



Mémoire de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie Electrique
Spécialité : Electrotechnique

Option : Réseaux Electrique

THÈME

Caractérisation d'un Système D'électrodes Multipointes-Plan

Présenté par :

Mr. BENISSAD Antar

Mr. MAZOUZEN Lakhdar

Encadré par :

Mr. RAHMANI. A

Mme. RAHMANI. O

Devant de jury :

Mme. BENDAHMANE

Mr. HERZINE

Remerciements

*Tout d'abord nous remercions le bon Dieu tout puissant
de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a
donné tout au long de nos études.*

*Nous remercions très sincèrement Mr A. RAHMANI, et Mme O. RAHMANI nos
encadreurs de ce travail, pour leurs conseils pertinents, leurs orientations judicieuses, leur
patience et pour leurs suggestions qui nous ont grandement facilité ce travail.*

*Nous remercions vont aussi Mme BENDAHRMANE et Mr HERZINE, pour l'honneur
qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.*

*Enfin, nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à
la réalisation de ce travail*

Dédicaces

À ma mère.

À mon frère .

À mes sœurs .

À mes neveux et mes nièces.

À tous mes amis : C07.

À la mémoire de mon père.

À la mémoire de ma grande sœur.

À mon amie de parcours Antar

A tous mes amis(es) de promo.

À tous les êtres chers dont le soutien m'a été indispensable.

Je dédie ce modeste travail

Lakhdar

DÉDICACES.

Je dédie ce modeste travail à :

Ceux qui sont les plus chers au monde, mes parents, aux quels je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, pour leur amour, leur soutien tout au long de mes études.

A mes grands parents

A mes sœurs

A toute la famille

A tous mes amis

A mon collègue Mazouzen Lakhdar pour m'avoir participé ce travail A tous ceux qui se donnent à fond dans la recherche scientifique

BENISSAD ANTAR

Liste des abréviations

C10 : Condensateur de lissage.

d : la distance inter-pointes.

DBD : Décharge à Barrière Diélectrique.

E : champ électrique.

e : charge élémentaire ($=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$).

E_i : le champ électrique à la surface du fil.

g: la différence entre r_e - r_s .

G270 : diode à haute tension.

h : distance inter-électrodes.

h_g : distance entre le plan et la grille.

h_p : distance entre la pointe et la grille.

H_r : humidité relative.

I : courant de la décharge.

I₀ : courant initial dû aux électrons primaires (A).

I_g = courant qui passe par la grille.

J : Densité de courant.

N : désignant la densité du gaz.

N₀ : nombre d'électrons initiaux au plan ($x=0$).

N_p : nombres de pintes.

P : plan collecteur.

pA : pico-Ampèremètre.

r₀ : rayon de l'électrode active.

R₀ : résistance haute tension.

r_c : frontière de l'ionisation.

Re : rayon extérieur de l'électrode.

r_e : rayon du trou.

R_g : résistance de la grille.

r_m : rayon effectif de la sonde.

r_s : rayon réel de la sonde.

S : sonde circulaire.

S₀ : section réelle de la sonde.

SG1 : Alimentation basse Tension.

S_m : surface total de la sonde.

T : température.

T100 : transformateur de haute tension.

V : différence de potentiel appliquée entre deux électrodes.

V₀ : tension seuil de l'effet couronne.

V_c : tension de claquage.

x : abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de l'électrode active.

η : Coefficient d'attachement

γ : deuxième coefficient de Townsend.

α : Premier coefficient de Townsend (m^{-1}).

liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Caractéristique Courant-Tension d'une décharge dans l'air à pression Atmosphérique	5
Figure I.2. Schema de developpement de la decharge par avalanche photo-ionisantes.....	6
Figure I.3. Etapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration d'électrodes pointe - plan : (a) pointe positive ; (b) pointe négative.....	7
Figure I.4. Différentes configurations de décharge couronne.....	8
Figure I.5. Topographie de la décharge couronne volumique en configuration pointe.....	11
Figure I.6. Schématisation d'une décharge couronne continue positive.....	12
Figure I.7. Schématisation d'une décharge couronne continue négative.....	13
Figure I.9. Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique de plastiques.....	16
Figure I.10. Principe de formation d'électret par décharge couronne.....	17
Figure I.11. Dispositif triode utilisé pour la charge par effet couronne.....	18
Figure I.12. Décharge couronne dans le système triode de charge.....	19
Figure I.13 Effet de la position de la grille sur la largeur de dépôt.	20
Figure I.14. Effet de la position de la grille sur l'uniformité de dépôt.	21

Chapitre II

Figure II.1 Représentation schématique du dispositif experimental.....	22
Figure II. 2 Photographie (a) et représentation schématique (b) des électrodes couronnes de type pointe.....	23
Figure II.3 Mesure du rayon de courbure de la pointe de l'aiguille : (a) projection de l'image de l'aiguille, (b) cellule de thomas.....	24
Figure II.4 Représentation schématique du système de décharge(vue de coté).....	24

Figure II. 5 Représentation de la grille conductrice utilisée.....	25
Figure II. 6 Schéma de l'installation haute tension.....	26
Figure II. 7 Equipement de l'installation utilisée.....	27
Figure II. 8 Installation haute tension utilisée au laboratoire de l'universite de bejaia.....	27
Figure II. 9 Voltmètre électrostatique.....	28
Figure II.10 Photographies des appareils de mesure de la température (a) et de l'humidité (b).....	29
Figure II.11 Vue de dessus de la sonde circulaire.....	30
Figure II.12 : Une coupe transversale de la sonde.....	30

Chapitre III

Figure III.1 Caractéristique Courant-Tension en fonction du nombre de pointe N_p ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=62\%$)	32
Figure III.2 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance inter-pointes d pour $N_p=3$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).....	33
Figure III.3 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance inter-pointes d pour $N_p=5$, ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).....	33
Figure III.4 Variation de courant de décharge en fonction de la distance d , pour différents nombres de pointes et $V=20\text{kV}$ ($T=22^\circ\text{C}$, $H_r=63\%$).....	34
Figure III.5 Distributions de la densité de courant J en fonction de la position x pour un système d'électrode pointe- plan ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=62\%$).....	35
Figure III.7 Distributions de la densité de courant J en fonction de la position x pour un système d'électrode cinq pointes-plan ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=62\%$).....	36
Figure III.6 Distributions de la densité de courant en fonction de la position x pour un système d'électrode trois pointes-plan ($C=21^\circ\text{C}$, $H_r=62\%$).....	36
Figure III.8 Distribution de la densité de courant J en fonction de la tension appliquée V pour $N_p=3$, $d=6\text{ cm}$, ($T=24^\circ\text{C}$, $H_r=57\%$).....	37
Figure III.9 Distribution de la densité de courant J en fonction de la tension appliquée V pour $N_p=5$ et $d=6\text{cm}$ ($T=24^\circ\text{C}$, $H_r=57\%$).....	38
Figure III.10 Distributions de la densité de courant J en fonction de la distance inter-pointes d pour $N_p=3$ et $V=12\text{kV}$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=57\%$).....	39

Figure III.11 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} en fonction de la distance inter-pointe \mathbf{d} , pour $N_p=5$ et $V=12\text{kV}$ ($T=21^\circ\text{C}$ $H_r=57\%$).....	39
Figure III.12 Configuration du système de décharge multipointes–grille –plan.....	40
Figure III.13 Caractéristique Courant-Tension pour différent valeur de N_p avec et sans grille, pour $R_g=100\text{M}\Omega$, $h_p=15\text{mm}$, $h_g=15\text{mm}$ et $d=4\text{cm}$ ($T=19^\circ\text{C}$, $H_r=60\%$).....	41
Figure III.14 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance inter-pointes \mathbf{d} , avec et sans grille pour $N_p=3$, $R_g=100\text{M}\Omega$, $h_p=15\text{mm}$ et $h_g=15\text{mm}$ ($T=19^\circ\text{C}$, $H_r=60\%$).....	42
Figure III.15 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance h_p pour $N_p=1$ et 3, $d=6\text{cm}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_g=15\text{mm}$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=56\%$).....	42
Figure III.16 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance h_p pour $N_p=1$ et 3, $d=6\text{cm}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_p=15\text{mm}$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=56\%$).....	43
Figure III.17 Variation de courant de décharge et du courant de grille en fonction du potentiel de la grille V_g pour $N_p=1$ (A), $N_p=3$ (B), $d=6\text{cm}$, $V=14\text{kV}$ et $h_g=15\text{mm}$ ($T=23^\circ\text{C}$, $H_r=60\%$).....	44
Figure III.18 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} pour un système pointe-plan $N_p=1$ avec et sans grille, $V=12\text{kV}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_g=15\text{mm}$, ($T=22^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).....	45
Figure III.19 Distribution de densité de courant \mathbf{J} pour un système multipointes-plan $N_p=3$ avec et sans grille, $V=12\text{kV}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_g=15\text{mm}$, ($T=22^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).....	46
Figure III.20 Distribution de densité de courant \mathbf{J} pour un système multipointes-plan $N_p=5$ avec et sans grille, $V=12\text{kV}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_g=15\text{mm}$, ($T=22^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).....	46
Figure III.21 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} en fonction de la tension appliquée V en présence de la grille pour $N_p=5$, $d=4\text{cm}$, $h_g=15\text{mm}$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=23^\circ\text{C}$, $H_r=58\%$) .	47
Figure III.23 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} (avec et sans grille) en fonction de la distance inter-pointes \mathbf{d} , pour $N_p=3$, $h_g=15\text{mm}$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=24^\circ\text{C}$, $H_r=55\%$).....	48
Figure III.22 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} en fonction de la tension appliquée V en présence de la grille pour $N_p=3$, $d=4\text{cm}$, $h_g=15\text{mm}$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=24^\circ\text{C}$, $H_r=55\%$).....	48
Figure III.24 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} (avec grille) en fonction de la distance h_p pour $N_p=1$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=61\%$) .	49
Figure III.25 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} (avec grille) en fonction de la distance h_p pour $N_p=3$, $d=6\text{cm}$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=61\%$).....	50
Figure III.26 Distribution de la densité de courant \mathbf{J} (avec grille) en fonction de la distance h_g pour $N_p=1$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=61\%$).....	50

Figure III.27 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la distance h_g pour N_p=3 et R_g=100MΩ (T=21°C, H _r =61%).....	51
Figure III.28 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la tension appliquée V pour N_p=1 , V_g=(1.2kV et 2kV) et h_g=15mm (T=22°C, H _r =54%).....	51
Figure III.29 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la tension appliquée V pour N_p=3 , V_g= (1.2kV et 2kV) et h_g=15mm (T=22°C, H _r =54%).....	52

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : Etude théorique de la décharge couronne

I.1 Introduction.....	2
I.2 Mécanisme de la formation de la décharge électrique	2
I.2.1. Électrons primaires.....	2
I.2.2 Collisions élastiques et inélastiques	2
I.2.2.1. Collisions élastiques.....	2
I.2.2.2. Collisions inélastiques.....	3
I.3 Décharge de Townsend.....	3
I.4 Mécanismes des streamers.....	5
I.5 La décharge couronne.....	7
I.5.1 facteur influencent la décharge couronne	8
I.5.1.1 Facteurs géométriques.....	8
I.5.1.2 Facteurs physiques.....	8
I.5.1.3. Facteurs électriques.....	10
I.5.2 Type de décharge couronne	10
I.5.2.1 Décharge couronne positive.....	11
I.5.2.2 Décharge couronne négative.....	12
I.5.2.2.1 Apparence lumineuse.....	13
I.6 Conséquence de l'effet de couronne dans l'air.....	13
I.6.1 Pertes.....	13

I.6.2 Interférences radio télévision	14
I.6.3 Bruit audible	14
I.7 Applications industrielles	14
I.7.1. Dépollution par la décharge couronne	14
I.7.2 Traitement des surfaces	16
I.7.3 Charge par décharge couronne	16
I.7.4 Autres applications	17
I.8. Le système d'électrodes triode	17
I.8.1 Processus de charge dans une configuration triode	18
I.8.2 l'effet de la position de la grille sur la largeur de dépôt	20
I.9 Conclusion	21

Chapitre II : installation expérimentales

II.1 Introduction	22
II.2 Dispositif expérimental	22
II.2.1 Le Système d'électrodes	23
II.2.1.1 présentation des électrodes active	23
II.2.2 la grille conductrice	25
II.2.3 La source de haute tension	25
II.3 Méthode de mesure	28
II 3.1 Mesure de tension appliquée	28
II 3.2 Mesure de courant de décharge	28
II 3.3 Mesure du courant et de la tension de la grille	29
II 3.4 Mesure des paramètres de l'air	29
II.3.5 Détermination de la densité de courant	30

II.4 Conclusion.....	31
-----------------------------	-----------

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....	32
III.2. Système multipointes-plan.....	32
III.2.1.Caractéristique Courant-Tension.....	32
III.2.1.1. Influence du nombre de pointes.....	32
III.2.1.2. Influence de la variation de la distance inter-pointes.....	33
III.2.2. Densité de courant J	34
III.2.2.1. Distribution de la densité de courant sur le plan	35
III.2.2.1.1 Influence du nombre de pointes	35
III.2.2.1.2 Influence de la variation de la tension appliquée.....	37
III.3. Système multipointes-grille-plan	40
III.3.1. Caractéristique Courant-Tension	40
III.3.1.1. Influence du nombre de pointes	40
III.3.1.2. Influence de la distance inter-pointes	41
III.3.1.3. Influence de la distance pointes-plan	42
III.3.1.4. Influence de la distance grille-plan:	43
III.3.1.5. Influence du potentiel de la grille	43
III.3.2. Distribution de la densité de courant	45
III.3.2.1. Influence du nombre de pointes	45
III.3.2.2. Influence de la variation de la tension appliquée	47
III.3.2.3. Influence de la distance inter-pointes	48
III.3.2.3. Influence de la distance pointe-grille.....	49
III.3.2.3.2. Influence de la distance entre la grille et le plan	50

III.3.2.3. Influence de la tension appliquée sur la densité de courant J avec le potentiel de la grille constant	51
III.4 Conclusion.....	52

Conclusion générale

Conclusion générale.....	53
---------------------------------	-----------

Références bibliographiques

Introduction g é n é r a l e

Introduction générale

Dès les débuts de l'électrotechnique en générale et de la haute tension en particulier, l'attention des ingénieurs et des chercheurs fut attirée par le curieux phénomène désigné par « Effet couronne » ou « Corona », qui est utile dans de nombreuses applications (traitement de surfaces, dépoussiérage électrique, traitement de l'eau par l'ozone, séparation électrostatique, etc...), mais qui est également nuisible dans d'autres situations (pertes d'énergie sur les lignes de transmission, perturbations radioélectriques, défauts d'isolement, etc...)[1].

L'effet couronne est une décharge électrique entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur, elle se produit lorsque le potentiel électrique dépasse une valeur critique et les conditions ne permettent pas la formation d'un arc. Le principe consiste à appliquer une tension suffisamment grande à l'électrode active, qu'est de forme totalement différente et d'un rayon de courbure très faible (dizaines de micromètres) de l'électrode de masse, l'asymétrie de la géométrie des deux électrodes va créer un champ hétérogène dans l'espace qui les sépare, dont l'intensité dépasse le seuil d'ionisation du gaz. Le champ au voisinage de l'électrode active est intense et diminue en s'éloignant d'elle, sous l'effet du champ des charges électriques sont produites aux voisinages de l'électrode d'ionisation, puis elles dérivent vers l'électrode mise à la terre sous faible champ[1].

L'objectif de notre travail est d'étudier les effets des différents facteurs influant sur le développement de la décharge couronne produite par une électrode couronne à aiguilles (électrode multi-pointes). Ces types de configurations ont des avantages d'avoir une bonne résistance aux chocs mécanique et un faible potentiel d'apparition d'effet couronne, de même dans les systèmes d'électrodes de type triode dédiés au chargement des médias fibreux non-tissés utilisés dans les filtres à électrets.

Pour mieux cerner notre thème, nous avons réparti ce travail en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'étude de la décharge couronne où nous exposerons une vue générale sur les mécanismes de la formation de la décharge couronne dans les intervalles d'air, en décrivant les différentes étapes qui la constituent. Ensuite, la présentation des différentes applications industrielles de la décharge couronne sera suivie par une description générale du système d'électrode de types dual et triode.

Le deuxième chapitre présente le protocole expérimental tout en exposant le matériel utilisé dans les essais, le mode opératoire, les méthodes de mesures, ainsi que les précautions prises pour aboutir à des résultats fiables dans l'environnement du laboratoire.

le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus avec leurs interprétations.

Enfin, on termine ce travail par une conclusion générale où l'on explique l'intérêt de cette étude.

Chapitre I

Étude théorique de la décharge couronne

Chapitre I

Etude théorique de la décharge couronne

I.1 Introduction

Théoriquement, les gaz constituent des isolants électriques parfaits. Cela tient au fait qu'ils ne contiennent pas de particules chargées libres, mais seulement des atomes ou molécules neutres. En pratique, un gaz contient toujours un certain nombre de charges électriques libres dues à l'action de certains agents ionisants extérieurs permanents, tels que les radiations cosmiques, la radioactivité de la terre ou de celle de substance présentes dans l'atmosphère. L'application d'un champ électrique suffisamment intense à un gaz le rend plus ou moins conducteur et les phénomènes complexes qui s'y produisent portent alors le nom de décharge dans les gaz [2], et dont il existe plusieurs types.

I.2 Mécanisme de la formation de la décharge électrique

II.2.1. Électrons primaires

Il est tout à fait bien connu qu'aucune décharge électrique ne peut s'initier dans l'air sans la présence d'au moins un électron dans le volume de gaz couvrant l'espace inter-électrodes. Ces électrons, présents au tout début de la décharge sont communément appelés électrons germes ou encore électrons primaires. Ils permettent d'initier la première avalanche électronique sans laquelle aucun type de décharge ne peut prendre forme encore moins se maintenir [3]. Nous allons maintenant donner quelques indications sur les sources possibles d'électrons germes, nécessaires à l'amorçage de décharge électrique.

✓ *Rayonnement cosmique ou radioactivité naturelle*

Sous l'effet de l'irradiation par rayonnements cosmiques ou par le processus de radioactivité naturelle, 7 à 20 électrons par cm^3 /sec sont produits dans l'air à la pression atmosphérique [4].

✓ *Détachement d'électrons des ions négatifs*

C'est le processus principal de production d'électrons à partir d'ions négatifs. Ces derniers peuvent préexister dans l'espace inter-électrodes, c'est le cas de la présence des impuretés telle que O_2 ou H_2O et les pourvoyeurs principaux en électrons germes seront les ions négatifs $\text{O}_2-(\text{H}_2\text{O})_n$ ou $\text{H}_2\text{O}-(\text{H}_2\text{O})_n$ liés aux impuretés[5,6].

✓ *Contribution de la cathode*

Dans le cas d'une configuration pointe positive-plan négatif, la cathode est généralement une source d'électrons germes peu efficace, parce qu'elle est d'une part soumise à un champ électrique faible et d'autre part située à une distance importante de la zone de décharge.

I.2.2 Collisions élastiques et inélastiques

I.2.2.1. Collisions élastiques

Par définition, lors d'une collision élastique, l'énergie interne des particules entrant en collision ne subit aucune modification. Il y a simplement un changement de direction des particules, avec une redistribution des énergies de translation entre elles. Cela se traduit par la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique [7].

Il faut aussi remarquer que les particules lourdes échangent très facilement leur énergie par collision élastique alors que, lors de la collision d'un électron et d'une particule lourde, la fraction d'énergie est très faible. Un électron devra subir des milliers de collisions élastiques pour perdre son énergie [8,9].

Ces collisions ne modifient pas l'énergie interne des particules en question mais sont responsables des phénomènes thermiques (conduction et diffusion de la chaleur au sein du gaz).

I.2.2.2. Collisions inélastiques

Même si l'énergie cinétique n'est pas conservée, la collision inélastique est dite conservative lorsqu'il y existe un nombre de particule avant et après collision. C'est le cas par exemple des collisions entraînant l'excitation des niveaux optiques, vibrationnels ou rotationnels des molécules cibles [7].

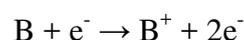
Les collisions inélastiques sont responsables de la fragmentation des molécules impactées ou de la modification de la distribution de l'énergie.

Les processus d'excitation deviennent significatifs lorsque le champ réduit augmente, cela entraîne une augmentation de l'énergie des particules projectiles au-delà du seuil d'excitation, les molécules de gaz se mettent en mouvement dans la direction du champ. Leur vitesse varie en fonction de la distribution et l'intensité du champ ainsi que d'autres paramètres tels que la pression, la température et l'humidité du gaz [7], [8].

I.3 Décharge de Townsend

L'énergie cinétique d'un électron détermine sa capacité à exciter ou à dissocier les molécules du gaz plasmagène. L'énergie acquise par un électron placé entre deux électrodes dépend de son libre parcours moyen et du champ électrique auquel il est soumis ($E=V/d$ dans le cas d'un champ uniforme, V étant la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes tandis que d représente la distance inter-électrodes).

L'obtention d'un nombre d'électrons suffisant pour exciter le gaz de façon significative exige un mécanisme de multiplication. Si l'énergie d'un électron est supérieure à l'énergie d'ionisation d'une molécule B, alors un choc inélastique est susceptible de libérer un électron, ce que traduit l'expression suivante :



Les deux électrons obtenus par ionisation sont alors accélérés par le champ électrique et peuvent à leur tour ioniser de nouvelles molécules. Townsend a proposé en 1914 l'introduire d'un coefficient d'ionisation α (appelé premier coefficient de Townsend) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation [10]. Ce coefficient dépend du champ réduit E/N (avec N désignant la densité du gaz) et son inverse $1/\alpha$ représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de $e^{\alpha d}$ électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé "avalanche électronique". La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (I.1)$$

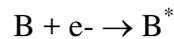
Avec I : courant (A)

I_0 : courant initial dû aux électrons primaires (A)

d : distance inter-électrode (m)

α : Premier coefficient de Townsend (m^{-1})

En dehors de ce mécanisme de multiplication des électrons proposé par Townsend, des électrons secondaires peuvent être émis par impact d'ions positifs B^+ sur la cathode ou par impact de photons (émis par désexcitation radiative après impact électronique) :



La probabilité de produire ainsi des électrons secondaires se traduit par l'introduction d'un second coefficient de Townsend γ . Le critère d'auto-entretien de la décharge (nombre adimensionnel) s'écrit alors :

$$\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (I.2)$$

La présence des gaz ayant des atomes à ion électronégatifs, tel le SF₆, peuvent capter un électron pour former un ion négatif. Ce phénomène est caractérisé par le coefficient d'attachement η qui s'oppose au processus. Comme ce mécanisme est consommateur d'électrons, il est compétitif du mécanisme d'ionisation. Pour prendre en compte ce phénomène, il convient alors d'introduire dans la relation de Townsend une probabilité d'attachement électronique η :

$$I = I_0 e^{(\alpha - \eta)d} \quad (I.3)$$

Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit alors :

$$\gamma \cdot (e^{(\alpha - \eta)d} - 1) = 1 \quad (I.4)$$

Pour l'auto-entretien de la décharge, il faut que tout électron qui quitte la zone d'ionisation soit remplacé. Chaque électron doit créer suffisamment d'ions positifs, de photons et d'espèce métastable pour qu'au moins l'un d'eux puisse produire de nouveaux électrons, appelé électrons secondaires.

Toutes les particules ainsi créées vont se déplacer dans l'espace inter-électrodes, sous l'influence du champ électrique appliquée et elles vont générer un courant électrique, appelé courant de décharge. La figure (I.1) décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée [11]. La courbe permet de distinguer quatre régimes :

➤ **Régime I- Collecte de charge**

Le courant est très faible et il est dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou rayonnement cosmique. Dans ce cas le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique.

➤ **Régime II-Régime impulsionnel**

Lorsque la tension atteint une valeur seuil V_0 , le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule environnante. Le processus d'avalanche se déclenche alors sans que le critère d'auto-entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire. Car le courant reste faible.

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

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

➤ **Régime IV-Régime disruptif**

Les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. C'est le régime des décharges disruptives tel que les arcs électriques [12].

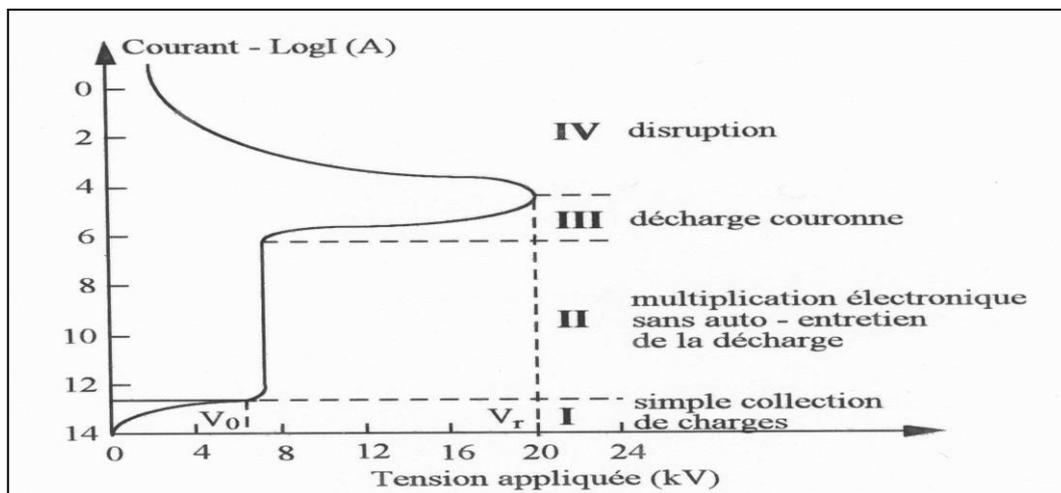


Figure I.1. Caractéristique courant-tension d'une décharge dans l'air à pression Atmosphérique [13].

