

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ ABDERAHMANE MIRA BEJAIA



FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
OPTION : Machines Electriques

## Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique

Thème :

Etude de la décharge couronne dans un  
système d'électrode triode

**Présenté par :**

Mr MAOUCHI Mohamed Chafik

Mr TARIKT Yanis

**Encadré par :**

Mme BENDAHMANE Akila

Mr RAHMANI Allaoua

**Année universitaire :**

2023 / 2024

# Remerciements

---

*Ce mémoire vient de clôturer cinq années d'étude. Il constitue le résultat d'un travail que nous avons élaboré avec efforts mais aussi avec un grand plaisir.*

*Nos remerciements vont particulièrement à :*

- *Madame BENDAHMANE Akila notre promoteur et notre co-promoteur monsieur RAHMANI Allaoua, pour leur accompagnements, leur disponibilités et leurs conseils précieux qui nous ont guidés tout au long de ce travail.*
- *L'ensemble des membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail avec bienveillance et expertise.*
- *Tous ceux qui, par leur fonction, ont contribué de près ou de loin à notre formation, nous permettant d'acquérir les compétences nécessaires pour mener à bien cette recherche.*
- *Notre université Abderrahmane Mira de Bejaïa, qui nous a offert l'opportunité de suivre notre parcours universitaire dans un environnement propice à l'apprentissage et à l'innovation.*

*Nous adressons également nos remerciements chaleureux à nos familles et amis, pour leur soutien moral et leur encouragement constant, qui ont été des piliers indispensables durant ces années d'études.*

*Merci!*

# Dédicace

---

*Je dédie ce modeste travail :*

*À ma mère et à mon père, qui m'ont toujours soutenu pour que je puisse atteindre mes objectifs. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*À mes grands-parents, à qui je souhaite une longue vie.*

*À ma sœur, mes deux frères, et à toute ma grande famille, en particulier mes oncles et mes tantes, pour leur soutien et leur encouragement durant toutes ces années.*

*À tous mes amis, à qui je souhaite beaucoup de succès.*

*À toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail, de près ou de loin.*

*À tous ceux que j'aime.*

*Merci !*

**MAOUCHI Mohamed Chafik**

# Dédicace

---

*A mes chers et très respectueux parents, aujourd'hui encore, le jour est arrivé pour moi d'exprimer ma profond reconnaissance à votre égard, vous redire combien je vous chéris sincèrement, je vous remercie encore une autre fois pour tout le bien que vous aviez fait pour moi afin d'en arriver là où je suis aujourd'hui.*

*A mon chers grand frère (Hacene), pour leur soutien, conseille et aide ainsi leur disponibilité pour moi durent tout mon parcours.*

*A mes deux frères (Samy et Rafik), m'a permis de connaitre, je tiens à les remercier pour leur soutien ainsi leur encouragement.*

**TARIKT Yanis**

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	2
<b>I. Chapitre 1 : Généralités sur la décharge couronne</b> .....	4
I.1 Introduction .....	4
I.2 Généralités sur la décharge couronne .....	4
I.3 Domaine d'existence de la décharge couronne .....	5
I.4 Polarité de la décharge couronne .....	6
I.4.1 Polarité positive .....	6
I.4.2 Polarité négative .....	7
I.5 Caractéristique courant-tension de la décharge couronne .....	7
I.6 Processus physiques des décharges électriques .....	8
I.6.1 Décharge de TOWNSEND .....	8
I.6.2 Décharge par streamer.....	9
I.7 Seuil d'apparition de la décharge couronne.....	10
I.8 Les facteurs influençant par la décharge couronne .....	11
I.8.1 Facteurs physico-chimiques .....	11
I.8.2 Facteurs électriques .....	12
I.8.3 Facteurs géométriques .....	12
I.9 Applications de la décharge couronne .....	13
I.9.1 Le filtrage électrostatique .....	13
I.9.2 La séparation électrostatique .....	13
I.9.3 Production d'ozone .....	14
I.9.4 Neutralisation et charge des médias non-tissés .....	15
I.9.5 Paratonnerre .....	15
I.9.6 Autres applications .....	16
I.10 Conclusion .....	16
<b>II. Chapitre 2 : Description de l'étude expérimentale</b> .....	18
II.1 Introduction .....	18
II.2 Description des installations expérimentales .....	18
II.2.1 Les alimentations électriques .....	18
II.2.2 Description du dispositif expérimentale .....	20
II.2.3 Système de la décharge couronne en configuration triode .....	22
II.2.4 Grille conductrice .....	23

II.2.5 Matériels utilisées .....	25
II.2.6 Sonde circulaire .....	26
II.3 Méthode de mesure .....	27
II.3.1 Mesure de tension appliquée aux électrodes actives .....	27
II.3.2 Mesure du courant .....	27
II.3.3 Mesure des paramètres de l'air .....	28
II.3.4 Mesure de la densité de courant J .....	28
II.4 Conclusion .....	28
<b>III. Chapitre 3 : Résultats et interprétations .....</b>	<b>30</b>
III.1 Introduction.....	30
III.2 Caractéristique courant - tension I (V) .....	30
III.2.1 Effet de la présence de la grille .....	30
III.2.2 Effet de la position de la grille .....	32
III.2.3 Effet de la distance entre le fil et le plan .....	34
III.2.4 Effet des résistances .....	35
III.2.5 Effet des dimensions de la grille .....	36
III.3 Distribution de la densité du courant sur le plan .....	38
III.3.1 Effet de la géométrie de la grille .....	38
III.3.2 Effet de la position de la grille .....	39
III.3.3 Effet des résistances .....	40
III.3.4 Effet du potentiel de la grille $V_g$ .....	42
III.3.5 Effet de l'espace inter-électrode H .....	44
III.4 Conclusion .....	45
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>48</b>

# Listes des figures

## **Chapitre 1 : Généralités sur la décharge couronne**

<b>Figure I.1</b> Configuration d'électrodes pour la génération de la décharge couronne .....	4
<b>Figure I.2</b> Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique .....	5
<b>Figure I.3</b> Processus d'une décharge électrique couronne positive .....	6
<b>Figure I.4</b> Processus d'une décharge électrique couronne négative .....	7
<b>Figure I.5</b> Dispositif expérimentale de TOWNSEND .....	9
<b>Figure I.6</b> Descriptif d'un streamer positif en géométrie fil-plan .....	10
<b>Figure I.7</b> Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes .....	13
<b>Figure I.8</b> Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour .....	14
<b>Figure I.9</b> Composants de base de toute installation expérimentale d'ozonation .....	14
<b>Figure I.10</b> Système de neutralisation et de charge des médias de type triode .....	15
<b>Figure I.11</b> Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre .....	16

