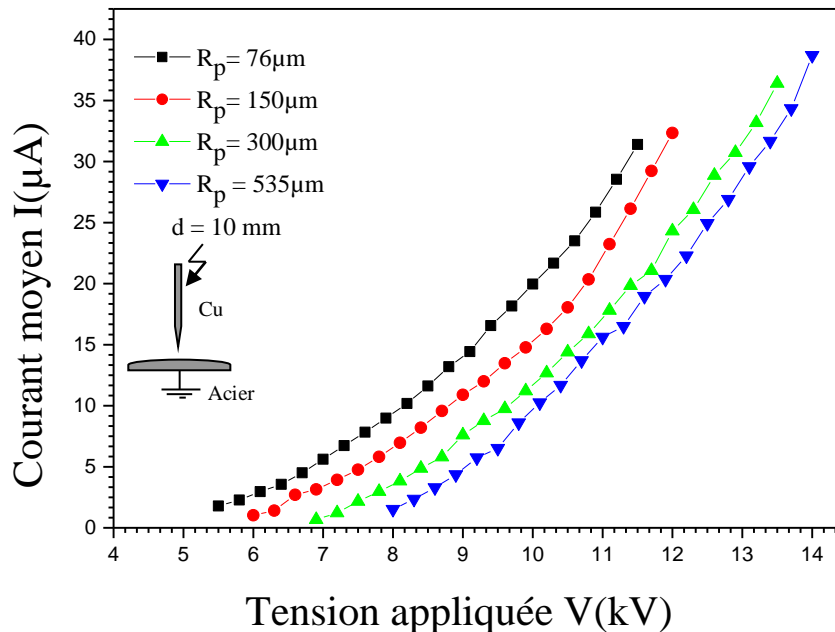


Figure III.9 Caractéristique I-V d'une décharge positive. Pointe en cuivre et plan en acier.

Par contre en polarité négative (Figure III.10), l'effet du rayon de courbure de la pointe est moindre, pour ne pas dire inexistant, il n'y a que la tension seuil V_0 qui augmente avec l'augmentation du rayon de courbure de la pointe. Cela peut s'expliquer par le fait que la pointe dans ce cas joue le rôle d'anode, donc l'extraction des électrons secondaires est limitée.

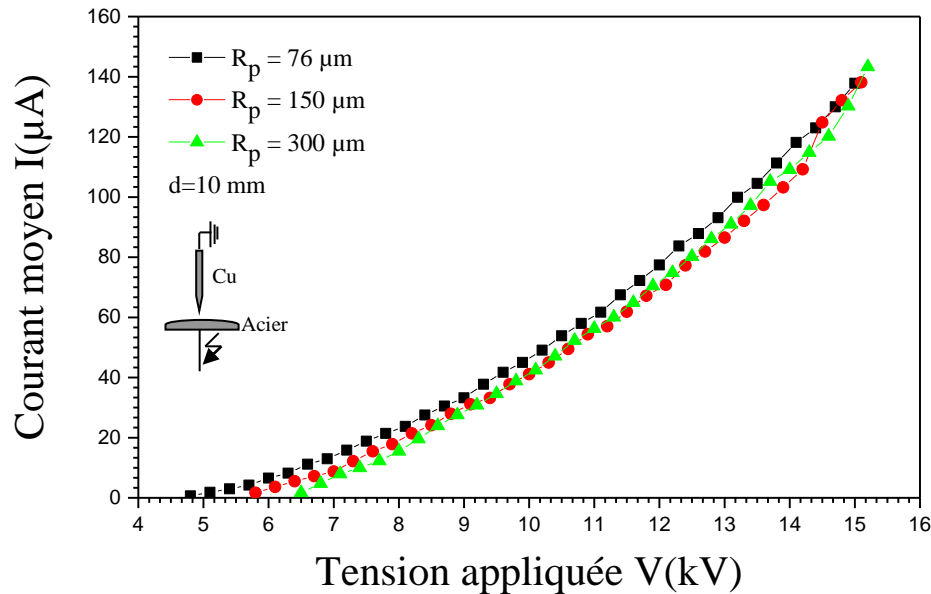


Figure III.10 Caractéristique I-V d'une décharge négative. Pointe en cuivre et plan en acier.

III.3.6 Influence de la pression

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 à vide 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 (figure III.12). Ce système peut mesurer des pressions allant de 0 à 1300 hPa.



Figure III.11 Tube à décharge.



Figure III.12 Baromètre et capteur de pression utilisés.

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, N₂, SF₆ et Hélium.

Les essais sont réalisés pour différentes pressions dans les deux polarités de la pointe.

III.3.6.1 En polarité négative de la pointe

Les figures III.13 à III.11 sont le résultat des essais réalisés pour des pressions allant de 200 à 1000 hPa, pour les distances inter-électrodes de 10, 20 et 25 mm. Il est à signaler que pour la conduite des essais, nous avons commencé par la pression de 1000 hPa et pour passer à 800 hPa par exemple en actionnant la pompe à vide jusqu'à la pression désirée. Les pointes et le plan sont en acier.

Les figures III.13 à III.15 montrent que, dans tous les cas et 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 [A1-1].

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 sur les figures III.14 et III.15. En effet, ces figures montrent qu'il y a une réduction du courant à mesure que la pression augmente.

De l'examen de ces figures, 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 [A1-1]. 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.

Il est possible de dire qu'à une pression plus élevée, le processus d'ionisation est moins susceptible de se produire en raison du fait que la tension seuil augmente avec la pression [Bi-1].

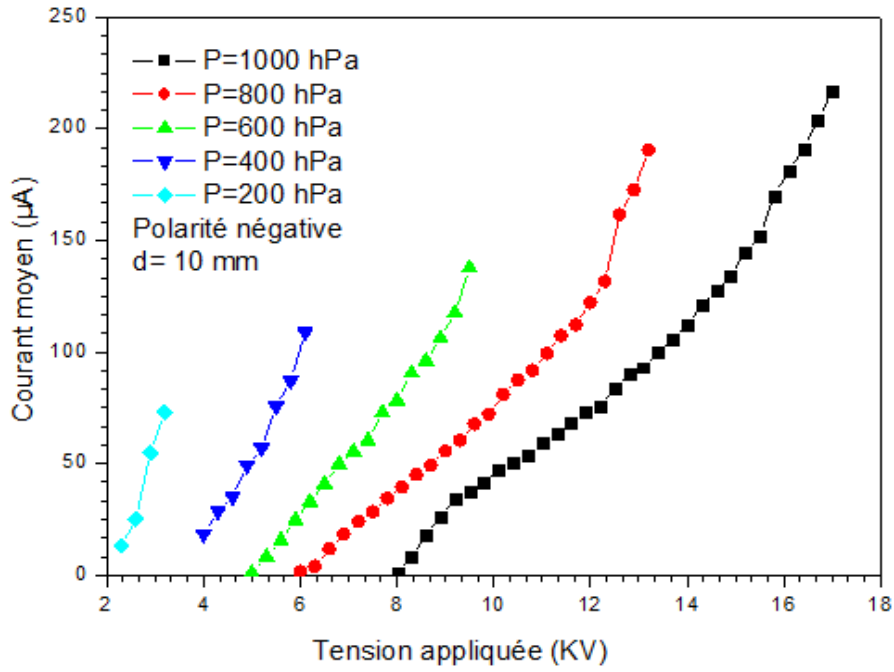


Figure III.13 Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions de l'air ($d = 10$ mm).

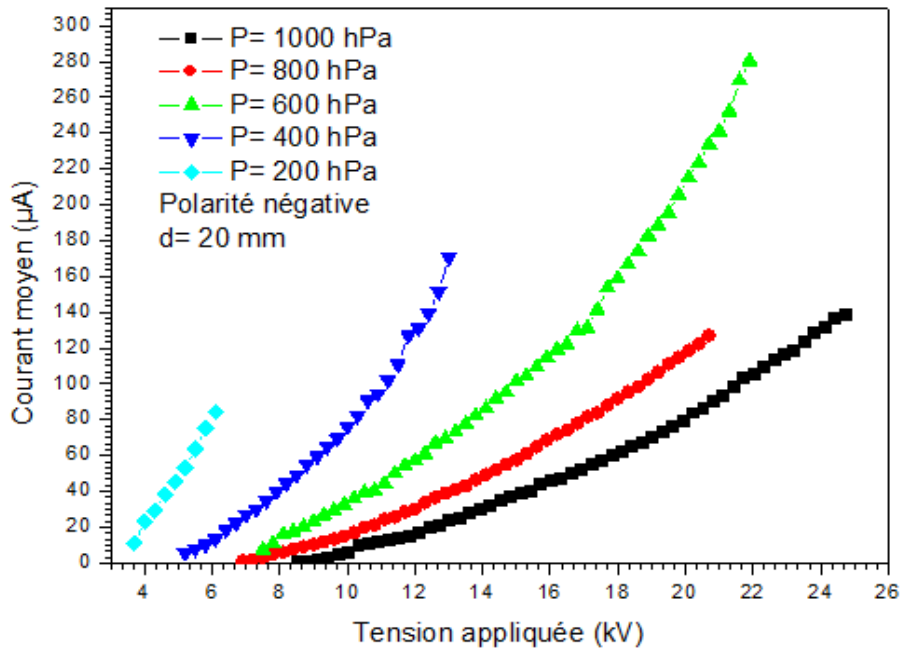


Figure III.14 Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions de l'air ($d = 20$ mm).

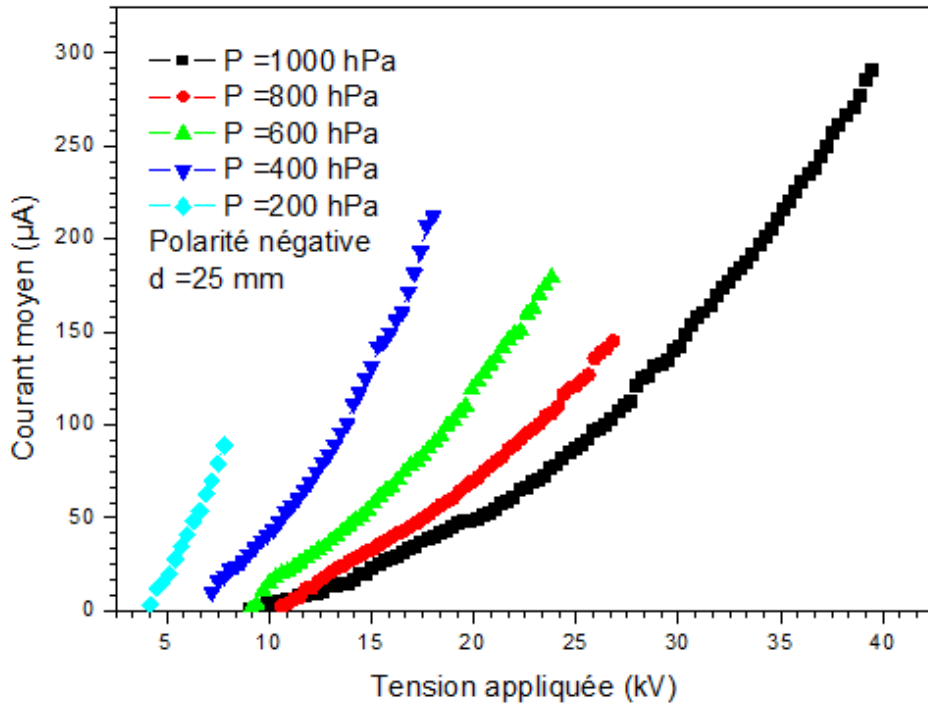


Figure III.15 Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions de l'air ($d = 25 \text{ mm}$).

III.3.6.2 En polarité positive de la pointe

Les figures III.16 à III.19 sont le résultat des essais réalisés pour des pressions (comme pour la polarité négative) allant de 200 à 1000 hPa pour les distances inter-électrodes de 10, 15, 20 et 25 mm.

L'allure des caractéristiques courant-tension des figures III.16 à III.19 est semblable à celle des caractéristiques courant-tension associées à la polarité négative de la pointe. La différence réside dans la tension seuil V_0 qui est plus grande en polarité positive qu'en polarité négative. Il est à noter également que les courants en polarité positive sont plus faibles que ceux associés à la polarité négative de la pointe.

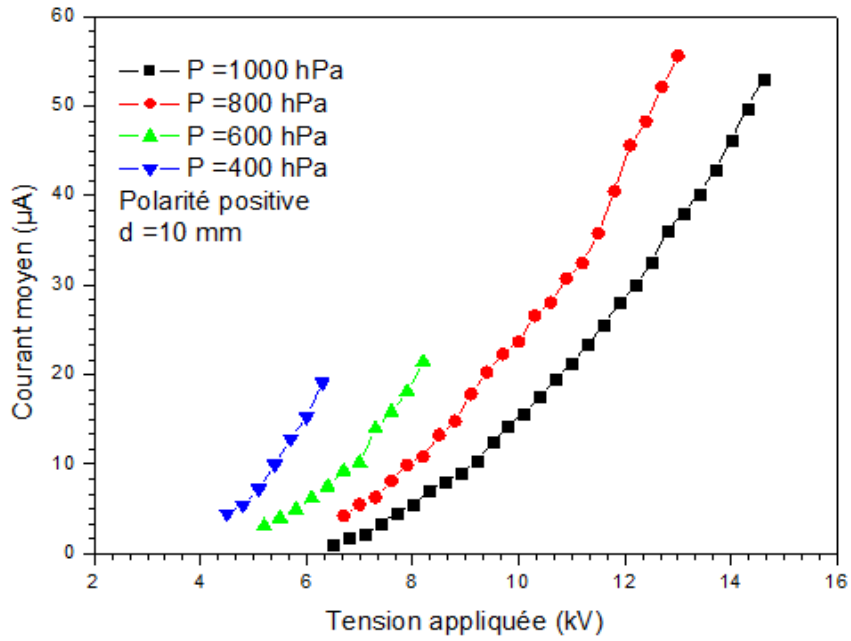
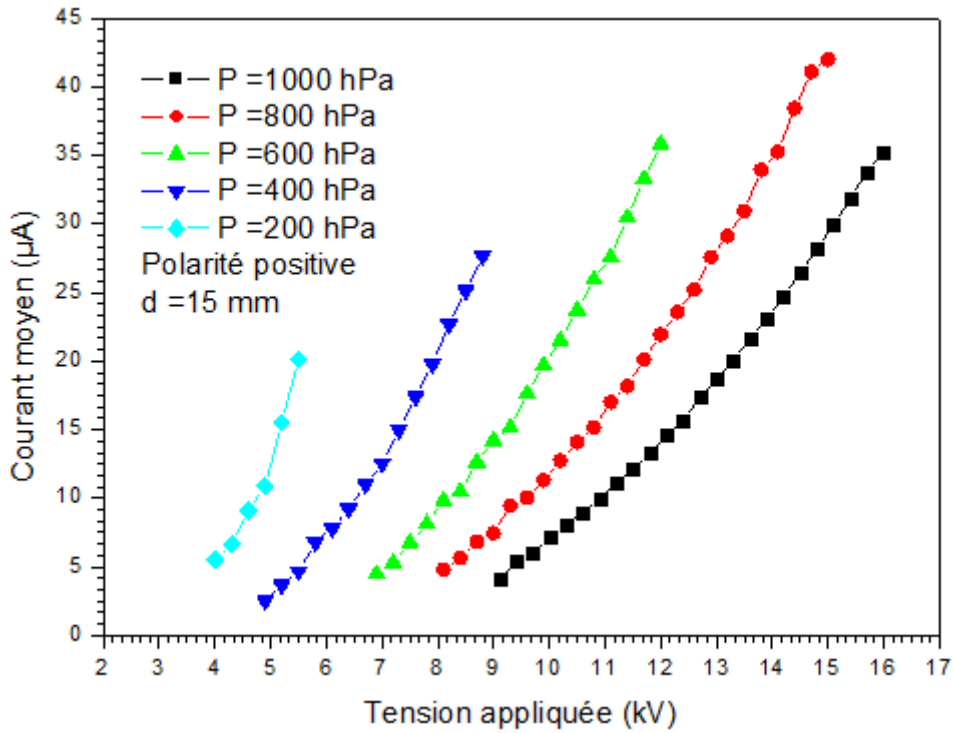


Figure III.16 Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions de l'air ($d = 10 \text{ mm}$).



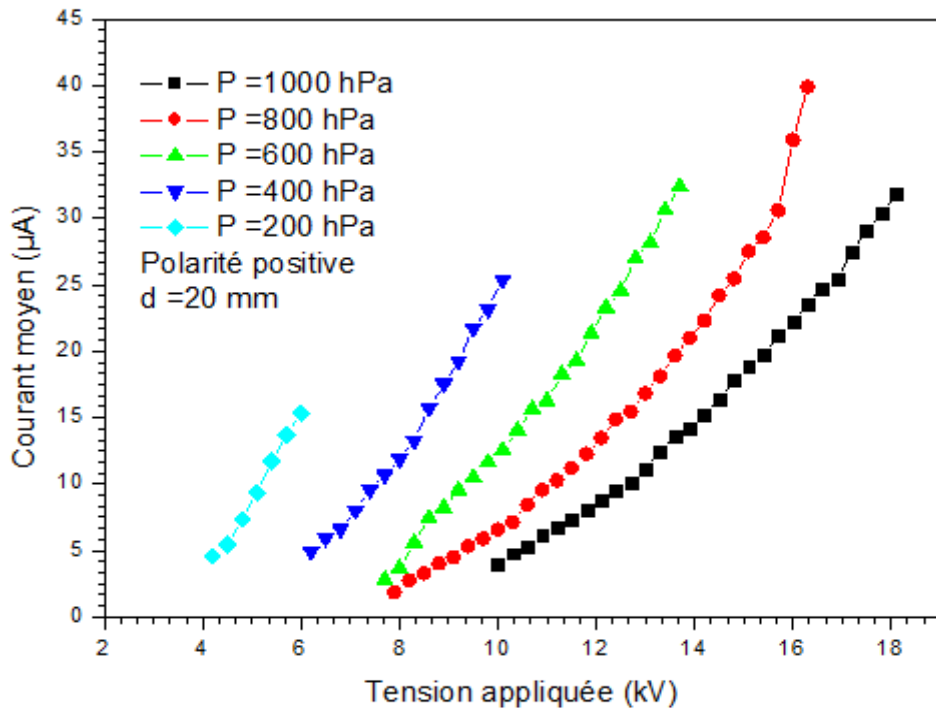


Figure III.18 Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions de l'air ($d = 20 \text{ mm}$).