I.4 Mécanismes des streamers

Dans la théorie de Townsend, les processus d'émission cathodique jouent un rôle fondamental dans l'amorçage de la décharge autonome. Cette théorie ne peut cependant expliquer les temps de développement de la décharge mesurés (10^{-9} à 10^{-7} s) dans le cas d'intervalles inter-électrodes importants et de pressions élevées. Ces temps sont beaucoup plus faibles que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode conditionnant le passage des décharges non autonomes en autonomes (10^{-5} à 10^{-4} s). Aussi, la tension d'apparition de l'étincelle dans les grands intervalles ne dépend-t-elle pas du matériau de la cathode contrairement à ce qui est prévu par la théorie de Townsend. Pour expliquer le mécanisme de développement des décharges dans les grands intervalles, L. B. Loeb et J. M. Meek [14] 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.2).

Selon ce modèle, la décharge se développe sous forme d'un canal très conducteur appelé streamer (canal de plasma) [15].

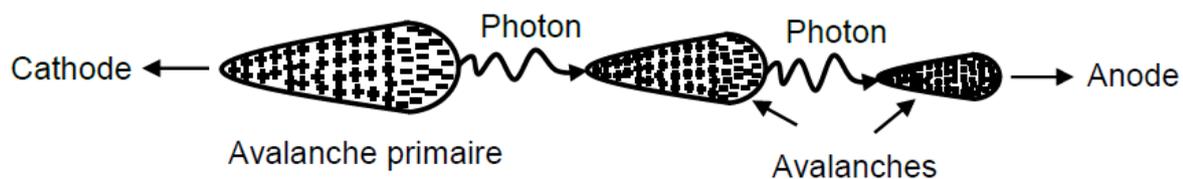


Figure I.2. Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes.

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. 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 immobiles en raison de leur mobilité. 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. Le champ sur les flancs de l'avalanche diminue alors. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ 108 électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur le front et sur la queue de l'avalanche. Dans l'avalanche, les électrons et les ions se recombinent en partie. L'énergie rayonnée peut provoquer la photo-ionisation des particules de gaz, se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'avalanche. Les électrons nouvellement créés peuvent, si le champ local est suffisamment intense, conduire par chocs ionisants, à la naissance de nouvelles avalanches, dites secondaires qui à leurs tours créeront une charge d'espace positive en avant de la première. Ces avalanches secondaires jouent le rôle de facteur d'entretien de la décharge (qui devient autonome) et d'amplification du nombre de porteurs de charges libres. Cette amplification va s'effectuer surtout dans l'axe du champ et de l'avalanche précédente. Chaque avalanche continue à se développer pour son propre compte et de façon très rapide. La première n'a pas fini de croître que déjà toute une chaîne se crée. Alors que les électrons se déplacent vers l'anode, la chaîne semble progresser vers la

cathode. La progression de cette chaîne est très rapide du fait que les avalanches se transplantent par rayonnement lumineux et non par migration d'électrons et d'ions. 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.

D'autre part, lors de collisions élastiques avec les particules de gaz, les charges leur transmettent une partie de leurs énergies cinétiques. Il en résulte une augmentation de la température du gaz. Tant que celle-ci est inférieure à celle nécessaire à l'ionisation thermique, elle n'aura aucune influence sur le développement de la décharge. Ce stade de la décharge est appelé streamer. Le champ extérieur nécessaire à son entretien est inférieur à celui conditionnant l'ionisation par collisions. Pour l'air par exemple, le champ moyen du streamer se développant à partir de l'anode est d'environ 5 kV/cm et de 15 kV/cm lorsque celui-ci se développe à partir de la cathode alors que le champ critique est d'environ 30 kV/cm (dans les conditions normales de pression et de température).

La figure I.3 représente les différents stades de développement de la décharge en streamer. Le modèle de développement de la décharge en canal dans les gaz, est très important du point de vue qualitatif ; il permet d'une manière convaincante, de connaître la probabilité conditionnant le mécanisme de décharges pour les grandes valeurs du produit ($p.d$) [14-15].

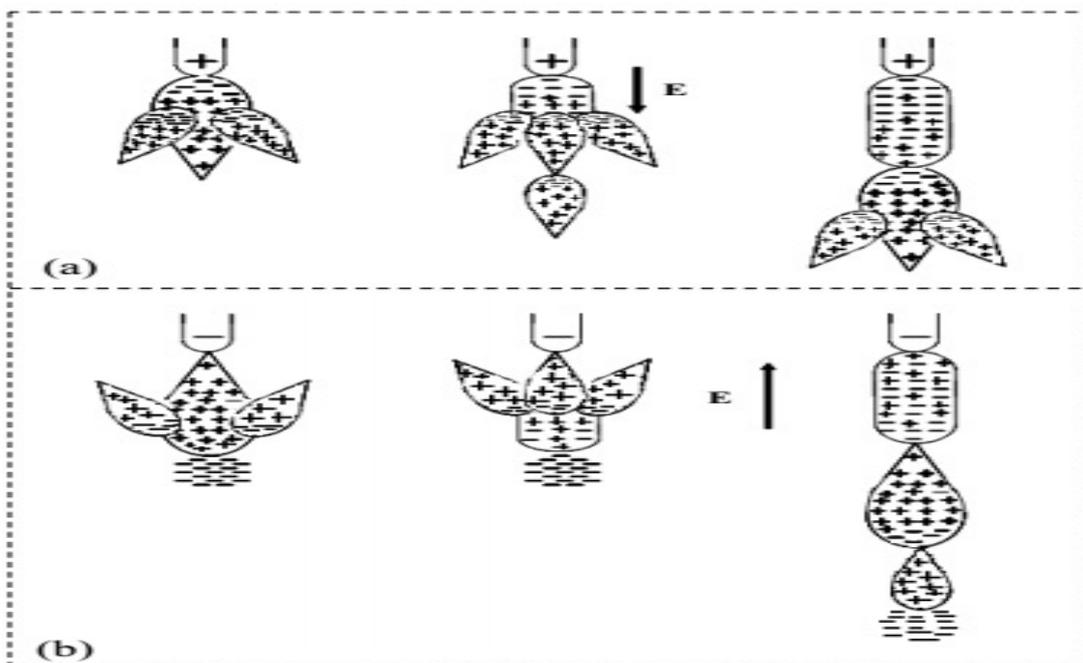


Figure I.3. Étapes successives de développement d'un streamer dans un gaz en configuration d'électrodes pointe - plan : (a) pointe positive ; (b) pointe négative [16].

I.5 La décharge couronne

La décharge couronne qui, habituellement, a lieu à pression atmosphérique est souvent associée à deux électrodes asymétriques [17]. Parmi les configurations d'électrodes les plus utilisées, on trouve les systèmes point-plan, couteau-cylindre, fil-plan, fil-cylindre ou cylindre-cylindre (figure I.4), La distance inter-électrode est généralement de l'ordre du centimètre [18].

La décharge peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode active [17].

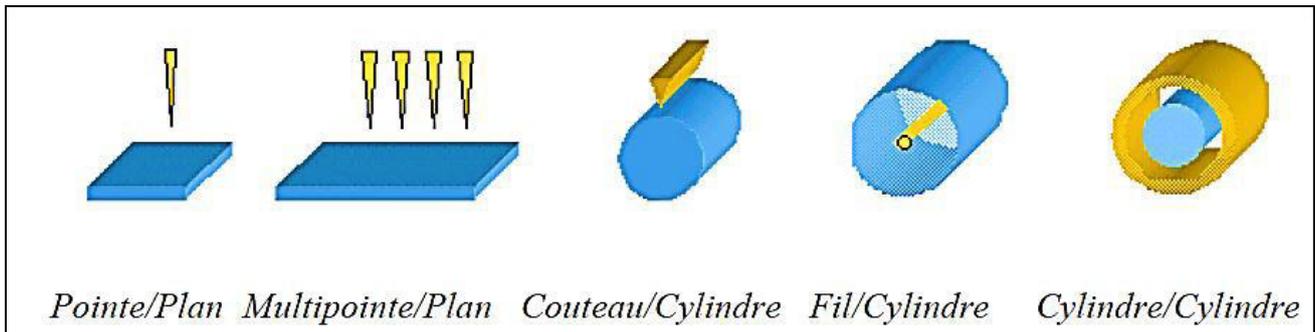


Figure I.4. Différentes configurations de décharge couronne [18]

I.5.1 facteur influencent la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et la caractéristique de la décharge couronne. On distingue trois facteurs essentiels :

- ✓ Facteurs géométriques
- ✓ Facteurs physiques
- ✓ Facteurs électriques.

I.5.1.1 Facteurs géométriques

- ✓ L'augmentation du rayon de courbure d'une pointe ou le diamètre d'un fil augmente la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne [19].
- ✓ La distance inter-électrodes : le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tensions inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes [20].
- ✓ La distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrodes dépend de la configuration géométrique des électrodes comme le cas en géométrie pointe-plan et fil-plan.

Dans la configuration pointe-plan, la décharge couronne présente une zone de stabilité et une très bonne gamme de fonctionnement, par contre pour le cas en géométrie (fil-plan) dès l'apparition du champ électrique, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique; donc la gamme de fonctionnement est très faible [21].

I.5.1.2 Facteurs physiques

La décharge couronne est influencée par de nombreux facteurs : l'humidité, la température et la pression. Des études expérimentales ont été menées pour comprendre l'effet de ces paramètres physiques.

a) Effets de l'humidité sur la décharge couronne

Nous présentons ici une nouvelle méthode de collecte des aérosols, pouvant capturer efficacement et indépendamment de leur taille toutes sortes d'aérosols, dont la taille peut varier de quelques dizaines de nanomètres à quelques micromètres (taille 10nm-10 μ m). Le système de collecte consiste en un électro-filtre standard, dans lequel une petite quantité de vapeur d'eau (humidité de l'air) est injectée au cœur de l'écoulement d'air de façon à augmenter leur taille [22,23], ce qui permet d'augmenter significativement le rendement pour la collecte des particules nanométriques. Cette méthode a l'intérêt majeur de présenter un bon rendement pour une gamme très étendue de tailles de particules [24,25] et de concentrer les particules collectées dans un petit volume d'eau.

La vapeur d'eau injectée a une influence sur le comportement de la décharge couronne. L'augmentation de l'humidité conduit à la décroissance de la tension seuil et la mobilité des porteurs de charges de la décharge couronne. En effet, l'eau contenue dans l'air se comporte comme un gaz électronégatif [26-28].

b) Effets de la température sur la décharge couronne

Des études expérimentales ont été menées pour comprendre l'effet de température sur la décharge couronne :

Avec l'augmentation de la température à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne à cause de l'augmentation du libre parcours moyen [21].

Lorsque la température augmente, les électrons gagnent plus d'énergie pour former l'avalanche. Ainsi, le seuil de la décharge couronne diminue à une température élevée des gaz [26]. Une élévation de température produit un accroissement de la mobilité des ions. On obtient alors une intensité d'ionisation plus importante dans l'espace de la couronne et un accroissement du courant dans la zone extérieure. La tension d'apparition de l'effet couronne devient plus faible. Par ailleurs, la densité des gaz augmente en même temps que la température. Ainsi la vitesse de migration, et le rendement du dépoussiérage diminuent quand la température augmente [29].

c) Effet de la pression sur la décharge couronne

L'influence de la pression sur le courant de décharge fourni par la source d'ions est très marquée. Dans le domaine 0,1-1,0 bar, Nouri [27,30] a trouvé que l'effet de la pression sur le seuil est équivalent à celui de la distance inter-électrodes. D'après la loi de Paschen, plus la pression augmente, plus le nombre de particules dans l'espace inter-électrodes augmente, et les libres parcours moyens des particules chargées diminuent. Par conséquent, l'ionisation de l'air est réduite. Le seuil d'apparition de la décharge couronne augmente avec la pression, par contre la mobilité des porteurs de charges diminue [27-30].

I.5.1.3. Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative. Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [31].

I.5.2 Type de décharge couronne

Les décharges couronnes classiquement établie entre une électrode active et une électrode passive (électrode reliée à la terre). L'électrode active est une pointe (ou un fil de petit diamètre) à laquelle on applique haut potentiel électrique tandis que l'électrode passive est une plaque ou une grille (figure I.5). On obtient alors une décharge couronne volumique. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. En l'absence de charge d'espace, Hartmann [32] a établi une expression du champ électrique E en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie x :

$$E = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln\left(\frac{2d+r}{r}\right)} \quad (\text{I.6})$$

Avec V le potentiel, d la distance inter-électrodes, r le rayon de courbure de la pointe et x l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine $x=0$

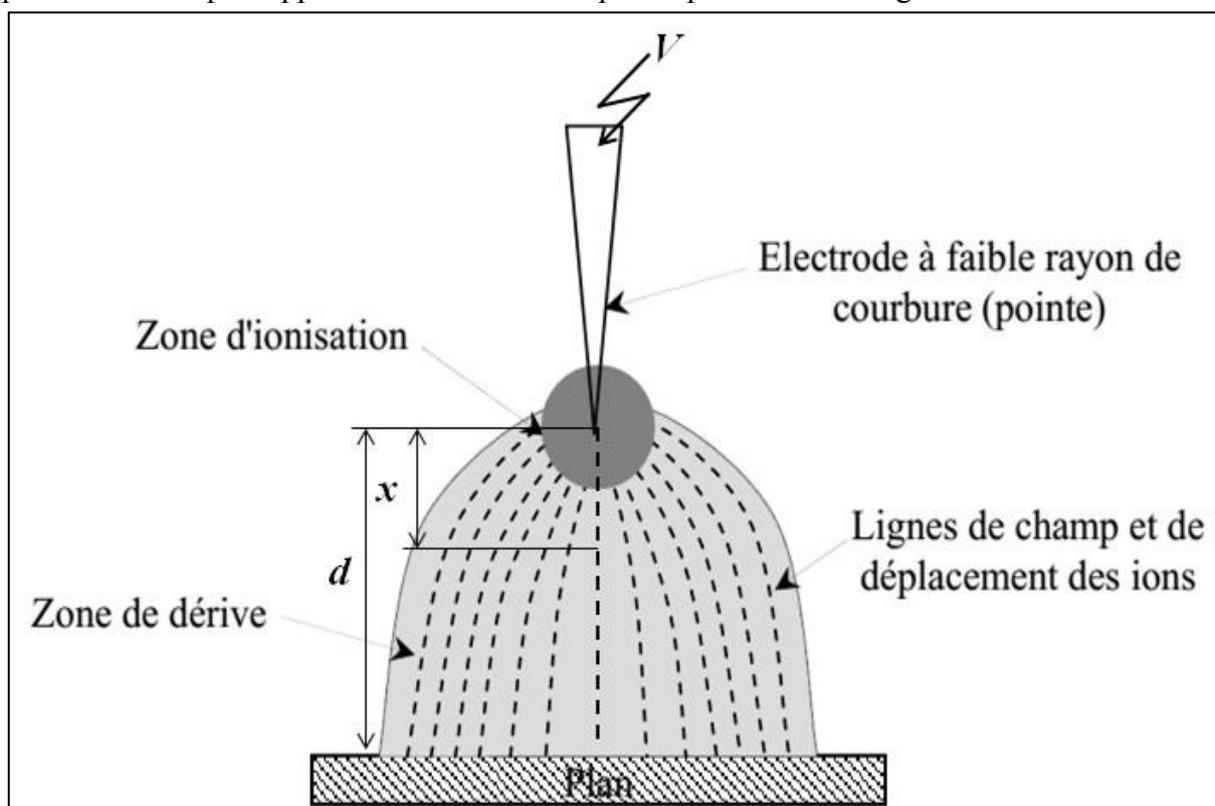


Figure I.5. Topographie de la décharge couronne volumique en configuration pointe [33]

Dans une configuration fil-plan, Lacoste et all. [34] ont utilisé :

$$E = Ei \frac{r}{x} \tag{I.10}$$

Avec Ei le champ électrique à la surface du fil que l'on peut déterminer par la formule empirique de Peek.

Dans la configuration pointe-plan, le champ électrique au voisinage de la pointe est intense ce qui permet l'ionisation. Cette région d'ionisation se caractérise par une zone «bleutée » au bout et tout autour de la pointe. La forme en couronne autour de la pointe a donc donnée le nom à la décharge. Après cette zone d'ionisation se trouve une région de champ plus faible où les particules ionisées dérivent. L'électrode passive sert alors à collecter les particules chargées. Par ailleurs, la décharge couronne est le siège d'une forte activité physicochimique. Enfin, selon la polarité du potentiel appliqué à la pointe on distingue la décharge couronne positive de la décharge couronne négative.

I.5.2.1 Décharge couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand le fil est porté à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de fil, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (le fil).

Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé de la figure (I.6).

Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb,

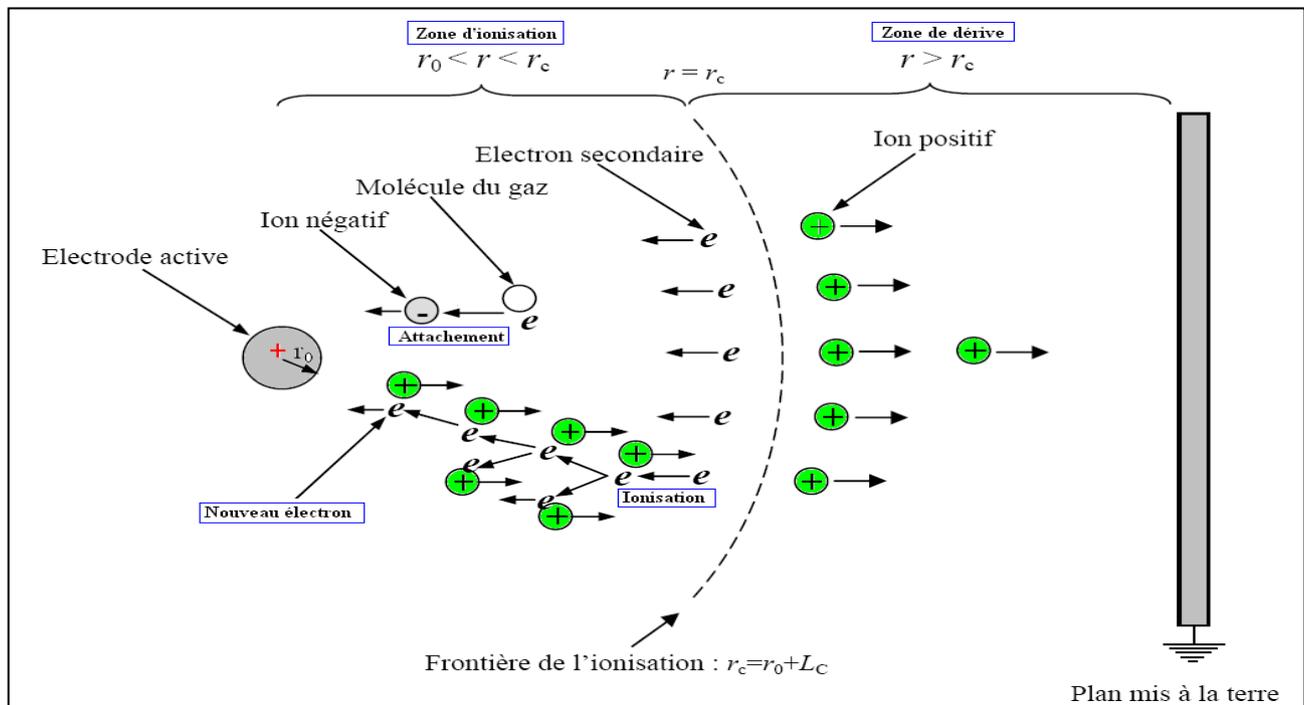


Figure I.6. Schématisation d'une décharge couronne continue positive [35].

jusqu'à une distance de fil (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ($< 30 \text{ kV/cm}$ dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs [34], est appelée région de « dérive » (Figure I.5). Pour cette décharge, il y a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode.

D'après les modélisations de Loiseau et al, (2002) [36], la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de $2 \times 10^5 \text{ m/s}$) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence 10 kHz . Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires. Goldman et al. (1985) [37] indique qu'un courant positif de $50 \mu\text{A}$ se décomposerait en un courant unipolaire continu de $20 \mu\text{A}$, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à $30 \mu\text{A}$ percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz .

I.5.2.2 Décharge couronne négative

Les mécanismes de génération d'électrons et d'ions dans la décharge couronne négative diffèrent de ceux de la décharge couronne positive, dans les décharges couronnes négatives, les électrons sont présents à l'extérieur de la région d'ionisation et les électrons secondaires sont

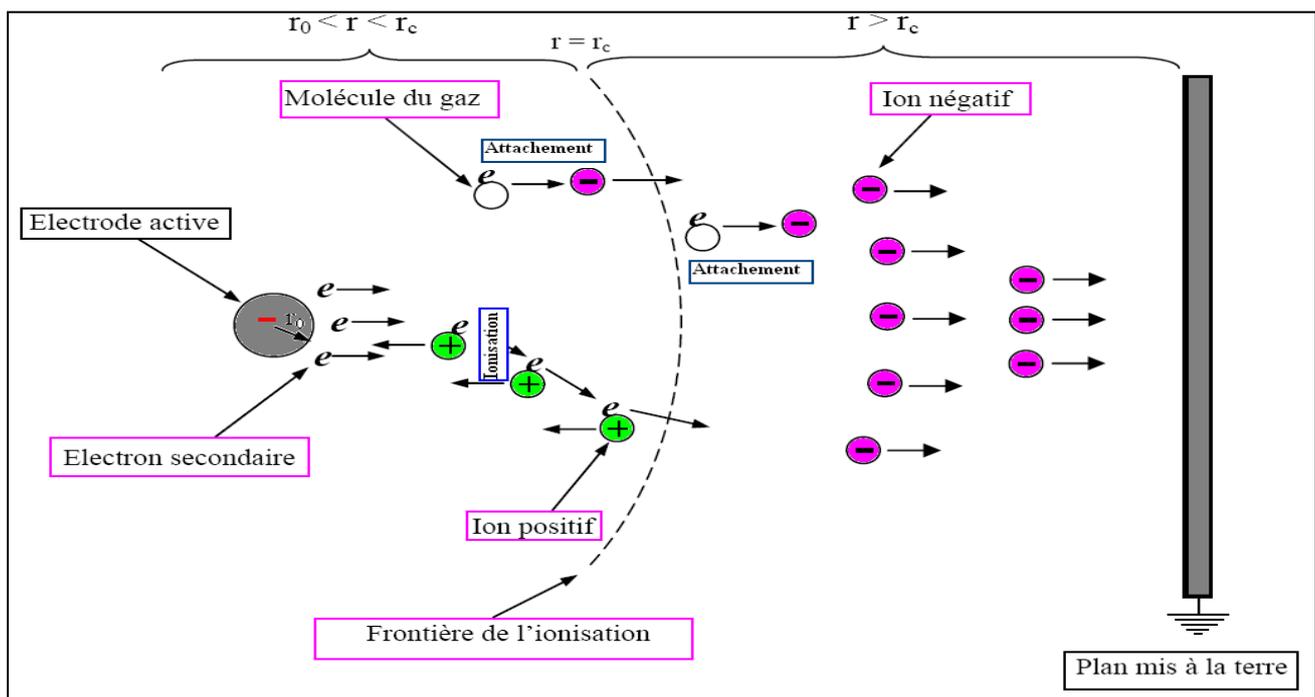


Figure I.7. Schématisation d'une décharge couronne continue négative [35].

produits par la photoémission sur la surface de la cathode.

La figure (I.7) montre les processus qui se produisent dans une décharge couronne négative à courant continu pour une géométrie fil-cylindre (tension négative appliquée au fil-cylindre relié à la masse). Contrairement à la décharge couronne positive qui est uniforme, la décharge couronne négative fait apparaître des points séparés (*trichels*) le long du fil. Lorsque la tension appliquée est au

voisinage de la tension d'amorçage, seuls quelques *trichels* apparaissent. Ils sont irrégulièrement distribués le long du fil. Si on augmente la tension appliquée, le nombre des *trichels* augmente et la distribution de ces *trichels* devient plus uniforme [38].

I.5.2.2.1 Apparence lumineuse

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

I.6 Conséquence de l'effet de couronne dans l'air

I.6.1 Pertes

Dans une décharge couronne, une grande partie de l'énergie électrique est perdue dans les collisions entre les molécules neutres du gaz. Ainsi les pertes dépendent principalement de la quantité de charge produite. De plus elles sont fortement influencées par l'état de surface du conducteur et par les conditions climatiques. En effet, la valeur moyenne annuelle des pertes par effet de couronne est relativement faible soit de l'ordre de quelques kW/cm.