## **Chapitre 2 : Description de l'étude expérimentale**

<b>Figure II.1</b> Schéma en bloc de la source de haute tension utilisée .....	19
<b>Figure II.2</b> Installation haute tension utilisée au laboratoire HT de Bejaia .....	20
<b>Figure II.3</b> Constitution du dispositif expérimental .....	21
<b>Figure II.4</b> Photo du dispositif expérimental .....	22
<b>Figure II.5</b> Vue schématique de la configuration triode .....	22
<b>Figure II.6</b> Aspect lumineux d'une décharge couronne .....	23
<b>Figure II.7</b> Vue longitudinale de la configuration triode .....	23

<b>Figure II.8</b> Première grille conductrice .....	24
<b>Figure II.9</b> Deuxième grille conductrice .....	24
<b>Figure II.10</b> Troisième grille conductrice .....	24
<b>Figure II.11</b> Appareillage de mesure .....	25
<b>Figure II.12</b> Résistance 22 M $\Omega$ .....	26
<b>Figure II.13</b> Vue de face de la sonde circulaire .....	26
<b>Figure II.14</b> Vue de dessus de la sonde circulaire .....	27

### **Chapitre 3 : Résultats et interprétations**

<b>Figure III.1</b> Caractéristique $I_{Total}$ (V) avec et sans la grille, $H = 7,1$ et $D = 2,5$ cm .....	31
<b>Figure III.2</b> Caractéristique $I$ (V) avec et sans présence de la grille $H = 5,8$ et $D = 2,5$ cm .....	31
<b>Figure III.3</b> Caractéristique $I = f(V_a)$ pour les courant du plan et courant de grille, $H=5,8$ cm, $D=2$ cm, $R_1=22M \Omega$ .....	32
<b>Figure III.4</b> Effet de la position de la grille pour la caractéristique $I_{Total} = f(V_a)$ pour $H_{max} = 7,1$ cm et $R_1 = 22 M\Omega$ .....	33
<b>Figure III.5</b> Effet de la position de la grille pour la caractéristique $I_G = f(V_a)$ pour $H_{max} = 7,1$ cm et $R_1 = 22 M\Omega$ .....	33
<b>Figure III.6</b> Caractéristique $I_{Total} = f(V_a)$ pour $D = 2$ cm et $R_1 = 22 M\Omega$ .....	34
<b>Figure III.7</b> Effet des résistances sur la caractéristique $I_{Total} = f(V_a)$ pour $H = 7,1$ cm et $D=2$ cm .....	35
<b>Figure III.8</b> Effet des résistances sur la caractéristique $I_G = f(V_a)$ pour $H = 7,1$ cm et $D=2$ cm.....	35
<b>Figure III.9</b> Effet des dimensions de la grille pour la caractéristique $I_{Total} = f(V_a)$ pour $H= 5,8$ cm et $D=2,5$ cm .....	36

<b>Figure III.10</b> Effet des dimensions de la grille pour la caractéristique $I_G = f(V_a)$ pour $H = 5,8$ cm et $D = 2,5$ cm .....	37
<b>Figure III.11</b> Effet de la géométrie de la grille sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H_{\max} = 7,1$ cm, $D = 2$ cm et $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$ .....	38
<b>Figure III.12</b> Effet de la position de la grille sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H_{\max} = 7,1$ cm et $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$ .....	39
<b>Figure III.13</b> Effet de la position de la grille sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H_{\max} = 7,1$ cm et $R_2 = 66 \text{ M}\Omega$ .....	39
<b>Figure III.14</b> Effet de la position de la grille sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H = 7,1$ cm et $R_3 = 132 \text{ M}\Omega$ .....	40
<b>Figure III.15</b> Effet des résistances sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H = 7,1$ cm et $D = 2$ cm et $I_G = 50 \mu\text{A}$ .....	41
<b>Figure III.16</b> Effet des résistances sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H = 7,1$ cm et $D = 3$ cm et $I_G = 50 \mu\text{A}$ .....	41
<b>Figure III.17</b> Effet des résistances sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H = 7,1$ cm et $D = 3,5$ cm et $I_G = 50 \mu\text{A}$ .....	42
<b>Figure III.18</b> Effet du potentiel de la grille sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H = 7,1$ cm et $D = 2$ cm et $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$ .....	43
<b>Figure III.19</b> Effet du potentiel de la grille sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H = 7,1$ cm, $D = 2$ cm et $R_2 = 66 \text{ M}\Omega$ .....	43
<b>Figure III.20</b> Effet du potentiel de la grille sur la variation de la densité du courant $J$ pour $H = 7,1$ cm, $D = 2$ cm et $R_3 = 132 \text{ M}\Omega$ .....	44
<b>Figure III.21</b> Effet de l'espace inter-électrode sur la variation de la densité du courant $J$ pour $D = 2,5$ cm et $V_a = 27$ kV .....	45

## Liste des symboles

**(I)** : courant de la décharge .

**(V)** : tension appliquée .

**(V<sub>s</sub>)** : tension seuil de l'effet couronne .

**(K)** : constante dépendant de la mobilité moyenne des ions et de la géométrie du système d'électrodes.

**(d)** : distance entre fil-plan .

**(R)** : rayon de la zone d'ionisation .

**(ε<sub>0</sub>)** : constante diélectrique du vide .

**(E<sub>c</sub>)** : champ critique, en kV/cm.

**(E<sub>s</sub>)** : champ superficiel, avec (E<sub>s</sub> = 31) kV/cm.

**(K)** : coefficient, avec (K = 0.308).

**(r)** : rayon du conducteur, en cm.

**(δ)** : densité relative de l'air, avec (δ = 1) pour (P = 76 cm Hg) et (T = 25°C),

**(T)** : température en °C .

**(P)** : pression de l'air en cm Hg).

**(J)** : densité de courant sur le plan , en μA/m<sup>2</sup>.

**(I<sub>s</sub>)** : courant de décharge collecté par la sonde , en μA.

**(S)** : surface du collecteur, en m<sup>2</sup>.

# Introduction Générale

## **Introduction générale**

La décharge couronne, est une méthode très simple et très efficace pour le chargement des matériaux diélectriques. Cette décharge électrique se produisant dans des champs électriques non homogènes, a suscité un intérêt considérable en raison de ses applications pratiques et de sa complexité théorique. Elle survient lorsque l'intensité du champ dépasse le seuil d'ionisation du milieu, typiquement en appliquant une tension élevée à une électrode de faible rayon de courbure située à une certaine distance d'un plan de masse. La décharge couronne est générée à partir d'un système d'électrode asymétrique. Parmi ces systèmes d'électrodes, on cite le système fil-plan, pointe-plan, lame-plan, etc....