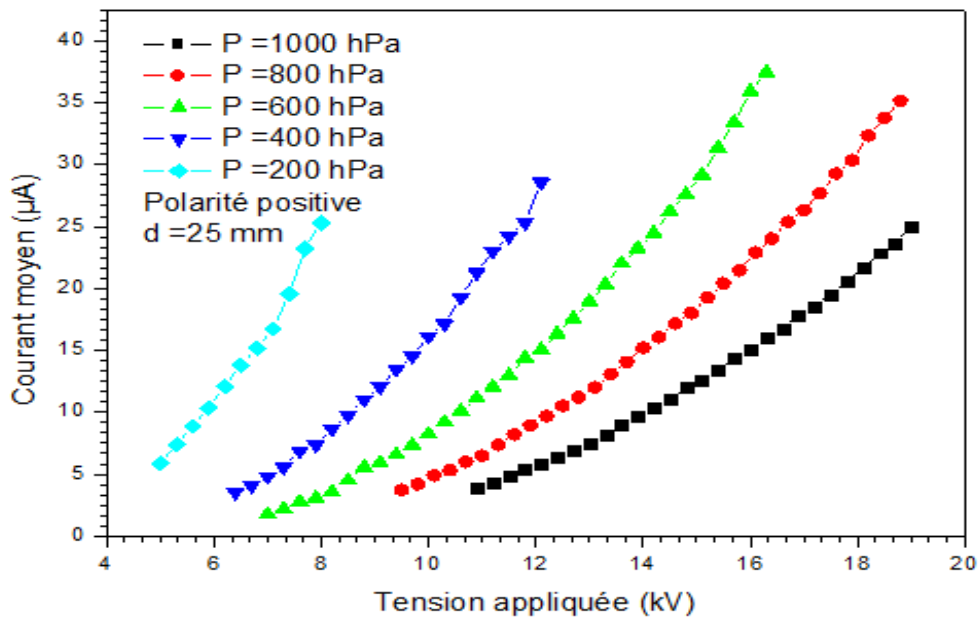


Figure III.19 Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions de l'air ($d = 25 \text{ mm}$).

III.3.7 Influence du matériau des électrodes

Dans le but de voir l'effet du matériau des électrodes passive et active sur la caractéristique courant-tension, une série d'essais a été réalisée. La question qui se pose est : quel est le matériau d'électrodes celui de la pointe ou celui de l'électrode plane qui influe sur la décharge couronne ou les deux à la fois?

Pour y répondre, une série d'essais a été réalisée à cet effet.

1- Des pointes de différents matériaux (aluminium, cuivre, acier et bronze) sont couplées à des électrodes planes en (aluminium, cuivre et acier). Les essais sont faits avec les 4 matériaux de la pointe ayant le *même rayon de courbure* pour un seul matériau du plan à chaque fois, le but étant de voir s'il y a une influence au niveau de la pointe. Les essais sont réalisés dans les deux polarités de la pointe.

2- Une autre série d'essais est réalisée en prenant les matériaux de l'électrode plane avec un matériau de la pointe et ce dans les deux polarités de la pointe.

III.3.7.1 En polarité négative de la pointe

Dans cette polarité, la figure III.20 illustre l'évolution du courant moyen avec la tension appliquée pour des pointes en cuivre, aluminium, bronze et en acier pour une distance inter-électrodes de 10 mm et pour une électrode plane en acier. On voit clairement que le courant moyen de la pointe en aluminium est plus grand par rapport à ceux associés aux pointes en cuivre et en bronze. Cela peut s'expliquer par le travail de sortie ϕ de l'aluminium qui est plus faible que celui du cuivre. Le tableau III.1 est un extrait du tableau A.II.1 (Annexe II) donnant les valeurs du travail de sortie pour le cuivre et l'aluminium.

Tableau III.1 Travail de sortie du cuivre et de l'aluminium

Métal	Travail de sortie (eV)
Cu	4,9
Al	4,2

Il est donc plus facile d'arracher un électron par impact à la cathode (à la pointe en aluminium) qu'à celle en cuivre.

La figure III.21 représente la caractéristique courant-tension associée à une pointe en acier avec des plans en cuivre, aluminium et acier. A l'examen de cette figure, on voit nettement qu'en polarité négative de la pointe, le matériau du plan (qui joue le rôle d'anode) n'a pratiquement aucun effet sur la décharge couronne. Ce qui nous conforte dans notre idée que le travail de sortie ϕ du métal joue un rôle prépondérant.

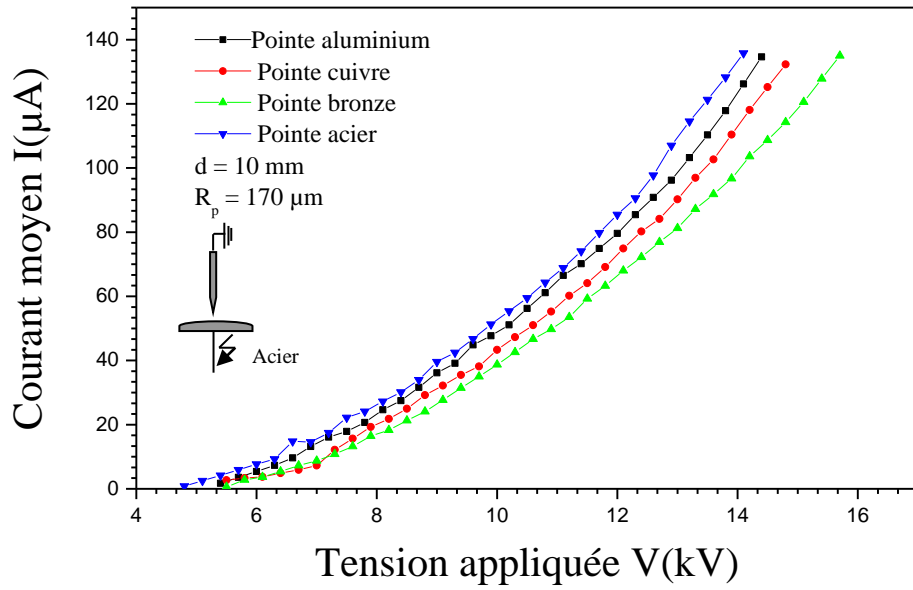


Figure III.20 Caractéristique I-V d'une décharge couronne négative pour différents matériaux des pointes et un plan en acier.

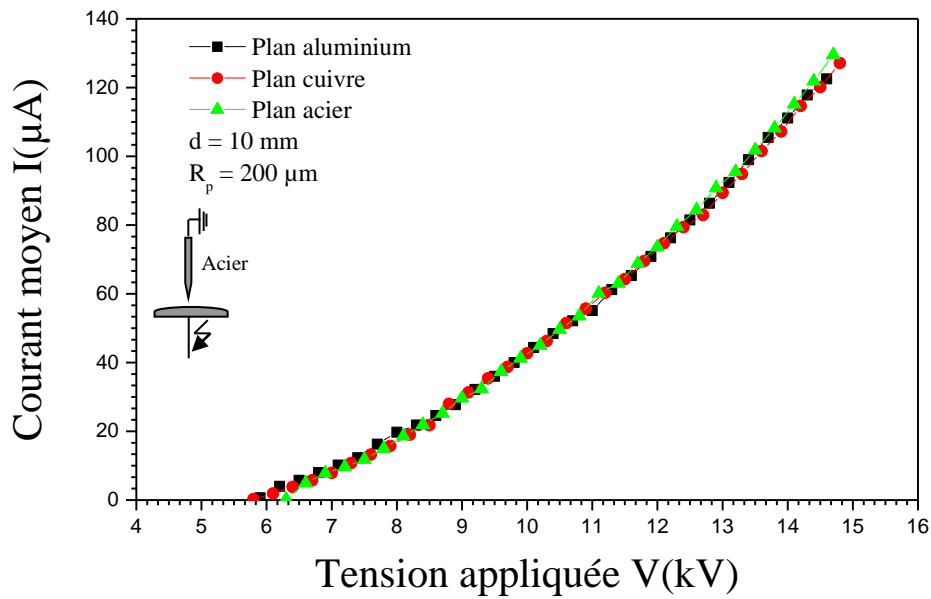


Figure III.21 Caractéristique I-V d'une décharge couronne négative pour une pointe en acier et différents matériaux du plan.

III.3.7.2 En polarité positive de la pointe

En polarité positive de la pointe, la figure III.22 montre l'évolution du courant moyen avec la tension appliquée pour des pointes en cuivre, en aluminium, en bronze et en acier, pour une distance inter-électrodes de 10 mm et pour l'électrode plane en acier.

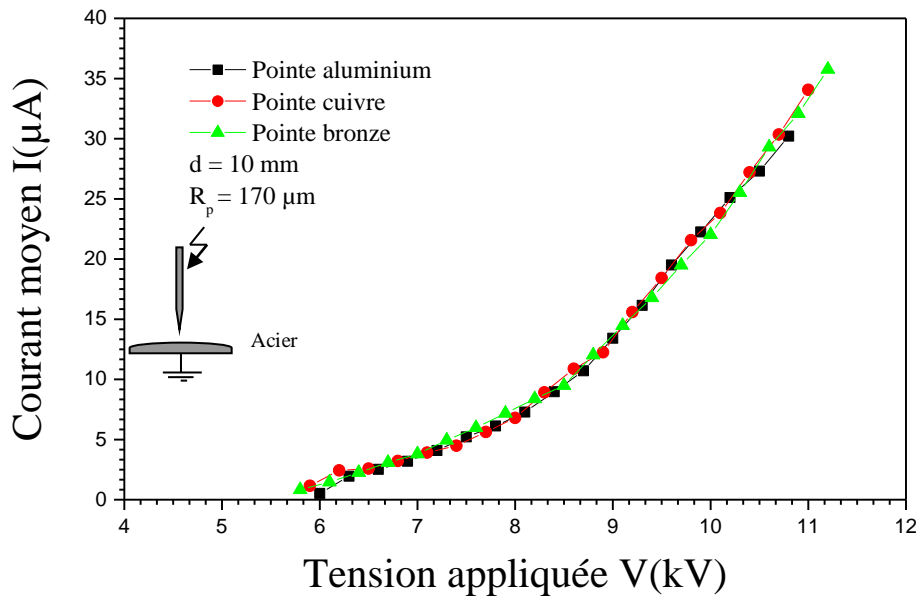


Figure III.22 Caractéristique I-V d'une décharge couronne positive pour différents matériaux des pointes et un plan en acier.

Dans ce cas, on voit clairement que le matériau de la pointe n'a pratiquement pas d'effet sur la caractéristique courant-tension en régime de décharge couronne.

Sur la figure III.23, nous avons utilisé une pointe en acier et des plans en cuivre, en aluminium et en acier. Un écart important est visible sur les caractéristiques courant-tension. Le matériau de l'électrode plane influe visiblement sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne positive.

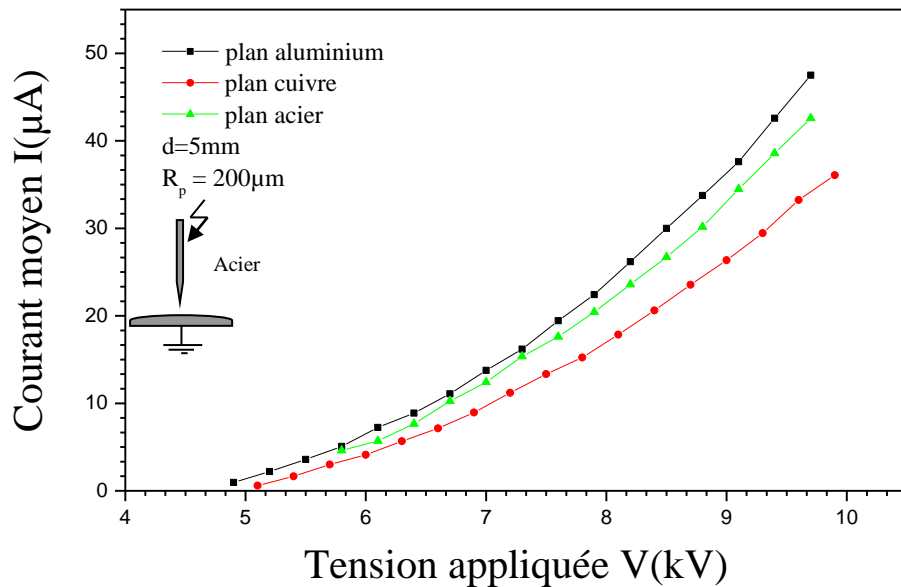


Figure III.23 Caractéristique I-V d'une décharge couronne positive pour différents matériaux du plan et une pointe en acier.

En résumé, selon la polarité de la tension appliquée, l'effet du matériau est localisé à la cathode. Nous donnerons plus de détails sur ce paramètre au chapitre qui va suivre.

III.4 Conclusion

Ce chapitre est consacré à l'étude de la décharge couronne en géométrie pointe plan sous tension continue. Nous avons réalisé la caractérisation électrique de la décharge couronne en fonction des paramètres géométriques tels que la distance inter-électrodes et le rayon de courbure des pointes. Pour les paramètres électriques, nous avons montré l'effet de la polarité de la tension appliquée sur le seuil d'initiation de la décharge couronne sa caractéristique courant-tension.

Une partie du travail est consacrée à l'influence de la pression ainsi que le matériau constituant les électrodes. Il en résulte deux principaux résultats :

- Pour dimensionner un réacteur à décharge couronne pointe-plan, selon la polarité de la tension utilisée, le matériau constituant la cathode le plus indiqué est l'aluminium ou un matériau ayant un travail de sortie des électrons plus faible ;
- Pour un éventuel traitement de surface par exemple, travailler à des pressions plus faibles que la pression atmosphérique permet d'avoir des courants assez importants pour des tensions appliquées réduites. Le problème qui se pose est de trouver un tube à décharge adapté.

Chapitre IV

Etude électrique d'un réacteur à décharge couronne pointe-plan à la pression atmosphérique

" La science consiste à passer d'un étonnement à un autre "
Aristote

Chapitre IV

Etude électrique d'un réacteur à décharge couronne pointe-plan à la pression atmosphérique

IV.1 Introduction

Le présent chapitre est une suite logique à nos précédents travaux dans lesquels nous avons étudié l'influence du matériau de l'électrode active sur la décharge couronne. L'étude comparative entre trois matériaux d'électrodes (acier, cuivre et aluminium) nous a permis de constater que le courant de décharge avec des électrodes en acier est instable [Me-4]. Pour cela, nous ne considérons dans ce chapitre que les électrodes en cuivre et en aluminium. Nous allons donc nous intéresser à la décharge couronne, en polarité négative de la pointe, avec des électrodes pointe-plan en aluminium ou en cuivre.

IV.2 Dispositif expérimental et protocole d'essais

Le dispositif expérimental présenté sur la figure IV.1 consiste en un système pointe-plan où les deux électrodes sont fabriquées à partir du même métal soit l'aluminium soit le cuivre. Etant donné que la source de haute tension dont nous disposons est à polarité positive, la décharge couronne en polarité négative est obtenue en portant le plan à la haute tension. Les différentes mesures ont été effectuées avec un oscilloscope numérique. Les signaux sont transférés à un μ Ordinateur via une RS 232, en utilisant un logiciel dédié fourni par la même firme. Le dispositif expérimental utilisé est celui donné à la figure III.2 (Page 37).

La représentation schématique des parties essentielles du dispositif expérimental est donnée sur la figure IV.1.

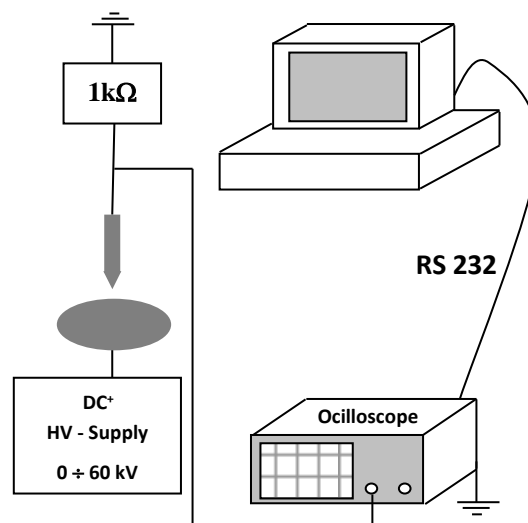


Figure IV.1 Représentation schématique du dispositif expérimental.

Les électrodes utilisées ont un angle d'ouverture de 15° ou 30° correspondant respectivement à des rayons de courbure de $100\ \mu\text{m}$ et $200\ \mu\text{m}$. La figure IV.2 donne le profil de ces électrodes.

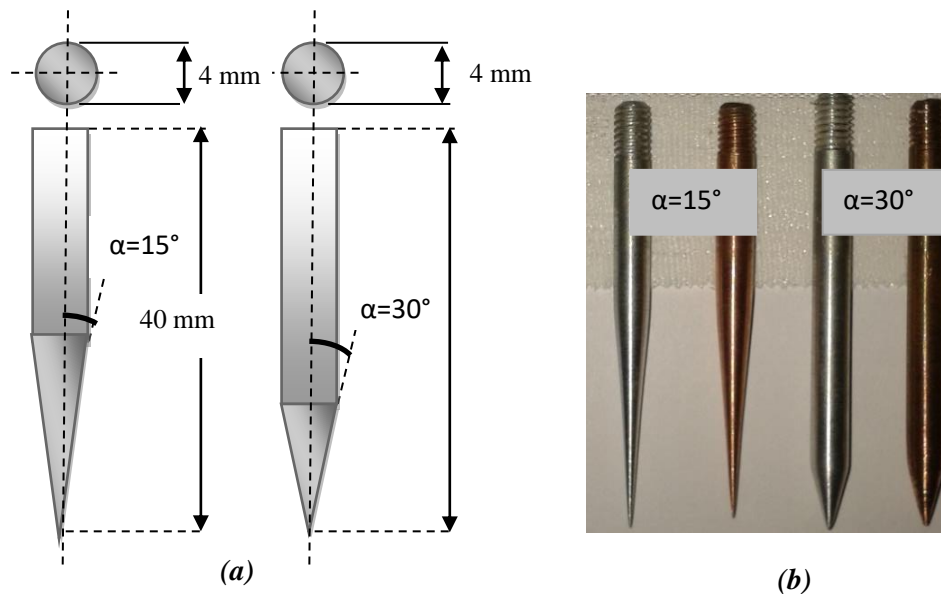


Figure IV.2 Pointes utilisées (a) : Forme et dimensions des pointes utilisées (b) : Photographie des pointes (aluminium et cuivre) avec les deux angles d'ouverture de 15° et 30° .

Les essais se sont déroulés avec un intervalle d'air de 10 mm et dans les conditions atmosphériques moyennes suivantes :

- Température ambiante : 25°C ,
- Pression atmosphérique : 1007 hPa,
- Humidité relative : environ 47 %.