Mais par mauvais temps on peut atteindre une valeur maximum de pertes par effet de couronne plus de vingt fois plus grande que la valeur moyenne. Ces augmentations ont une influence sur la livraison d'énergie surtout pendant les périodes de pointe. Pour ces raisons les concepteurs de ligne déterminent le diamètre et le nombre de conducteurs par phase en considérant le champ critique d'apparition de l'effet de couronne et de l'intensité de précipitation [40].

I.6.2 Interférences radio télévision

La nature impulsionnelle de la décharge couronne est à l'origine des parasites ou interférences radio télévision qui peuvent être captées par les antennes des récepteurs qui se trouvent proches des lignes de transport d'énergie (moins de 100 m). Outre l'effet de couronne, les étincelles ou les petits arcs électriques sont également responsables de perturbations [40].

I.6.3 Bruit audible

L'effet de couronne est à l'origine d'une onde sonore produite par une variation locale de la pression qui se propage dans l'air environnant. La principale source de bruit audible provient des gouttes suspendues ou des gouttes passant à proximité des conducteurs. Il a été observé aussi que le givre est un générateur de bruit audible. De plus, en présence de la vibration induite par effet de couronne sous pluie, les bruits irréguliers sont parfois modulés à la fréquence de vibration mécanique des conducteurs [40].

I.7 Applications industrielles

Les applications industrielles des décharges électriques sont très variées et touchent à des domaines d'applications assez hétérogènes. Les plasmas sont utilisés à différents titres : pour leurs

hautes températures, parce qu'ils sont riches en espèces réactives chimiquement et également pour leurs propriétés lumineuses. La diversité de ces applications fait que les sources électriques, qui leurs sont liées, ont des caractéristiques variées.[42]

I.7.1. Dépollution par la décharge couronne

Le traitement de gaz avec les décharges couronne se fait par des réacteurs. L'utilisation des réacteurs plasmas froids hors équilibre générés par des décharges électriques de type couronne nous permet de traiter les gaz à pression atmosphérique. Le traitement s'effectue soit en détruisant les espèces toxiques, soit en les transformant en espèces moins nocives et/ou plus facilement traitables par d'autres techniques de dépollution. Les espèces toxiques traitées peuvent être des oxydes d'azote et de soufre ou des composés organiques volatiles. Des recherches sont également en cours pour estimer le potentiel de traitement des surfaces par des dispositifs hybrides couplant les décharges couronne avec des catalyseurs.

Dans certains cas, le réacteur corona peut également servir de précipitation électrostatique et piéger les poussières ou les particules lourdes. Le traitement d'un gaz d'échappement par réacteur corona s'effectue en trois principales étapes comme il est indiqué sur la figure I.8.

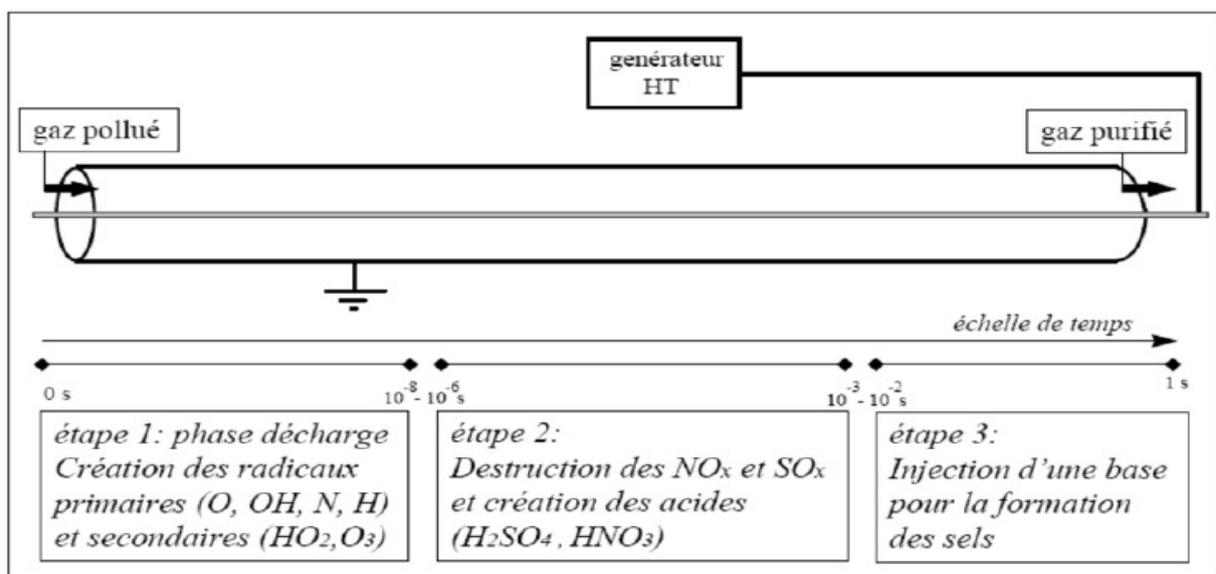


Figure I.8. Représentation schématique des principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne [42]

✓ Étape 1

C'est la phase de décharge en elle-même qui dure quelques centaines de ns. Pendant cette phase de décharge, il y a création de radicaux du type OH, H, N, O, HO₂, O₃, etc. Ceci se fait par les particules majoritaires du gaz (collisions électron– neutre) puis par des réactions secondaires telles que les collisions entre les ions et les molécules majoritaires du gaz. On peut noter que les collisions électron – polluant ou ion – polluant sont, dans la plupart des cas, inefficaces dans la réduction directe des polluants à cause de la très faible concentration de ces derniers (1000 à 10000 fois plus faible que les molécules majoritaires) et donc à une très faible probabilité d'interaction

✓ Etape2

C'est une phase de post décharge. Elle est décalée spatialement et/ou temporellement par rapport à la première étape et dure de quelques microsecondes à quelques millisecondes. Durant cette phase, les radicaux qui ont été formés lors de la première étape réagissent avec les espèces polluantes pour former de nouvelles espèces stables.

✓ Etape3

Elle peut intervenir beaucoup plus tard dans le temps et/ou l'espace. La cinétique réactionnelle liée à cette étape fait intervenir différents processus. Par exemple, dans le cas d'une décharge couronne dans l'air humide, les acides formés précédemment vont s'entourer de molécules d'eau et former une phase liquide. L'adjonction d'une base qui réagit avec les acides entraîne la formation de sels.

I.7.2 Traitement des surfaces

Le traitement des surfaces est le deuxième domaine d'utilisation des plasmas froids produits par décharge couronne. Le premier secteur à les avoir adoptés couramment est la micro électronique pour la fabrication des circuits intégrés et des circuits imprimés. En raison de leurs caractéristiques et de leurs qualités intrinsèques, ils se diffusent dans d'autres secteurs comme la métallurgie et la mécanique (durcissement superficiel et protection anti corrosion des pièces et outillages), la plasturgie (préparation de la surface à une enduction ultérieure, nettoyage et dégraissage, élaboration de fonctions sélectives sur membranes, modification du coefficient de frottement, création d'un effet barrière, notamment pour les emballages alimentaires), le textile (anti-mouillabilité, anti glisse), ou encore l'optique et l'optoélectronique (dépôts organo métalliques multicouches).

La figure I.9 représente un exemple d'utilisation de la décharge à barrière diélectrique pour le traitement d'une surface de plastique.

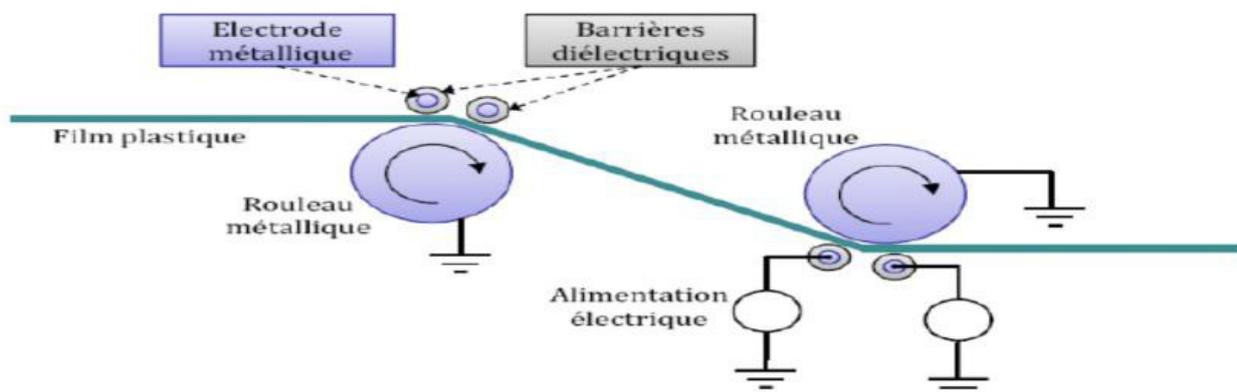


Figure I.9. Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique de plastiques [43].

I.7.3 Charge par décharge couronne

La charge par décharge couronne est adéquate pour la formation des électrets, qu'ils soient des films ou des matériaux fibreux. Cette méthode de charge est largement utilisée dans l'industrie où la formation d'électrets est réalisée à la chaîne. Le procédé industriel est assez performant, il permet d'asservir le potentiel de surface des électrets afin de contrôler le niveau et la qualité du dépôt des charges électriques [44-49].

Ce procédé de formation est basé sur la génération de décharge couronne en appliquant une tension assez élevée (dizaines de kV) à une électrode de faible rayon de courbure (centaines de micromètres) située à une certaine distance (plusieurs centimètres) par rapport à un plan de masse. L'électrode active peut être une pointe, plusieurs pointes, ou un fil très fin. Le champ électrique dans l'espace inter électrodes est non uniforme, son intensité au voisinage de l'électrode active est assez élevée pour que l'air soit ionisé. Le diélectrique est posé sur le plan de masse. Sous l'action du champ électrique, il reçoit des charges de même polarité que l'électrode couronne. La figure I.10 illustre le principe de formation d'électret par décharge couronne négative.

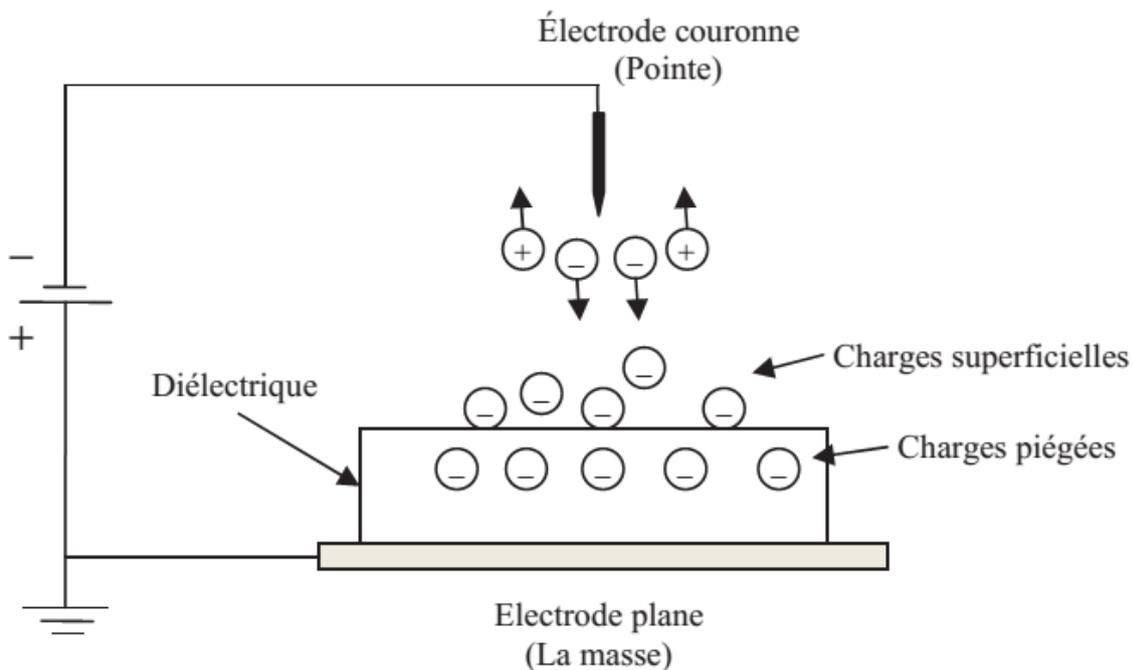


Figure I.10. Principe de formation d'électret par décharge couronne. [50]

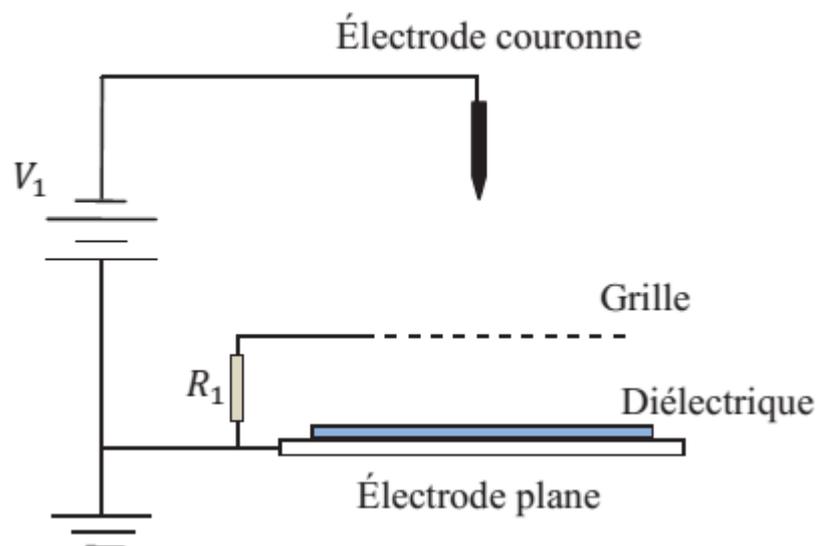
Si la décharge couronne se produit à partir d'une électrode de polarité négative, dans l'air à pression atmosphérique et à une humidité relative comprise entre 40% à 60%, des ions négatifs seront formés tels que CO_3^- et O_2^- . Une fois ces ions atteignent la surface libre du diélectrique, ils seront neutralisés en cédant leurs électrons et une couche d'électrons piégés est formée juste au-dessous de la surface libre du diélectrique. Par contre, des ions positifs seront formés tels que $(\text{H}_2\text{O})_n\text{H}^+$, NO^+ et NO_3^+ lorsque la polarité des électrodes couronne est positive. Ces ions seront neutralisés en acceptant des électrons lorsqu'ils atteignent le diélectrique, laissant ainsi une couche de trous piégés au-dessous de la surface libre du matériau [51,52].

I.7.4 Autres applications

Outre les applications citées précédemment, l'effet couronne est aussi utilisé dans l'élimination de l'électricité statique, dans les photocopieurs ou les imprimantes à jet d'encre [51].

I.8. Le système d'électrodes triode

Le contrôle du dépôt de charges par le dispositif primaire de la figure I.11 est extrêmement difficile, voire impossible. L'insertion, entre le diélectrique et l'électrode couronne, d'une grille conductrice portée à un potentiel plus faible et de même polarité que le potentiel appliqué à l'électrode active permettra le contrôle du niveau du potentiel de surface et l'obtention d'un dépôt uniforme. Dans cette configuration d'électrode, appelée configuration triode, les charges issues de l'ionisation de l'air sont accélérées sous action du champ électrique, passent à travers la grille et viennent se déposer sur la surface libre du diélectrique. Le potentiel de surface du diélectrique croît jusqu'au niveau du potentiel de la grille. A partir de ce moment-là, le champ entre la grille et la surface du diélectrique est nul. Les ions ne traversent plus la grille.



Le potentiel de la grille est celui que résulte du passage du courant, acheminé par la grille vers la masse, à travers la résistance R_1

Figure I.11. Dispositif triode utilisé pour la charge par effet couronne [50].

Ainsi le potentiel de surface est limité par le potentiel de la grille. Il existe plusieurs dispositifs à triode pour la formation contrôlée d'électrets [44, 45, 47, 48, 52-53]. La figure I.11 représente le dispositif à triode de charge par décharge couronne. Ces ions (positifs ou négatifs selon la polarité de la pointe) peuvent se déposer sur une surface isolante placée à proximité. Il en résulte

une densité superficielle de charge sur cette surface. Cette méthode de charge d'une surface est plus facile à maîtriser et la charge est plus uniforme que celle obtenue par frottement [54].

I.8.1 Processus de charge dans une configuration triode

En considérant les dimensions des mailles de la grille assez petites devant la distance d entre la grille et le plan de masse, l'ensemble grille-plan peut être assimilé à une configuration d'électrodes définie par deux plans parallèles. La topographie du champ électrique, définie par la distribution du champ et du potentiel électrique dans le système triode de charge, permet de connaître les caractéristiques qualitatives du procédé de charge. En effet, ce procédé dépend du processus de génération d'ions par effet couronne et de la dérive des charges sous l'action du champ électrique le long des lignes caractéristiques. La décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à la modification de la conductivité d'un gaz à proximité d'un conducteur de faible rayon de courbure, porté à un potentiel positif ou négatif assez élevée dont le champ électrique environnant est intense mais non disruptif. Dans le cas de la configuration triode, où une électrode (pointe) est utilisée pour générer la décharge couronne et la grille est reliée à la masse via une résistance électrique, la conductivité est due aux phénomènes d'ionisation intense de l'air au voisinage immédiat de la pointe à potentiel élevé. Ainsi, l'espace inter électrodes est répartie en trois zones telles qu'elles sont illustrées sur la figure I.12 [50].

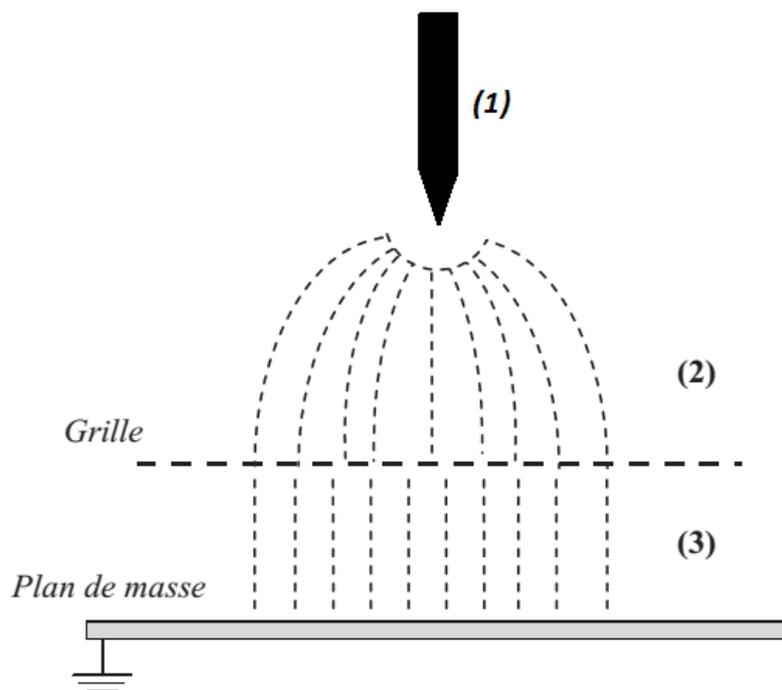


Figure I.12 Décharge couronne dans le système triode de charge.[50]

La zone active (1) est près de l'électrode active où le champ est supérieur au champ critique du minimum d'ionisation. Elle est caractérisée par une densité de charge totale nulle. Le champ électrique est très inhomogène dans la zone (2) et pratiquement nul dans la zone (3). En présence de la décharge, des charges de même polarité que celle de l'électrode duale sont collectées par la grille

et s'écoulent à travers la résistance vers la masse. La tension produite aux bornes de la résistance fixe le potentiel de la grille.

En présence d'un matériau diélectrique posé sur le plan de masse, les charges qui traversent la grille sont attirées vers la masse sous l'action du champ électrique et interceptées par ce diélectrique. Ainsi la surface libre du matériau subit un dépôt de charges sous l'action du champ électrique dû à la différence de potentiel entre la grille et le plan de masse. Le matériau continue à se charger jusqu'à ce que le potentiel de surface de celui-ci soit égal à celui de la grille. Ainsi, la zone (2) est caractérisée par une charge d'espace importante tandis que la zone (3) est caractérisée par un champ électrique et une charge d'espace pratiquement négligeables. La figure I.13 illustre l'influence de la position de la grille sur la largeur de la surface chargée qui se rétrécit lorsque la grille est très proche de l'électrode couronne [50].

I.8.2 l'effet de la position de la grille sur la largeur du dépôt

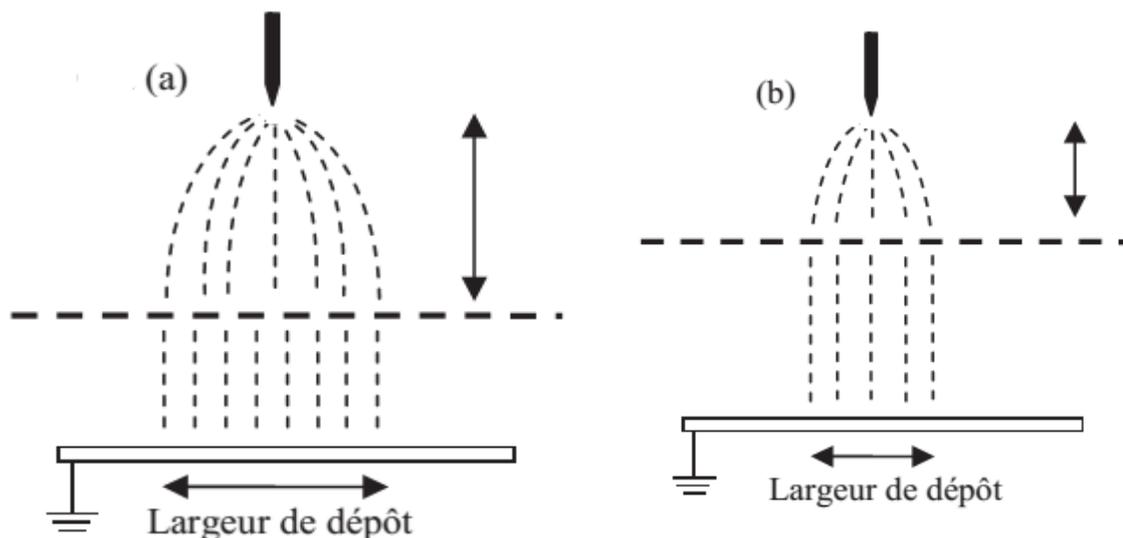


Figure I.13 Effet de la position de la grille sur la largeur de dépôt. [50]

Si la grille est très proche de la masse, telle qu'elle est présentée à la figure I.14, l'inhomogénéité du champ électrique dans la zone (3) s'accroît et il apparaît des zones non chargées. En effet, les dimensions des mailles de la grille ne sont plus négligeables par rapport à la distance d relativement petite, alors l'uniformité de dépôt n'est plus garantie. Ainsi, il faut maintenir une distance minimale entre la grille et le plan de masse afin que l'ensemble grille-plan soit semblable à une configuration plan-plan et pour éviter, lors de la charge du média fibreux non tissé, tout contact entre la grille et les fibres du matériau.

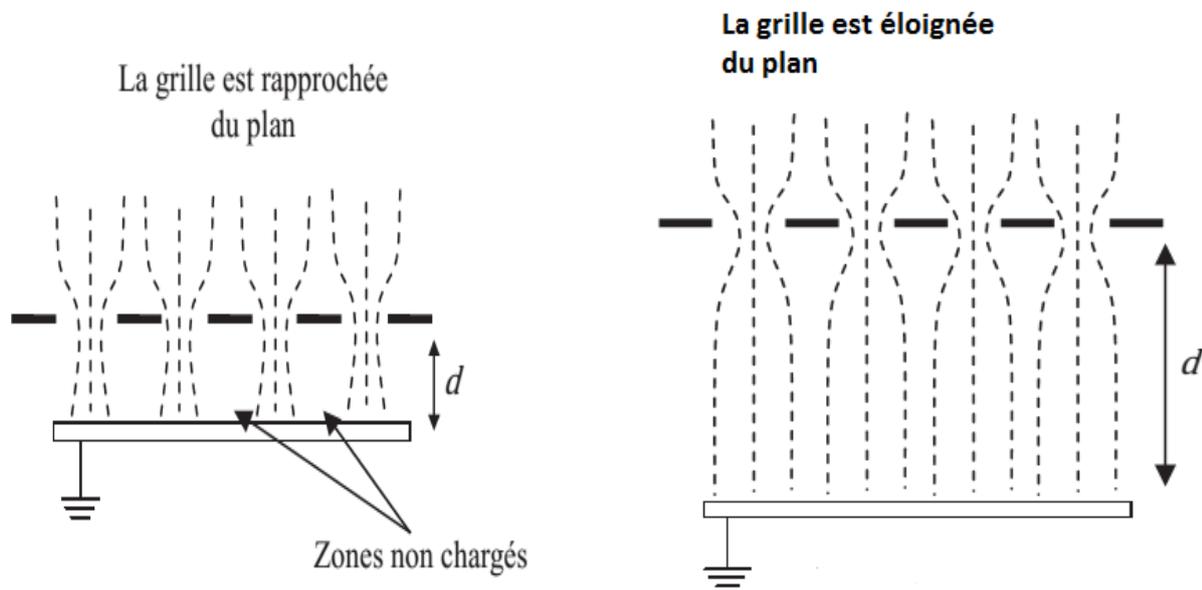


Figure I.14. Effet de la position de la grille sur l'uniformité de dépôt. [50]

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les phénomènes liés aux décharges électriques. L'étude de ces décharges dans des intervalles d'air présente un intérêt de vue technologique et l'étude des mécanismes de la décharge électrique a montré que le phénomène était d'une très grande complexité. Malgré les grandes avancées effectuées dans les applications, beaucoup de processus physiques fondamentaux sont toujours sujets à des investigations. Les mécanismes de développement de l'avalanche électronique et de propagation des décharges ont été décrits. Les électrons accélérés par le champ électrique entrent en collision avec les molécules neutres présentes dans l'espace inter-électrodes et conduisent à l'excitation et à l'ionisation du gaz. Nous pouvons considérer que ces mécanismes, qui ont surtout été décrits dans la littérature pour des configurations pointe-plan.