Diverses technologies s'appuient sur les applications de la décharge couronne liées à la protection de l'environnement (séparation et précipitation électrostatique, chargement des médias non tissés utilisés dans la filtration d'air). Les travaux menés sur la décharge couronne ont mentionnés l'utilité du courant engendré par la décharge, d'où la nécessité de caractériser les différentes configurations d'électrodes pour leur utilisation dans différents procédés électrostatiques.

Le but de ce travail est de caractériser un système d'électrode de type triode par la mesure de la densité de courant et la détermination de la caractéristique courant-tension. Ce travail permet de mieux contrôler et maîtriser la charge générée à partir de cette configuration.

Pour structurer cette étude, nous avons divisé le mémoire en trois chapitres.

Le premier chapitre est dédié à l'étude théorique de la décharge couronne en abordant les différents types de décharge couronne et les facteurs influençant sur ce phénomène.

Le deuxième chapitre présente l'installation de haute tension utilisée pour les expériences. Nous décrivons les deux configurations géométriques d'électrodes étudiées : la configuration duale (fil-plan) et la configuration triode (fil-plan + grille), ainsi que les méthodes de mesure des paramètres de la décharge couronne.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus en fonction des différents paramètres.

En fin ce travail clôture par une conclusion générale.

# Chapitre (I)

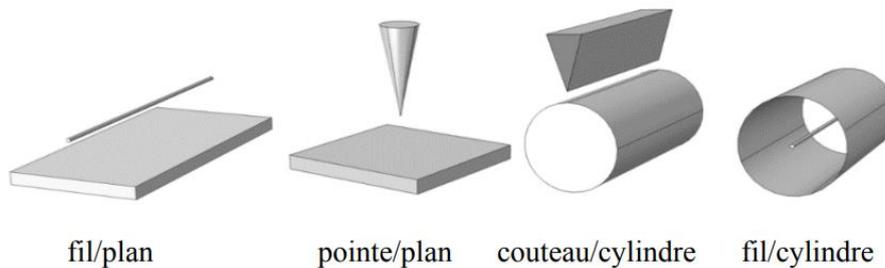
## I.1 Introduction

Dans le domaine de l'électrotechnique, la décharge couronne est un phénomène électrique d'une grande importance. Elle se produit généralement autour des conducteurs électriques lorsque la tension appliquée est élevée.

Dans ce chapitre, nous citerons des notions générales sur la décharge couronne, la physique et les mécanismes du développement de cette décharge. Puis nous clôturons par certaines applications de la décharge.

## I.2 Généralités sur la décharge couronne

Les décharges couronne se distinguent par une dissymétrie géométrique des électrodes. Les configurations typiquement utilisées dans les expériences sont de type pointe-plan, fil-plan, couteau-cylindre et fil-cylindre **Figure I.1**.



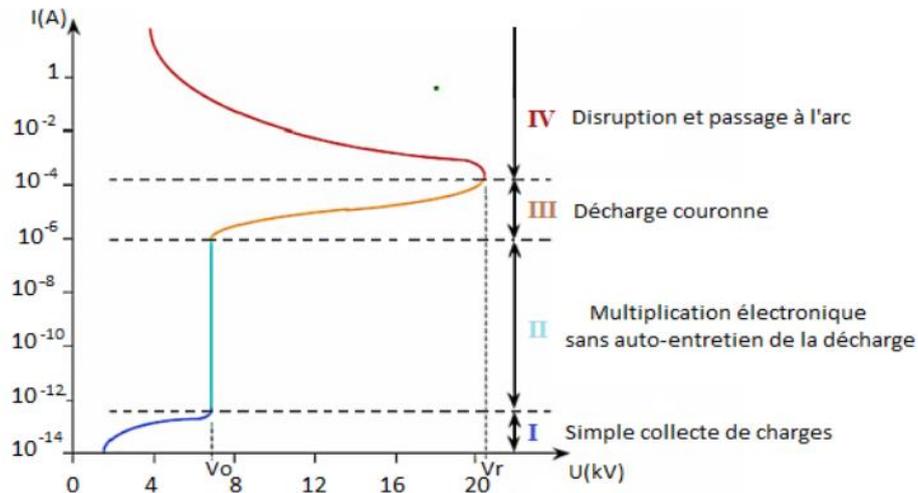
**Figure I.1** Configuration d'électrodes pour la génération de la décharge couronne

Lorsqu'une haute tension est appliquée à l'électrode présentant le rayon de courbure le plus petit, le champ électrique entre les électrodes devient très inhomogène. Il est particulièrement élevé à proximité de cette électrode, diminuant rapidement à mesure que l'on s'approche de la cathode plane. Près de la pointe anodique, le champ électrique intense génère des électrons avec suffisamment d'énergie pour ioniser le gaz, favorisant ainsi la formation d'avalanches électroniques [1] qui entraînent rapidement l'accumulation d'une charge d'espace, amorçant ainsi la décharge.

Dans cette zone proche de la pointe, les processus d'ionisation dominent naturellement sur ceux d'attachement des électrons. En revanche, à mesure que l'on s'éloigne de la pointe, le champ électrique s'affaiblit.

### I.3 Domaine d'existence de la décharge couronne

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



**Figure I.2** Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique[2]

- ✚ **Le premier régime (I)**, implique la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont générées par l'impact des rayons cosmiques ou des particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (**radioactivité naturelle**) sur le gaz présent entre les électrodes.
- ✚ **Le deuxième régime (II)**, démarré à partir d'une tension seuil  $V_0$ , marque le début de l'avalanche électronique de Townsend sans répondre encore au critère d'auto-entretien de la décharge. Cette décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour produire les électrons germes. Le courant augmente de manière significative pour une infime variation de la tension appliquée.
- ✚ **Le troisième régime (III)**, est caractérisé par une ionisation du gaz par la décharge suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation externes : la décharge devient auto-entretenu. Il s'agit du régime de la décharge couronne, marqué par l'apparition de dards, également appelés streamers, responsables de la composante impulsionnelle du courant.
- ✚ **Le quatrième régime (IV)**, Au-delà d'une tension appliquée  $V_a$ , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit «  $E/N$  » est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation

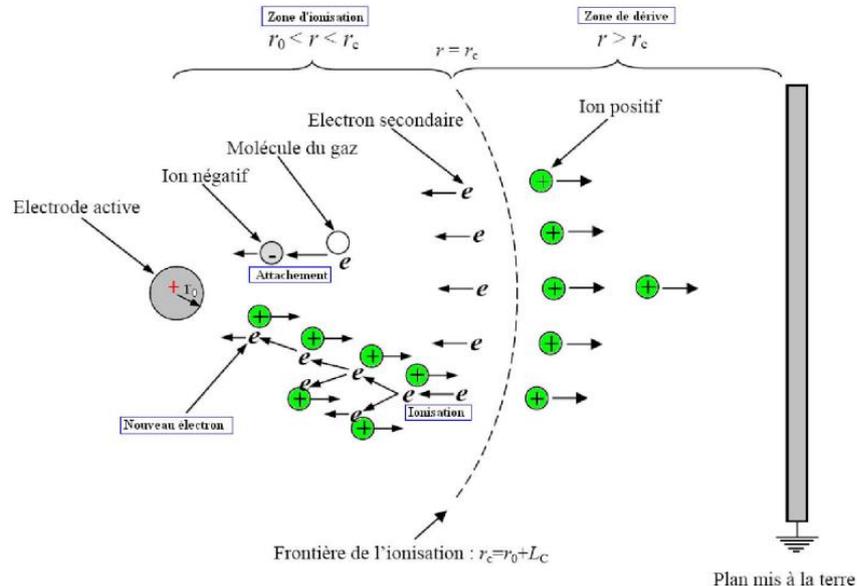
deviennent majoritaires par apport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

## I.4 Polarité de la décharge couronne

La décharge couronne est un phénomène dans lequel un champ électrique intense ionise l'air autour d'un conducteur, créant une région lumineuse et ionisée. La polarité de la décharge, positive ou négative, respectivement, affecte la luminosité, la distribution et les types de particules ionisées produites ; si la polarité est positive la décharge est positive, sinon elle est négative.

### I.4.1 Polarité positive

Le **figure I.3** montre un système d'électrodes fil-plan où un fil (**anode**) suspendu à une certaine hauteur  $H$  est porté à un potentiel élevé, et un plan (**cathode**) mis à la terre. En alimentant l'anode positivement, une décharge continue positive est induite. Les électrons, générés et accélérés par photo-ionisation autour de l'anode, créent une région de forte ionisation. Les ions positifs ainsi formés sont repoussés par l'anode jusqu'à une distance où le champ électrique devient trop faible pour créer de nouveaux ions positifs [3].

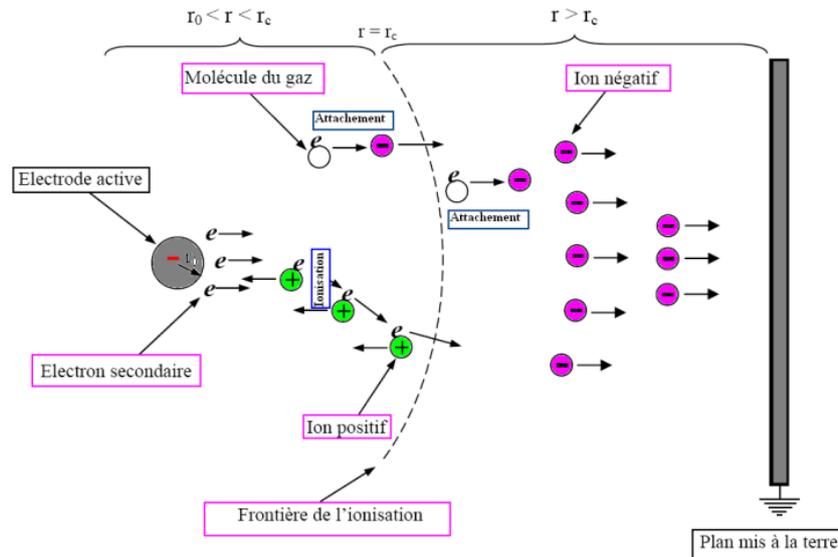


**Figure I.3** Processus d'une décharge électrique couronne positive [3]

Ces ions positifs se déplacent alors vers la cathode, formant une région de "**dérive**". Selon le modèle de Loiseau et al[3]. La décharge se compose d'une phase de propagation du streamer et d'une phase de restauration des ions, avec un cycle de fréquence de **10 kHz**, rendant le courant de décharge transitoire plutôt que continu.

### I.4.2 Polarité négative

Lorsque l'électrode active est portée à un potentiel négatif **figure I.4**, la photoionisation s'ensuit toujours, créant des électrons et produisant la zone d'ionisation autour de l'électrode HT. Selon **Goldman et Sigmond**[4], les ions positifs générés lors de l'opération reviennent rapidement à la cathode.



**Figure I.4** Processus d'une décharge électrique couronne négative[3]

Seuls les ions négatifs produits par l'attachement dans une région à plus faible intensité de champ peuvent se déplacer vers l'électrode plane mises à la terre. De plus, lorsqu'elle dépasse un certain seuil, un arc se forme. Le courant dans cette décharge provient des impulsions de **Trichel** à une fréquence qui dépend de la haute tension appliquée [3].

### I.5 Caractéristique courant-tension de la décharge couronne

Trois configurations d'électrodes sont fréquemment utilisées au laboratoire pour étudier la décharge couronne : pointe-plan, fil-cylindre et fil-plan. Dans ces trois configurations, le champ électrique est très intense près de l'électrode active, puis diminue de manière hyperbolique pour atteindre sa valeur minimale au niveau de l'électrode passive. Le système pointe-plan, initialement étudié par **Warburg**[5], est simple à mettre en place. **Townsend**[6] a préféré le système cylindrique coaxial pour sa symétrie radiale et la simplicité de son calcul théorique. Quant à la configuration fil-plan, elle a été utilisée par **Deutsch**[6] pour sa pertinence pratique dans la transmission d'énergie électrique.

Malgré les différences dans le comportement de la décharge couronne, ces systèmes partagent une caractéristique commune importante dans leur relation courant-tension (**I-V**) :

$$I = K.V.(V - V_s) \quad (\text{I-1})$$

Comme observé, le courant est nul lorsque ( $V = V_s$ ) et augmente de manière parabolique avec  $V$ .

Dans le cas de la géométrie fil-plan, qui ne possède pas la symétrie de révolution du système cylindrique, le calcul de la relation courant-tension est basé sur une loi générale complexe. Cependant, pour de faibles courants, elle est exprimée [6] comme suit :

$$I = \frac{3.12.\pi.\epsilon_0.\mu}{d^2.\ln\left(\frac{2.d}{R}\right)} V.(V - V_s) \quad (\text{I-2})$$

## **.I.6 Processus physiques des décharges électriques**

La décharge est interprétée à l'aide de deux modèles :

- ⊗ Le premier modèle concerne les décharges à longue portée qui se produisent le long de l'intervalle entre les électrodes, notamment les effets observés près de la cathode. C'est ce qu'on appelle la décharge de Townsend.
- ⊗ Un second modèle a été développé pour décrire la rapidité des phénomènes associés aux décharges à courte portée, en tenant compte des conditions locales : il s'agit des streamers.