Les électrodes planes consistent en des disques à bords arrondis de 10 cm de diamètre usinés selon le profil de Rogowsky, la distance inter-électrodes est fixée à 10 mm.

Trois pointes de chaque matériau ont été utilisées et deux essais ont été réalisés avec chaque pointe. Les valeurs des courants obtenus avec ces pointes sont reproductibles et la différence entre elles se situe à la deuxième décimale. Pour une meilleure exactitude, la moyenne des six valeurs du courant a été prise en considération pour le tracé des caractéristiques courant-tension. A la fin de chaque essai, le rayon de courbure des électrodes est contrôlé.

IV.3. Effet du matériau de l'électrode active

Les caractéristiques courant-tension obtenues pour les deux matériaux de l'électrode active sont données sur la figure IV.3.

La figure IV.3 montre que les courants associés aux électrodes actives en aluminium sont plus élevés que ceux associés aux électrodes en cuivre. De plus, on peut souligner que les intensités

des courants sont inversement proportionnelles au rayon de courbure de la pointe. La figure montre clairement que la tension seuil d'apparition de la décharge couronne est plus faible dans le cas des électrodes en aluminium et ceci est valable pour les deux rayons de courbure de la pointe.

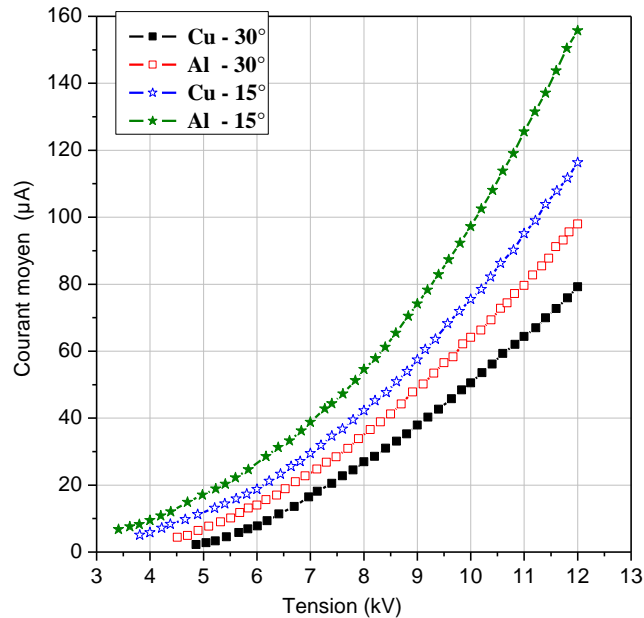


Figure IV.3 Caractéristiques courant-tension : pointes en aluminium et en cuivre avec les deux angles d'ouverture de 15° et 30°.

IV.4 Forme d'onde du courant

Les figures IV.4 à IV.7 illustrent l'effet du matériau de l'électrode active sur la forme des courants. Ces courants ont été obtenus pour des tensions allant de 4 à 6 kV pour un rayon de courbure de 100 µm et de 5 à 7 kV pour un rayon de courbure de 200 µm.

Le choix des tensions pour les oscillogrammes est dicté par la tension d'apparition de l'effet couronne pour chaque type d'électrode. Pour les pointes ayant un rayon de courbure de 200 µm, la tension seuil est de 4.86 kV pour l'électrode en cuivre est 4.51 kV pour l'électrode en aluminium. Ainsi, la première tension associée au premier oscillogramme est de 5 kV. Concernant les pointes à faible rayon de courbure (100 µm), la tension d'apparition de l'effet couronne est de 3.81 kV pour les électrodes en cuivre et 3.41 kV pour celles en aluminium. Dans ce cas, la première tension figurant sur les oscillogrammes est de 4 kV.

Toutes ces figures (IV.4 à IV.7) montrent que le courant est constitué d'impulsions dont le nombre augmente avec le niveau de tension.

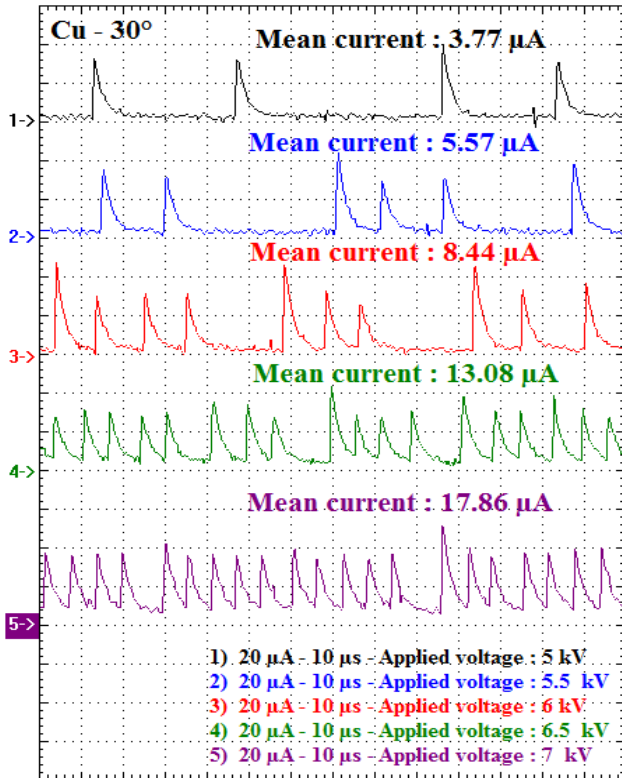


Figure IV.4 Forme du courant pour une électrode en cuivre ($\alpha = 30^\circ$, $R_p=200 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).

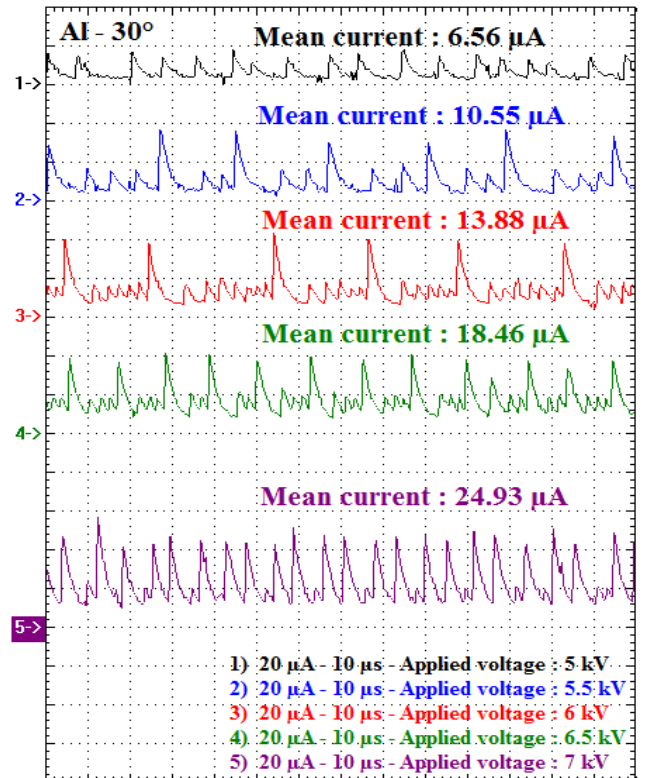


Figure IV.5 Forme du courant pour une électrode en aluminium ($\alpha = 30^\circ$, $R_p=200 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).

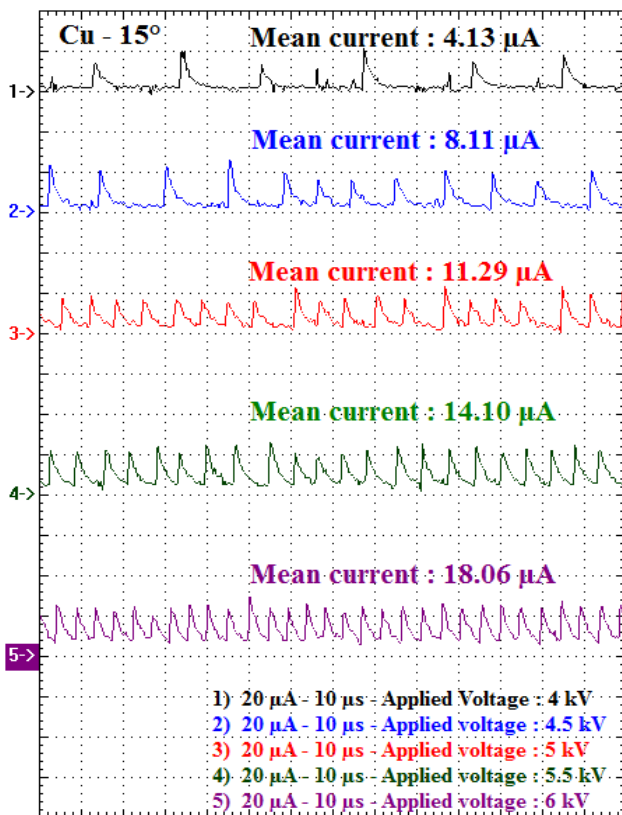


Figure IV.6 Forme du courant pour une électrode en cuivre ($\alpha = 15^\circ$, $R_p=100 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).

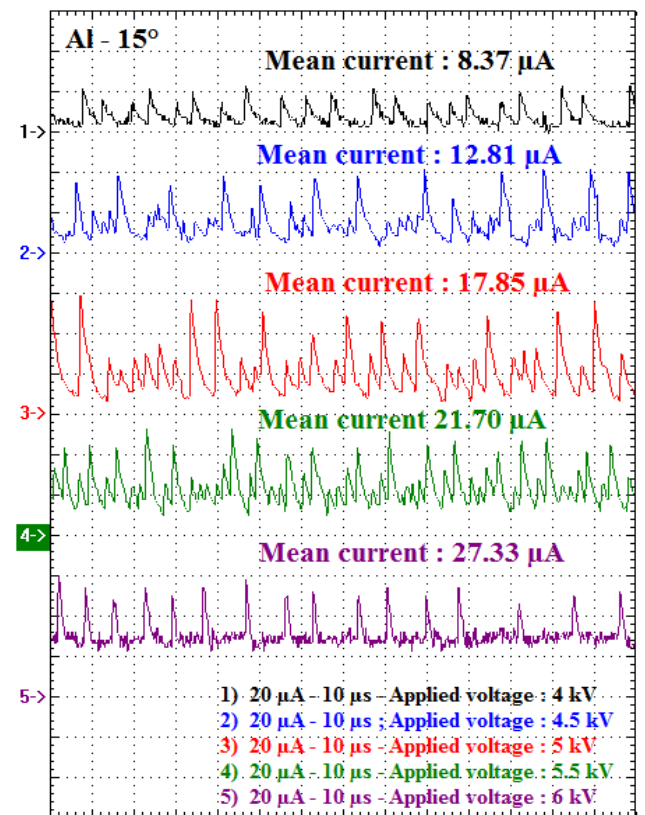


Figure IV.7 Forme du courant pour une électrode en aluminium ($\alpha = 15^\circ$, $R_p=100 \mu\text{m}$ et $d = 10 \text{ mm}$).

IV.5 Discussion des résultats

IV.5.1 Caractéristiques courant-tension

Dans la littérature, comme nous l'avons déjà signalé précédemment, pour une configuration pointe-plan, le courant de décharge I augmente avec la tension appliquée V de façon parabolique suivant l'expression [Lo-1, Ak-3] :

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

V_0 étant la tension d'initiation ou seuil d'ionisation à partir duquel la décharge couronne est initiée. La constante k dépend de la géométrie de la décharge et de la nature du gaz environnant. La tension V_0 est celle permettant une avalanche d'électrons en régime permanent auto-entretenu et cela se produit lorsque :

$$\int_0^d (\alpha - \eta) dx \approx Ln \frac{1}{\gamma} \quad (\text{IV.3})$$

où α et η sont des coefficients liés aux processus d'ionisation et d'attachement, d est la dimension de la région proche de l'électrode active qui satisfait la condition $\alpha > \eta$ et γ est le coefficient de génération d'électrons secondaires par divers processus (y compris la photo-ionisation volumique, la photoémission de surface et l'émission de surface causée par des ions positifs et des particules métastables) [Ku-1].

Nous considérons que l'humidité relative, la température et la pression atmosphérique, restent constantes pendant nos essais expérimentaux. Ainsi, pour une distance inter-électrodes et un rayon de courbure de la pointe donnés, nous pouvons adopter la valeur de la mobilité des porteurs de charge de la littérature. La mobilité ionique dans l'air, aux conditions atmosphériques est : $\mu = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ (V}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ [Be-3]. Ainsi, nous pouvons transformer l'équation (IV.1) comme suit :

$$I = a \cdot \mu \cdot V(V - V_0) \quad (\text{IV.4})$$

Cette formule a déjà été proposée par Goldman [Go-2]. La détermination du coefficient a sous Matlab est le résultat de l'utilisation de l'équation (IV.4) ainsi que des données expérimentales. Nous donnons pour la mobilité sa valeur numérique et pour V_0 sa valeur déterminée expérimentalement. Dans le tableau IV.1, nous donnons les résultats obtenus du coefficient a pour les électrodes en cuivre et en aluminium.

Tableau IV.1 Paramètres de la décharge couronne de l'équation IV.3 pour les électrodes en cuivre et en aluminium.

Matériau d'électrode	Tension seuil expérimentale V_0 (kV)	a
Cuivre 30°	4.86	5359
Aluminium 30°	4.51	6328
Cuivre 15°	3.81	6738
Aluminium 15°	3.41	8331

Les valeurs du coefficient α sont intéressantes car elles peuvent caractériser les phénomènes de décharge couronne, pour une géométrie d'électrodes donnée. Dans cette étude, ce facteur est étroitement lié au matériau de l'électrode active. D'après le tableau IV.1, le coefficient α associé à l'aluminium est supérieur à celui associé au cuivre, pour les deux rayons de courbure. Ce résultat est en accord avec le travail de sortie de l'aluminium qui est plus petit que celui du cuivre [Li-2] (voir annexe II).

IV.5.2 Formes du courant

Pour les deux matériaux et les deux rayons de courbure de la pointe, le courant est constitué d'impulsions de Trichel que l'on peut considérer comme régulières, augmentant avec la tension. Le courant moyen augmente également avec la tension comme le montrent les figures IV.4 à IV.7. Une comparaison de ces figures montre que les impulsions du courant ont tendance à être plus régulières dans le cas de l'aluminium que dans le cas du cuivre pour les deux rayons de courbure.

Pour mieux comprendre l'effet du matériau ainsi que celui du rayon de courbure de la pointe, nous avons tracé les caractéristiques I-V correspondant aux différents oscillogrammes (figure IV.8).

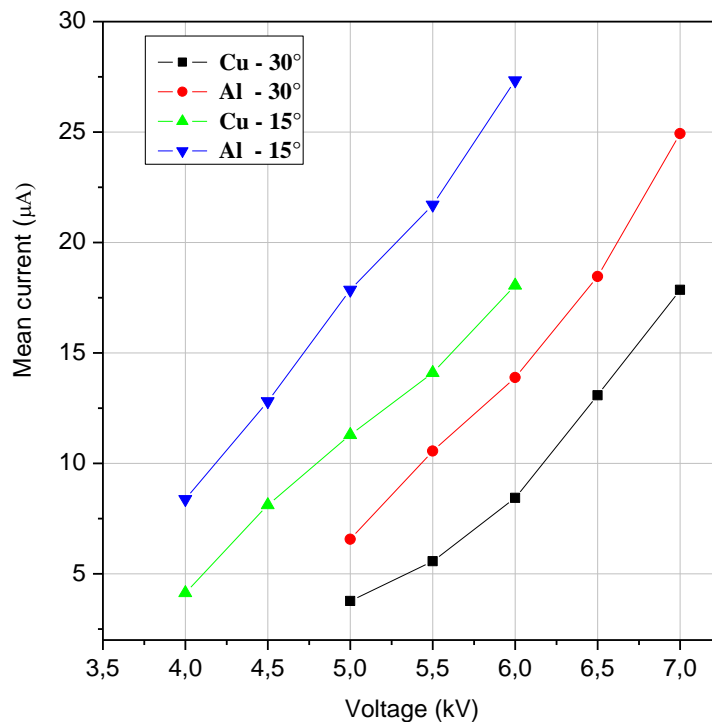


Figure IV.8 Caractéristiques courant-tension correspondant aux figures IV.5 à IV.8.

La figure IV.8 montre clairement que les courants sont plus élevés pour les pointes en aluminium que pour celles en cuivre. Dans la plage des tensions considérées sur la figure, la caractéristique courant-tension peut être approchée par l'équation [ME-6] :

$$I = bV^n \quad (\text{IV.5})$$

Où les coefficients b et n sont déterminés en approximant les données expérimentales sous Matlab.

Les valeurs des coefficients b et n pour les deux matériaux et les rayons de courbure de la pointe sont consignées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 Paramètres du courant de l'équation IV.4 pour les électrodes en cuivre et en aluminium.

Matériau d'électrode	b	n
Cuivre 30°	0.001761	4.745
Aluminium 30°	0.01602	3.775
Cuivre 15°	0.07676	3.057
Aluminium 15°	0.2184	2.701

L'exposant n change avec le rayon de courbure et le matériau de la pointe. Cet exposant est plus petit pour les électrodes en aluminium que pour celles en cuivre.

Dans cette partie du travail, nous avons clairement établi que le courant est plus stable pour les électrodes en aluminium que pour celles en cuivre. De plus, nos résultats ont révélé que pour une tension donnée, la valeur moyenne du courant est plus importante pour les électrodes en aluminium que pour celles en cuivre. D'un autre côté, l'érosion de la pointe en cuivre dans la décharge couronne négative a été étudiée dans une configuration d'électrodes pointe-plan, dans l'air à pression atmosphérique. L'étude a révélé que le cuivre est affecté par une formation de cratères de taille nanométrique sur la surface de la cathode en raison des processus d'érosion [Pe-3]. Par conséquent, le cuivre doit être évité lors de la conception des électrodes pour les réacteurs à décharge couronne.