La décharge couronne est une décharge non homogène, générée à pression atmosphérique dans un système d'électrodes fortement dissymétriques. En effet, lors de la décharge, l'électrode de faible rayon de courbure soumise à une haute tension est le siège d'un fort champ électrique, qui constitue le facteur clé dans l'ionisation des espèces neutres présentes dans le gaz. Les phénomènes d'ionisation et d'attachement se sont révélés être d'intérêt particulier, car étant les principaux phénomènes contrôlant la décharge. Donc l'étude des phénomènes physiques fondamentaux de la décharge couronne nous permet de définir les paramètres essentiels influençant la décharge tel que l'air environnant le conducteur, le diamètre de conducteur, la tension appliquée, la distance entre les électrodes, ... etc.

Chapitre II

Installation expérimentale

Chapitre II

Installations expérimentales

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et à la présentation de l'ensemble des moyennes et du matériel expérimental utilisé dans ce travail.

Ce dernier a pour but de déterminer les paramètres de la décharge couronne (tension de seuil, densité de courant, la caractéristique Courant-Tension), ainsi que les paramètres qui influent sur cette décharge (nombres d'électrodes actives utilisées, la distance inter-pointes, la distance inter-électrodes (pointes actives-plan)).

Dans un premier temps nous avons effectué plusieurs séries de mesure de la caractéristique $I=f(V)$ et de la densité de courant sans grille. Par la suite on a inséré une grille conductrice entre l'électrode active et le plan et on a refait les mêmes mesures pour pouvoir voir l'influence de la grille sur la décharge couronne.

II.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est représenté sur la figure (II.1). L'électrode active (4) est alimenté par une installation haute tension figure (II.5), qui délivre une tension variable (de 0 à 150 kV)

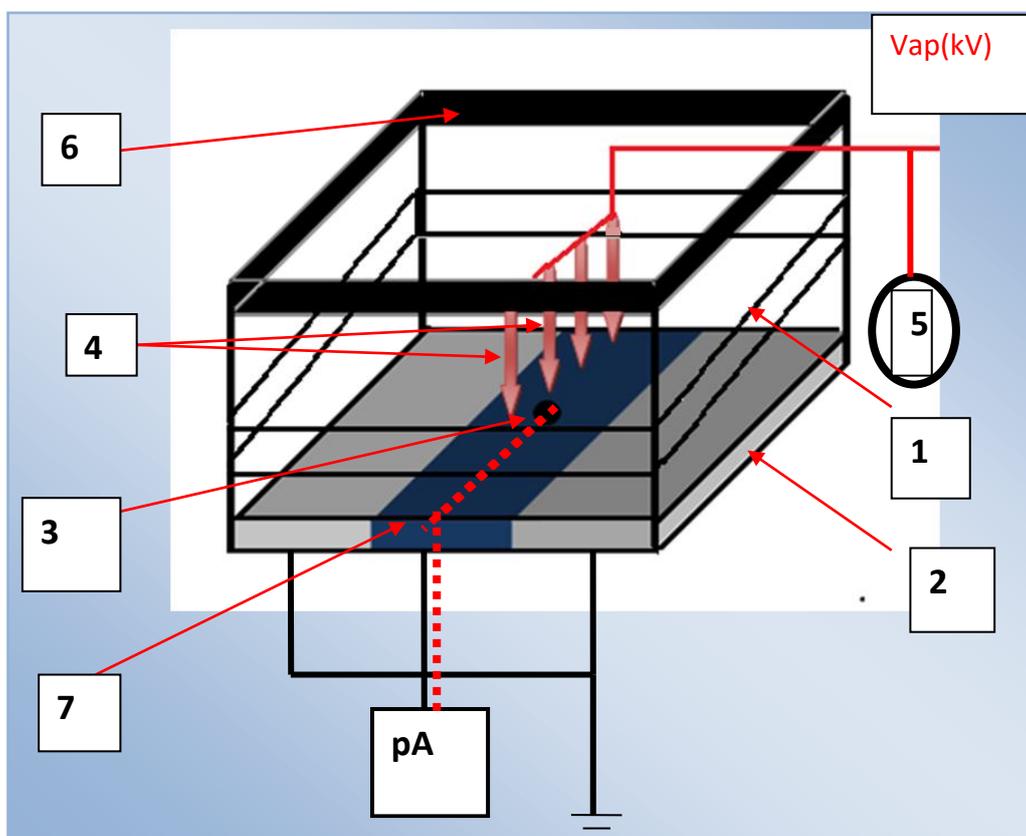


Figure II.1 Représentation schématique du dispositif expérimental

1 : support en plexiglas ; 2 : les plans de gardes (**E**) ; 3 : la sonde circulaire (**S**) ;
4 : les électrodes actives (pointes) ,5 : voltmètre électrostatique ; 6 : support en bois ;
7 : plan collecteur (**P**) ; pA : pico-Ampèremètre

II.2.1 Le Système d'électrodes

Le système d'électrodes utilisé dans notre système est celui de la géométrie multipointes –plan. En effet, ce système est composé de deux systèmes d'électrodes principales, le premier est l'électrodes active (4) à très faible rayon de courbure (de l'ordre de μm) composé de l'ensemble des pointes qui sont suspendues perpendiculairement sur un support en plexiglas (1) à une distance h du plan de mesure et le deuxième plan représente l'électrode passive (le plan collecteur) est mis au potentiel de la terre $V=0$ (7). Et de deux surfaces côtières qui représentent les plans de garde (2) qui sont directement mis à la terre figure (II.1).

II.2.1.1 présentation des électrodes active

L'électrode active utilisée pour la réalisation des essais expérimentaux est illustrées sur la figure (II.1). Il s'agit d'un système multi-pointes en inox, ce dernier est composé de plusieurs pointes (1 à 5) avec un très faible rayon de courbure à savoir $73 \mu\text{m}$, $72 \mu\text{m}$, $75 \mu\text{m}$, $64 \mu\text{m}$ et $77 \mu\text{m}$.

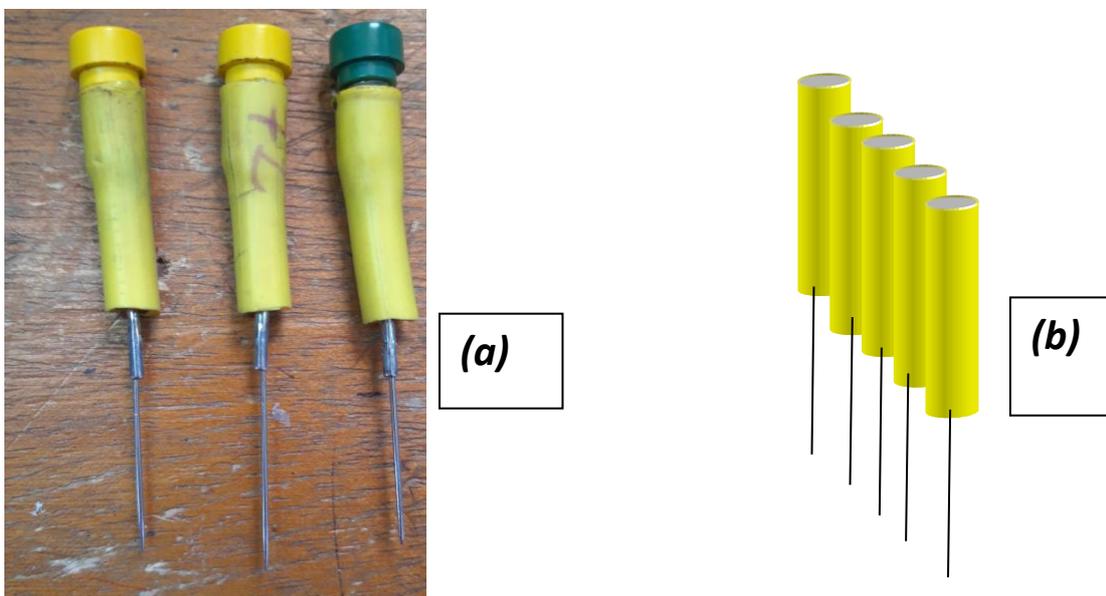


Figure II.2 Photographie (a), et représentation schématique (b) des électrodes couronnes de type pointe

❖ Mesure du rayon de courbure des pointes

Les rayons de courbure des aiguilles sont mesurés au moyen d'un microscope optique à caméra, relié à un PC, et en utilisant l'équation (II.1) et le logiciel " Digimizer".

$$r_0 = \frac{a^2+b^2}{2b} \quad (\text{cm}) \quad (\text{II.1})$$

avec $a = \frac{AB}{2}$ Et $b=CD$

Grâce à une cellule de THOMAS, graduée au dixième de micron (50 μm de côté), posée sous une loupe binoculaire, l'image de l'aiguille posée sur la cellule est projetée avec un agrandissement G désiré (40 fois) figure (II.3) et le rayon de courbure r₀ (μm) et déduit de son image r₀ (cm).

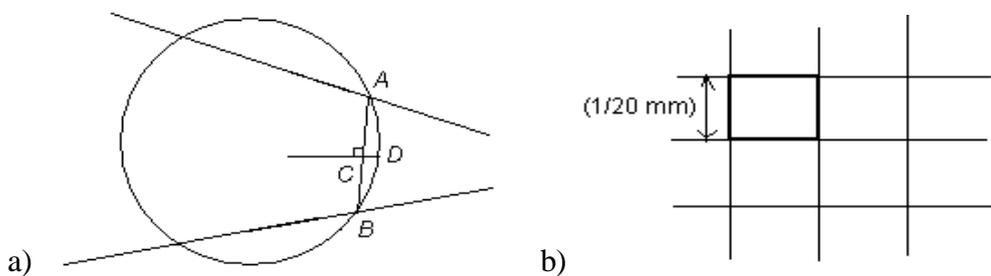


Figure II.3 Mesure du rayon de courbure de la pointe de l'aiguille : (a) projection de l'image de l'aiguille, (b) cellule de THOMAS

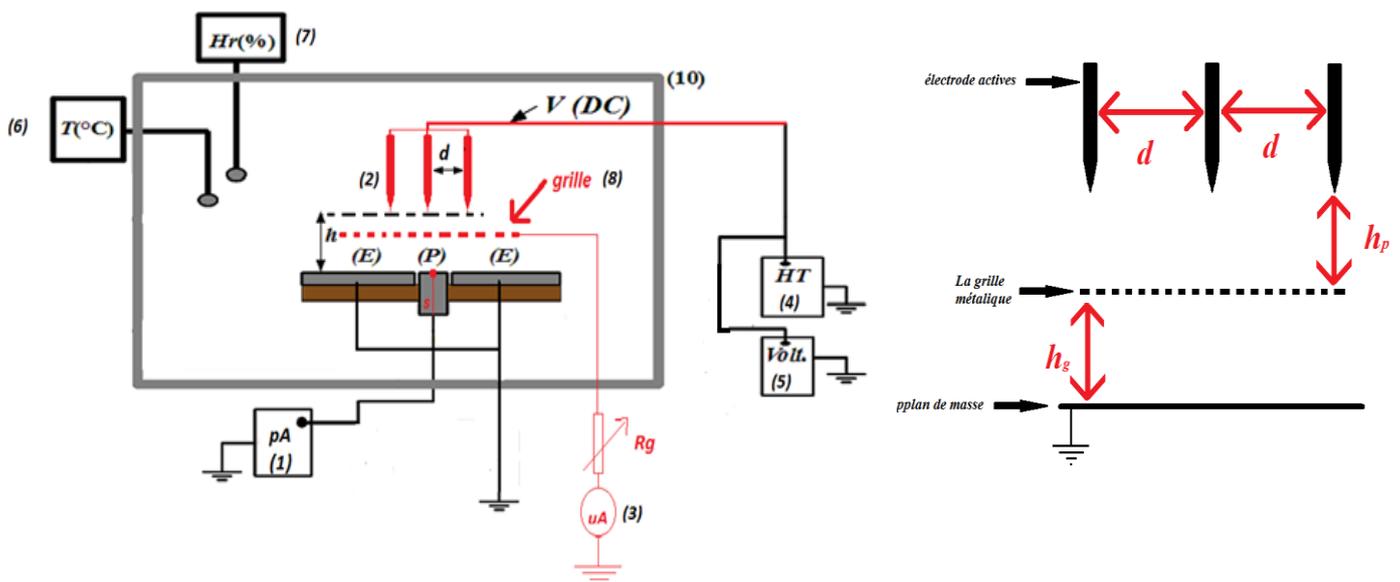


Figure II.4 Représentation schématique du système de décharge (vue de coté)

(1) : pico-Ampèremètre (2) : électrodes actives (pointes), (3) multimètre numérique (4) : source de haute tension, (5) : voltmètre électrostatique, (6) : thermomètre à cheveux ,(7) :hygromètre à cheveux, (8) : grille métallique(9) : la sonde ;(10) :cellule de mesure .
 d : la distance inter-pointes ; h_p ;la hauteur pointes-grille ; h_g :la hauteur plan-grille ;

II.2.2 la grille conductrice

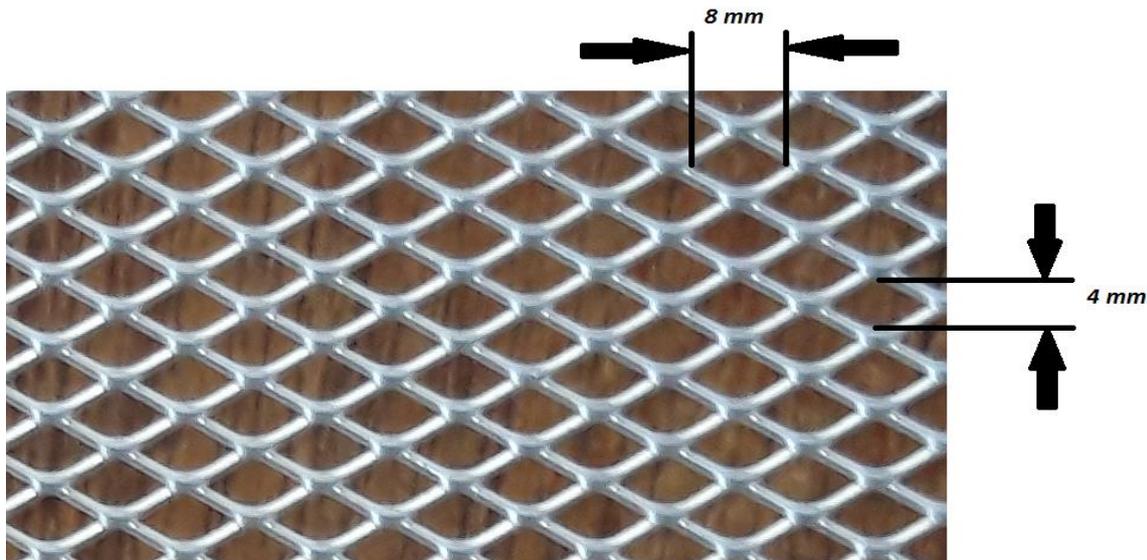


Figure II.5 représentation de la grille conductrice utilisée

La grille conductrice est placée au milieu, entre l'électrode active (pointes) et l'électrode plan reliée à la terre. La grille est reliée à la terre à travers une résistance électrique, son potentiel V_g dépend de la valeur de cette résistance et du courant de décharge I_g qui s'écoule à travers cette grille.

Afin de contrôler le dépôt de charges à un potentiel de surface désiré, nous agissons sur la résistance variable qui fixe le potentiel de la grille. La variation de la résistance R_g est obtenue par l'association de résistances de l'ordre de $M\Omega$.

II.2.3 La source de haute tension

Pour mesurer les paramètres de la décharge couronne en configuration multipointes-plan, nous avons besoin d'une source de haute tension continue de polarité positive. Pour cela, nous avons utilisé une installation haute tension présente au laboratoire de haute tension de l'université de Bejaïa, qui délivre des tensions variant de 0 à 135 kV, continue, de polarité positive, figure (II.5). Cette installation est composée :

- D'une source basse tension SG1 ;
- D'un transformateur de haute tension T100, alimenté par la source SG1 ;
- D'une diode à haute tension G270 ;
- D'un condensateur de lissage C10=10 nF ;
- De deux résistances R et R_0 de valeurs 106 k Ω et 250 M Ω respectivement.

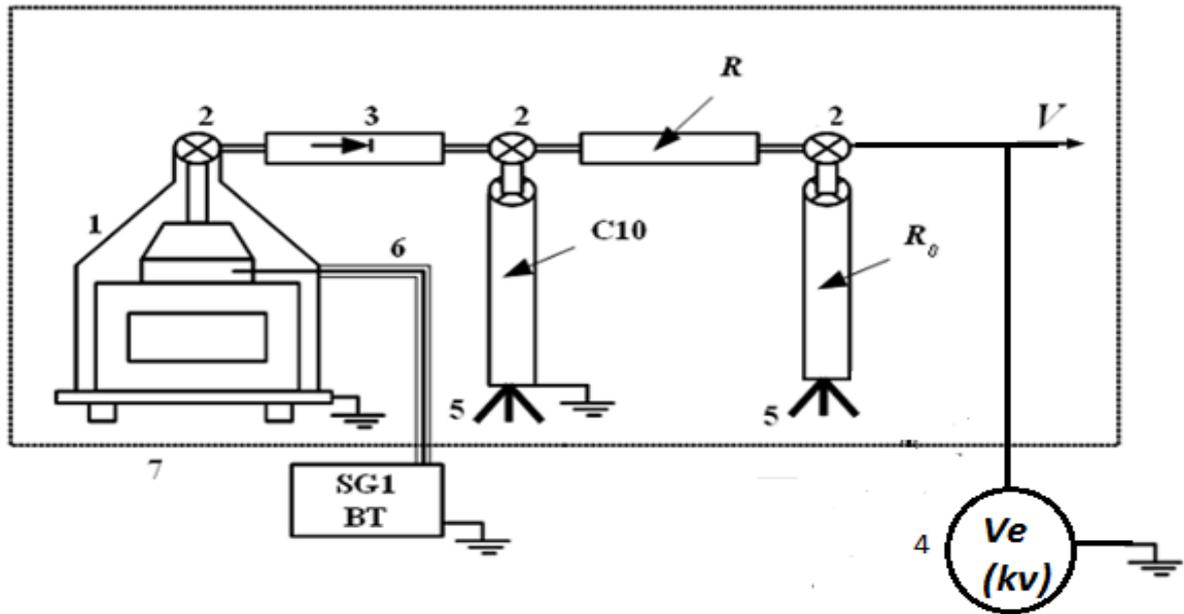


Figure II.6 : schéma de l'installation haute tension

1 Transformateur haute tension (T100) ; 2 Nœuds de liaison ; 3 Diode haute tension (G270) ; 4 voltmètre électrostatique ; 5 Support d'éléments ; 6 Câble coaxial ; 7 Grille de protection ; SG1 Alimentation basse Tension ; C10 Condensateur de lissage ; R Résistance d'amortissement ; R_0 Résistance haute tension ;

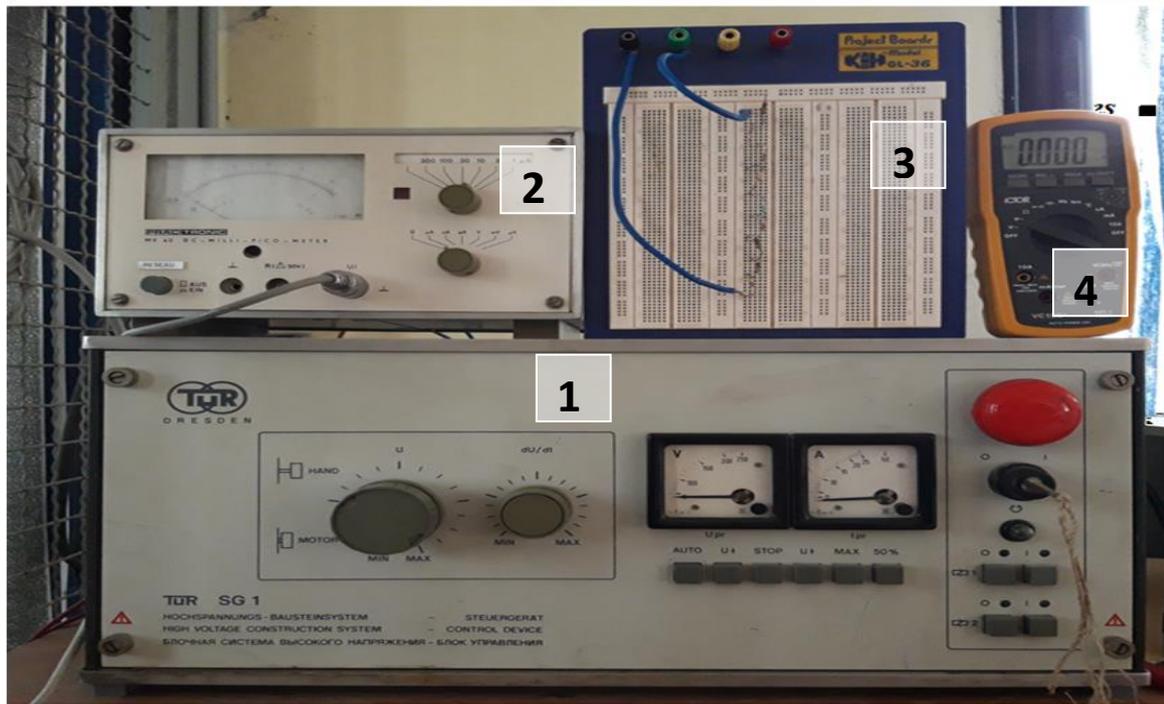


Figure II.7 : Équipement de l'installation utilisée.

1 : SG1 Générateur d basse tension ; 2 : pico-Ampèremètre ; 3 : résistance variable de la grille ; 4 : multimètre numérique.



Figure II.8 Installation haute tension utilisée au laboratoire de Bejaia

(1) : Transformateur haute tension (T100) ; (2) : Diode haute tension (G270).
(5) : Condensateur de lissage (C10) ; (3) : Résistance d'amortissement (Ra).
(4) : Résistance haute tension (R₀)



Figure II.9 Voltmètre électrostatique

II.3 Méthode de mesure

II 3.1 Mesure de tension appliquée

La mesure de la tension continue appliquée à électrode active V , est effectuée à l'aide d'un voltmètre électrostatique Figure (II .9), ou il mesure et affiche directement la valeur de la haute tension appliquée. Un multimètre numérique mesure la tension U basse tension délivrée par la source (SG1).

II 3.2 Mesure de courant de décharge

Pour mesurer le courant de la décharge (I), la sonde (S) et le plan (P) sont reliés à un pico-Ampèremètre à l'aide d'un câble coaxial blindé figure (II.1). La précision des mesures dépend du bon ajustement des pointes et de la vérification de la distance inter-électrode h entre les pointes et le plan, et aussi dépend du bon centrage de la sonde et du courant de fuite causé par l'accumulation de poussière entre la sonde et l'électrode active. Pour se faire, avant toute mesure, la sonde doit être nettoyée avec de l'acétone et la position des pointes par rapport à la sonde (S) doit être ajustée. La mesure du courant de la décharge couronne I , collecté par la sonde en fonction de la tension appliquée V à l'électrode active, est effectuée à l'aide d'un Pico-Ampèretre (pA).

II 3.3 Mesure du courant et de la tension de la grille :

La mesure du courant de décharge I_g qui traverse la grille ainsi que le potentiel V_g de cette dernière est effectuée à l'aide d'un multimètre numérique. La grille est reliée au multimètre par câble coaxiale qui est à son tour reliée à une résistance variable R_g qui contrôle le potentiel de la grille V_g .

$$V_g = I_g * R_g \quad (II.2)$$

II 3.4 Mesure des paramètres de l'air

Étant donné la sensibilité de la décharge couronne aux paramètres physiques de l'air, il est alors nécessaire de tenir compte des conditions atmosphériques dont lesquelles les mesures expérimentales ont été prises. Et pour cela nous avons effectué durant l'étude expérimentale, des relevées, de température à l'aide d'un thermomètre à cheveux (a), et de l'humidité, à l'aide d'un hygromètre à cheveux (b), dont les plages de mesure sont $-35^{\circ}\text{C} < T < 55^{\circ}\text{C}$ et $0 < H_r < 100\%$ Figure (II.10).

Les diverses séries de mesures ont été effectuées dans des conditions de température, d'humidité et de pression différentes.