### **I.6.1 Décharge de TOWNSEND**

La théorie de Townsend explique comment les gaz, normalement de bons isolants électriques, peuvent devenir conducteurs sous diverses contraintes extérieures telles que le rayonnement lumineux, la chaleur ou les champs électriques. Elle décrit la transition d'un gaz de son état isolant à un état conducteur sous l'effet d'un champ électrique. En considérant deux électrodes planes séparées par une distance  $d$  dans un gaz à la pression  $P$ , et en appliquant une différence de potentiel  $V$  entre ces électrodes, un champ électrique uniforme d'intensité  $E = \frac{V}{d}$  se forme dans l'intervalle [10].

Le coefficient d'ionisation primaire de Townsend, noté  $\alpha$ , représente le nombre moyen de paires électron-ion ainsi créées par un électron par unité de longueur de parcours dans la direction du champ électrique  $E$ .

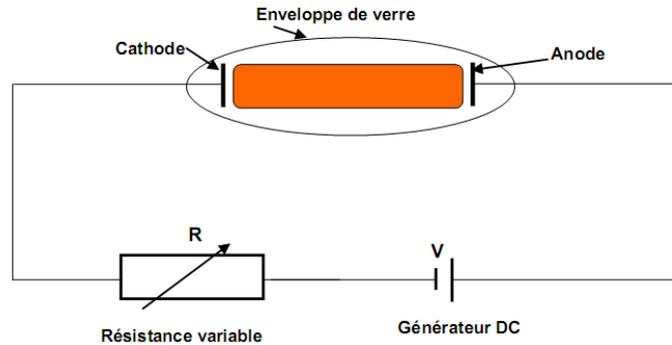


Figure I.5 Dispositif expérimentale de TOWNSEND[7]

Si l'on suppose qu'il se forme  $n(x)$  électrons à une distance  $x$  de la cathode, alors ils vont générer  $\partial n(x)$  électrons sur une distance  $dx$  selon l'équation :

$$\partial n(x) = \alpha \times n(x) \times \partial x \quad (\text{I-3})$$

En intégrant cette équation, nous trouvons le nombre d'électrons atteignant l'anode comme suit :

$$n(d) = n_0 \times \exp(\alpha d) \quad (\text{I-4})$$

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

$$e \times n(d) = e \times n_0 \times \exp(\alpha d) \quad (\text{I-5})$$

Par conséquent, le courant collecté est donné par :

$$i = i_0 \times \exp(\alpha d) \quad (\text{I-6})$$

L'étude expérimentale réalisée par Townsend sur le courant  $i$  en fonction de la distance  $d$  a révélé une augmentation plus rapide que celle prédite par la relation (I.6). Cette observation est attribuable au phénomène d'ionisation secondaire qui se produit près de la cathode.

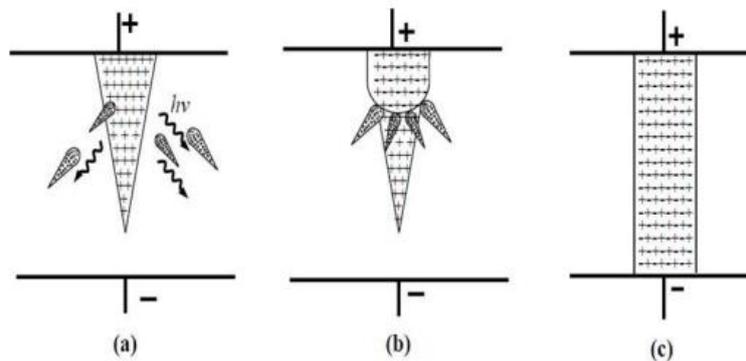
En effet, lorsque l'on considère les ions positifs résultant des collisions entre les électrons et les molécules, leur impact sur la cathode peut entraîner l'émission d'électrons secondaires. Ce processus est caractérisé par un coefficient d'ionisation secondaire  $\gamma$ , qui représente le nombre d'électrons émis à la cathode par ion incident.

### I.6.2 Décharge par streamer

La théorie du streamer décrit l'apparition d'un filament lumineux étroit, visible sur une photographie statique. L'émission lumineuse provient principalement des photons créés à l'avant du streamer. Dans ce processus, la photo-ionisation du gaz joue un rôle crucial au sein

de la charge d'espace engendrée par la première avalanche de **Townsend** près de la cathode. Sous l'effet du champ électrique, les électrons accélérés excitent les molécules neutres par collision, lesquelles émettent des photons en revenant à leur état fondamental. Ces photons sont absorbés par le gaz entre les électrodes.

Dans l'air, les molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons avec une énergie supérieure à **13 eV**, suffisante pour ioniser les molécules d'oxygène dont le potentiel d'ionisation est de **12.2 eV**. Les électrons produits déclenchent de nouvelles avalanches secondaires selon le même mécanisme de multiplication électronique décrit par **Townsend**.



**Figure I.6** Descriptif d'un streamer positif en géométrie fil-plan[8]

Ces avalanches secondaires se propagent vers la charge d'espace positive, formant un canal d'étincelles. Le phénomène de **streamer** se caractérise par un temps de développement d'environ  $10^{-8}$  secondes. Des critères ont été établis par **Meek et Raether** pour estimer le champ électrique nécessaire à la transformation d'une avalanche en **streamer**.

**Raether** a proposé un critère simple stipulant que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer [9]. Dans le cas d'un champ non uniforme, si  $E_s$  représenté le champ à la surface de l'anode et  $E_c$  le champ critique du minimum d'ionisation correspondant à  $(\alpha - \eta) = 0$ , ce critère s'exprime par :

$$\int_0^{L_c} (\alpha - \eta) \cdot dx = 1,5 \cdot 10^8 \text{Electrons} \quad (\text{I-7})$$

L'expression précédente est dérivée à la fois du critère de claquage de **Townsend** et du critère de **Meek**. Ce dernier énonce que le champ de la charge d'espace  $E_p$  est approximativement équivalent au champ  $E_s$  à la surface de l'anode[10].

### I.7 Seuil d'apparition de la décharge couronne

Pour que la décharge couronne se produise, le champ électrique doit être suffisamment fort ( $E > E_{peek}$ ). La tension appliquée détermine ce champ électrique et peut ioniser des particules d'air dans une petite région de gaz.

Les électrons libres, générés par un champ électrique intense, initient ce processus. Lorsqu'un de ces électrons libres entre en collision avec une molécule de gaz, son énergie dépasse l'énergie d'ionisation de la molécule de gaz, provoquant son ionisation et la libération de nouveaux électrons. Ces nouveaux électrons sont soumis au même champ électrique qui les a produits, pouvant ainsi initier une avalanche de Townsend en générant des photons à haute énergie.