La stabilité de la décharge couronne avec des électrodes en aluminium, ajoutée aux bonnes caractéristiques électriques et au faible coût de l'aluminium, [Mo-1] font de lui un matériau très intéressant pour la conception des électrodes actives dans les réacteurs à plasma à décharge couronne.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude expérimentale d'une décharge couronne en géométrie pointe-plan, en polarité négative dans l'air à pression atmosphérique, est présentée. Les effets du matériau de l'électrode active et de son rayon de courbure sur les caractéristiques de la décharge couronne sont étudiés. Deux matériaux différents, l'aluminium et le cuivre, sont utilisés pour réaliser des électrodes

actives. Les caractéristiques courant-tension montrent une plus grande intensité du courant pour les électrodes en aluminium par rapport à celle du courant associé aux électrodes en cuivre. D'un autre côté, le courant est plus important avec la pointe ayant le plus petit rayon de courbure. Les caractéristiques courant-tension ont une forme bien approchée par une équation parabolique. Les impulsions Trichel sont plus régulières pour les électrodes en aluminium que pour celles en cuivre. Finalement, l'utilisation d'électrodes en aluminium pour avoir une décharge régulière avec un fort courant serait préférable pour réaliser un réacteur à plasma froid. L'étude de la décharge couronne dans une géométrie multi pointes-plan est une suite logique à ce chapitre et sera traitée dans le chapitre V.

Chapitre V

Etude de la décharge couronne en géométrie multi pointes – plan dans l'air sous tension continue

"La philosophie est la science des problèmes résolus"
Léon Brunschvicg

Chapitre V

Etude de la décharge couronne multi pointes-plan dans l'air sous tension continue

V.1 Introduction

Dans le domaine des décharges couronne, énormément de travaux ont été réalisés vu l'intérêt porté à celle-ci pour diverses applications et ce dans la configuration pointe-plan pour la plupart. Cette configuration est utilisée beaucoup plus dans la production d'ozone ou pour les hauts parleurs plasma sous tension continue [Du-1]. Ces dernières années, certains travaux sont dédiés pour des applications environnementales, au traitement de surface des plaques diélectriques ou à la séparation électrostatique de mélanges granulaires [Be-2]. En géométrie multi pointes-plan, on trouve peu de références bibliographiques dans la littérature [Be-1, Ki-2, Mr-2, Su-1].

Dans ce chapitre, une étude expérimentale sous tension continue en géométrie multi-pointes-plan a été menée en vue d'explorer les limites des techniques de décharge couronne et de mettre en évidence la meilleure disposition des pointes qui donne le plus grand courant.

V.2 Dispositif expérimental et déroulement des essais

L'utilisation du système « multi pointes-plan » présente l'avantage de permettre le contrôle de la répartition des décharges le long de leur écoulement. Cependant, plusieurs formes de configurations multi-pointes sont possibles : en brosse sur une surface, en alignement de dents de scie, en forme de hérisson, etc.... De plus, on peut utiliser certains paramètres de réglage au niveau de cette configuration à savoir la densité des pointes (nombre et espace entre les pointes), leur positionnement en disposition circulaire ou en peigne ainsi que leur rayon de courbure.

Pour l'ensemble de nos essais, nous avons utilisé le dispositif expérimental de la figure V.1. qui comprend le tube à décharge, une pompe à vide et des appareils de mesure. Le système d'électrodes utilisé est en multi pointes-plan. Le système multi pointes consiste en un disque circulaire avec une pointe centrale. Autour de cette dernière (Figure V.2.a), nous avons percé et fileté les trous correspondant aux dimensions des pointes. Le nombre maximum de pointes périphériques est de 8 et nous pouvons les disposer sur quatre rayons. Sur la figure V.2b, nous donnons un exemple de système multi pointes avec une pointe centrale et les 8 pointes périphériques sur le plus grand rayon R de 4 cm. Pour la disposition en peigne (Figure V.2c), nous n'avons qu'une seule configuration, à savoir 9 pointes distantes de 1 cm l'une de l'autre. Les pointes ainsi que le plan, qui consiste en un disque de 10 cm de diamètre, sont en acier.



Figure V.1 Dispositif expérimental utilisé pour caractériser la décharge couronne multi pointes-plan.



Figure V.2 Système multi-pointes utilisé : (a) Distance R des pointes par rapport à la pointe centrale, avec $R_1 = 1\text{ cm}$, $R_2 = 2\text{ cm}$, $R_3 = 3\text{ cm}$, $R_4 = 4\text{ cm}$. (b) disposition circulaire pour $R = R_4 = 4\text{ cm}$, (c) disposition en peigne.

Pour une disposition circulaire donnée ($R = 1, 2, 3$ ou 4 cm), nous avons la possibilité de faire varier le nombre de pointes de 1 à 9. Nous avons réalisé des essais préliminaires dans lesquels nous avons 9 courbes différentes. La logique, nous a poussé à réduire le nombre d'essais à 4 cas, à savoir : la pointe centrale, 3, 5 et 9 pointes et ce pour avoir à chaque fois une symétrie dans la disposition des pointes.

V.3 Décharge couronne positive multi pointes-plan

En polarité positive des pointes, nous avons réalisé quelques tests pour mettre en évidence l'effet du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne. Comme signalé précédemment, la mesure du courant de décharge couronne positive est aisée mais le passage à l'arc est aléatoire. Les conditions des essais : $t = 21.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 1000 \text{ hPa}$, $H = 51.2\%$

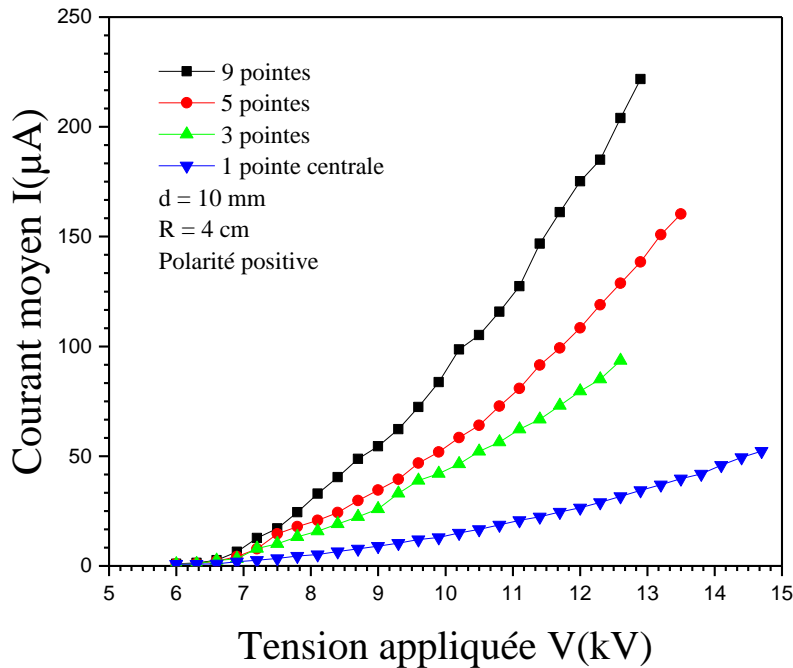


Figure V.3 Caractéristique I-V de la décharge couronne positive multi pointes-plan ($R = 3\text{cm}$)

Les figures V.3 et V.4 illustrent l'influence du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension de la décharge pour une distance inter-électrodes donnée (1 cm dans ce cas). 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 [Ab-2].

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.

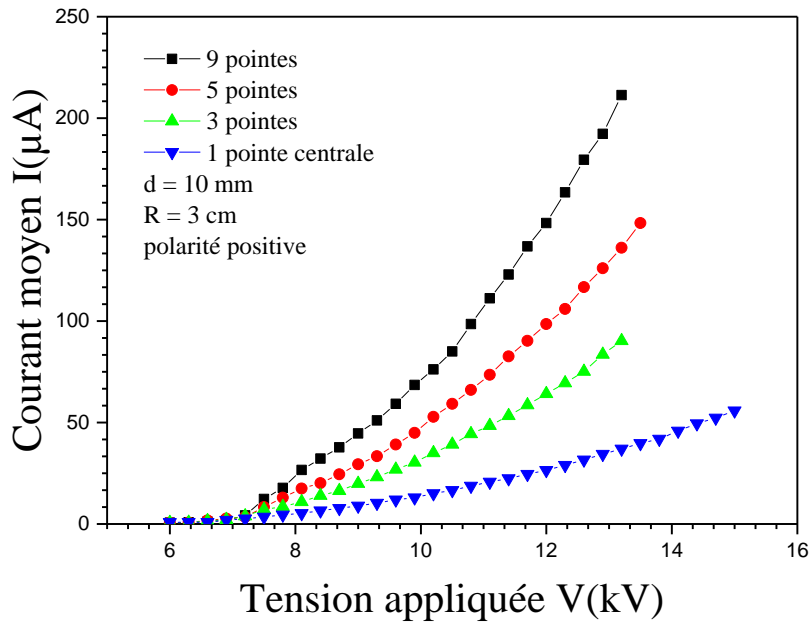


Figure V.4 Caractéristique I-V de la décharge couronne positive multi pointes-plan (R = 4cm)

Nous donnons sur le tableau V.1 un exemple pour une tension appliquée $V = 12 \text{ kV}$. Nous remarquons que pour un espacement de 3 cm des pointes par rapport à la pointe centrale, le courant passe d'environ $28 \mu\text{A}$ pour une pointe seule à $165 \mu\text{A}$ pour 9 pointes, le courant est donc multiplié avec un rapport d'environ 6. Alors que pour l'espacement de 4 cm, il passe à $186 \mu\text{A}$, donc encore plus que pour l'espacement de 3 cm.

Tableau V.1 Courant mesuré en fonction du nombre de pointes pour $V = 12 \text{ kV}$

Nombre de pointes	1	3	5	9
Courant mesuré pour R = 3 cm (μA)	28	65	105	165
Courant mesuré pour R = 4 cm (μA)	28	84	122	186

V.4 Décharge couronne négative multi pointes-plan

En polarité négative, nous avons réalisé un ensemble d'essais pour mettre en évidence l'effet de certains paramètres :

- Nombre de pointes comme en polarité positive,
- Distance entre la pointe centrale et les pointes périphériques.
- Pression.

Les conditions d'essais sont :

Température : 21.3°C , pression : 1000 hPa, humidité relative : 51.2 %

V.4-1 Effet du nombre de pointes sur la décharge couronne négative (disposition circulaire)

Nous avons réalisé des essais pour mettre en évidence l'effet du nombre de pointes sur la caractéristique courant-tension pour une distance inter-électrodes de 1 cm et une distance R entre la pointe centrale et les pointes allant de 2 à 4 cm.

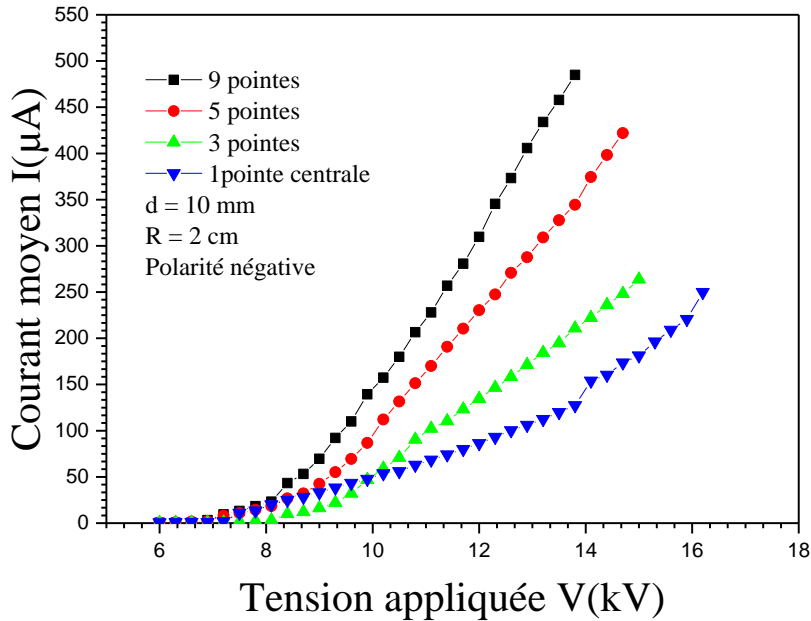


Figure V.5 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (R = 2cm)

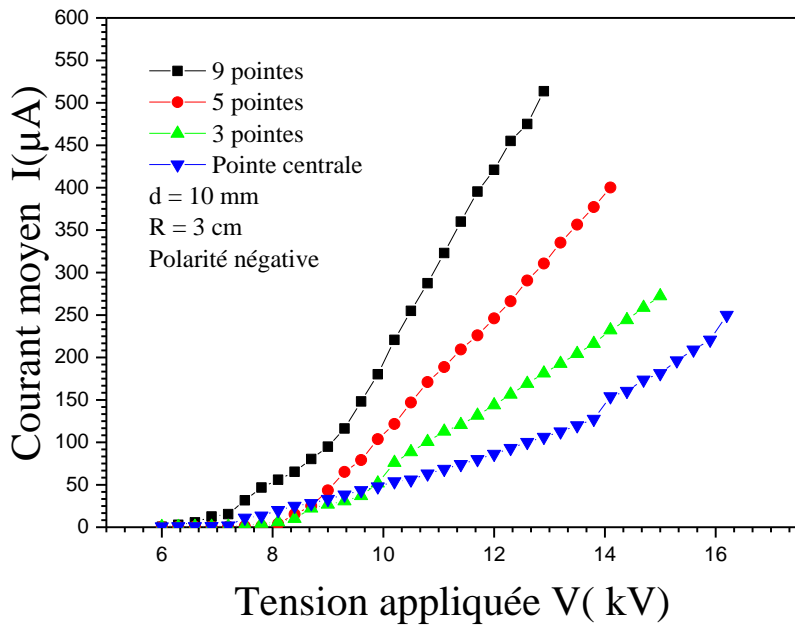


Figure V.6 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (R = 3cm)

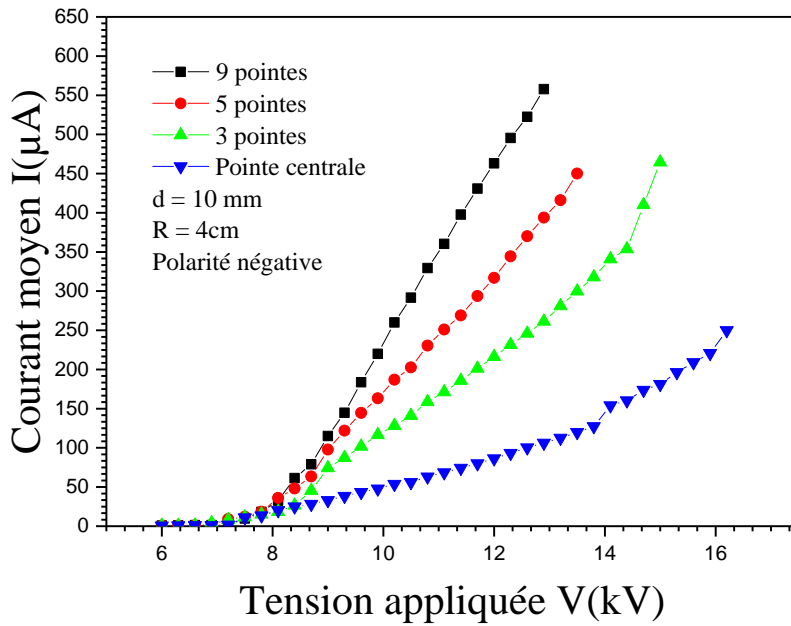


Figure V.7 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (R = 4 cm)

Les figures V.5 à V.7 illustrent l'évolution du courant de décharge couronne en fonction de la tension appliquée. Comme pour la décharge couronne positive, on voit clairement que le courant augmente avec l'augmentation du nombre de pointes pour une tension appliquée donnée.

V.4-2 Effet de l'espacement des pointes sur la décharge couronne négative

Les figures V.8 et V.9 représentent les résultats expérimentaux pour les différentes distances R entre la pointe centrale et les pointes périphériques (R allant de 1cm à 4 cm) et une distance inter-électrodes de 1cm. Le nombre de pointes est de 5 ou 9. Pour une distance R donnée, lorsque la tension appliquée augmente, le courant moyen de la décharge couronne augmente. Cela est dû au renforcement du champ électrique, ce qui entraîne une augmentation du courant de décharge. Le tableau V.2 nous permet de bien appréhender l'effet de la distance R.

Tableau V.2 Effet de l'espacement des pointes pour V=12 kV

Espacement (cm)	1	2	3	4
Courant mesuré pour 5 pointes (µA)	187	213	260	350
Courant mesuré pour 9 pointes (µA)	300	336	377	480

En effet, nous voyons bien que plus distance R augmente, plus le courant augmente.

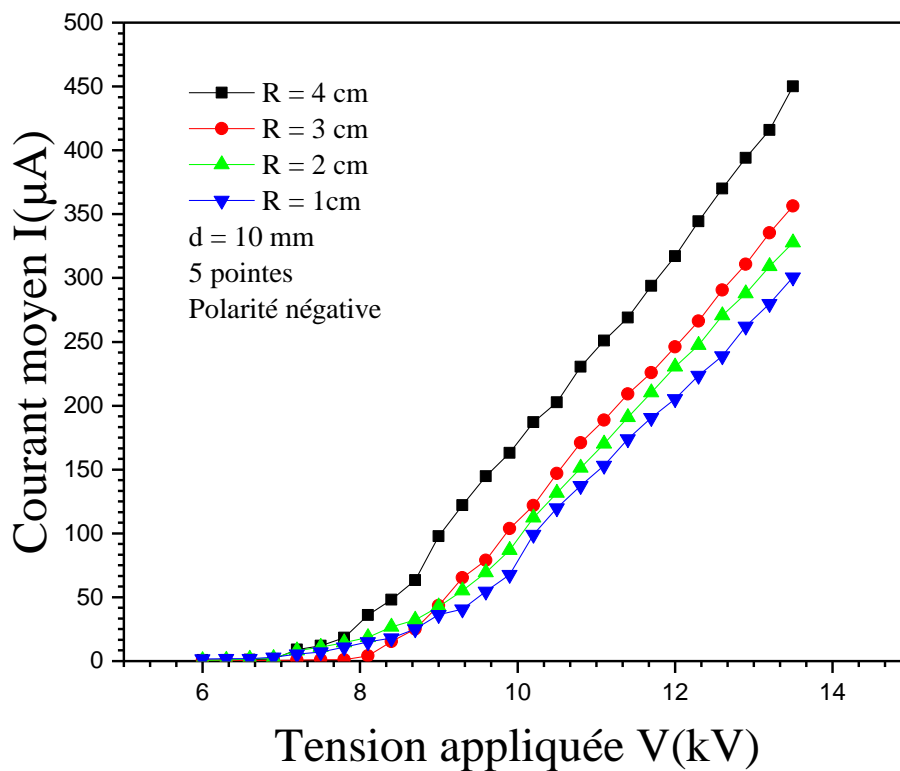


Figure V.8 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (5 pointes)

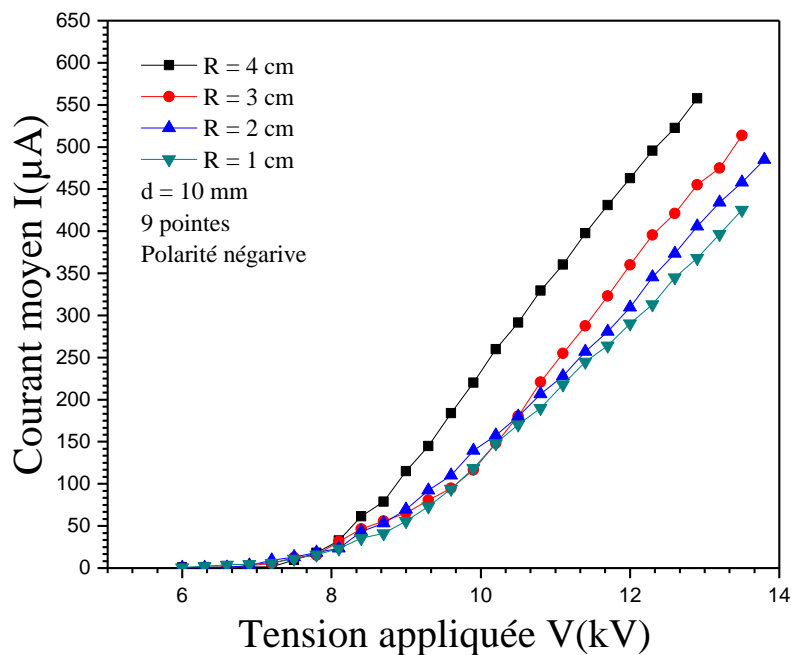


Figure V.9 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (9 pointes)

V.5 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 9 points (configuration qui nous donne le maximum de courant). Les essais ont été réalisés dans les deux dispositions en peigne et circulaire. Les conditions atmosphériques des essais sont :

Température : 22.3°C, pression : 1000 hPa, humidité relative : 50.5 %

V.5.1 Effet de la pression sur la disposition des pointes

Pour la disposition en peigne, les 9 points sont alignées et séparées de 1 cm l'une de l'autre et pour la disposition circulaire, les pointes sont distantes de 1 cm par rapport à la pointe centrale.