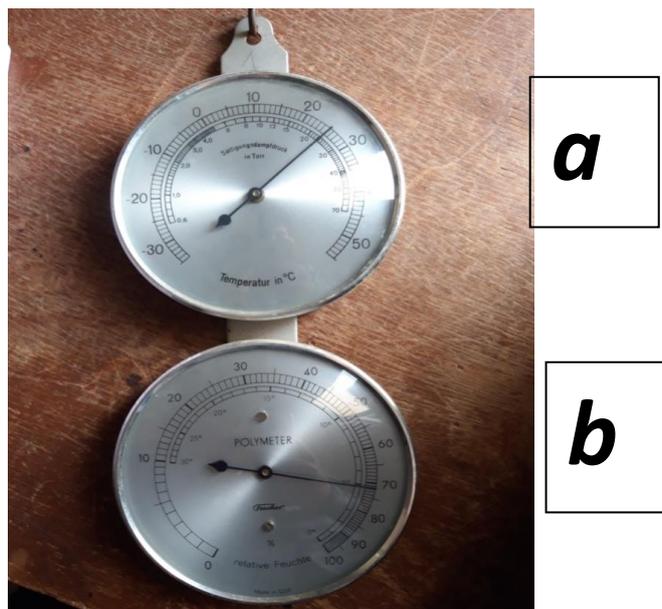


Figure II.10 photographies des appareils de mesure de la température (a) et de l'humidité (b)

II.3.5 Détermination de la densité de courant

Afin de déterminer la distribution de la densité de courant sur le plan, la pointe (électrode active) dont la position initiale se trouve suspendue sur un support en plexiglas juste au dessus de la sonde séparé d'une distance h .

La valeur de la densité de courant J est défini comme étant le courant par unité de surface, elle est calculée par l'équation (II.3) qui donne la densité de courant J en fonction du courant I collecté par la sonde circulaire et de la surface moyenne (S) de cette dernière Figure (II.11).

$$J = \frac{I}{S} (\mu A/mm^2) \quad (II.3)$$

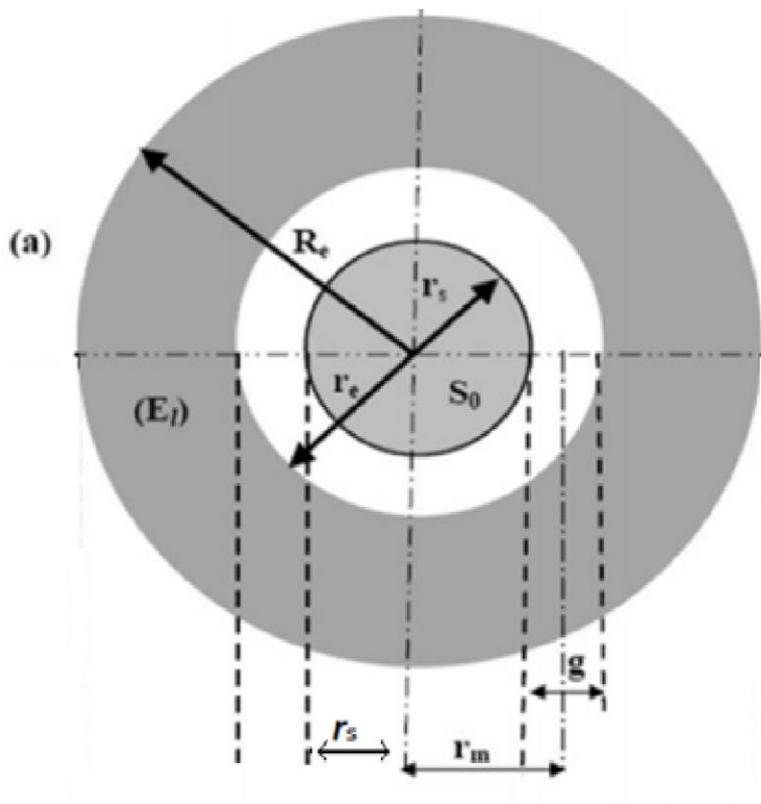


Figure II.11 vue de dessus de la sonde circulaire

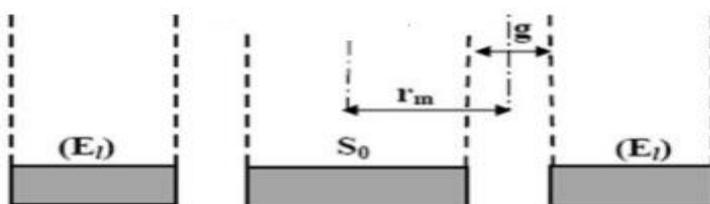


Figure II.12 : une coupe transversale de la sonde

II.3.6 Les dimensions de la sonde

Rayon du collecteur (sonde) $r_s=4.7/2=2.35$ mm.

Rayon du trou $r_e=5/2=2.5$ $g=r_e-r_s=0.15$ mm

le rayon moyen $r_m=r_s+(g/2)=2.425$

la surface total de sonde $S_m=\pi.r_m^2=18.474$ mm²

II.4 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation du dispositif expérimental et son principe de fonctionnement. Nous avons présenté aussi la méthode de mesure des différents paramètres essentiels qui caractérisent la décharge couronne.

Dans le chapitre qui suit, nous procéderons à présentation et l'interprétation des résultats obtenus de l'étude expérimentale de la décharge couronne en géométrie multipointes-plan.

Chapitre III

Résultats et discussions

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre représente l'analyse des résultats expérimentaux obtenus. Le but de ces analyses est de déterminer les paramètres de la décharge couronne (la caractéristique Courant-Tension et la densité de courant), dans deux types de configurations d'électrodes à savoir multipointes-plan et multipointes-grille-plan et l'influence des paramètres (nombre des pointes actives, distance inter-pointes et la distance inter-électrodes) sur ces caractéristiques ainsi que l'influence de l'insertion de la grille conductrice entre l'électrode active et passive.

Initialement, on a relevé la caractéristique Courant-Tension $I=f(V)$, le principe consiste à mesurer simultanément la tension appliquée à l'électrode active et le courant de la décharge couronne collecté par le plan, après on a relevé la densité de courant J , en fixant la tension appliquée V , on relève le courant collecté par la sonde S pour différentes position (x) de l'électrode active. Par la suite, on insérant une grille conductrice, on refait les mêmes essais que précédemment.

III.2. Système multipointes-plan

III.2.1. Caractéristique Courant-Tension

On a étudié les caractéristiques Courant-Tension en fonction des paramètres suivants : Nombre de pointes N_p , distance inter-pointes d et la tension appliquée V

Les différents essais effectués portent sur la mesure des paramètres suivants :

- La tension appliquée à la pointe V .
- Le courant I collecté par la surface de la sonde S et le plan P .

III.2.1.1. Influence du nombre de pointes

La figure (III.1) représente la variation du courant de décharge en fonction du nombre de pointes N_p allant de 1 jusqu'à 5, la distance inter-pointes est fixée à $d=4\text{cm}$.

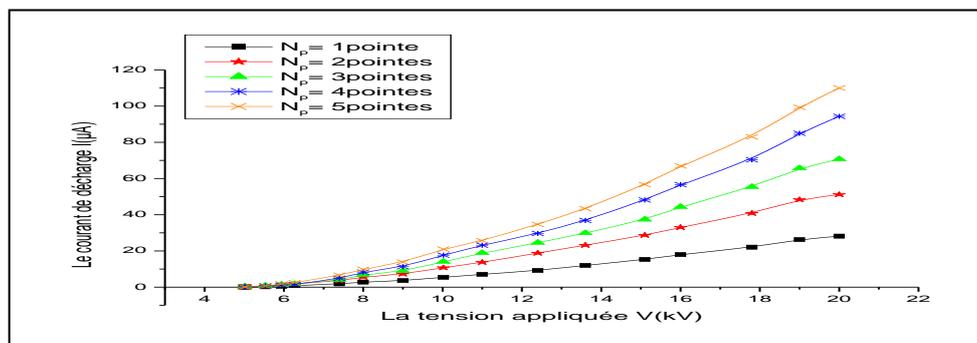


Figure III.1 Caractéristique Courant-Tension en fonction du nombre de pointe N_p ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=62\%$).

Les courbes montrent que le courant de la décharge augmente avec la tension appliquée V lorsqu'elle dépasse une certaine valeur V_s (tension seuil d'apparition de l'effet couronne) et ce jusqu'au claquage. Les caractéristiques Courant-Tension ont une forme quadratique (comme la loi de Townsend).

On constate aussi sur la figure (III.1), que le courant I recueilli par le collecteur augmente avec le nombre de pointes N_p , cela peut être expliqué par l'augmentation du nombre de régions ionisées autour de chaque pointe.

III.2.1.2. Influence de la variation de la distance inter-pointes

Pour les nombres de pointes $N_p=3$ et $N_p=5$, on varie la distance inter-pointes d , et on mesure le courant I collecté par le plan P en fonction de la tension appliquée V .

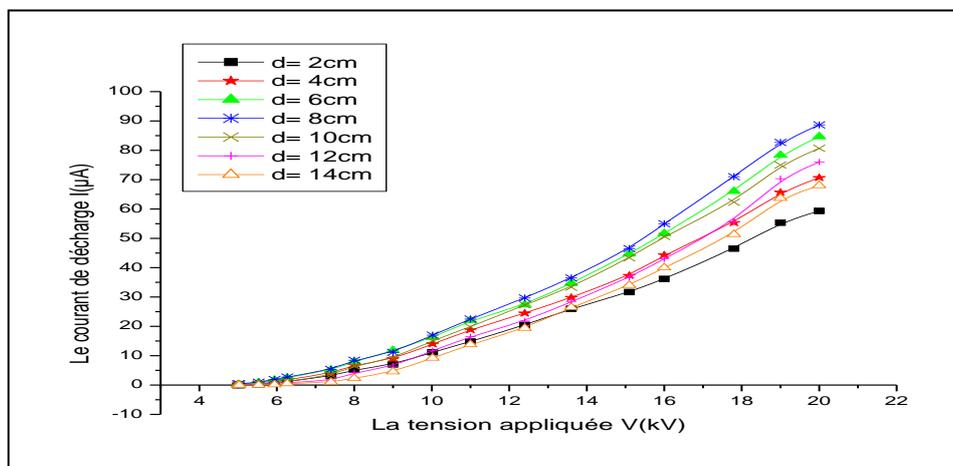


Figure III.2 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance inter-pointes d pour $N_p=3$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).

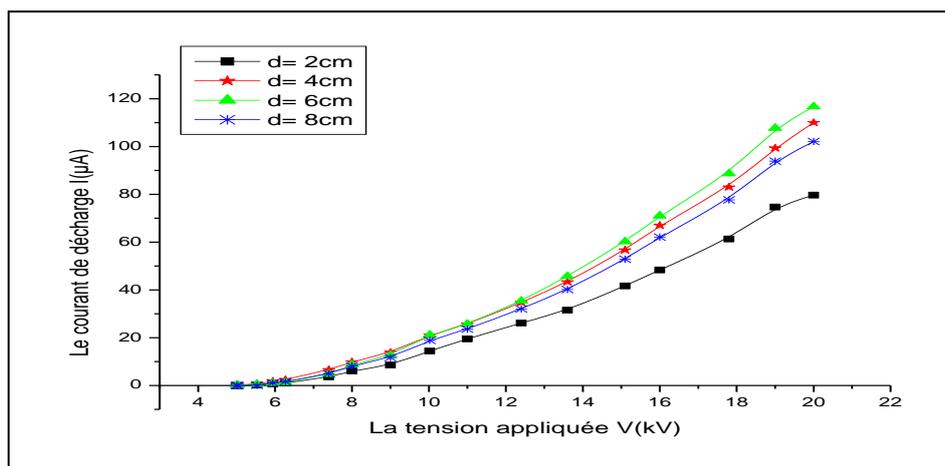


Figure III.3 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance inter-pointes d pour $N_p=5$, ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).

Sur la figure (III.4), on fixe la tension à $V=20\text{kV}$ et on varie la distance inter-pointes d de **2** à **14cm** pour $N_p=3$ et de **2** à **8cm** pour $N_p=5$.

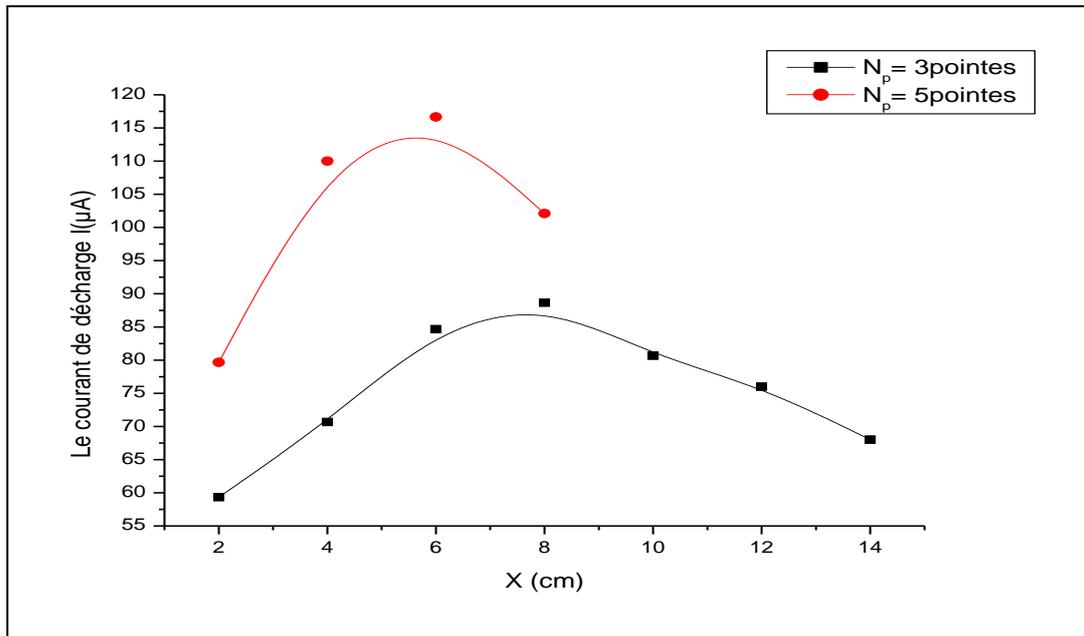


Figure III.4 Variation de courant de décharge en fonction de la distance d , pour différents nombres de pointes et $V=20\text{kV}$ ($T=22^\circ\text{C}$, $H_r=63\%$). $N_p=3$ et 5

Les courbes des figures (III.2, III.3 et III.4) montrent que le courant croît avec l'augmentation de la distance inter-pointes d , mais à partir d'une certaine distance d qui est de $d=10\text{cm}$ pour le système d'électrode $N_p=3$ pointes et de $d=8\text{cm}$ pour le système d'électrode $N_p=5$ pointes, ce courant diminue en augmentant la distance inter-pointes, cela est dû à la variation du champ électrique dans l'espace inter-électrodes.

III.2.2. Densité de courant J

Les essais de mesure de la densité de courant ont été effectués dans l'air ambiant où les paramètres pression, température et humidité relative varient d'un jour à l'autre mais restent constants au cours d'une même série de mesure.

La collecte du courant de décharge I , est effectuée à l'aide d'une sonde circulaire en fonction de trois paramètres suivants:

- Nombre de pointes N_p .
- Le niveau de la tension appliquée V .
- La distance inter-pointes d et les positions des pointes par rapport à la sonde x .

III.2.2.1. Distribution de la densité de courant sur le plan

La mesure de la densité de courant J en diverses positions x ont été obtenus en faisant déplacer la position de la pointe par un pas de 5 mm horizontalement par rapport à l'axe de la sonde S , jusqu'à ce que le courant s'annule, et cela, pour divers niveaux de tensions et pour une distance inter-électrodes h fixée à 30 mm.

III.2.2.1.1 Influence du nombre de pointes

La tension appliquée est fixée à $V=12kV$, la distance inter-pointes $d=4cm$ et le nombre de pointes variable $N_p=1$, $N_p=3$ et $N_p=5$.

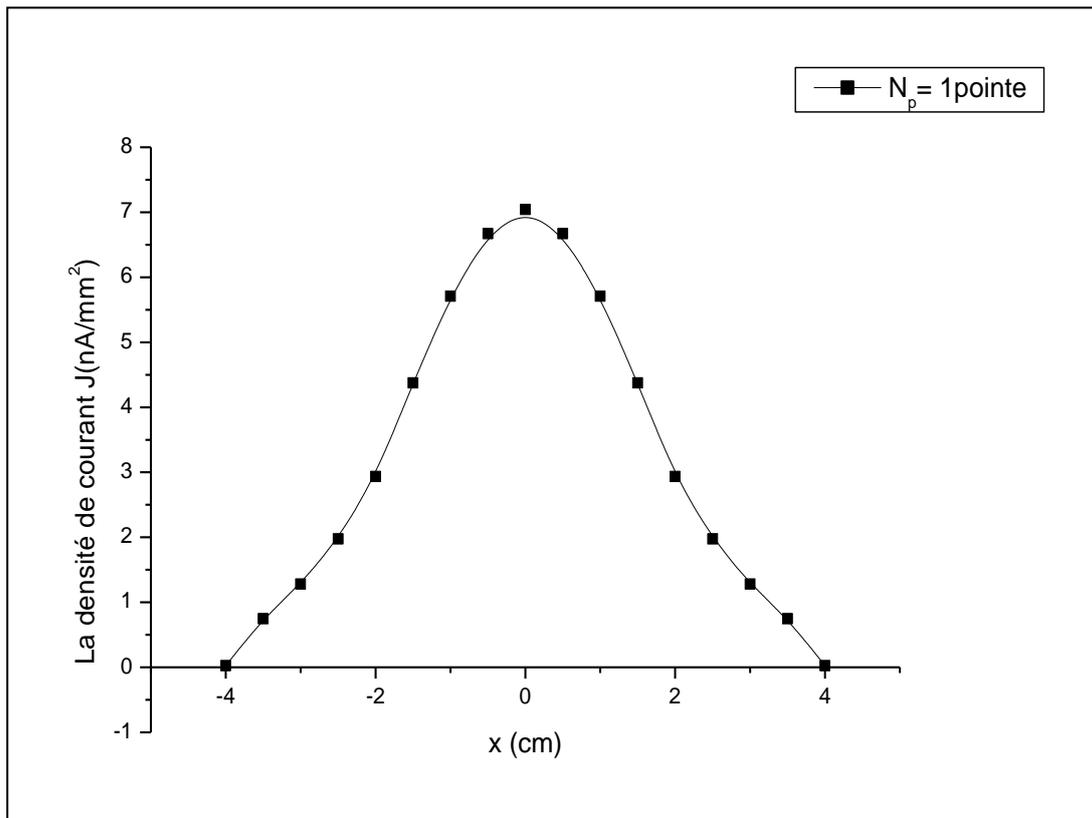


Figure III.5 Distributions de la densité de courant J en fonction de la position x pour un système d'électrode pointe- plan ($T=21^{\circ}C$, $H_r=62\%$).

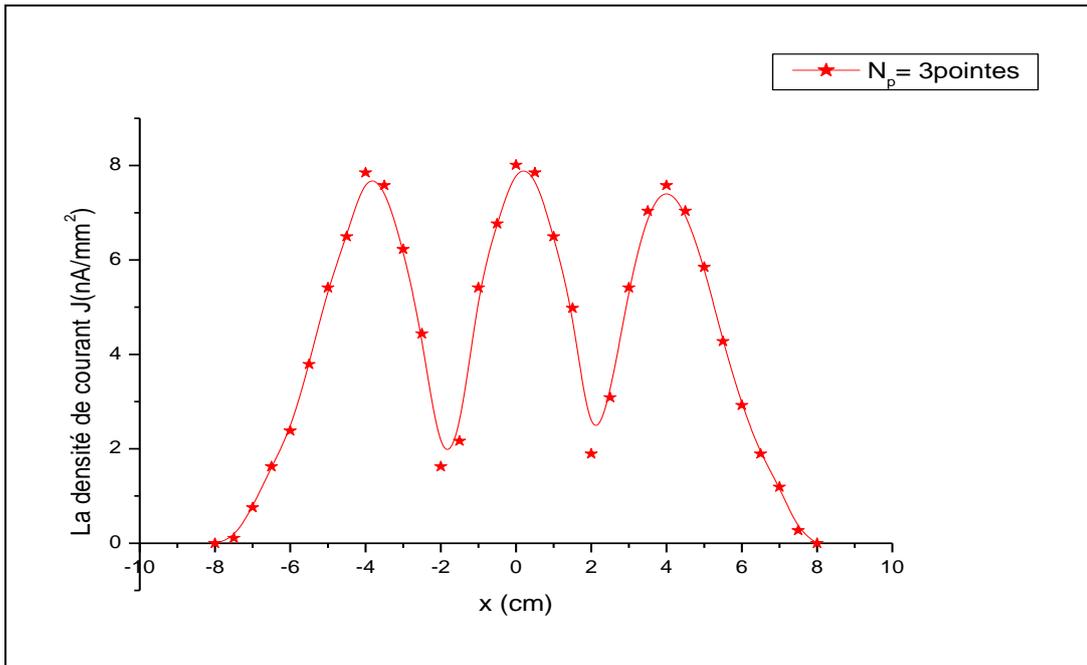


Figure III.6 Distributions de la densité de courant J en fonction de la position x pour un système d'électrode trois points-plan (T=21°C, H_r=62%).

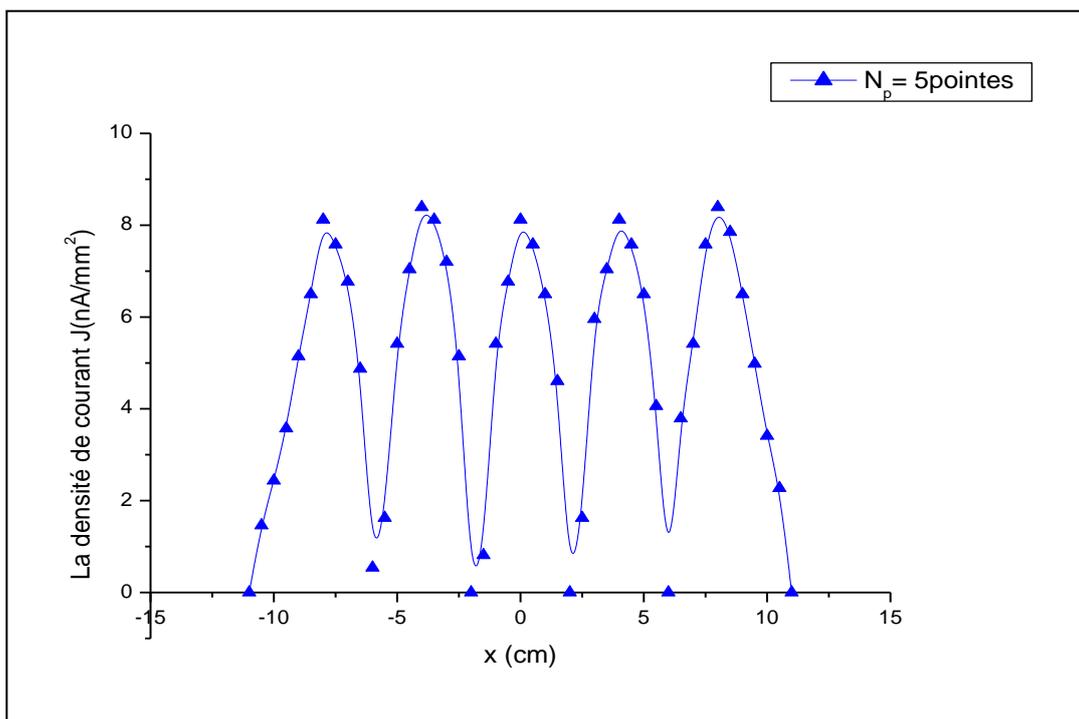


Figure III.7 Distributions de la densité de courant J en fonction de la position x pour un système d'électrode cinq points-plan (T=21°C, H_r=62%).

D'après la figure (III.5) on remarque que la densité de courant J est maximale au niveau de la sonde (qui correspond à l'électrode active) puis diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne d'elle.

Pour les systèmes d'électrodes multipointes-plan, figures (III.6 et III.7), les courbes de la densité de courant ont des formes ondulées (forme d'onde) avec des valeurs maximales de courant aux dessous des pointes et des valeurs minimales de courant au milieu de chaque deux pointes voisines.

III.2.2.1.2 Influence de la variation de la tension appliquée :

Sur les figure (III.8 et III.9) nous avons présenté l'influence de la variation de la tension appliquée V sur la densité de courant J de la décharge couronne, on fixant le nombre de pointes $N_p=3$ puis $N_p=5$ pour une même distance inter-pointes $d=6\text{cm}$, pour différentes tension appliquée de $V=12\text{kV}$ jusqu'à $V=18\text{kV}$ pour $N_p=3$ et $N_p=5$ avec un pas de 2kV .