Lorsque plusieurs avalanches se produisent, une décharge couronne se forme. Les électrons et les ions ainsi créés se déplacent selon leur polarité de charge, créant une charge d'espace [11].

Selon **F.W. Peek**, pour une configuration cylindrique, l'apparition de l'effet de couronne dépend du champ superficiel, du rayon du conducteur et de la densité de l'air, comme le décrit l'équation suivante :

$$E_c = E_s \times \delta \times \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta \times r}}\right) \quad (\text{I-8})$$

→ Le terme  $(\sqrt{\delta \times r})$  est appelé correction de **Peek**, prenant en compte le fait que plus le rayon du conducteur est petit, plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur.

→ Cette équation est valide uniquement pour les surfaces.

## I.8 Les facteurs influençant par la décharge couronne

Les facteurs influençant la décharge couronne peuvent être classés en trois catégories :

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

### I.8.1 Facteurs physico-chimiques

- **Température:** Une augmentation de la température réduit la rigidité diélectrique de l'air, favorisant ainsi l'effet couronne[12].
- **Humidité:** L'humidité affecte également la rigidité diélectrique de l'air. Une humidité élevée favorise la conductivité de l'air et abaisse le seuil de décharge couronne[13].
- **Pression atmosphérique:** Selon la loi de **Paschen**, une augmentation de la pression atmosphérique augmente le nombre de particules dans l'espace entre les électrodes,

affectant ainsi le seuil de décharge couronne et la mobilité des porteurs de charge[14].

### I.8.2 Facteurs électriques

Le niveau et le type de tension appliqués aux électrodes sont des facteurs déterminants. La plupart des études se sont concentrées sur le courant continu, mais les mêmes modes d'éjection de charge sont observés avec les tensions alternatives. Cependant, la concentration d'émission de charge diffère entre les deux types de tensions[15].

- a. **En tension continue:** Si le champ électrique n'est pas assez fort pour permettre au streamer de traverser tout l'espace entre les électrodes, le courant en excès provoque un court-circuit dans la partie extérieure du circuit. Une diminution du courant arrête l'ionisation et réduit le champ électrique dans la région de l'électrode, produisant un niveau de tension minimum indiquant une décharge corona. Les petites décharges d'étincelles, appelées "**stubs**", se produisent à intervalles réguliers, nettoyant l'environnement à la pointe de l'étincelle par des processus de dérive, de diffusion, de recombinaison et d'augmentation du champ électrique [12].
- b. **En tension alternative:** Le bruit émis par les lignes haute tension est dû au développement de streamers autour du câble HT, constituant une décharge couronne [16].

### I.8.3 Facteurs géométriques

- **Rayon de courbure:** Il affecte la tension de seuil de décharge, et cette tension augmente avec le rayon de courbure de l'électrode active. Le courant de décharge diminue avec l'augmentation du rayon de courbure dans les mêmes conditions atmosphériques [17].
- **Distance inter-électrodes:** À une faible distance inter-électrodes, le courant de décharge augmente rapidement avec la tension appliquée, et un seuil de décharge corona se produit à de courtes distances [17].
- **Nature des électrodes:** Les caractéristiques courant-tension des électrodes en acier, aluminium et cuivre diffèrent, avec des valeurs de courant de décharge supérieures pour l'acier. Cependant, l'acier a une tension de seuil inférieure à celle de l'aluminium et du cuivre [14].
- **Forme des électrodes:** La géométrie des électrodes influence la répartition du champ électrique. Une décharge corona se forme lorsque le champ électrique n'est pas

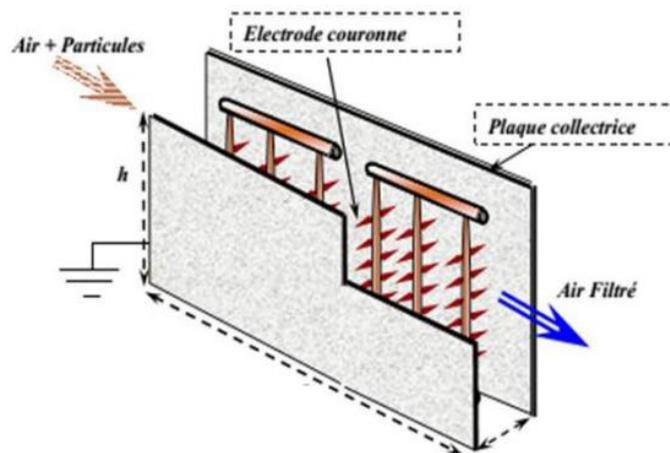
uniforme, tandis qu'une géométrie plan à plan favorise un arc dès le début de la décharge [18].

## I.9 Applications de la décharge couronne

Diverses applications industrielles exploitent l'effet couronne pour générer des charges électriques. Ces applications incluent les précipitateurs électrostatiques utilisés dans la purification de l'air, la destruction de la pollution atmosphérique, l'évaporation électrostatique, la séparation de matériaux à l'aide d'isolants chargés, ainsi que les générateurs d'ozone pour éliminer l'électricité statique. De plus, l'effet couronne est utilisé dans les processus électriques des copieurs, des imprimantes à jet d'encre et des neutralisants complexes.

### I.9.1 Le filtrage électrostatique

Également connu sous le nom de précipitation électrostatique, utilise la génération de charges électriques dans les décharges couronnes continues à pression atmosphérique. Cette technique est employée depuis de nombreuses années dans le traitement des effluents gazeux contenant des particules de poussière. En chargeant sélectivement les particules avec les charges électriques produites par l'effet couronne, les poussières nocives peuvent être collectées avant leur libération dans l'environnement. Les précipitateurs électrostatiques sont couramment utilisés dans les industries telles que les centrales thermoélectriques, les cimenteries, etc., où ils contribuent à améliorer la qualité de l'air à l'intérieur des locaux.

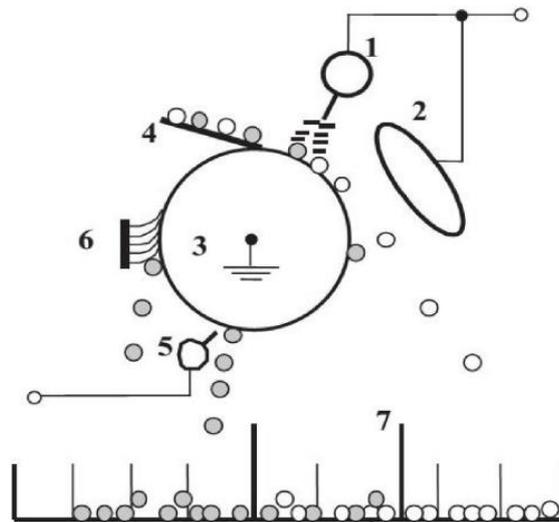


**Figure I.7** Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes[19]

### I.9.2 La séparation électrostatique

C'est un procédé largement utilisé dans l'industrie pour séparer des mélanges de particules métalliques et d'isolants. Les séparateurs électrostatiques, notamment les séparateurs à tambour, offrent des niveaux de pureté élevés, atteignant souvent près de 100 %.