Les figures V.10 et V.11 illustrent l'évolution du courant de la décharge couronne en fonction de la tension appliquée pour différentes pressions. 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.

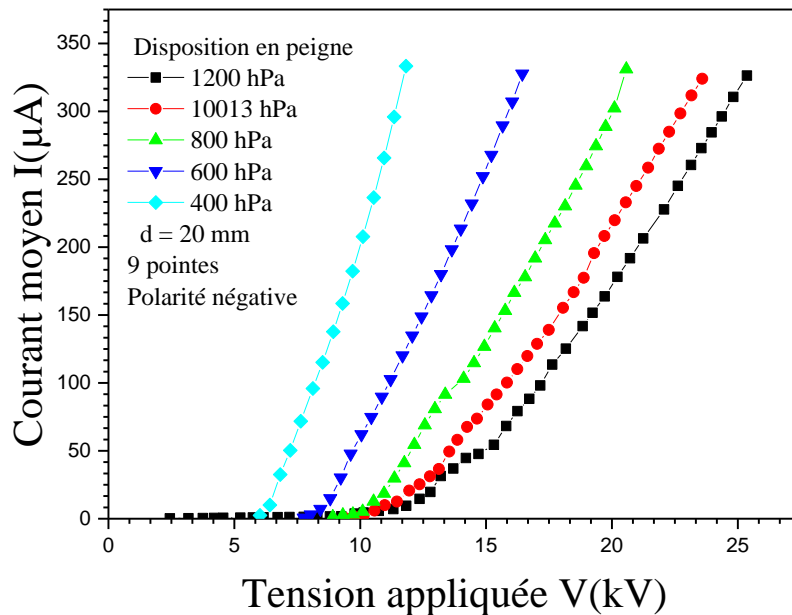


Figure V.10 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative Multi pointes-plan pour la disposition en peigne

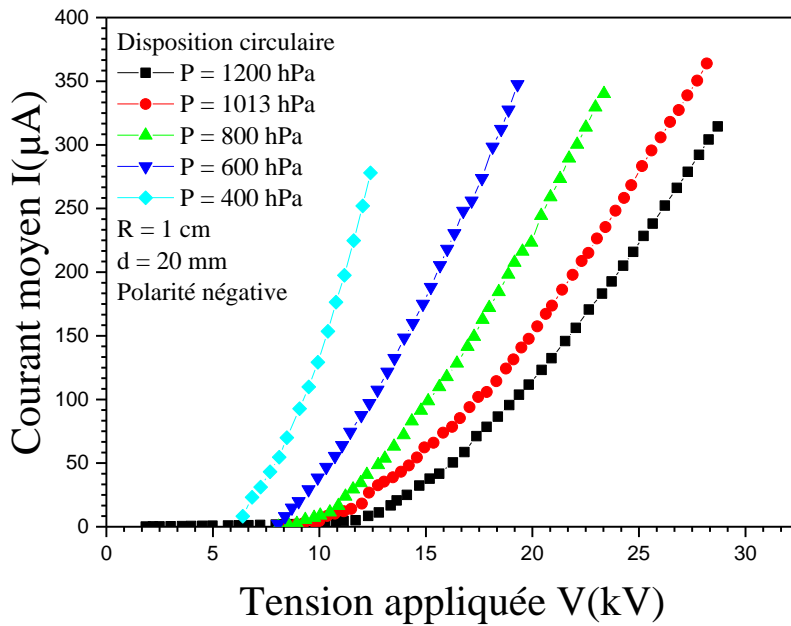


Figure V.11 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition circulaire (R = 1cm)

Une comparaison entre les dispositions circulaire et en peigne avec 9 pointes est mise en évidence sur la figure V.12. A partir d'une tension de 14 kV, la caractéristique relative à la disposition en peigne s'écarte de celle correspondant la disposition circulaire et présente des courants plus élevés.

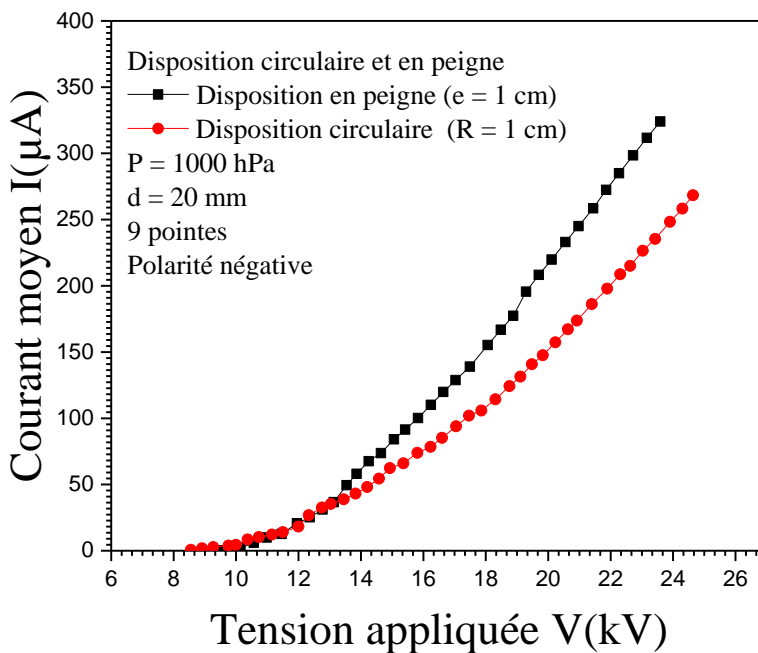


Figure V.12 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour les dispositions en peigne et circulaire

V.5.2 Effet de la pression et de la distance R entre la pointe centrale et les pointes périphériques

Pour voir l'effet de la distance R entre la pointe centrale et les pointes périphériques, nous avons utilisé 9 pointes placées sur les rayons de 1 à 4 cm. La distance inter-électrodes est de 2 cm.

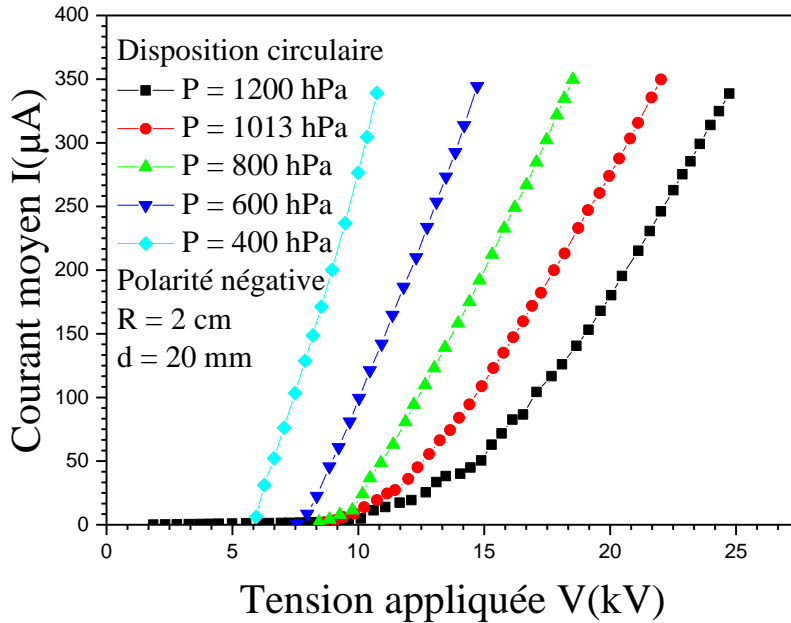


Figure V.13 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition circulaire (R = 2 cm)

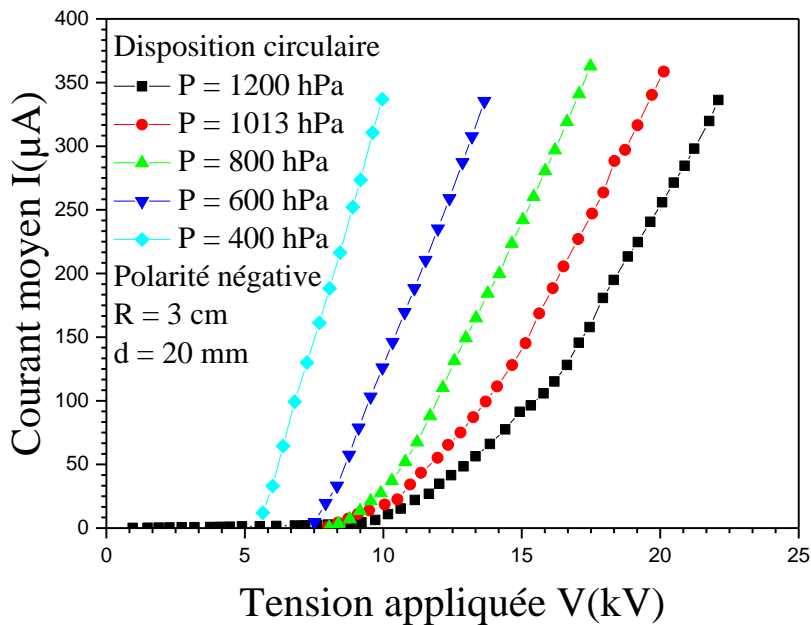


Figure V.14 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition circulaire (R = 3 cm)

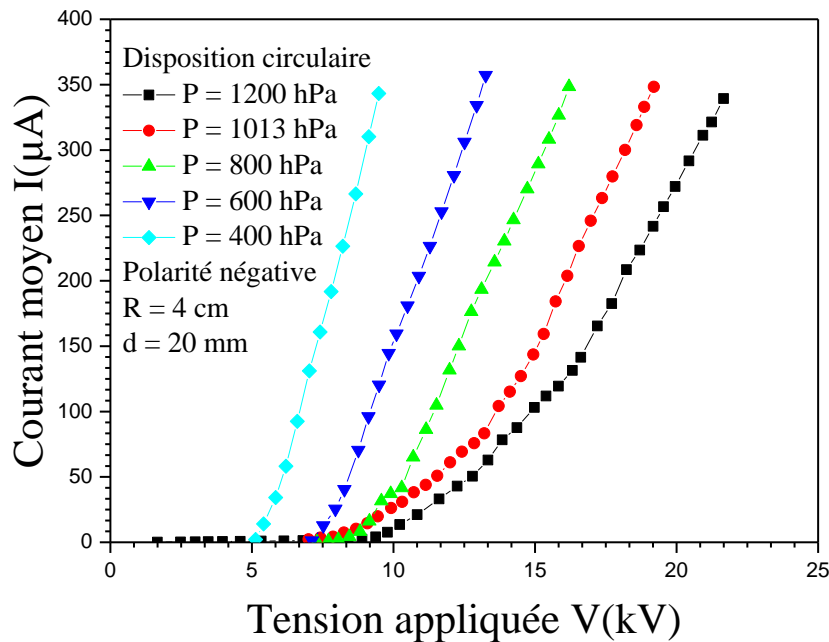


Figure V.15 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan pour la disposition circulaire ($R = 4$ cm)

Les figures V.13, V.14 et V.15 donnent les caractéristiques courant-tension pour différentes pressions et des distances R de 2 cm, 3 cm et 4 cm respectivement. En regardant ces figures ainsi que la figure V.11 qui donne les caractéristiques I-V pour une distance R de 1cm, nous remarquons que le courant de décharge augmente avec l'augmentation de la tension et ce courant diminue au fur et à mesure que la pression augmente.

V.5.3 Effet de la distance d'écartement pour une pression fixée

Les figures V.16 à V.20 montrent l'évolution du courant de décharge couronne en fonction de la tension pour différentes distances R entre la pointe centrale et les pointes périphériques et ce pour des pressions allant de 400 à 1200 hPa. Nous remarquons que pour une pression fixée, le courant augmente avec l'augmentation de la distance R , cela est valable pour $R = 1, 2$ et 3 cm. Pour la distance R de 4 cm, certes, il y a une augmentation du courant de décharge avec l'augmentation de la tension, mais cette augmentation n'est pas significative. Cela nous amène à conclure qu'au-delà de $R = 3$ cm, l'effet de la distance R influe peu, contrairement au cas où la distance inter-électrodes est de 1 cm (Figure V.9).

Ainsi, pour caractériser un réacteur à plasma multi-pointes-plan, deux paramètres sont à prendre en considération : la distance inter-électrodes d et la distance R entre la pointe centrale et les pointes périphériques.

- Pour $d = 1$ cm (Figure V.9), le courant de décharge couronne est assez important pour $R = 4$ cm.

- Pour $d = 2$ cm, le courant de décharge pour $R = 4$ cm est certes élevé mais assez proche de celui obtenu avec $R = 3$ cm.

Nous pouvons donc avancer le fait que, quand la distance inter-électrodes d dépasse une certaine valeur, l'efficacité du réacteur à plasma diminue pour les grandes distances entre la pointe centrale et la pointe périphérique.

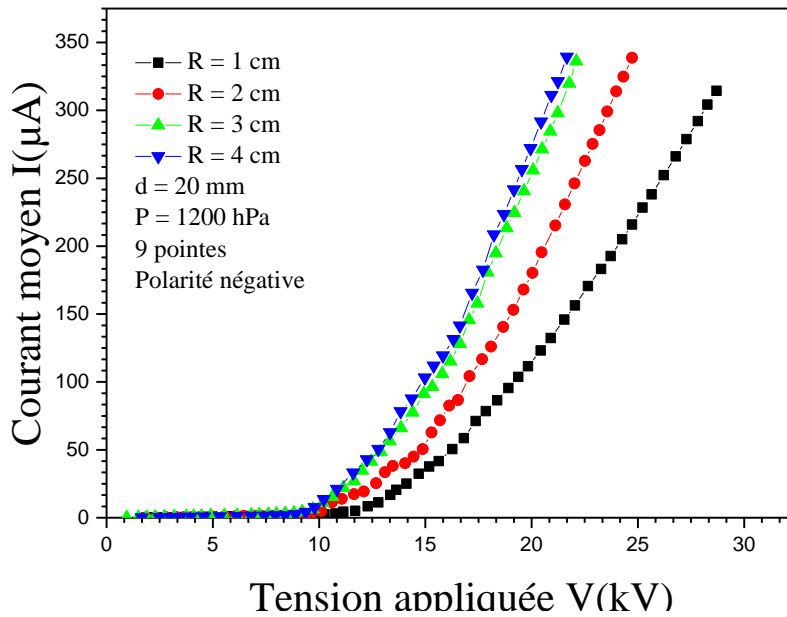


Figure V.16 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P = 1200$ hPa)

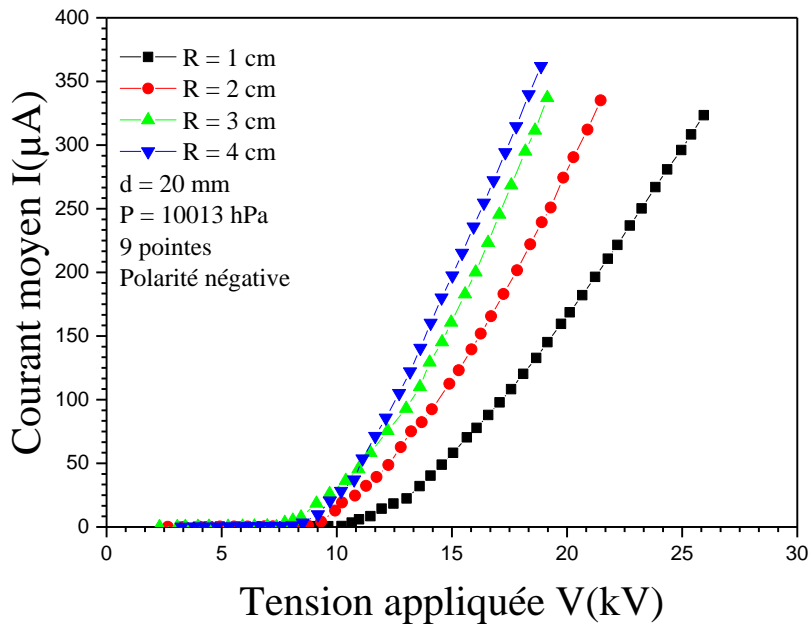


Figure V.17 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P=10013$ hPa)