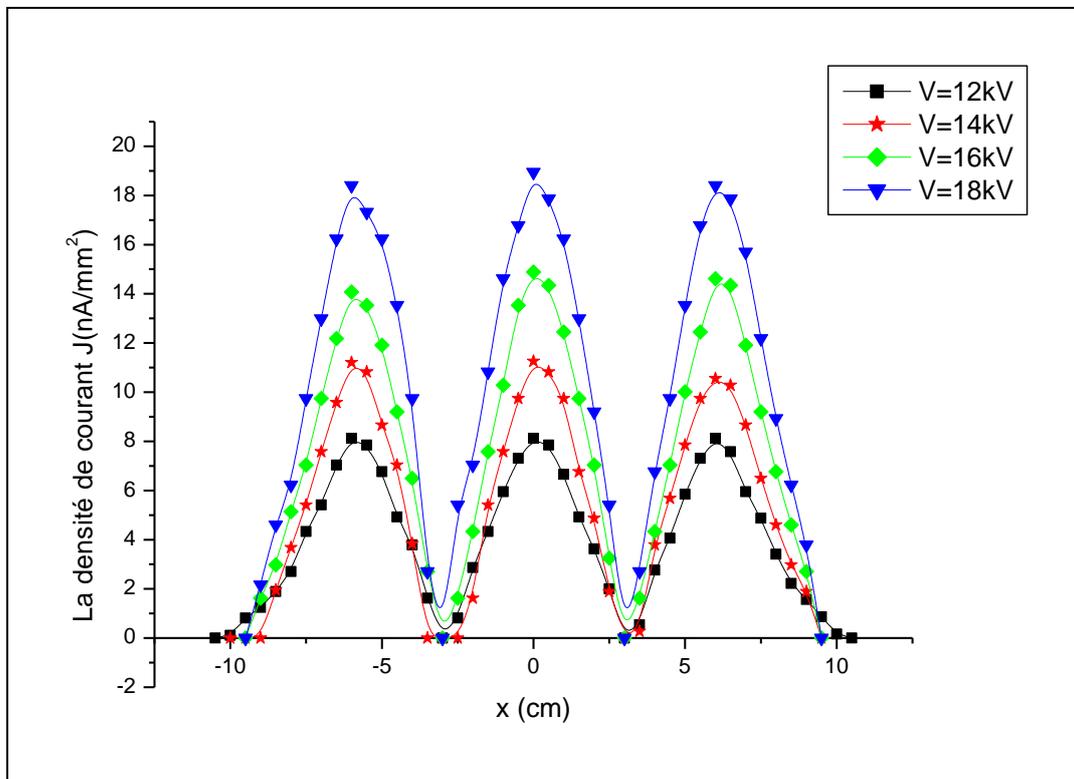


Figure III.8 Distribution de la densité de courant J en fonction de la tension appliquée V pour $N_p=3$, $d=6\text{cm}$, ($T=24^\circ\text{C}$, $H_r=57\%$).

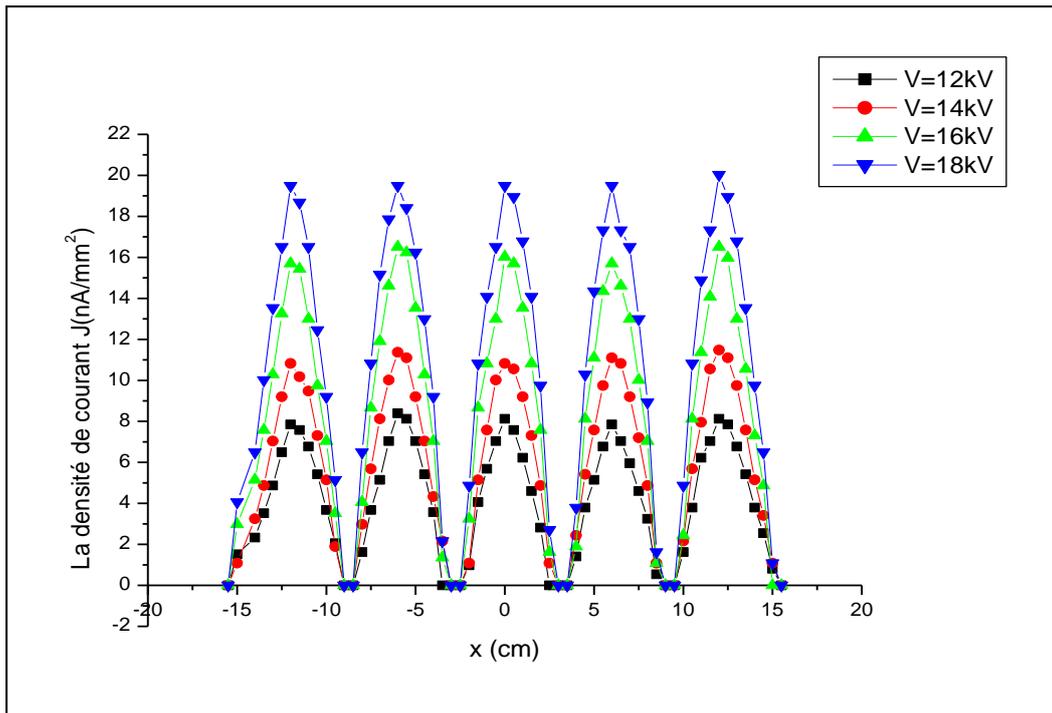


Figure III.9 Distribution de la densité de courant J en fonction de la tension appliquée V pour $N_p=5$ et $d=6\text{cm}$ ($T=24^\circ\text{C}$, $H_r=57\%$).

On constate que la densité de courant J augmente avec l'augmentation de la tension appliquée V , car le champ moyen dans l'espace inter-électrodes devient plus intense.

III.2.2.1.3 Influence de la distance inter-pointes :

En maintenant la tension appliquée $V=12\text{kV}$ constante, l'effet de la variation de la distance inter-pointes de $d=2\text{cm}$ jusqu'à $d=14\text{cm}$ pour $N_p=3$ et jusqu'à $d=6\text{cm}$ pour $N_p=5$ est présenté sur les figures (III.10 et III.11).

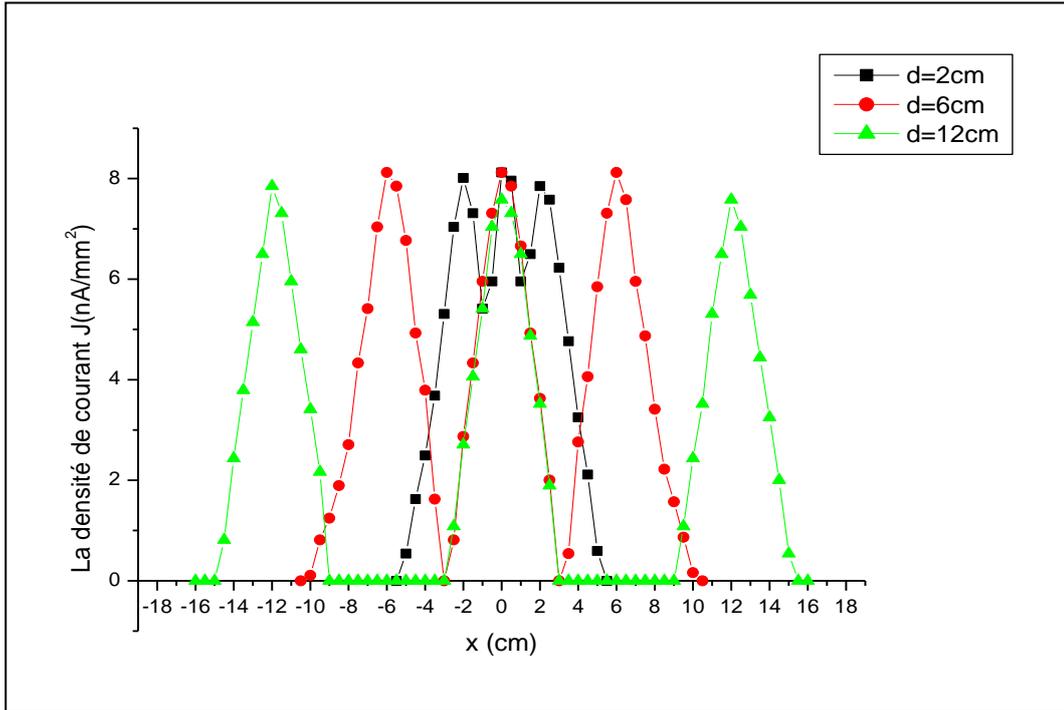


Figure III.10 Distributions de la densité de courant J en fonction de la distance inter-pointes d pour $N_p=3$ et $V=12\text{kV}$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=57\%$).

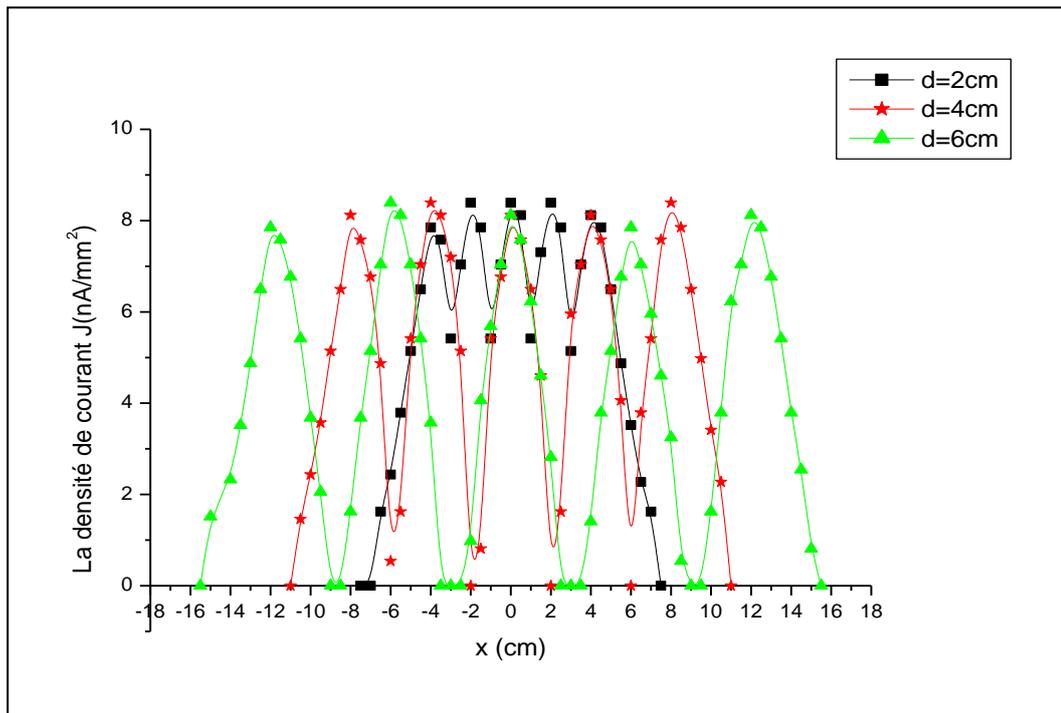


Figure III.11 Distribution de la densité de courant J en fonction de la distance inter-pointe d , pour $N_p=5$ et $V=12\text{kV}$ ($T=21^\circ\text{C}$ $H_r=57\%$).

Les résultats montrent que plus la distance d augmente plus les zones de charge faible ou nulle s'élargissent car on a plus d'interférences entre les zones de distribution de charge.

III.3. Système multipointes-grille-plan

Dans cette nouvelle configuration nous utilisons les mêmes éléments que précédemment avec l'ajout d'une grille qu'on insère entre l'électrode active et le plan de masse.

La présence de la grille rajoute de nouveaux paramètres à l'étude qui sont :

h_g distance entre la grille et le plan,

h_p distance entre pointe et grille,

R_g et I_g sont respectivement la résistance et le courant de la grille qui permettent de Contrôler le potentiel de grille qu'on appelle V_g .

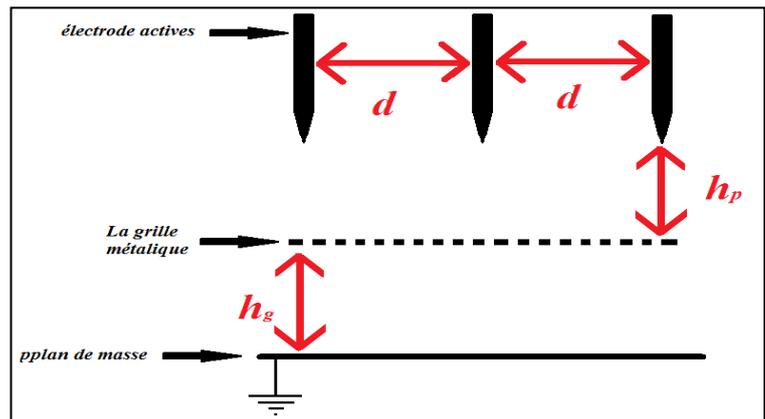


Figure III.12 Configuration du système de décharge multipointes-grille-plan

III.3.1. Caractéristique Courant-Tension

Dans ce qui suit nous allons représenter et étudier les effets des différents paramètres : distance inter-pointes d , le nombre de pointe N_p utilisé, ainsi que la position de la grille par rapport aux pointes h_p , et par rapport au plan h_g sur la caractéristique Courant-Tension $I=f(V)$.

III.3.1.1. Influence du nombre de pointes :

On a fixé la distance entre les pointes à $d=4\text{cm}$, la résistance de la grille $R_g=100\text{M}\Omega$, la distance pointe-grille $h_p=15\text{mm}$, la distance grille-plan $h_g=15\text{mm}$ et on a changé respectivement les nombre de pointes utilisées $N_p=1, 3$ et 5 .

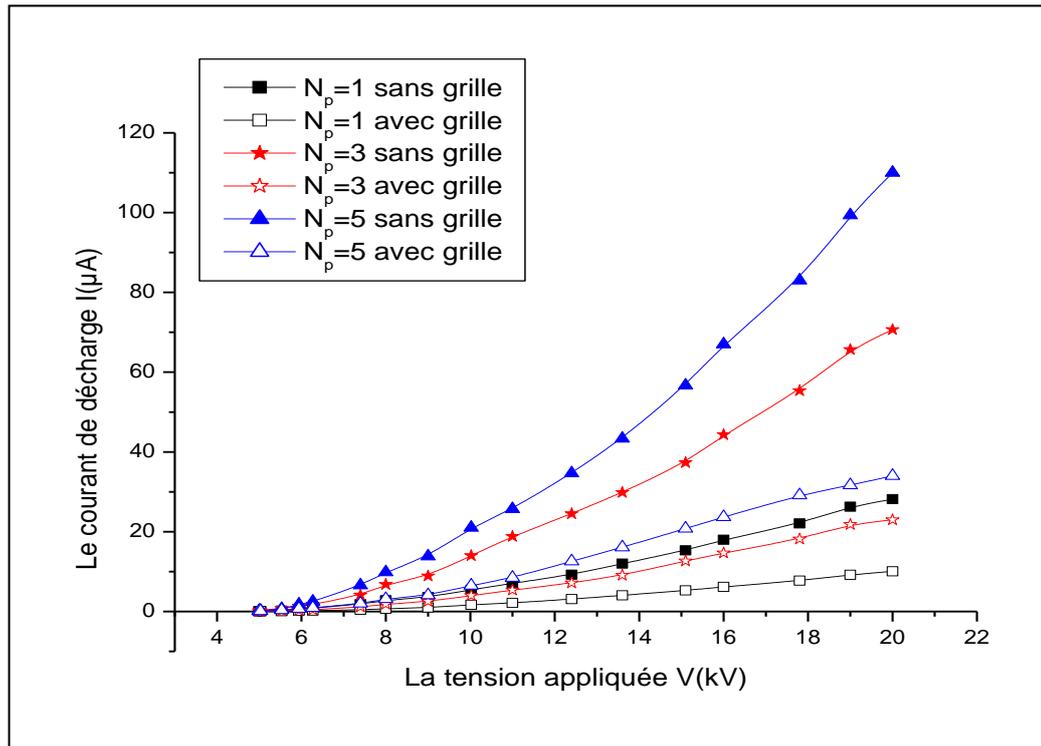


Figure III.13 Caractéristique Courant-Tension pour différent valeur de N_p avec et sans grille, pour $R_g=100M\Omega$, $h_p=15mm$, $h_g=15mm$ et $d=4cm$ ($T=19^\circ C$, $H_r=60\%$).

La figure III.13 montre clairement que le courant de décharge recueilli par le plan augmente significativement avec l'augmentation du nombre de points utilisées, cela peut être expliqué par le nombre de régions ionisées autour de chaque pointe qui augmente.

Comme on remarque aussi que le courant de décharge I diminue après l'insertion de la grille, parce ce que une partie de celui-ci passe à travers la grille vers le plan de masse.

III.3.1.2. Influence de la distance inter-pointes

Pour le nombre de pointes $N_p=3$, la distance entre la pointe et la grille $h_p=15mm$ et la résistance de la grille $R_g=100M\Omega$, on trace sur la figure III.14 la caractéristique Courant-Tension pour différentes valeurs des distances inter-pointe d . Les courbes montrent que le courant est plus important dans la configuration sans grille car une partie de celui-ci traverse la grille vers le plan de masse.

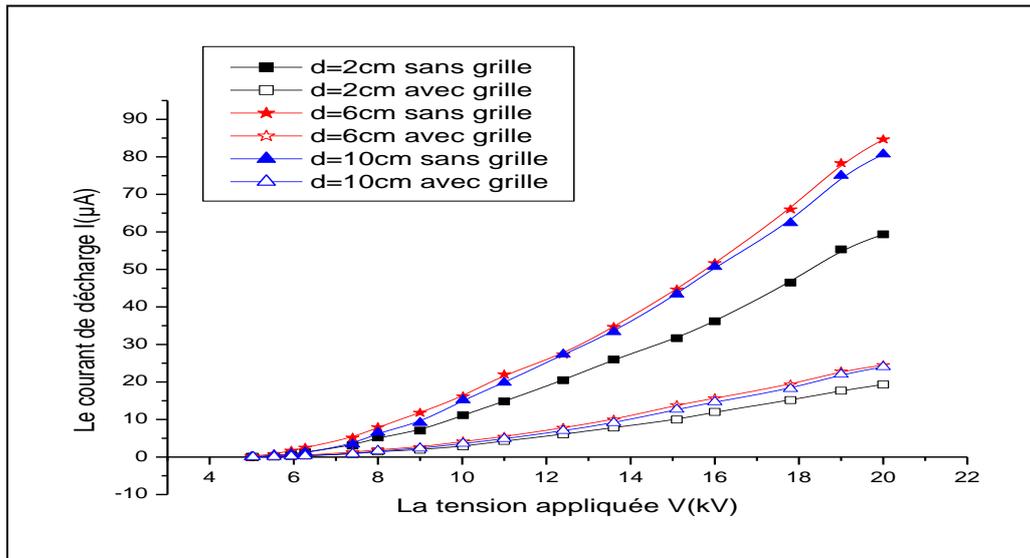


Figure III.14 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance inter-points d , avec et sans grille pour $N_p=3$, $R_g=100M\Omega$, $h_p=15mm$ et $h_g=15mm$ ($T=19^\circ C$, $H_r=60\%$).

III.3.1.3. Influence de la distance pointes-plan

La figure III.15 illustre l'effet de la variation de la distance pointes-plan h_p sur la caractéristique Courant-Tension pour $h_g=15mm$, $d=6cm$ et la résistance de la grille $R_g=100M\Omega$. On déduit de ces résultats que l'augmentation de la distance pointes-plan h_p provoque une diminution du courant de décharge couronne, ceci est justifié par la diminution du champ électrique moyen dans l'espace situé entre la pointe et la grille.

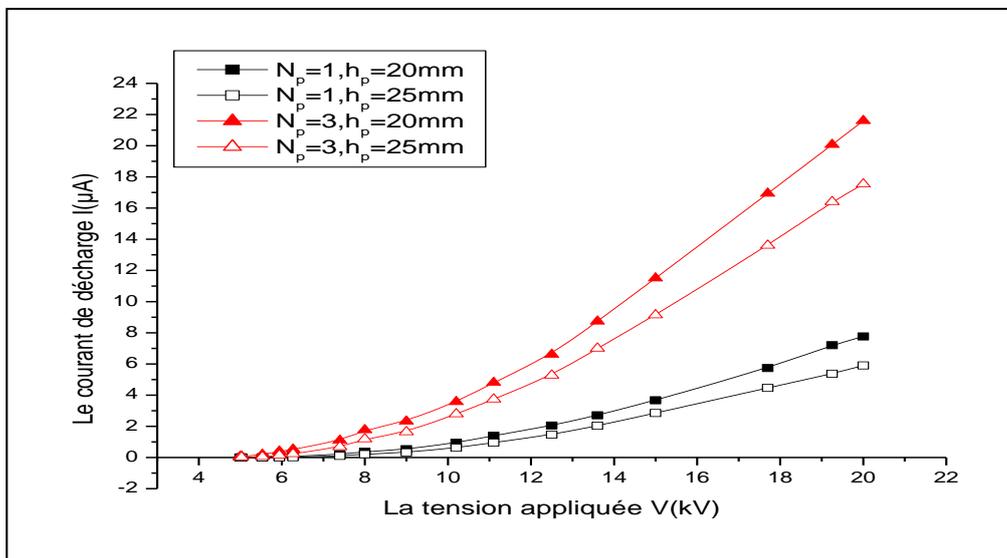


Figure III.15 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance h_p pour $N_p=1$ et 3 , $d=6cm$, $R_g=100M\Omega$ et $h_g=15mm$ ($T=21^\circ C$, $H_r=56\%$).

III.3.1.4. Influence de la distance grille-plan:

Sur la figure III.16 on a présenté l'effet de la variation de la distance grille-plan h_g sur la caractéristique $I=f(V)$. On déduit de ces résultats que l'augmentation de la distance grille-plan h_g provoque une diminution du courant de décharge couronne, ceci est justifié par la diminution du champ électrique moyen dans l'espace situé entre la grille et le plan.

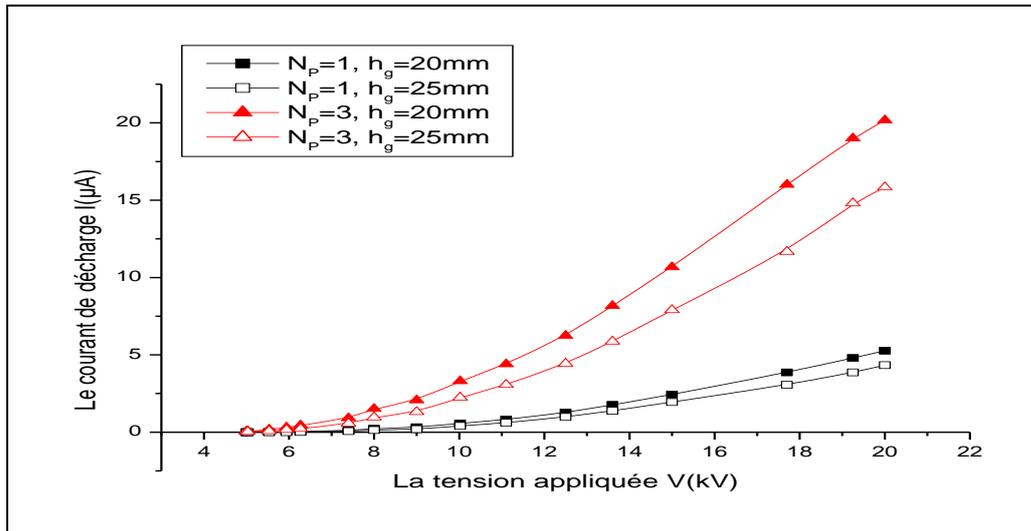
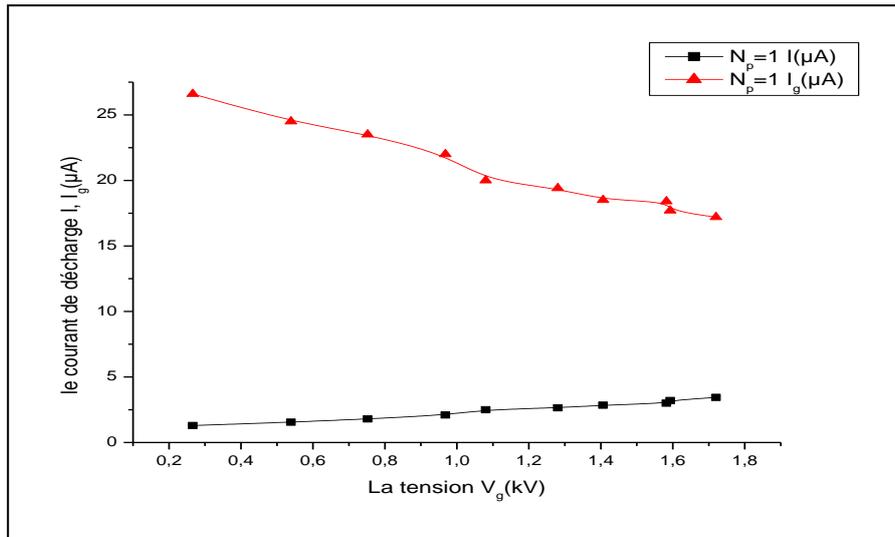


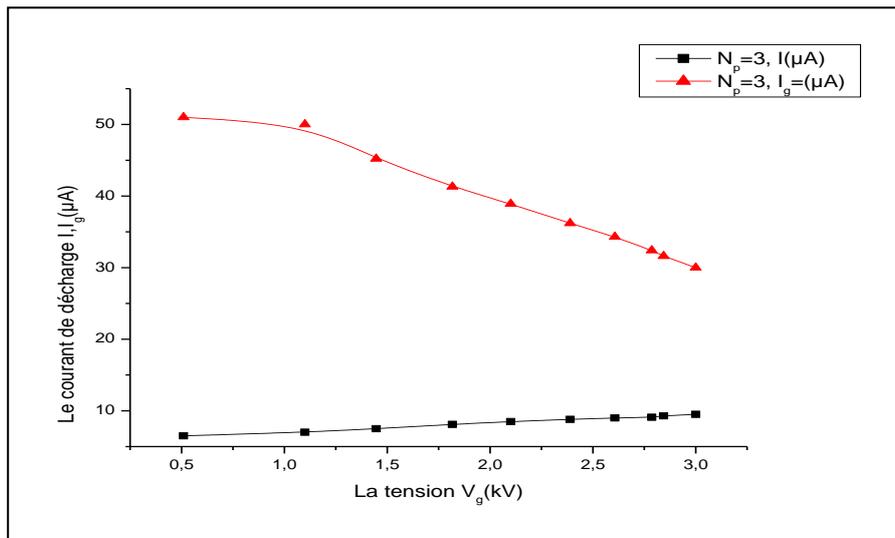
Figure III.16 Caractéristique Courant-Tension en fonction de la distance h_g pour $N_p=1$ et 3 , $d=6\text{cm}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_p=15\text{mm}$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=56\%$).