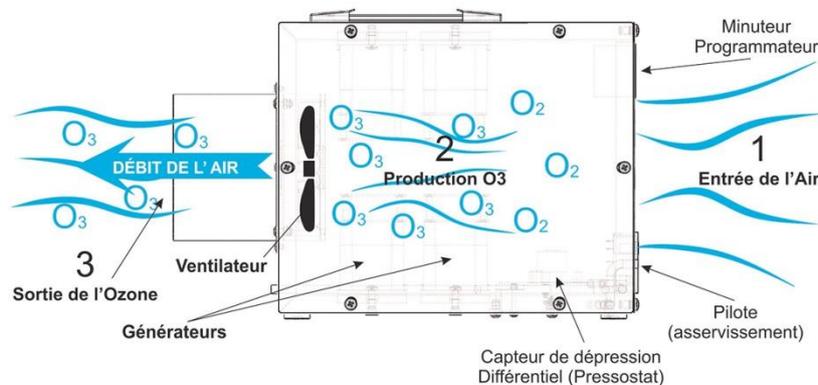
Leur fonctionnement repose sur la création d'un champ électrique entre deux électrodes principales (1 et 2), avec une troisième électrode de masse (3) pivotant autour d'elle-même pour faciliter le processus de séparation, comme illustré dans la **figure I.8**.



**Figure I.8** Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour[20]

### I.9.3 Production d'ozone

Elle est réalisée par décharge couronne, où la décharge divise les molécules d'oxygène stables en deux ions oxygène chargés. Ces ions réagissent ensuite avec d'autres molécules d'oxygène pour former de l'ozone. L'ozone est utilisé dans divers domaines, notamment le traitement de l'eau, le nettoyage et la préservation des aliments, en raison de ses propriétés oxydantes puissantes. Pour effectuer cette production, l'ozone est introduit dans le flux gazeux à traiter. Le schéma de la **Figure I.9** illustre un ozonateur fournissant de l'oxygène ou de l'air, où le courant électrique convertit une partie du gaz en ozone.



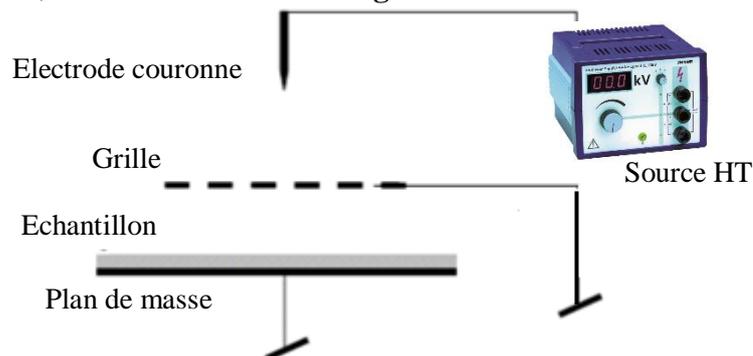
**Figure I.9** Composants de base de toute installation expérimentale d'ozonation

#### I.9.4 Neutralisation et charge des médias non-tissés

Les matériaux isolants sont souvent chargés électro-statiquement sur leur surface, ce qui peut entraîner des problèmes statiques significatifs, tels que l'adhérence entre les matériaux ou aux surfaces métalliques. Cela peut poser des défis dans diverses applications telles que la fabrication de feuilles de papier, la manipulation de textiles ou les films polymères [10]. Les décharges électriques provenant d'objets chargés peuvent être dangereuses, surtout dans la fabrication d'équipements électroniques, nécessitant une manipulation précautionneuse.

Pour contrôler la charge électrique des matériaux, un ensemble de trois électrodes, appelé triodes, est utilisé pour générer une décharge couronne afin de neutraliser la charge sur le matériau. Ces triodes peuvent également être utilisées pour charger des tissus non tissés et des films isolants. Plusieurs laboratoires et entreprises ont réalisé des études sur l'efficacité des filtres à air non tissés après avoir été exposés à une décharge couronne.

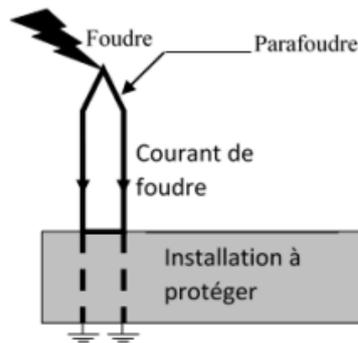
Cette catégorie d'applications pour les systèmes d'électrodes triodes a fait l'objet de recherches approfondies, comme illustré dans la **figure I.10**.



**Figure I.10** Système de neutralisation et de charge des médias de type triode[22]

#### I.9.5 Paratonnerre

C'est un dispositif conçu pour protéger les bâtiments contre les coups de foudre directs. Il est constitué d'un conducteur relié à la terre par plusieurs fils, avec une pointe métallique placée au-dessus du bâtiment. L'effet couronne améliore la conductivité de la pointe, attirant ainsi la foudre. Lorsqu'un nuage chargé négativement se rapproche, la foudre suit le chemin de moindre résistance, reliant la charge positive de la terre à la charge négative du nuage.



**Figure I.11** Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre [19]

### I.9.6 Autres applications

En plus des applications mentionnées précédemment, l'effet couronne est également utilisé pour éliminer l'électricité statique dans divers contextes, notamment dans les photocopieurs ou les imprimantes à jet d'encre.

### I.10 Conclusion

Ce chapitre a présenté les phénomènes relatifs à la décharge couronne. Le mécanisme de la décharge couronne reste toujours un sujet d'étude vu l'importance et la diversité des applications découlant de cette décharge. Nous avons décrit les mécanismes de développement de cette décharge, ainsi que les paramètres influençant la décharge couronne. Enfin, nous avons explicité quelques applications industrielles de cette décharge.

Le prochain chapitre sera consacré à la description du dispositif expérimental et les méthodes de mesure utilisées pour la caractérisation.