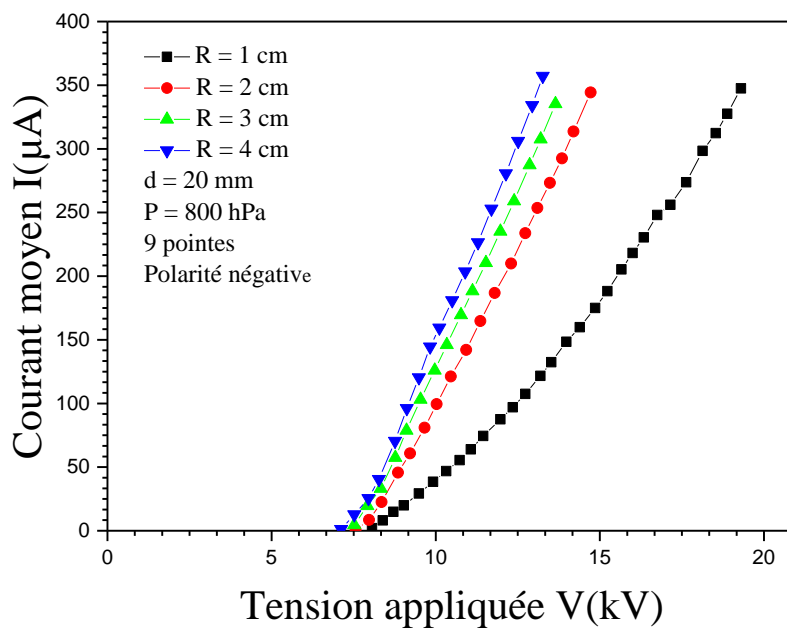


Figure V.18 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P = 800$ hPa)

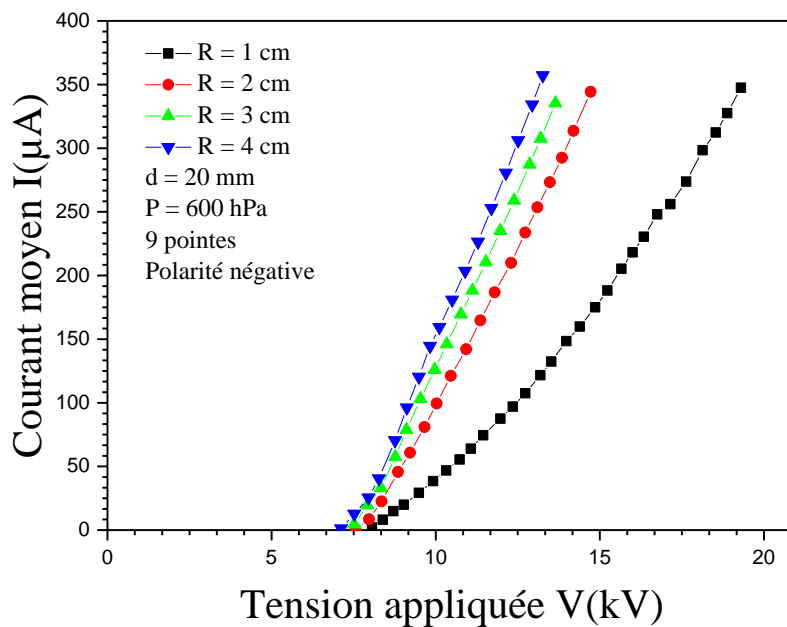


Figure V.19 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan ($P = 600$ hPa)

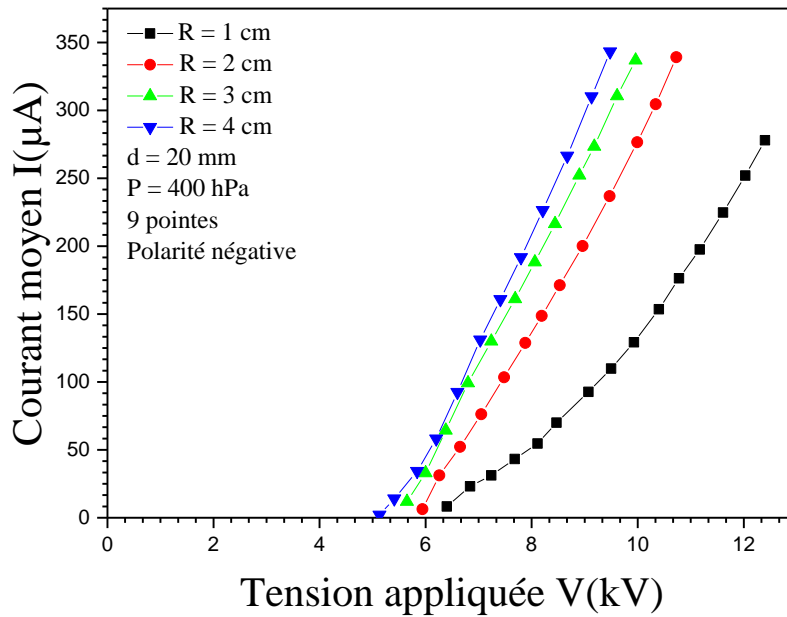


Figure V.20 Caractéristique I-V de la décharge couronne négative multi pointes-plan (P = 400 hPa)

V.5.4 Influence de la pression et de la distance entre la pointe centrale et les points périphériques

La figure IV.21 regroupe les résultats des essais réalisés en appliquant une tension fixe de 9 kV pour une distance inter-électrodes de 2 cm et en faisant varier la pression de 400 à 1000 hPa par pas de 50 hPa. La température moyenne est de 22.6°C.

Les courbes de la figure V.21 sont approximées par une exponentielle de la forme :

$$y = Ae^{-x/t} + y_0$$

Il demeure entendu que cette approximation est valable dans la gamme des pressions considérées.

Pour un écartement donné, le courant moyen diminue avec l'augmentation de la pression. Cela est dû à la diminution de l'efficacité d'ionisation des électrons pour une pression plus élevée. Ce qui conduit donc à la diminution du courant de charge d'espace dans l'intervalle inter-électrodes et c'est ce qui entraîne forcément la diminution du courant de décharge couronne.

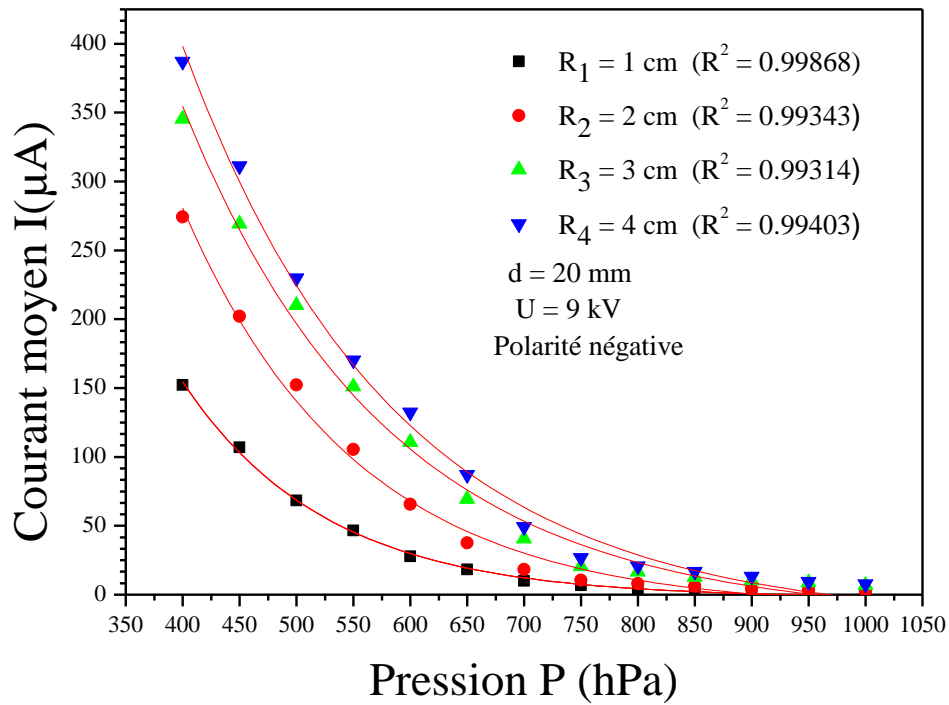


Figure V.21 Evolution du courant moyen en fonction de la pression et de la distance R entre la pointe centrale et les pointes périphériques.

V.5.5 Discussion des résultats

Pour mieux appréhender l'effet de la pression sur le courant de décharge pour les diverses dispositions des pointes périphériques, nous avons tracé les caractéristiques donnant les différentes tensions qui nous permettent de générer un courant de $100 \mu\text{A}$ pour différentes pressions. Les courbes de la figure V.22 montrent clairement que la tension de génération du courant augmente avec la pression. Par ailleurs la tension de génération de ce courant est plus basse pour une distance de 4 cm entre les pointes périphériques et la pointe centrale. Cependant, les tensions nécessaires à la génération du courant sont sensiblement proches pour des pressions se trouvant entre 400 et 600 hPa . Au-delà de cette dernière, les valeurs des tensions sont légèrement différentes, ce qui nous permet d'affirmer ce qui a été déjà dit précédemment, c'est-à-dire que la distance R de 3 cm nous donne des résultats permettant d'optimiser la configuration d'un réacteur à décharge couronne multi pointe-plan. Ainsi, pour travailler avec de basses tensions, il faudrait baisser la pression.

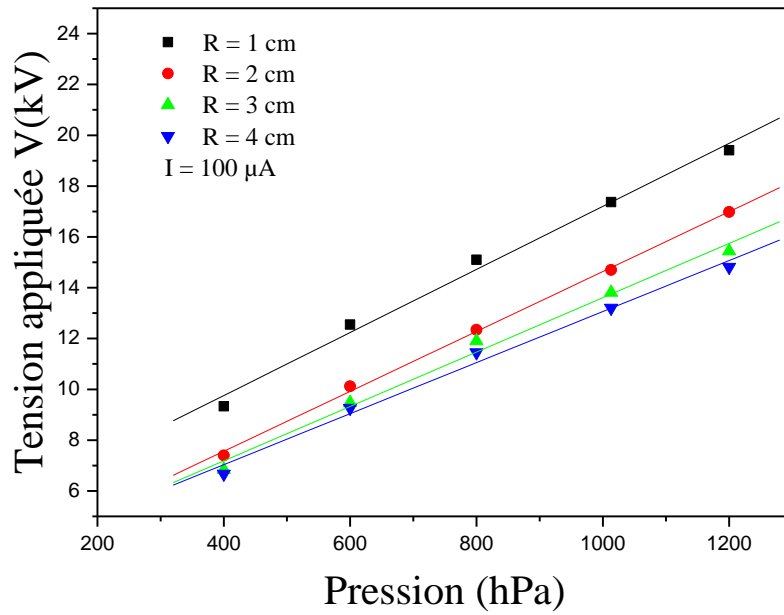


Figure V.22 Tension appliquée en fonction de la pression nécessaire à la génération d'un courant de 100 μA

Pour mieux voir l'effet de l'humidité relative, nous avons mesuré l'humidité relative correspondant à chaque pression dans le tube à décharge. Le dispositif utilisé est celui de la figure III.1 donné au chapitre III. Les valeurs des différentes humidités sont consignées dans le tableau V.3.

Tableau V.3 Humidité relative pour les différentes pressions.

Pression (hPa)	Humidité relative (%)
1200	62.16
1013	60.82
800	57.6
600	53.2
400	47.2

Pour mieux apprécier la relation entre l'humidité et la pression, nous avons tracé la courbe de la figure V.23. La courbe est approximée par un polynôme du second degré de la forme :

$$y = A + B_1x + B_2x^2$$

Cette figure montre que l'humidité relative est une fonction parabolique de la pression.

Si nous revenons à la tension de génération du courant de décharge de 100 μA , le tracé de cette tension en fonction de l'humidité relative (figure V.24) montre que la tension nécessaire à la génération d'un courant de 100 μA a une allure linéaire. Il y a juste à signaler qu'au-delà de 1013 hPa, la tension semble augmenter plus rapidement.

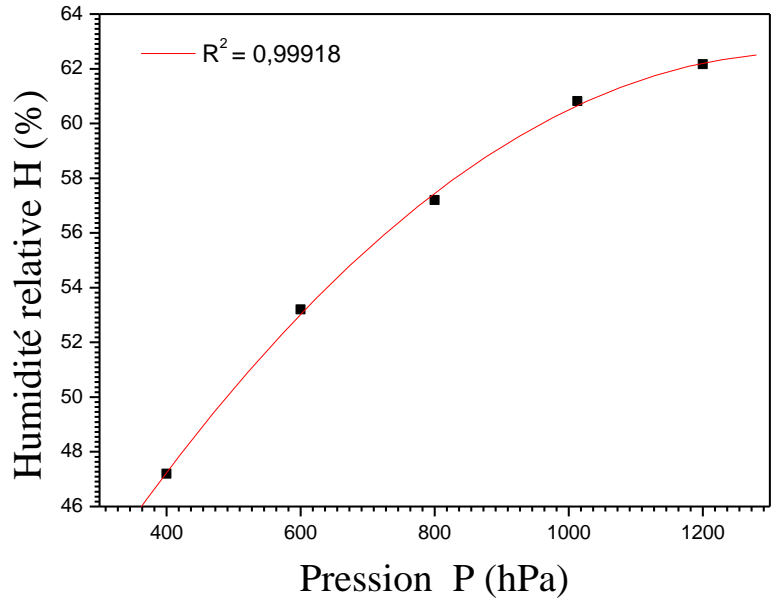


Figure V.23 Humidité relative en fonction de la pression.

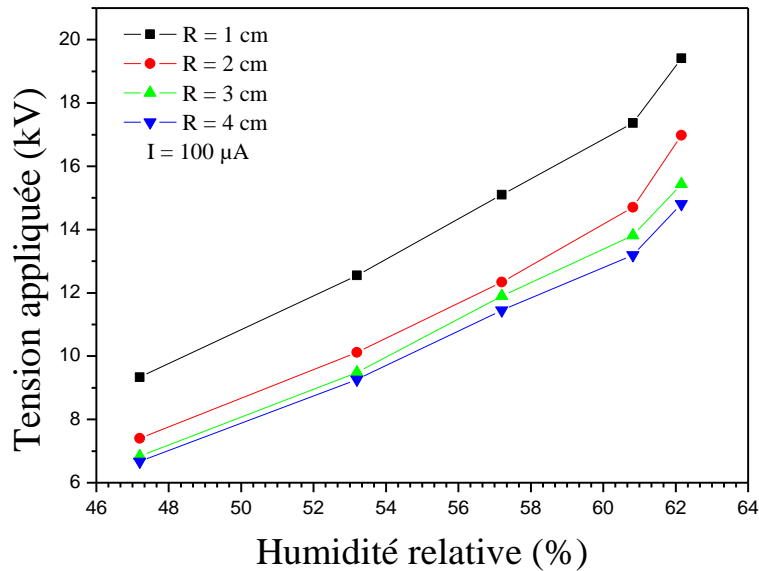


Figure V.24 Tension en fonction de l'humidité relative.

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé un réacteur plasma multi pointes-plan. Ce dernier peut accueillir 9 pointes au maximum en disposition circulaire. Nous pouvons varier la distance entre les pointes périphériques et la pointe centrale. La disposition en peigne consiste en une seule configuration de 9 pointes séparées l'une de l'autre d'une distance de 1 cm.

Nous avons d'abord mis en évidence l'effet du nombre de pointes sur les caractéristiques courant-tension associées à la décharge couronne positive ou négative. Plus le nombre de pointes est élevé, plus le courant engendré est important.

La variation de la distance R entre la pointe centrale et les pointes périphériques nous a permis de conclure que, plus R est grand, plus le courant de décharge augmente et ce pour toutes les pressions considérées.

Il ressort de cette étude que la meilleure efficacité du réacteur est pour des distances inter-électrodes inférieures à 20 mm pour des pointes ayant un rayon de courbure de $200\mu\text{m}$ (rayon de courbure des pointes que nous avons utilisées).

Conclusion générale

*"Patience et longueur de temps, font plus que force ni que rage".
Jean de la Fontaine*

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'étude expérimentale de deux réacteurs à décharge couronne l'un en géométrie pointe-plan et l'autre 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, pour ces deux configurations.

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 concernant l'influence du matériau des électrodes sur les caractéristiques de la décharge couronne, a révélé que le matériau du plan affecte la décharge couronne positive et le matériau de la pointe affecte la décharge couronne négative.

L'étude portant sur l'influence du matériau de l'électrode active sur la décharge couronne négative, en géométrie d'électrodes pointe-plan, a été menée avec deux matériaux : le cuivre et l'aluminium. Deux rayons de courbure de la pointe ont été considérés. Le courant associé à l'électrode active en aluminium est plus élevé que celui associé à l'électrode active en cuivre et cela est valable pour les deux rayons de courbure des pointes. Les oscillogrammes des courants de décharge montrent clairement que le courant associé à l'électrode en aluminium est plus stable que celui associé à l'électrode en cuivre. Ceci est mis en évidence par le fait que les impulsions de Trichel sont plus régulières dans le cas de l'aluminium que dans le cas du cuivre. Ainsi, nous pouvons considérer que l'aluminium représente un matériau très attractif pour la conception des réacteurs à décharge couronne.

L'étude de la décharge couronne dans la géométrie d'électrodes multi pointes-plan a été principalement menée avec une électrode circulaire composée de neuf pointes : 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.

L'étude a également montré qu'une distance de 3 cm entre la pointe centrale et les pointes périphériques représente une géométrie optimale qui permet d'avoir un courant élevé avec une tension relativement basse. La pression affecte sensiblement la décharge couronne multi pointe-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.

Les perspectives ouvertes par ce travail sont :

- Mener une étude du réacteur multi pointes-plan avec des pointes en aluminium,
- Utiliser des pointes de faible rayon de courbure,
- Augmenter le nombre de pointes périphériques.