III.3.1.5. Influence du potentiel de la grille

La figure III.17 montre l'effet de la variation du potentiel de la grille sur le courant I enregistré au niveau du plan de masse et le courant I_g qui traverse la grille, pour des distances h_p et h_g fixes et pour une tension appliquée de **14kV**.



(A)



(B)

Figure III.17 Variation de courant de décharge et du courant de grille en fonction du potentiel de la grille V_g pour $N_p=1$ (A), $N_p=3$ (B), $d=6\text{cm}$, $V=14\text{kV}$ et $h_g=15\text{mm}$ ($T=23^\circ\text{C}$, $H_r=60\%$).

Les résultats montrent que le courant collecté par le plan **I** augmente avec l'augmentation du potentiel de la grille, ceci s'explique par l'augmentation du champ électrique moyen dans l'espace situé entre la grille et le plan, par contre le courant qui passe par la grille I_g diminue. En effet, afin d'augmenter le potentiel de la grille V_g pour une tension appliquée constante, il faut augmenter la valeur de la résistance de la grille R_g ce qui se traduit par une diminution du courant de grille.

III.3.2. Distribution de la densité de courant

Afin de déterminer l'influence de l'insertion d'une grille conductrice entre l'électrode active et le plan sur la distribution de la densité de courant **J**, nous avons procédé de la même façon que les essais effectués dans la première partie (essais sans grille) la seule différence ici, c'est la variation du potentiel et de la position de la grille par rapport aux pointes et au plan.

III.3.2.1. Influence du nombre de pointes

Sur les figures (III.18, III.19 et III.20), on a présenté l'influence de la présence de la grille sur la distribution de la densité de courant **J**, pour différentes valeurs du nombre de pointes $N_p=1, 3$ et 5 .

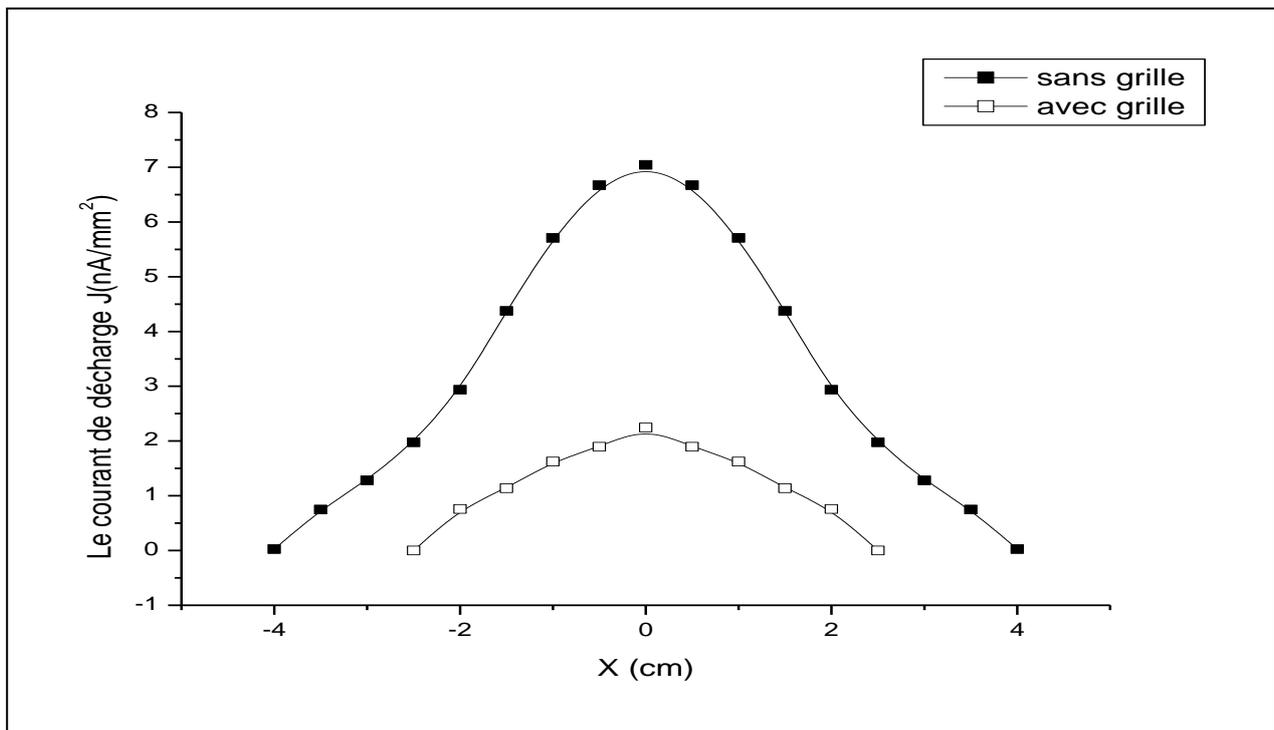


Figure III.18 Distribution de la densité de courant **J** pour un système pointe-plan ($N_p=1$) avec et sans grille, $V=12\text{kV}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_g=15\text{mm}$, ($T=22^\circ\text{C}$, $H_r=64\%$).

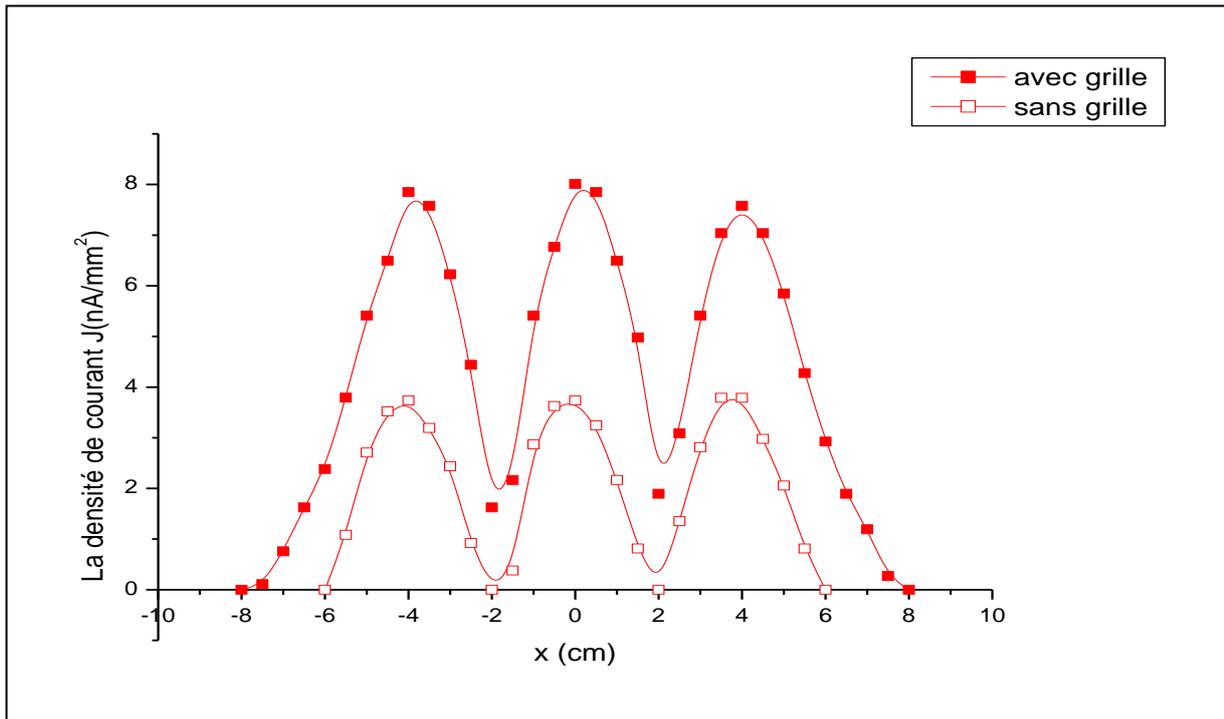


Figure III.19 Distribution de densité de courant J pour un système multipointes-plan ($N_p=3$) avec et sans grille, $V=12\text{kV}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_g=15\text{mm}$, ($T=22^\circ\text{C}$, $H_f=64\%$).

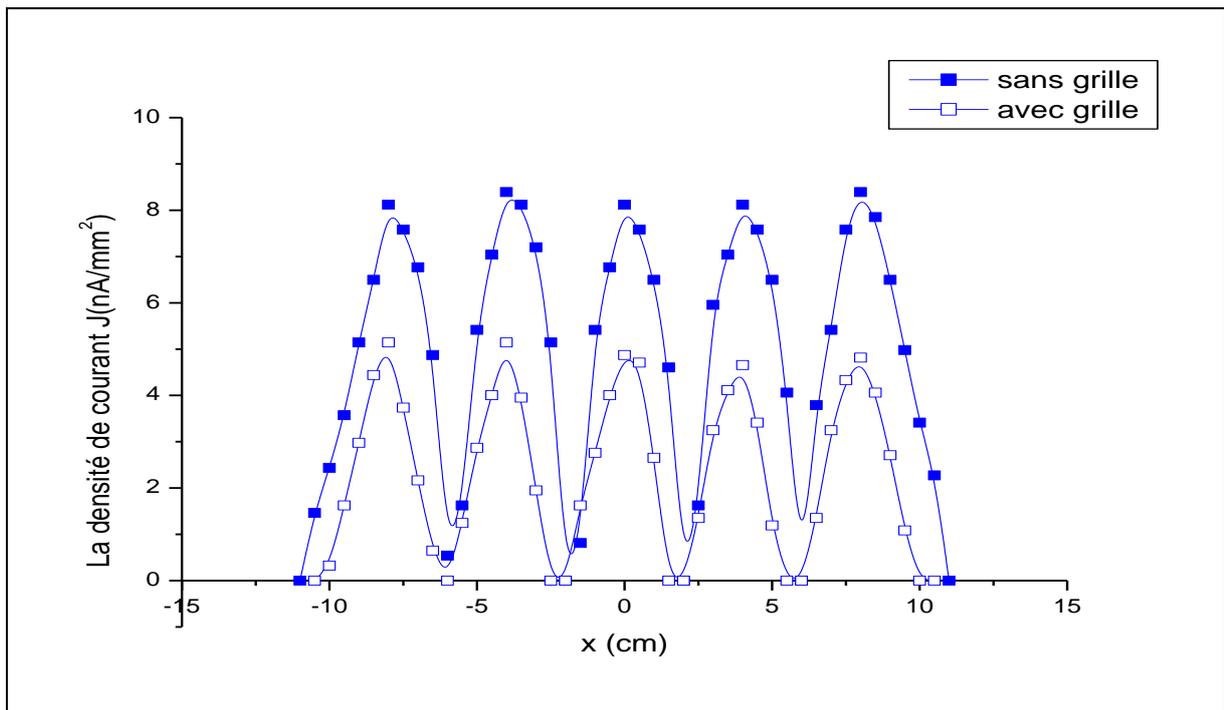


Figure III.20 Distribution de densité de courant pour un système multipointes-plan ($N_p=5$) avec et sans grille, $V=12\text{kV}$, $R_g=100\text{M}\Omega$ et $h_g=15\text{mm}$, ($T=22^\circ\text{C}$, $H_f=64\%$).

D'après ces figures, on remarque que le courant diminue après l'insertion de la grille et que les zones de faibles charge s'élargissent quelque soit le nombre de pointes N_p (1, 3, 5) car une partie du courant délivré par la source est dirigé vers le plan de masse à travers la grille.

III.3.2.2. Influence de la variation de la tension appliquée :

La figure III. 21 représente l'influence de la variation de la tension appliquée V sur la densité de courant J , en fixant la distance inter-pointes $d=4\text{cm}$ et la distance grille-plan $h_g=15\text{mm}$ pour $N_p=5$. On constate que à chaque fois que la tension appliquée V augmente, la densité de courant J augmente, car le champ devient plus important.

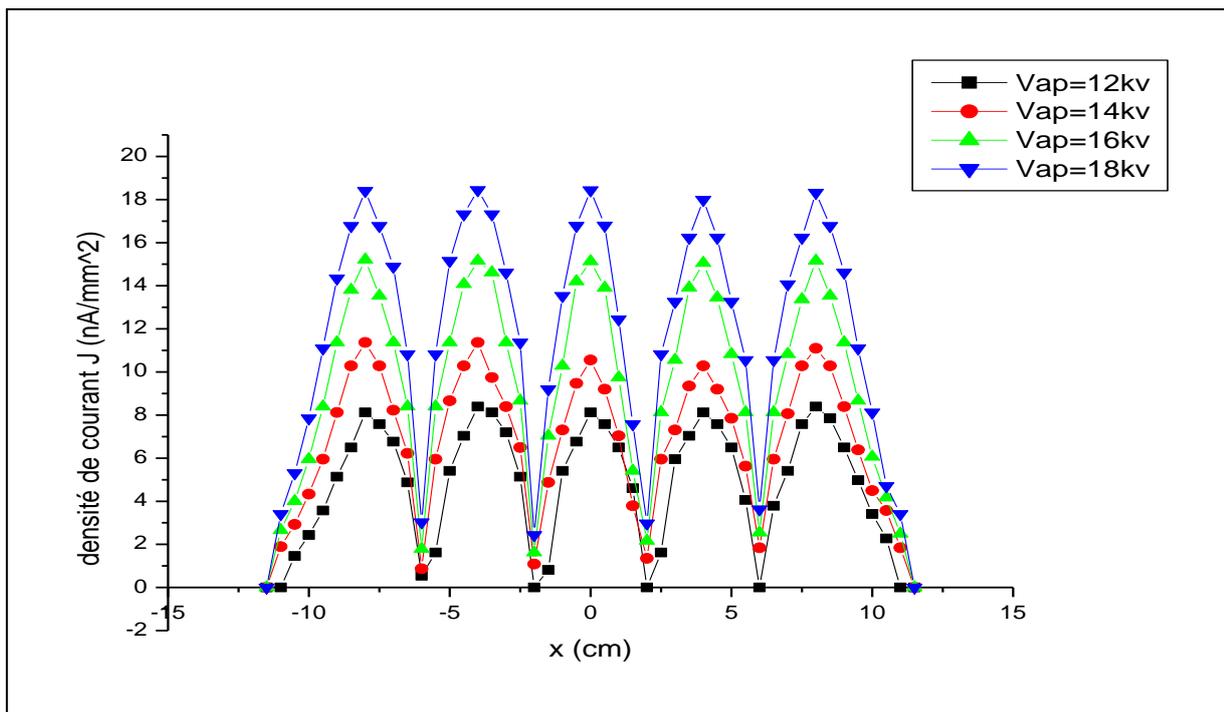


Figure III.21 Distribution de la densité de courant J en fonction de la tension appliquée V en présence de la grille pour $N_p=5$, $d=4\text{cm}$, $h_g=15\text{mm}$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=23^\circ\text{C}$, $H_r=58\%$).

III.3.2.3. Influence de la distance inter-pointes :

L'influence de la distance inter-pointes d sur la densité de courant J après l'insertion d'une grille métallique, figure III.22, en fixant la tension appliquée $V=12kV$, la résistance de grille $R_g=100M\Omega$ et la distance grille-plan $h_g=15mm$ pour un nombre de pointes $N_p=3$. On remarque que les zones de faible charge augmentent avec la distance inter-pointe d .

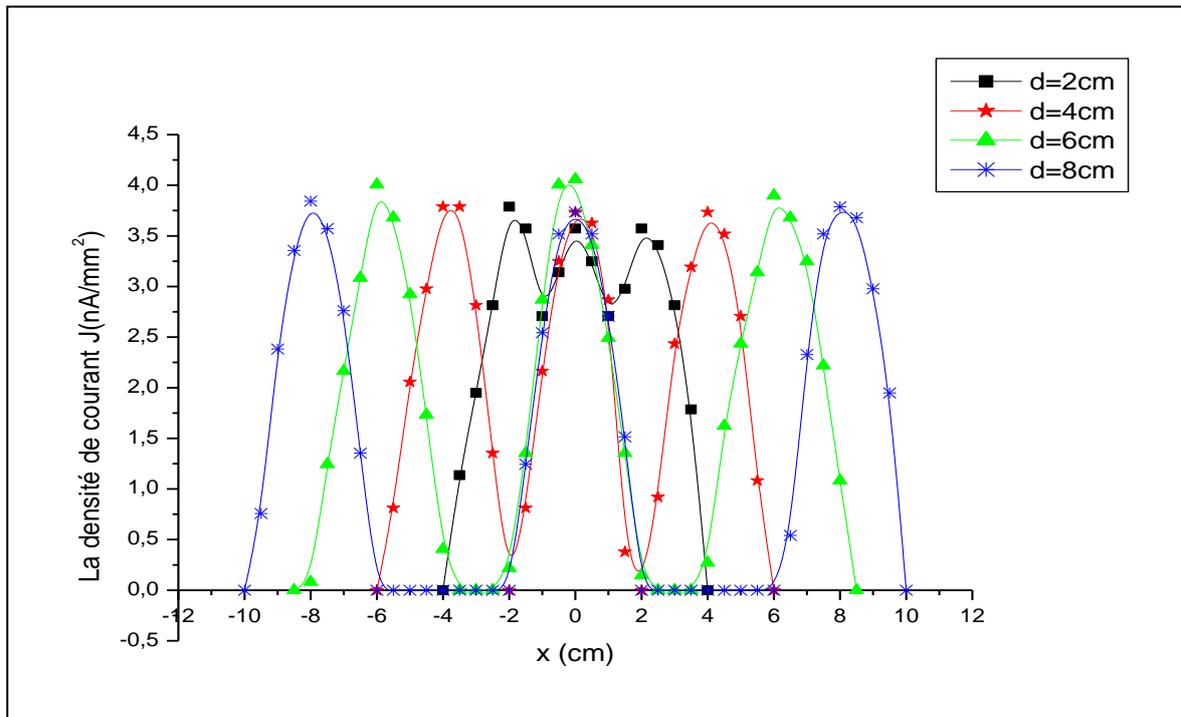


Figure III.22 Distribution de la densité de courant J en fonction de la tension appliquée V en présence de la grille pour $N_p=3$, $d=4cm$, $h_g=15mm$ et $R_g=100M\Omega$ ($T=24^\circ C$, $H_r=55\%$).

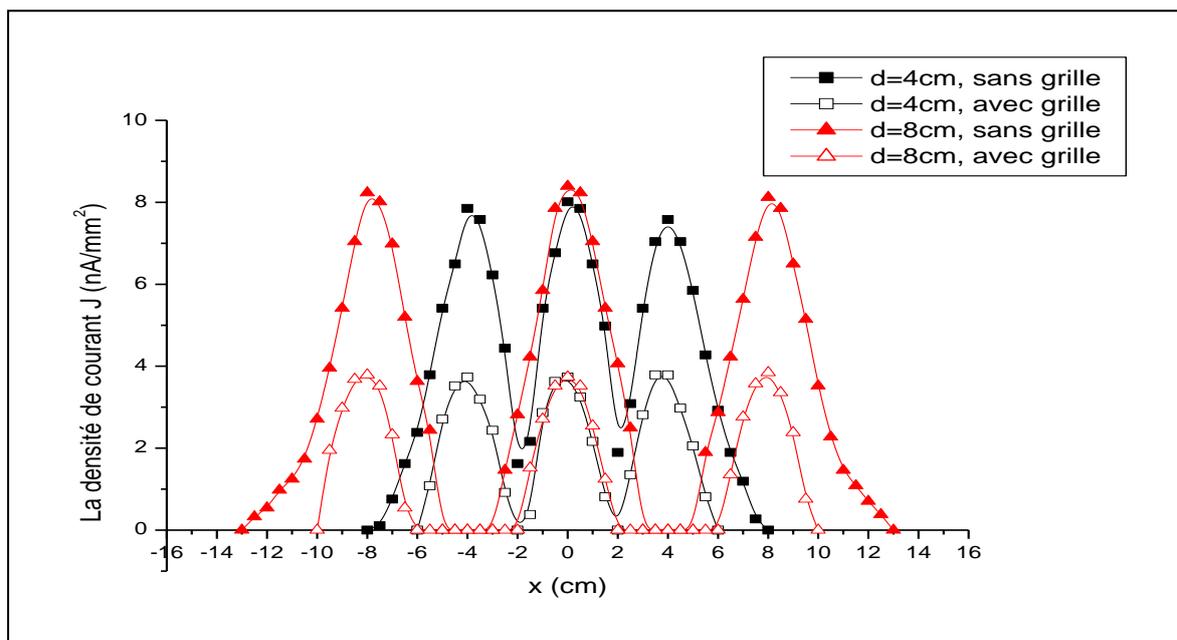


Figure III.23 Distribution de la densité de courant J (avec et sans grille) en fonction de la distance inter-pointes d , pour $N_p=3$, $h_g=15mm$ et $R_g=100M\Omega$ ($T=24^\circ C$, $H_r=55\%$).

Une comparaison entre les deux systèmes d'électrodes multipointes- plan (avec grille et sans grille) avec une distance d inter-pointes variable est représentée sur la figure III.23. on voit qu'après l'insertion de la grille, la densité de courant J diminue et les zones de faible charge s'élargissent car une partie du courant de la source traverse la grille vers le plan de masse.

III.3.2.3. Influence de la distance pointe-grille :

Sur les figures (III. 24 et III. 25) on a représenté l'influence de la distance h_p sur la densité de courant J pour différents nombres de pointes $N_p=1$ et $N_p=3$. On remarque que la densité de courant J diminue si on augmente la distance h_p . Ceci est dû à la diminution du champ électrique moyen dans l'espace situé entre les pointes et la grille.

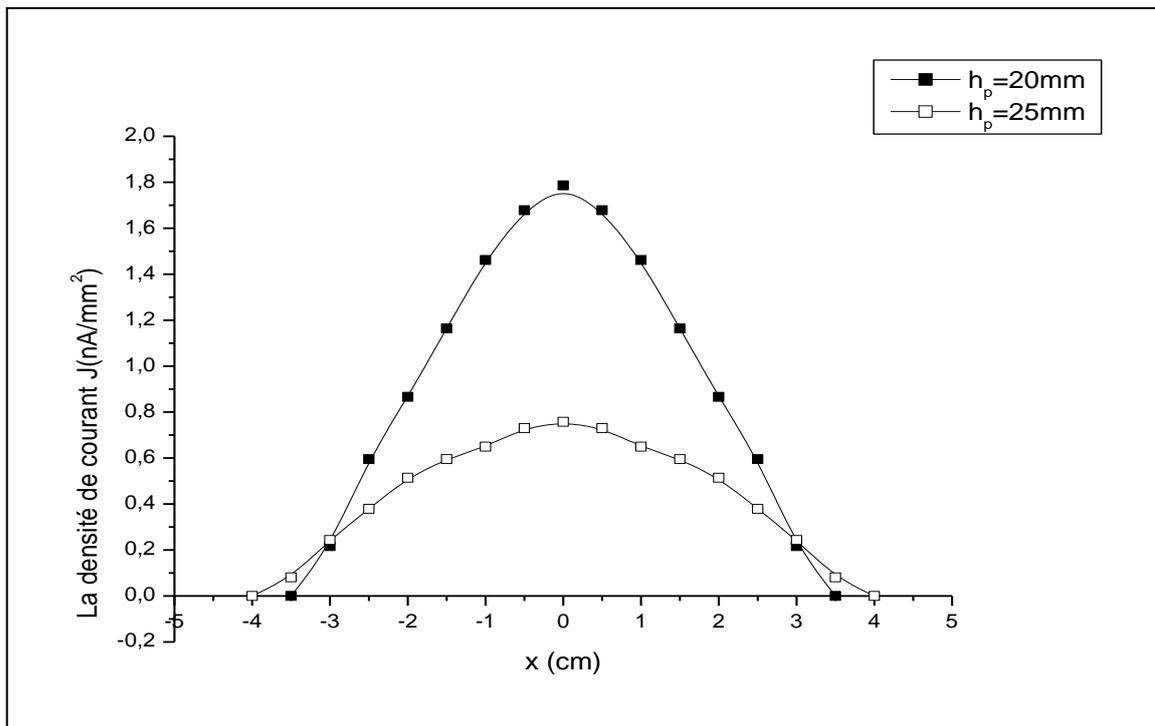


Figure III.24 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la distance h_p pour $N_p=1$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=61\%$).