Références bibliographiques

"La recherche doit avant tout être un jeu ou plaisir"
Pierre Joliot

Références bibliographiques

- [Ab-1] **A.Abahazem**, "*Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz*", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, 2009.
- [Ab-2] **A.Abahazem, H. Guedah, N. Merbahi, M.Yousfi, O.Eichwald &A.Ihlal**, "*Energy injected in multi-tip pulsed corona discharge reactor in air at atmospheric pressure for pollution control*", *Materials Today: Proceedings* 2, pp. 4694 – 4700, 2015.
- [Ab-3] **M.Abdel-Salam, H.Anis, A.El-Morshedy & R.Radwan**, "*High voltage engineering: Theory and practice*", Edition Marcel Dekker,Inc., 2000.
- [Ac-1] **I.E.Achouri**, "*Modélisation du fonctionnement optimal des filtres et séparateurs électrostatiques des matériaux poudreux*", Thèse de Doctorat de l'Université Ferhat Abbas, Sétif 1, 2019.
- [Ag-1] **N.Aggadi**, "*Etude de la réactivité de suies modèles n-Hexane sous décharge couronne pulsée à pression atmosphérique*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris XIII, 2009.
- [Ak-1] **Yu S. Akishev, A. A. Deryugin, I. V. Kochetov, A. P. Napartovich & N. I. Trushkin**, "*DC glow discharge in air flow at atmospheric pressure in connection with waste gases treatment*", *J. Phys.D: Appl. Phys.*, Vol.26, N°10, pp.1630-1637, 1993.
- [Ak-2] **Yu. S. Akishev, M. E. Grushin, I. V. Kochetov, A. P. Napartovich, M. V. Pan'kin & N. I. Trushkin**, "*Transition of a multipin negative corona in atmospheric air to a glow discharge*", *Plasma. Phys.Report*, Vol. 26, N°2, pp. 172–178, 2000.
- [Ak-3] **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.
- [Ak-4] **Yu.S.Akishev, I.V.Kochetov, A.I. Loboiko & A. P. Napartovich**, "*Numerical Simulations of Trichel pulses in a negative corona in air*", *Plasma Physics Reports*, Vol.28, N° 12, pp. 1136-1146, 2002.
- [Ak-5] **Yu S. Akishev, M.E.Grushin, V.B.Karal'nik , I. V. Kochetov, A.E.Monich, A. P. Napartovicgh & N. I. Trushkin**, "*Evolution of the radial structure of a negative corona during its transformation into a glow discharge and a spark* ", *Plasma. Phys.Report*, Vol.29, N°2, pp.176-186, 2003.
- [Ak-6] **Yu. S. Akishev, M. E. Grushin, V. B. Karal'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.
- [Ak-7] **Yu.S.Akishev, M.E.Grushin, I.V.Kochetov, V.B.Karal'nik, A.Napartovich & N.Trushkin**, "*Negative corona, glow and spark discharges in ambient air and transitions between them*", *Plasma Sources Sci.Technol.*, Vol.14, N°2, pp.18-25, 2005.

- [Al-1] **J.A.Alarcon, F.Santamaria & F.Roman**, "*Behavior of the corona current in coaxial systems with negative corona under controlled pressure conditions*", International Sympo. On Lightning Protection, Brazil, pp. 322- 325, 2015.
- [Al-2] **K.Allegraud**, "*Décharge à barrière diélectrique : physique et procédé*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de Plaiseau, 2008.
- [Am-1] **N.Amiour**, "*Contribution à l'étude de l'influence d'une décharge couronne sur les propriétés de films minces de polyimide en vue de leur utilisation dans le biomédical*", Thèse de Doctorat de l'Université Frères Mentouri, Constantine 1, 2022.
- [Ar-1] **R.Arora & W.Mosch**, "*High voltage and electrical insulation engineering*", Editions IEEE Press series on Power engineering, A John Wiley & sons, inc., 2011.
- [At-1] **D.S.Antao, D.A. Staack, A.Fridman & B.Farouk**, "*Atmospheric pressure dc corona discharges: operating regimes and potential applications*", Plasma Sources Sci. Technol., Vol.18, 2009.
- [Au-1] **L.Aubrecht, Z.Stanek & J. Koller**, "*Systematic Study of the Characteristics of the point-to-plane corona on natural objects*", ICCP & 25th EPS Conf.on Contr.Fusion and Plasma Physics, Praha, ECVA.Vol.22C, pp.2431-2433, 1998.
- [Au-2] **L.Aubrecht, J.Koller & Z.Stanek**, "*Onset voltages of atmospheric corona discharges on coniferous trees*", Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial Physics 63, pp.1901-1906, 2001.
- [Ba-1] **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.
- [Be-1] **F.Beloucif**, "*Analyse et prédiction des seuils d'apparition des décharges couronnées dans les gaz isolants en haute tension*", Thèse de Doctorat de l'Université de Guelma, 2017.
- [Be-2] **A.Bendaoud, A.Tilmatine, K.Medles, M.Rahli, M.Huzau & L.Dascalescu**, "*Characterization of dual corona-electrostatic electrodes for electrostatic processes applications*", IEEE Trans.on Indus.Applications, Vol. 44, N° 3, pp.692-698, 2008.
- [Be-3] **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
- [Be-4] **M.Benyamina**, "*Etude de la production de l'ozone dans les décharges couronne*", Thèse de Doctorat de l'Université d'Oran des Sciences et de la Technologie (USTO-MB), 2014.
- [Be-5] **P.Bérard**, "*Etude du vent ionique produit par décharge couronne à pression atmosphérique pour le contrôle d'écoulement aérodynamique*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Paris, 2008.
- [Be-6] **T.H.Bezanahary**, "*Modélisation du comportement de la colonne positive d'un plasma de décharge dans les gaz rares purs*", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, 2003.

- [Be-7] **P.Béquin, V.Joly & P.Herzog**, " *Modeling of a corona discharge microphone*", J. Phys. D: App. Phys., Vol.46, pp. 1-8, 2013.
- [Bi-1] **X.Bian, L.Wang, J.M.K.Mac Alpine, Z.Guan, J.Hui & Y.Chen**, " *Positive corona inception voltages and corona currents for air at various pressures and humidities*", IEEE Transactions on Dielec. and Elect. Insulation, Vol.17, N°1, pp. 63-70, 2010.
- [Bh-1] **M.S.Bhalla & J.D Craggs**, " *Measurment of ionisation and attachment coefficients in carbon monoxide in uniform fields*", Proc.Phys.Soc., Vol.78, N°3, p438, 1961.
- [Bo-1] **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.
- [Bu-1] **P. Bulat, P.Chernyshov, I.Esako, L.Grachex, P.Lavrov, A.Melnikova, K.Volkov & I.Volobuev**, " *Multi-point ignition of air/fuel mixture by the initiated subcritical streamer*", Journal Acta Astronautica, Vol.194, pp-504-513, 2022.
- [Ca-1] **P.A.Calva & F.P.Espino**, " *Correction factors for positive dc Voltages*", IEEE Trans.on Diel.and Elec.Insul., Vol.5, N°4, pp.541-544, 1998.
- [Ca-2] **H.Capdeville**, " *Mesure et modélisation des décharges luminescentes à basses pressions : Comportement électrique et pulvérisation des électrodes*", Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, 2001.
- [Ca-3] **K.Castor**, " *Caractérisation des sources acoustiques associées aux décharges couronnes négatives*", Thèse de Doctorat de l'Université du Maine, Le Mans, 2001.
- [Ce-1] **M. Cernák**, " *Positive-streamer-like phenomena in point plane corona gaps: Trichel pulses and high pressure cathode sheath instabilities*", App.Physics letter, Vol. 57, N°4, pp. 339-340, 1990.
- [Ce-2] **M. Cernák, T. Hosokawa, S. Kobayashi & T. Kaneda**, " *Streamer mechanism for negative corona current pulses*", Journal of App. Physics, Vol.83, pp. 5678-5690, 1998.
- [Ch-1] **J.S.Chang, P.A.Lwless & T.Yamamoto**, " *Corona Discharges Processes*", IEEE Trans.on Plasma.Sci., Vol.19, N°6, pp.1152-1166, 1991.
- [Ch-2] **J.Chen**, " *Direct current corona-enhanced chemical reactions*", PhD Thesis, University of Minnesota, 2002.
- [Ch-3] **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.
- [Co-1] **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.
- [Da-1] **G.N.B.Dandaron & B.B.Baldanov**, " *Experimental study of a negative corona in atmospheric-pressure argon*", Plasma Physics Reports, Vol.33, N°3, pp. 243-248, 2007.

- [Da-2] **L.Dascalescu, A.Samuila, D.Rafiroiu, A.JugaA.Krupa & R.Morar**, " *Multiple-Needle corona Electrodes for Electrostatic Processes Application*", IEEE Trans.on Industries Appl., Vol.35, N°3, pp. 543-548, 1999.
- [De-1] **J-L.Delcroix & A.Bers**, " *Physique des plasmas 1 & 2*", Inter Edition et CNRS Edition, Paris, 1994.
- [Do-1] **B.Dong**, " *Etude et caractérisation de plasmas destinés au contrôle actif d'écoulements gazeux subsoniques*", Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, 2008.
- [Do-2] **R.Dorai**, " *Modeling of atmospheric pressure plasma processing of gases and surfaces*", PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- [Dr-1] **B.Dramane**, " *Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge à barrière diélectrique – Cinétique électrique, granulométrie et aérodynamique*", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2009.
- [Du-1] **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.
- [Du-2] **N.Dubus**, " *Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique*", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2009.
- [El-1] **M. Th. El-Mohandes, S. Ushiroda, S. Kajita, Y. Kondo, and K. Horii**, " *Current density distribution on the plane electrode in multineedle to plane configuration* ", IEEE-IAS Annu. Meeting, pp.1527–1532, 1992.
- [Fa-1] **M. Farzaneth**, " *Contribution à l'étude des mécanismes des vibrations induites par effet de couronne*", Thèse de Doctorat d'état de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.
- [Fe-1] **D.Ferrah**, " *Etude des propriétés physico-chimiques d'interfaces par photo émission*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 2013.
- [Fo-1] **I.Fofana**, " *Modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, 1996.
- [Ga-1] **C.Gary**, " *Les propriétés diélectriques de l'air et les hautes tensions*", Edition Eyrolles, 1984.
- [Gi-1] **T.N.Giao & J.B.Jordan**, " *Modes of corona discharge in air*" , IEEE Trans.on Power Appar.and Syst., Vol. PAS-87, N°5, pp. 1207-1215, 1968.
- [Go-1] **A.Goldman & M.Goldman**, " *Les plasmas froids à pression atmosphérique*", Collection Dopee, Edition Electra, Paris, 1978.
- [Go-2] **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.

- [Go-3] **M.Goldman & A.Goldman**, " *Corona discharges*", Gaseous Electronics, Academic Press, New York, 1978.
- [Go-4] **M.Goldman & R.S.Sigmond**, " *Corona and insulation*", IEEE Trans. Elec. Ins., Vol.E-17 N°2, pp. 90-105, 1982.
- [Go-5] **M. Goldman, A. Goldman & R.S. Sigmond**, " *The corona discharge, its properties and specific uses* ", Pure and Appl. Chem., Vol. 57, pp. 1353-1362, 1985.
- [Gr-1] **F.P Grosu, A.M.Bologa, M.K.Bologa & O.V.Motorin**, " *Generalization of the Townsend current–voltage characteristics of a corona discharge*", Surface Engineer.and Appl. Electrochemistry, Vol. 50, N°4, pp. 306–310, 2014.
- [Gr-2] **F.P Grosu, A.M.Bologa, M.K.Bologa & O.V.Motorin**, " *On temperature dependence parameters of corona discharge current-voltage characteristics*", Surface Engineer.and Appl. Electrochemistry, Vol.52, N°1, pp. 85-91, 2016.
- [Gu-1] **G.R.Gurumurthy** " *Corona between point plane electrodes in air at atmospheric pressure* ", IEEE Annual Report Conf. on Elect.Insul.and Diel.Phen, pp.305-308, 2003.
- [Gu-2] **G.R. Gurumurthy, J.Amarnah & B.R. Natarajan** " *Corona in atmospheric air in between negative point and plane electrodes* ", IEEE Annual Report Conf. On Elect.Insul. and Diel.Phen, pp. 538-541, 2004.
- [Ha-1] **A.Haddad & D.Warne**, " *Advances in high voltage engineering*", Edition IET Power and Energy series 40, 2007.
- [Ha-2] **M.Haidour**, " *Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension*", Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II, 2007.
- [Ha-3] **G.Hartmann**, " *Spectroscopie de la décharge couronne : Etudes des mécanismes de collisions dans le dard*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris XI, 1977.
- [Ha-4] **W.Hauschild & E.Lemke**, " *High voltage test and measuring techniques*", Edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [Ja-1] **Y.N.Jaffre**, " *Optimisation de réacteurs à plasmas non thermiques pour le traitement des oxydes d'azote*", Thèse de Doctorat de Ecole Centrale de Lyon, 2010.
- [Ja-2] **A. Jaworek & A.Krupa**, " *Corona discharge from a multipoint electrode in flowing air*", Journal of Electostatics, pp. 187-197, 1996.
- [Jo-1] **J.Jolibois**, " *Etude et développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique-Application au contrôle d'écoulement sur profil d'aile*", Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, 2008.
- [Ka-1] **S.Kacem**, " *Modélisation électro-hydrodynamique des décharges couronne dans l'air à la pression atmosphérique pour application aux actionneurs plasmas*", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, 2011.

- [Ki-1] **A.F.Kip**, " *Positive point-to-plane discharge in air at atmospheric pressure*", Phys. Review, Vol.54, pp. 139-146, 1938.
- [Ki-2] **A.F.Kip**, " *Onset studies of positive point-to-plane corona in air at atmospheric pressure*", Phys. Review, Vol.55, pp. 549-559, 1939.
- [Kr-1] **A.Krupa**, " *Back discharge in multipoint-plane geometry in flue gases*", The European Phys.Journal D, pp. 1-6, 2009.
- [Ku-1] **A.Küchler**, " *High voltage engineering: Fundamentals-Technology-Applications*", Editions Springer Vieweg, 2018.
- [Ku-2] **E.Kuffel, W.S.Zaengl & J.Kuffel**, " *High voltage engineering: Fundamentals*", second edition, Edition Newnes, 2000.
- [Ko-1] **F.Koliatene**, " *Contribution de l'existence des décharges dans les systèmes d'avionique*", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, 2009.
- [La-1] **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.
- [La-2] **Y.Lagmich**, " *Diagnostic et modélisation d'une décharge à barrière diélectrique pour le contrôle d'écoulement*", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, 2007.
- [La-3] **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.
- [Le-1] **F.Leroux**, " *Etude des traitements par plasma à pression atmosphérique : Applications à l'industrie textile*", Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut, 2007.
- [Le-2] **C. Leys, D. Neirynch, R. Morent & E. Temmerman**, " *DC-excited cold atmospheric pressure plasmas*", Czechoslovak Journal of Physics, Suppl. B, Vol.56, pp. 896-902, 2006.
- [Li-1] **Y. Li, D.Han, B.Tang & K.Li**, " *The influence of electrode materials on the emission spectrum in SF6 under AC corona discharge*", Electrical Insulation Conference (EIC), Virtual Event, pp. 707-710, 2021.
- [Li-2] **R.Liao, F.Wu, L.Yang, K.Wang, Z.Zhou & K.Liu**, " *Investigation on microcosmic characteristics of Trichel pulse in bar-plate DC negative corona discharge based on a novel simulation model*", IREE, Vol.8, N°1, pp. 504-513, 2013.
- [Li-3] **D.R.Lide**, " *Handbook of chemistry and physics* ", 73th Edition, 1992 – 1993.
- [Li-4] **Z.Liu, T.Liu, X.Miao, W.Guo & S.He**, " *Experimental research on spectral intensity of needle-plate corona discharge*", Journal of Physics: Conference Series 418, 2013.
- [Lo-1] **L.B.Loeb**, " *Fundamental processes of electrical discharge in gases*", Edition John Wiley & Sons, 1939

- [Lo-2] **L.B.Loeb, A.F.Kip**, " *Electrical discharges in air at atmospheric pressure: the nature of positive and negative point-to-plane coronas and the mechanism of spark propagation*", J. Appl. Phys., Vol.10, pp. 142-160, 1939
- [Lo-3] **L.B.Loeb**, " *Electrical coronas: Their basic physical mechanism*", University of California Press, 1965.
- [Lo-4] **L.B.Loeb**, " *Recent advances in basic processes of gaseous electronics*", Berkeley, University of California Press, 1973.
- [Lo-5] **J.J.Lowke & F.D'Alessandro**, " *Onset corona fields and electrical breakdown criteria*", J.Appl.Phys.D, Vol.36, pp. 2673-2682, 2003.
- [Lu-1] **Z.Lu**, " *Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharges électriques de type filamentaire*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1991.
- [Ma-1] **P.Magnier**, " *Etude expérimentale du contrôle d'écoulements aérodynamiques subsoniques par action de plasmas froids surfaciques à pression atmosphérique*", Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, 2007.
- [Ma-2] **E.Marode**, " *La formation de l'arc entre une pointe positive et un plan*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris dOrsayI, 1972
- [Ma-3] **L.Martin**, " *Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Marquage isotopique et simulation du procédé*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 2005.
- [Ma-4] **J.C.Matéo-Vélez**, " *Modélisation et simulation numérique de la génération de plasmas dans les décharges couronnées et son interaction avec l'aérodynamique*", Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2006.
- [Ma-5] **K. Matra, Y. Tanakaran, T. Temponsub, S. Nimbua, P. Thab-in & C. Pluksa**, " *Electrical Characteristics of Atmospheric Air Corona Plasma by Multi-pin Electrodes*", International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol.14, N°3, pp. 226-236, 2019.
- [Ma-6] **R.Maurau**, " *Etude de l'influence du régime d'une décharge à barrière diélectrique dans un mélange HMDSO/N₂, sur les propriétés d'un procédé de dépôt*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 2009.
- [Me-1] **J.M.Meek**, " *Electrical breakdown of gases*", The International Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, 1953.
- [Me-2] **M.Mekious**, " *Influence du matériau d'électrode sur une décharge couronne*", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi ouzou, 2001.
- [Me-3] **M.Mekious, M.Megherbi, F.Bitam-Megherbi**, " *Material electrode influence of point-to-plan corona discharges in the atmospheric air*", Proc. Gas Discharges and their Applications, Toulouse, France, pp. 347-350, 2004.