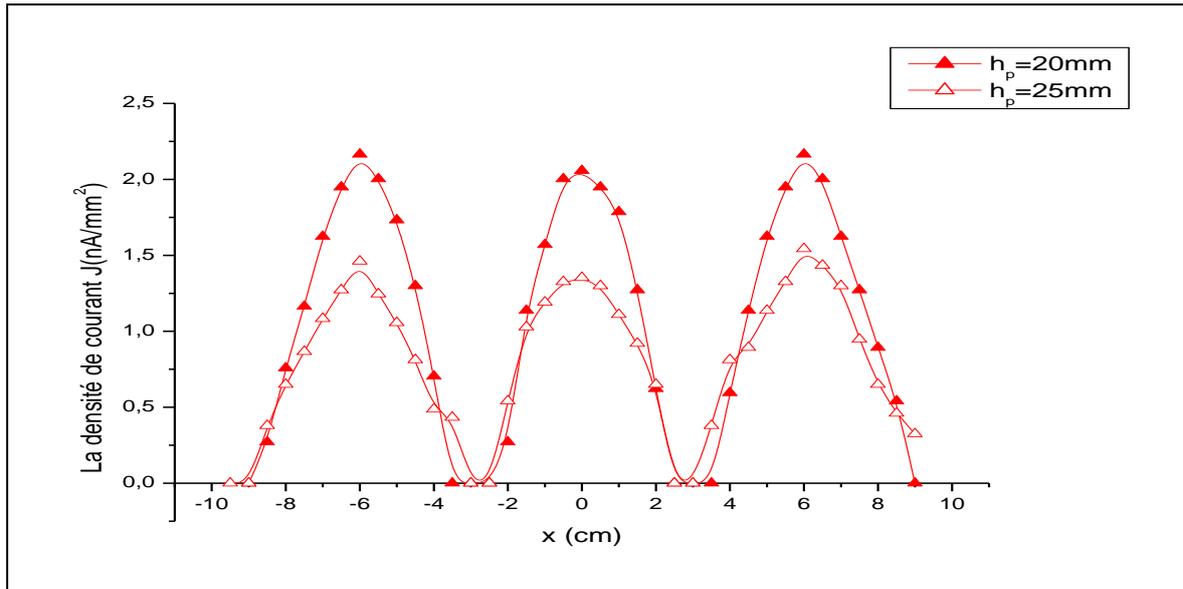


Figure III.25 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la distance h_p pour $N_p=3$, $d=6\text{cm}$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=61\%$).

III.3.2.3.2. Influence de la distance entre la grille et le plan :

Les figures (III.26 et III.27) illustrent l'influence de la distance grille-plan h_g sur la densité de courant J , en fixant la tension appliquée V à 12kV . On remarque que la densité de courant J diminue si on augmente la distance grille-plan h_g . Ceci est dû à la diminution du champ électrique moyen dans l'espace situé entre la grille et le plan de masse.

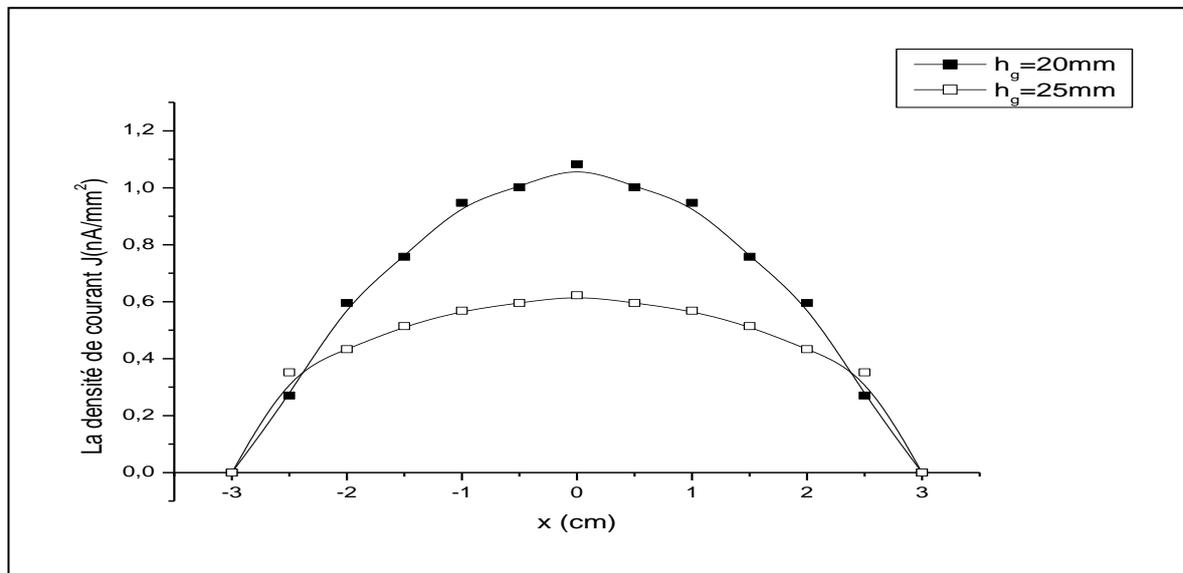


Figure III.26 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la distance h_g pour $N_p=1$ et $R_g=100\text{M}\Omega$ ($T=21^\circ\text{C}$, $H_r=61\%$).

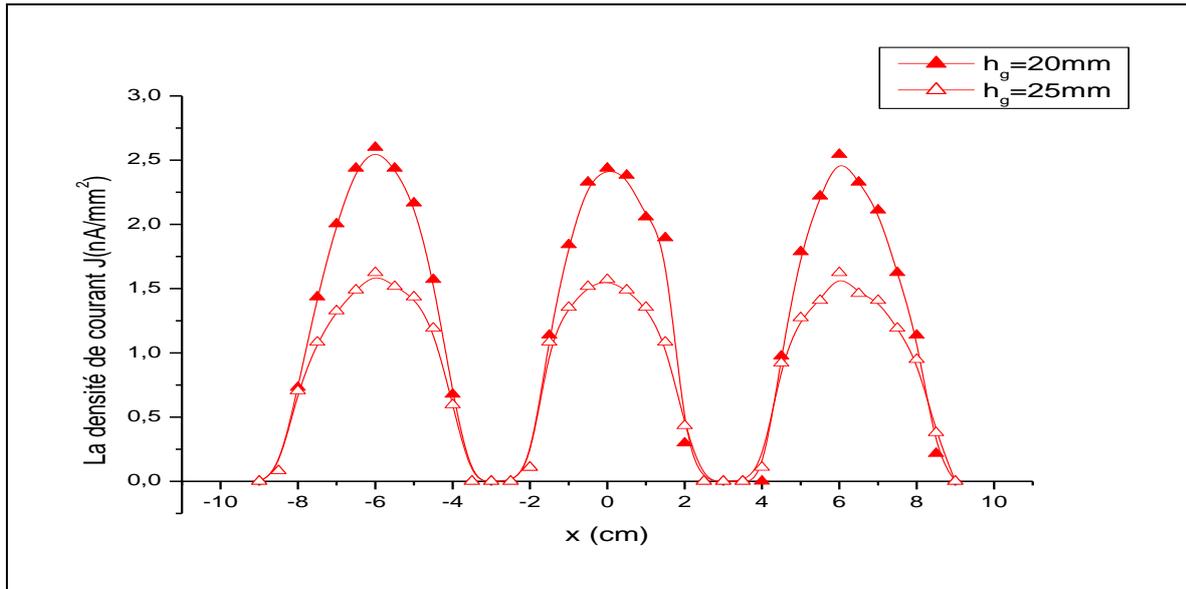


Figure III.27 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la distance h_g pour $N_p=3$ et $R_g=100M\Omega$ ($T=21^\circ C$, $H_r=61\%$).

III.3.2.3. Influence de la tension appliquée sur la densité de courant J avec le potentiel de la grille constant :

Sur les figures (III.28 et III.29) on a représenté la variation de la densité de courant en fonction de la tension appliquée V pour une potentielle de grille $V_g=1,2kV$ et $2kV$.

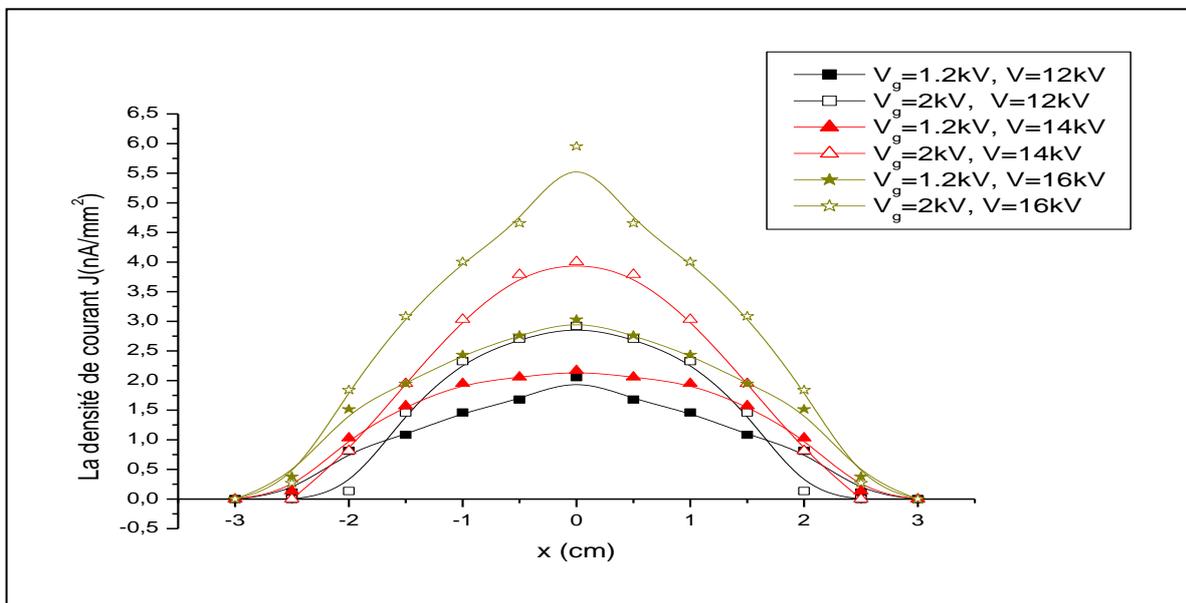


Figure III.28 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la tension appliquée V pour $N_p=1$, $V_g=(1.2kV$ et $2kV)$ et $h_g=15mm$ ($T=22^\circ C$, $H_r=54\%$).

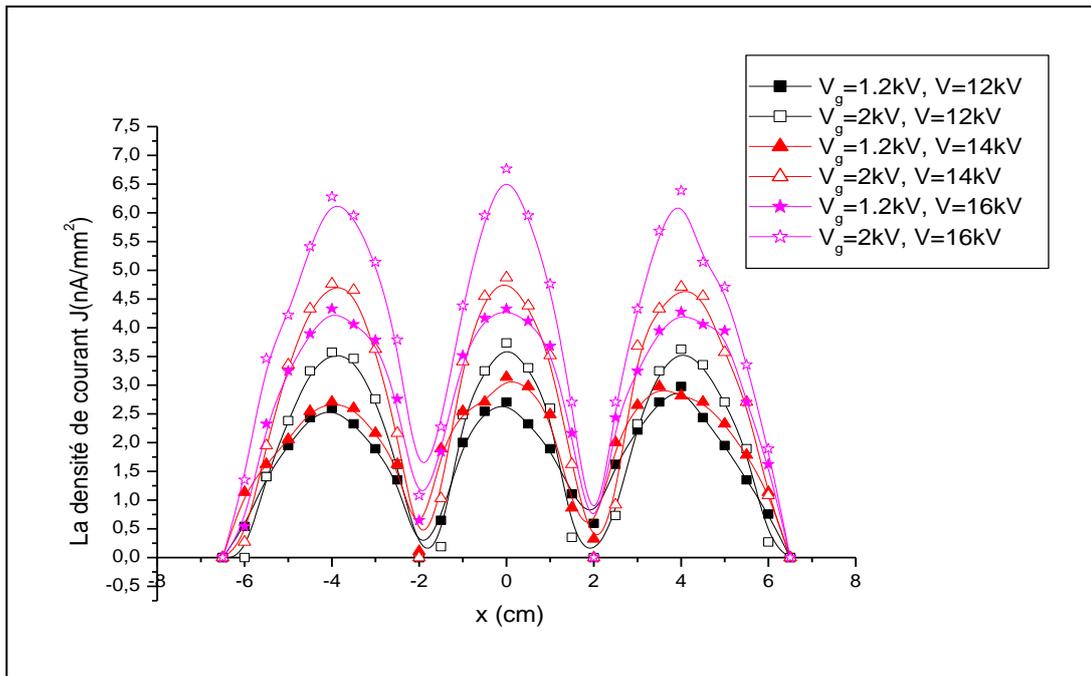


Figure III.29 Distribution de la densité de courant J (avec grille) en fonction de la tension appliquée V pour $N_p=3$, $V_g= (1.2\text{kV et } 2\text{kV})$ et $h_g=15\text{mm}$ ($T=22^\circ\text{C}$, $H_r=54\%$).

En regardant les figures (III.28 et III.29) on remarque que les densités de courant sont plus faibles en diminuant le potentiel de la grille pour les mêmes valeurs de tensions appliquées, ce qui montre que la charge est contrôlée par le potentiel de la grille

III.4 Conclusion

Le relevé des caractéristiques Courant-Tension et la distribution de la densité de courant, sont deux facteurs qui nous aident à caractériser un système d'électrode. En effet, les résultats expérimentaux obtenus dans le cas du système multipointes-plan avec ou sans grille montrent que :

- le courant I recueilli par le collecteur augmente avec le nombre de pointe N_p et avec l'augmentation de la distance inter-pointes d , mais à partir d'une certaine distance d qui est de $d=10\text{cm}$ pour le système d'électrode $N_p=3$ pointes et de $d=8\text{cm}$ pour le système d'électrode $N_p=5$ pointes ce courant diminue.

- les courbes de la densité de courant pour le système d'électrode multipointes-plan ont des formes ondulées dont l'intensité augmente avec la tension appliquée V . Plus la distance inter pointes d augmente plus les zones de charge faible ou nulle s'élargissent.

- le courant diminue et les zones de faibles charges s'élargissent après l'insertion de la grille, mais la présence de cette dernière permet de contrôler la charge en fixant le potentiel de la grille.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons utilisé deux systèmes de configurations d'électrodes de la décharge couronne, le premier est un système (multipointes-plan) et le deuxième est le système (multipointes-grille-plan). Dans ce dernier une grille métallique mise à la terre est insérée entre les deux électrodes le rôle de cette dernière est de contrôler les décharges. En effet, nous avons développé une étude expérimentale de la décharge couronne en déterminant les caractéristiques courant-tension, la densité de courant, en fonction des systèmes d'électrodes utilisés.

Le travail expérimental de la décharge avec un système multipointes-plan nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'intensité de courant de décharge augmente avec la tension appliquée et le nombre de pointes, car le champ devient plus intense. La caractéristique courant-tension a une forme quadratique et elle confirme la loi de Townsend.
- Pour un nombre de pointes donné, l'espacement inter-pointes est un paramètre important, influençant la décharge. En effet l'intensité du courant croît avec l'augmentation de l'espacement interpointes, mais à partir d'une certaine distance ce courant diminue même si on augmente l'espacement interpointes.
- L'augmentation de la distance entre les pointes et la grille en fixant la distance entre la grille et le plan a diminué le courant, et même conclusion pour une distance pointes-grille fixe en variant la distance grille-plan.
- L'intensité de courant collecté par le plan de masse augmente en augmentant la valeur du potentiel de la grille, pour la même tension appliquée.
- Lorsque nous avons inséré une grille les tracés de la caractéristique courant-tension ont montré les mêmes allures que celle sans grille, mais avec une intensité relativement faible.
- Suite à l'analyse des courbes de distribution de la densité de courant sur le plan, nous avons constaté que les allures de celles-ci sont à peu près dans les mêmes celles du cas sans grille, leurs intensités sont contrôlées par le potentiel de la grille.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Reguig, " Contribution à l'étude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans différents types de configurations d'électrode", Thèse de doctorat université Sidi Bel-Abbès 2017, pp.116
- [2] E. Badareu, I.Popescu, "gaz ionisé décharges électriques dans les gaz", Edition Dunod, Paris 1984.
- [3] E.N.Veldhuizen and W.R Rutger, " Corona discharge, fundamentals and diagnostics " Faculty of Appiled Physics private communication, Technisch Université Eindhoven.
- [4] A. C. Lahjomri, P. Atten, "simulation EHD des précipitateurs électrostatiques", Journal Applied Applied, 22 (1987) pp. 1087-1094.
- [5] M. Townsend, "Electricity in Gases", Oxford university press, (1915) 375-376
- [6] B. L. Henson, "A space-charge region model for microscopic steady corona from points", Journal Applied Physique, 52 (1981) pp.709-15
- [7] D. Benyoucef, "Modélisation particulaire et multidimensionnelle des décharges hors équilibre à basse pression excitées par champs électromagnétiques", thèse de doctorat Université de Toulouse III – Paul Sabatier, Mai 2011.
- [8] A. Flitti, "Modélisation numérique 1.5D et 2D de la propagation d'une décharge filamenteuse haute pression", thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf Oran, Janvier 2008.
- [9] V. Martin, "Etude de microdécharges comme source de rayonnement ultraviolet intense", thèse de doctorat, Université Paris Sud, Décembre 2011.
- [10] J.S.Townsend, "Elitriciry in gases" Oxford,1994.
- [11] K .Yamada, "An empirical formula for negative corona discharge current in Pointe-grid electrode geometry" Journal Applied Physique,96 (2004) 2472-5
- [12] Ait Said Hakim, " Influence de l'humidité sur la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique d'aérosols", thèse de doctorat, Université de Béjaia, 2016.
- [13] M. LARBA, "Effets des décharges partielles sur les propriétés diélectriques des isolants dans la fabrication des câbles électriques ", thèse de doctorat, Université de Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [14] A. Fridman, "Plasma Chemistry ", Cambridge University press UK, 2008, pp.1-978.

- [15] L. B. Loeb, J. M. Meek, "The Mechanism of the Electric Spark", Stanford University press, 1940, pp.1-188.
- [16] M. Coulibaly, " Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale", thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2009 pp.1-217.
- [17] A. kasdi , "Etude théorique et expérimentale de la décharge couronne bipolaire" , thèse de doctorat, Université de Béjaia, 2007.
- [18] S. Benabdelmalek, R. Messaoudi, "Simulation numérique de la cinétique chimique d'une mixture N₂/O₂/NO par décharge couronne", Mémoire master, physique, 2011.
- [19] M. Rezzouga, A.Tilmatine, R.Gouri, k.Medles, L.Dascalescu, " Experimental modeling of high-voltage corona discharge using design of experiments ", front, electr, electron, eng, 2, 2007, pp, 139-143.
- [20] M.P. Panaget, " Etude en laboratoire des effets physico-chimiques induits par les pertes de transport à haute tension ", Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1997.
- [21] Y. Zebboudj, R. Ikene, K. Hamidouche et K. Oudjhani, " Influence de la densité de l'air sur le seuil de la décharge couronne positive en géométrie pointe-plan ", CNHT'97 à Tizi-Ouzou.
- [22] Y. Zebboudj, " Influence de l'humidité de l'air atmosphérique sur les paramètres de la décharge couronne positive en géométrie cylindrique ", Thèse de Doctorat, Université Paris 6, 1988.
- [23] M. Aissou, H. Ait Said, H. Nouri, Y. Zebboudj, " Analysis of current density and electric field beneath a bipolar DC wires-to-plane corona discharge in humid air ", Eur. Phys. J. Appl. Phys. 61, 30803, 2013.
- [24] Q. Lancereau, J.M. Roux, J.L. Achard, " Analyse numérique du processus de condensation hétérogène pour la collecte d'agents pathogènes aéroportés par un filtre électrostatique semi-humide ", 20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon, 29 août au 2 septembre 2011.
- [25] Ernest. Galbrun, Alain. Glière, Yves. Fouillet, Jean-Luc Achard, Florence Rouillon, Christine Péponnet, " Mise au point d'un système de collecte d'aérosols nanométriques pour l'analyse biologique ", 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 2007 pp, 27-31 août.

- [26] X. Wang and C. You, " Effect of Humidity on Negative Corona Discharge of Electrostatic Precipitators ", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2013, Vol.20, PP, 1720-1725.
- [27] H. Nouri, "Influence des paramètres physiques de l'air sur le précipitateur électrostatique d'aérosols ", Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2010.
- [28] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, "Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator ", J. Electrostatic, 70, pp, 20-24, 2012.
- [29] J.-P. Borra, " Etude des problèmes liés aux précipitateurs électrostatiques pour le traitement des cendres volantes ", Rapport final, 1999, 51 p, n°97-0115/1A.
- [30] H. Nouri, M. Aissou, Y. Zebboudj, "Modeling and simulation of the effect of pressure on the corona discharge for wire–plane Configuratio", IEEE TDEI, 2013, 20, pp, 1547-1553.
- [31] M. Kaci, H. Ait Said, A.Laifaoui, M. Aissou, H. Nouri, Y. Zebboudj, " Investigation on the corona discharge in blade-to-plane electrode configuration ", Braz. J. Phys., 45 (2015) pp. 643-655.
- [32] G. Hartmann, " Spectrographie de la décharge couronne : étude des mécanismes de collisions dans le dard ", Thèse de doctorat Univ. Paris XI. (1977).
- [33] C. F. Gallo, "IEE Transactions on industry applications",1977, 19 pp. 550 – 557.
- [34] A. Lacoste, D. Pai, C. Laux, " Ion wind effect in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air ", AIAA Reno, 2004 pp. 354.
- [35] Tsrong-Yi Wen , Hsiu-Che Wang , Igor Krichtafovitch , Alexander V. Mamishev, " Novel electrodes of an electrostatic precipitator for air filtration ", Journal of Electrostatics, Vol. 73, pp 117-124, (2015).
- [36] J.F. Loiseau, J. Batina, F. Noël, R. Peyrous, " Hydro-dynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor ", J. Phys. 2002 D: Appl. Phys.Vol. 35, pp 1020-1031.
- [37] M. Goldman, A. Goldman, R.S. Sigmond, " The corona discharge, its properties and specific uses ", Pure and Appl. Chem. 1985, 57, n°9, pp, 1353-1362.
- [38]: I. W. Mcallister, G.C grichton, and E. Bregnsbo, " experimental study on the onset of positive corona ice atmospheric ", J, Appl, Physic 50 (11), 6791-6805, 1979.

- [39] B. Khaddour, " Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée" , Thèse de doctorat INPG, Grenoble, 2006.
- [40] M. FARZANEH, "Contribution à l'étude des mécanismes des vibrations induites par effet couronne", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse, 1986.
- [41] M. SALANNE Jean-Philippe, " Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation ", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [42] M. Benyamina, " *Etude de la production de l'ozone dans les décharges couronne* ", Thèse de doctorat, Université d'Oran, 2014.
- [43] :T.T Chau, K.C Kao, G.Blanc, F. Madrid, " Microwave plasma for low temperature dryterilization, Biomaterials" , 1996, Vol 17,pp.1273-1277.
- [44] F. Micheron, " Electrets ", Techniques de l'ingénieur, E1893, pp.1-12.
- [45] K. C. Kao, " Dielectric phenomena in solids ", Elsevier Academic Press, ISBN: 0-12-396561-6, 2004.
- [46] A.R. Denman, C.J. Groves-Kirkby, P.S.Phillips, R.G.M. Crockett, A. Woolridge, G.K. Gillmore, " The practical use of electrets in a public health radon remediation campagne", Journal of Environmental Radioactivity, 2005, Vol.84, pp.375-391.
- [47] K. L. Kaiser, " Electrostatic discharge ", Taylor & Francis Group, ISBN 0-8493-7188-0, 2006.
- [48] J. A. Giacometti , G.F. Leal Ferreira , B. Gross, " Summary Of Corona Charging Methods, " IEEE 6th International Symposium on Electrets (ISE 6) 1988 , pp.87-91.
- [49] M. Ignatova, T. Yovcheva, A. Viraneva, G. Mekishev, N. Manolova, I. Rashkov, "Study of charge storage in the nanofibrous poly(ethylene terephthalate) electrets prepared by electrospinning or by corona discharge method ", European Polymer Journal, 2008, Vol.44, pp.1962–1967.
- [50] B. Tabti, "Contribution à la caracterisation des filtres à électret par la mesure du déclin du potentiel de surface ", Thèse de doctorat, Université de Poitier, 2011.
- [51] K. C. Kao, " Dielectric phenomena in solids ", Elsevier Academic Press, 2004, ISBN: 0-12-396561-6.
- [52] J. A. Giacometti, O. N. Oliveira Jr, " Corona Charging of Polymers ", IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, Vol.27 N°.5, pp.924-943.

[53] Z. Xu, L. Zhang, G. Chen, " Decay of electric charge on corona charged polyethylene ", Journal of Physics D: Applied Physics. 2007, Vol.40, pp.7085–7089.

[54] C. MENGUY, " Électricité statique : Principes. Problèmes. Applications ", Techniques de l'Ingénieur, D1035, pp.1-25.