- [Me-4] **M.Mekious, M.Megherbi, F.Bitam-Megherbi** , *"Effet of the electrodes material on the corona discharge at atmospheric pressure"*, International Review of Physics, Vol.8, N°4, pp. 177-122, 2014.
- [Me-5] **M.Mekious, M.Megherbi, F.Bitam-Megherbi & R.Kachenoura**, *"Active Electrode material influence on the characteritics of corona discharge reactor at atmospheric pressure"*, Russian Elect.Engineering, Vol.93, N°4, pp. 277-283, 2022.
- [Me-6] **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.
- [Me-7] **B. Mennad, Z. Harrache, K. Yanallah, D. Amir Aid, A. Belasri**, *" Effect of the anode material on ozone generation in corona discharge"*, Vacuum, Vol.104, pp. 29-32, 2014.
- [Me-8] **M.Meziane**, *" Modélisation 2D et 3D d'un écoulement gazeux instationnaire activé par décharges couronne dans un réacteur multi-pointes plan dédié à la décontamination des gaz"*, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, 2011.
- [Mo-1] **M.Moudoud**, *" Contribution à l'étude d'une isolation composée solide/air en tension alternative 50 Hz"*, Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 1997.
- [Mo-1] **S.C.Mok**, *" Aluminum Economy for Sustainable Development"*, IEEE Global Humanitarian Technology Conference, pp. 21-24, 2011.
- [Mo-2] **V.Monna**, *"Réactivité des décharges en flux dans les mélanges de gaz pour le traitement des surfaces"*, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III, 2002.
- [Mr-1] **A.Mraihi, N.Merbahi, M.Yousfi, A.Abahazem & O.Eichwald**, *"Electrical and spectroscopic analysis of mono and multi-tip pulsed corona discharges in air at atmospheric pressure"*, Plasma Sources Sci.Technol.,Vol.20, 2011.
- [Mr-2] **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.
- [Na-1] **M.S.Naidu & V.Kamaraju**, *"High voltage engineering"*, 4th edition, Edition Mc Graw-HILL, 2009.
- [Na-2] **E.Nasser**, *"Fundamentals of gaseous and plasma electronics"*, Edition John Wiley & Sons Canada, Limited, 1971.
- [Nd-1] **I.Ndiaye**, *" Approche physique du développement de streamers positifs sur une surface de glace"*, Thèse de Doctorat de l'Université au Québec à Chicoutimi, 2007.
- [Ou-1] **S.A. Ould Ahmedou**, *" Etude numérique et expérimentale de l'intensification des transferts convectifs par vent ionique"*, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2010.

- [Pa-1] **M.P.Panaget**, " *Etude en Laboratoire des effets physico-chimiques induits par les pertes des lignes de transport à Haute Tension*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997.
- [Pa-2] **L.Parisis**, " *Etude d'un procédé de traitement d'air chargé en composés organiques volatils par décharge moyenne avec barrière diélectrique : Mécanisme de mise en œuvre et recherche d'optimisation*", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1999.
- [Pe-1] **A.Pedersen**, " *Criteria of spark breakdown in sulphur hexafluoride*", IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., pp. 2043-2048, 1970.
- [Pe-2] **F.W.Peek**, " *Dielectric phenomena in high voltage engineering*", Edition Mc Graw-Hill, 1920.
- [Pe-3] **A.A.Petrov, R.H.Amirov & I.S.Samoylov**, " *On the Nature of Copper Cathode Erosion in Negative Corona Discharge*", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.37, N°7, pp. 1146-1149, 2009.
- [Pi-1] **D.Piscitelli**, " *Simulation de la pulvérisation cathodique dans les écrans à plasma*", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, 2002.
- [Po-1] **A.M.POINTU**, " *Décharge électrique* ", Techniques de l'Ingénieur, D322, 1980
- [Ra-1] **H.Raether**, " *Electron avalanches and breakdown in gases*", Edition Butterwords, London, 1964.
- [Ra-2] **Y.Raizer**, " *Gas discharge physics*", Edition Springer-Verlag, 1991.
- [Ri-1] **F.A.M. Rizk & T.N.Giao**, " *High voltage engineering* ", Edition Taylor & Francis Group, LLC, 2014.
- [Ro-1] **M.Robinson**, " *Movement of air in the electric wind of the corona discharge*", AIEE Trans. Journal, 80, pp. 143-150, 1961.
- [Ro-2] **C.Rotvin**, " *Comportement et effet de la charge d'espace sur le mécanisme des vibrations induites par effet couronne*", Mémoire de Maîtrise en Ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, 2000.
- [Ro-3] **G.Le Roy, C.Gary, B.Hulzter, J.Llot & C.Dubanton**, " *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*", Collection de la D.E.R d'Electricité de France (E.D.F), Editions Eyrolles, Paris, 1984.
- [Sa-1] **P.Sattari, C.F.Gallo, G.S.P.Castle & K.Adamiak**, " *Trichel pulse characteristics-negative corona discharge en air*", J.Appli.Phys.D, Vol.44, 2011.
- [Se-1] **P.Segur**, " *Gaz isolants*", Techniques de l'Ingénieur, D2530, 1990.
- [Se-2] **P.Seimandi**, " *Modélisation mathématique et simulation numérique de décharges couronnes pour contrôle d'écoulements*", Thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, 2010.
- [St-1] **B. M. Stanislaw, M. Gubanski & H. Hillborg**, " *AC and DC Corona/Ozone-induced Ageing of HTV Silicone Rubber*", IEEE Trans. Dielect. And Elect. Ins. Vol.18, N°6, pp. 1984-1994, 2011.

- [Su-1] **A.Sublet**, " *Caractérisation de décharges à barrières diélectriques atmosphérique et sub-atmosphériques et application à la déposition de couches d'oxydes de silicium*", Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.
- [Ti-1] **A.Tilmatine, K.Medles, M.Younes,A.Bendaoud &L.Dascalescu**, " *Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles*", IEEE Trans.on Indus.Applications, Vol. 46, N° 4, pp.1564-1569, 2010.
- [To-1] **K. Toda, K. Takaki, S. Kato & T. Fujiwara**, " *Removal of NO and NOx using a multipoint-type dielectric barrier discharge reactor at a narrow gap*", J. Appl. Phys., Vol.34, pp. 2032-2036, 2001.
- [To-2] **J.S.Townsend**, " *Electricity in gases*", Edition Carendon Press, 1915.
- [Tr-1] **G.W.Trichel**, " *The mechanism of the negative point to plane corona near onset*", Phys. Review, Vol.54, pp. 1078-1086, 1938.
- [Vi-1] **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.
- [Wa-1] **C.L.Wadhwa**, " *High voltage engineering*", Second edition, New Age International Publishers, 2007.
- [Wa-2] **A .Y. Wardaya , M. Nur & J.E Suseno**, " *A study of the corona discharge theory for multipoint-plane configurations*", Indian J. Phys, Vol.94, N° 3, pp. 409-415, 2020.
- [Ya-1] **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.
- [Ya-2] **B.Yahiaoui, M.Megherbi, A. Smaili, A.Antoniou, B. Tabti & L. Descalescu**, " *Distribution of electric potential at the surface of corona-charged polypropylene nonwoven fabrics after neutralization*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.49, N° 4, pp. 1758-1766, 2013.
- [Ya-3] **B.Yahiaoui, B.Tabti, M.Megherbi, A.Antoniou, M.C.Plopeanu & L.Dascalescu**, " *AC Corona Neutralization of Positively and Negatively charged Polypropylene Non-woven Fabrics*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.20, N°5, pp. 1516-1522, 2013.
- [Ya-4] **A.Yawootti, P.Intra, N.Tippayawong & P.Rattanadecho** " *An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger*", Journal of Electrostatics , Vol.77, pp. 116-122, 2015.
- [Yu-1] **D.Yu, M.Farzaneh, J.zhang,L.Shu, W.Sima & W.Sima**, " *Properties of corona discharge under positive DC voltage at low atmospheric pressure*", IEEE Annual Report Conf. On Elect.Insul. and Diel.Phen, pp. 393-396, 2006.
- [Zi-1] **Z. Ziari**, " *Etude de l'effet d'un traitement par plasma froid sur les propriétés de surface d'un film de polymère*", Thèse de Doctorat de l'Université Mentouri de Constantine, 2008.

Annexes

On fait la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres : mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison.

Henri Poincaré

ANNEXE I

Principales collisions dans les gaz :

Un gaz est le siège de processus réactifs entre particule qui le composent. Soumis à un champ électrique, par conséquent à la force de Coulomb, les particules chargées vont entrer en collision avec les molécules environnantes. On distingue des collisions *élastiques* et des collisions *inélastiques*.

Dans les chocs élastiques, les atomes conservent la même structure interne. Ceux-ci n'échangent pas d'énergie entre eux ni même avec le milieu extérieur, seuls leurs vecteurs vitesse respectifs changent en direction et norme. Globalement, l'énergie cinétique du système reste inchangée.

Contrairement aux chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change. L'énergie de la partie incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau *excité* ou soit *ionisée*. Les chocs inélastiques sont donc la source d'un nombre de réactions physico-chimiques qui vont modifier les propriétés macroscopiques du gaz.

Les phénomènes élémentaires principaux sont l'ionisation, l'excitation et l'attachement pour les phénomènes dits *ionisants* ; la recombinaison, le détachement et l'émission pour les phénomènes *déionisants*.

1- Phénomènes ionisants

- L'ionisation : elle a lieu quand l'énergie absorbée par un atome lors d'un choc inélastique est suffisante pour qu'un de ses électrons soit soustrait à l'attraction du noyau formant ainsi un ion positif. L'électron ainsi libéré peut alors s'apparier à un autre atome pour former un ion négatif (attachement) ou s'éloigner à l'infini.
- L'excitation : phénomène qui se produit lorsqu'un atome a acquis suffisamment d'énergie pour qu'un des électrons passe à un orbital supérieur. L'atome passe alors de son état fondamental à un état excité.
- L'absorption : c'est un processus qui se produit au moment où un atome absorbe un photon et se retrouve dans un état excité ou ionisé.

2- Phénomènes déionisants

- La recombinaison : phénomène inverse de l'ionisation et se produit lorsqu'un ion positif rencontre un électron ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent. Cela aboutit à la formation d'atomes neutres stables.
- Le détachement : se produit quand un ion négatif perd un électron supplémentaire suite à un choc.
- L'émission : phénomène qui survient quand un atome se désexcite en émettant un photon.

Le tableau suivant regroupe les principales collisions dans les gaz mono et diatomiques.

Tableau A.I.1 Principales collisions liées aux décharges dans un gaz [De-2,Ja-1]

Processus	Reactions
Collision élastique, modifie la mobilité électronique	$e^- + A \rightarrow e^- + A$
Excitation, création de métastables	$e^- + A \rightarrow e^- + A^*$
Ionisation, multiplication électronique	$e^- + A \rightarrow 2 e^- + A^+$
Déexcitation, destruction des métastables	$e^- + A^* \rightarrow e^- + A$
Ionisation en 2 étapes, multiplication électronique	$e^- + A^* \rightarrow 2 e^- + A^+$
Recombinaison radiative, émission lumineuse	$e^- + A^+ \rightarrow A^+ + h\nu$
Recombinaison dissociative, création de métastables	$e^- + A^+ \rightarrow A^* + A^+$
Excitation vibrationnelle, modifie la mobilité électronique	$e^- + A_2 \rightarrow e^- + A_2^v$
Dissociation, création de radicaux	$e^- + A_2 \rightarrow e^- + 2A$
Ionisation dissociative, multiplication électronique	$e^- + A_2 \rightarrow 2e^- + A^+ + A$
Attachement dissociatif, molécule dissociative	$e^- + A_2 \rightarrow A^+ + A$
Détachement par choc électronique	$e^- + A^- \rightarrow 2e^- + A$
Recombinaison ion-ion	$A_2^- + A_2^+ \rightarrow 2 A_2$

Tableau A.I.2 Minimum de Paschen en fonction du gaz et du métal de la cathode [Co-1]

Matériaux		Minimum de Paschen	
Gaz	Cathode	$(U_d)_{\min}$ (V)	$(p.d)_{\min}$ (mm Hg.cm)
Air	Fe	330	0,57
N ₂	Fe	275	0,75
H ₂	Pt	295	1,25
O ₂	Fe	450	0,7
Hg	Fe	520	2

Tableau A.I.3 Constantes pour le calcul du coefficient d'ionisation de Townsend pour divers gaz [Ko-1,Ja-1,Ra-2]

Gaz	A (Torr ⁻¹ .cm ⁻¹)	B (V/Torr .cm)	E/p (V/Torr .cm)
H ₂	5	130	150 - 600
N ₂	12	342	100 - 600
CO ₂	20	466	500 - 1000
Air	15	365	100 - 800
H ₂ O	13	290	150 - 1000
HCl	25	380	200 - 1000
He	3	34	20 - 150
Ne	4	100	100 - 400
Ar	14	180	100 - 600
Kr	17	240	100 - 1000
Xe	26	350	200 - 800
Hg	20	370	200- 600



John Sealy Edward Townsend (1868 - 1957)
 Physicien et mathématicien irlandais qui a mené différentes expériences sur la conductivité électrique des gaz et a mesuré directement la charge électrique.



Friedrich Louis Carl Heinrich Paschen (1865 -1947)
 Physicien allemand, principalement connu pour ses travaux sur les décharges électriques

ANNEXE II

Travail de sortie :

Un métal contient des électrons libres qui peuvent se mouvoir mais qui ne peuvent pas spontanément quitter le métal à cause de la barrière de potentiel ϕ à l'interface métal-vide figure ci-dessous. Cependant, du fait de leur mouvement, ces électrons acquièrent une certaine énergie cinétique occupant ainsi des niveaux différents. Le niveau d'énergie le plus élevé occupé par un électron est appelé niveau de Fermi.

Le travail de sortie ϕ d'un métal est la différence $\chi - \xi$ qui correspond donc à l'énergie nécessaire à un électron pour quitter le métal. A champ électrique relativement important (à partir de quelques 10^6 V/m), la barrière énergétique à l'interface électrode-isolant peut être franchie par les porteurs suivants deux Processus distincts.

Le premier est le saut par activation thermique au dessus de la barrière en tenant compte de l'abaissement de celle-ci sous l'effet du champ électrique et de la température (effet Schottky). Le second est le passage de la charge par effet tunnel au travers de la barrière (effet Fowler-Nordheim). Les deux phénomènes peuvent aussi se superposer.

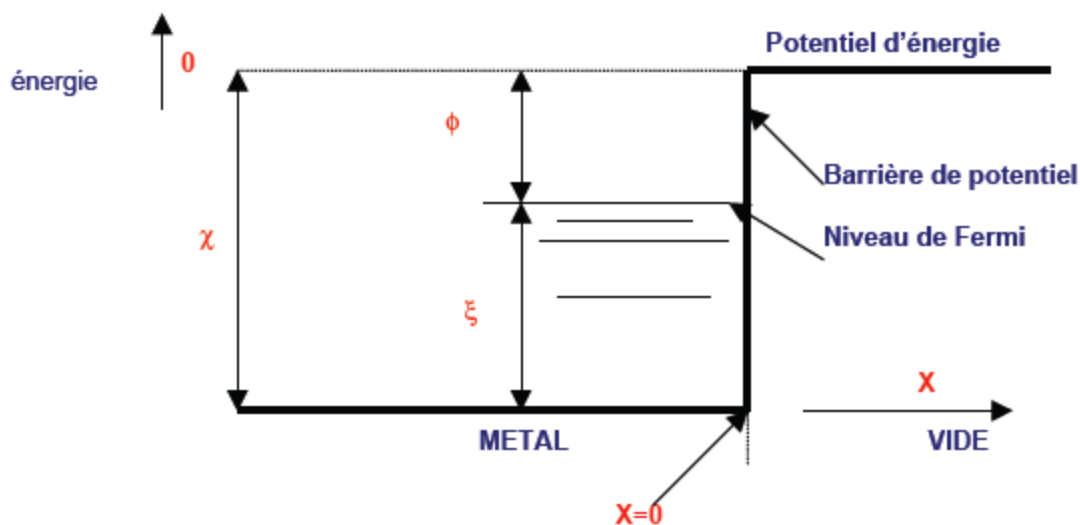


Figure A.II.1 : Travail de sortie ϕ d'un métal [Me-2].

Les électrons du métal possèdent des énergies cinétiques inférieures ou au maximum égales à ψ (statistiques de Fermi-Dirac). Le surcroît d'énergie à fournir aux électrons de niveau le plus élevé (niveau de Fermi-Dirac) est égal à :

$$\phi = \chi - \xi.$$

ϕ est appelé *travail de sortie* (ou d'extraction) du métal.

Le tableau suivant rassemble pour différents matériaux, le travail de sortie ϕ , l'énergie de surface E_{sur} (expérimentale) et l'énergie de formation de l'oxyde le plus stable $-\Delta H_f$ en (kJ) par mole d'oxygène (O) (qui exprime la réactivité vis-à-vis de l'oxygène).

Tableau A.II.1 *Quelques métaux: Travail de sortie ϕ , énergie de surface E_{sur} (expérimentale) et réactivité vis-à-vis de l'oxygène ΔH_f [Fe-1]*

ϕ (eV)	E_{sur} (J/m ²)	ΔH_f (kJ)	ϕ (eV)	E_{sur} (J/m ²)	ΔH_f (kJ)	ϕ (eV)	E_{sur} (J/m ²)	ΔH_f (kJ)
Au	5,3	1,50	Na	2,7	0,26	V	4,3	2,55
Ag	4,7	1,25	Fe	4,5	2,48	Ti	4,3	2,10
Pt	5,7	2,48	Mo	4,9	3,00	Ba	2,7	0,37
Pd	5,6	2,05	W	5,2	3,68	Zr	4,0	2,00
Rh	4,9	2,70	Rb	2,1	0,11	Al	4,2	1,16
Ru	4,7	3,05	Cs	2,1	0,09	Sr	2,6	0,41
Cu	4,9	1,83	K	2,3	0,13	La	3,5	1,02
Re	5,7	3,60	Cr	4,5	2,30	Mg	3,6	0,76
Co	5,0	2,55	Nb	4,8	2,70	Ca	2,8	0,49
Ni	5,3	2,45	Mn	4,1	1,60	Gd	2,9	1,11

RESUME

Cette thèse concerne l'étude expérimentale de deux réacteurs à décharge couronne l'un en géométrie pointe-plan et l'autre 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 ces deux configurations. Les paramètres considérés sont : la distance inter-électrodes, le rayon de courbure des pointes, le matériau de l'électrode active et la pression. L'étude a montré que l'aluminium représente un matériau de choix pour concevoir un réacteur à décharge couronne. L'étude du système multi pointes-plan a 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 est 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, matériau d'électrode, multi pointes, effet de la pression, pointe centrale, pointes périphériques.

ABSTRACT

This thesis concerns the experimental study of two corona discharge reactors, one in needle-plane geometry and the other in a multi-needle-plane geometry. The study focused on the influence of electro-geometric parameters and pressure on the characteristics of corona discharges under continuous voltage for these two configurations. The parameters considered are the inter-electrodes distance, the curvature radius of the needles, the material of the active electrode and the pressure. The study showed that aluminum represents a preferred material for designing a corona discharge reactor. The study of the multi-needle-plane system focused on a circular electrode composed of a central needle and eight peripheral needles. The arrangement of the peripheral needles can take four positions depending on the distance between them and the central needle. The study showed that the current increases with the increase in the distance between the central needle and the peripheral needles. When the distance between the electrodes exceeds a specific threshold, the effectiveness of the plasma reactor diminishes in the case of significant gaps between the central and peripheral needles. Finally, it is interesting to work at low pressure if one wants to achieve a high discharge current with low voltage.

Keywords

Corona discharge, current-voltage characteristic, mean current, electrode material, multi-needles, pressure effect, central needle, peripheral needles.