# Chapitre (II)

## II.1 Introduction

Ce chapitre s'est basé sur la présentation des différents équipements et matériels expérimentales utilisés pour réaliser les essais et les mesures nécessaires dans ce travail. L'objectif est de déterminer les caractéristiques courant-tension et la densité de courant lors d'une décharge couronne mono polaire positive générée à partir de deux types de configurations d'électrodes (duale et triode), ensuite d'analyser les facteurs qui influencent cette décharge.

Un dispositif spécifique a été conçu pour permettre d'effectuer ces mesures. Ce dispositif est constitué d'un système dual ou triode et une sonde circulaire pour mesurer la densité de courant le long du plan de masse. Les expérimentations ont été menées au Laboratoire de Haute Tension de l'Université A. Mira de Bejaia. Nous avons exploré deux configurations d'électrodes, notamment la configuration duale (fil-plan) et la configuration triode (électrode duale-grille-plan), afin d'étudier la décharge couronne dans diverses conditions.

Nous avons réalisé une série de mesures comprenant les caractéristiques  $I = f(V)$ , ainsi que la distribution de la densité de courant sur la surface du plan en polarité positive. Ces mesures ont été effectuées avec et sans l'insertion d'une grille conductrice entre l'électrode active et le plan, pour observer l'influence de la grille sur le comportement de la décharge couronne.

## II.2 Description des installations expérimentales

Les installations expérimentales de la décharge couronne à choisir dépendent des objectifs spécifiques de la recherche.

### II.2.1 Les alimentations électriques

Pour alimenter les électrodes actives de la décharge couronne, une source de haute tension continue en polarité positive a été utilisée. L'équipement électrique est installé dans le laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia, qui fournit des tensions allant de 0 à 140 kV dans les deux polarités. Les **figures (II.1 et II.2)** montrent les composants de cette installation, qui se compose de :

- ✚ Une source de basse tension (SG1).
- ✚ Un transformateur de haute tension alimenté par la source de basse tension (T100).

- ✚ Une diode haute tension (G270).
- ✚ Un condensateur de lissage (C10).
- ✚ Deux résistances  $R_a$  et  $R_\theta$  de valeurs de 106k $\Omega$ , 250 M $\Omega$  respectivement.

L'enroulement primaire du transformateur élévateur (T100) est capable de fournir des hautes tensions et il est alimenté par une source de basse tension variable (SG1) via un câble. Pour obtenir une haute tension continue, un redresseur mono-alternance a été associée à ce transformateur.

Ce redresseur comprend une diode haute tension en silicium (G270) et un condensateur de lissage (C10) d'une capacité de 10 nF. Une résistance  $R_a$  de 106 k $\Omega$  relie le condensateur au système d'électrodes, jouant le rôle d'amortisseur de courant pour protéger la diode des surintensités.

La mesure de la haute tension continue  $V_a$  est réalisée grâce à un diviseur de tension résistif, composé d'une résistance haute tension  $R_\theta$  de 250 M $\Omega$  et d'une résistance basse tension  $R_a$  de 501 k $\Omega$  intégrée dans le voltmètre de crête (MU11). Ces deux résistances sont connectées par un câble coaxial blindé.

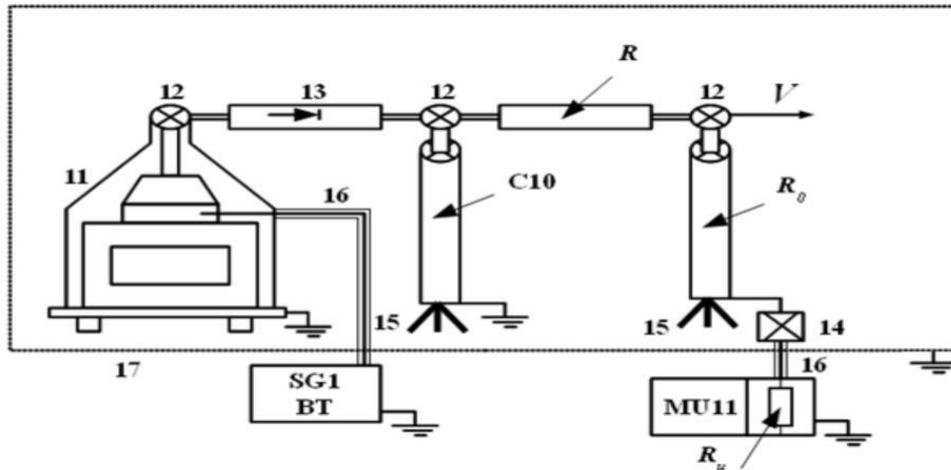


Figure II.1 Schéma en bloc de la source de haute tension utilisée [23]

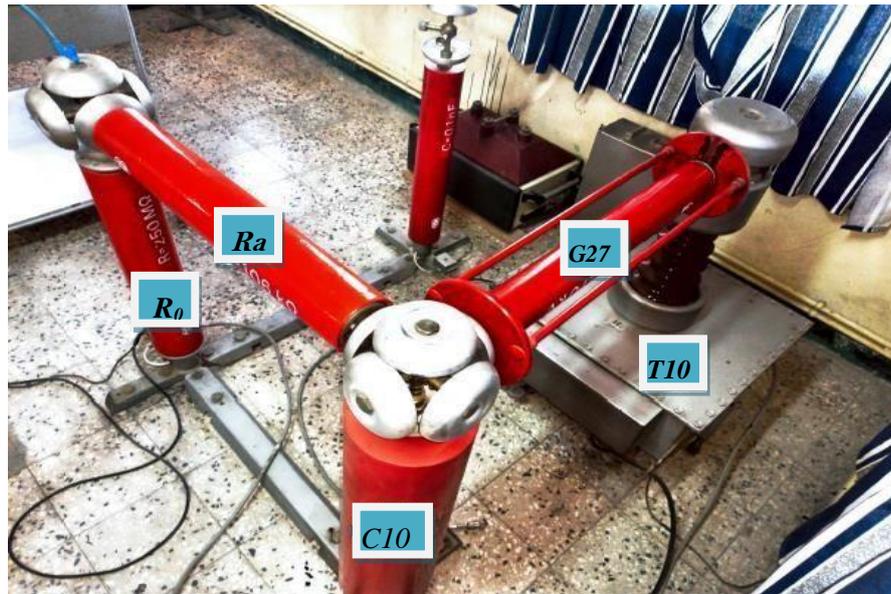


Figure II.2 Installation haute tension utilisée au laboratoire HT de Bejaia

$R_a$ : Résistance d'amortissement	G270 : Diode haute tension
$R_0$ : Résistance haute tension	T100 : Transformateur haute tension
MU11 : Voltmètre de crête	C10 : Condensateur de lissage

### II.2.2 Description du dispositif expérimentale

Parmi les configurations utilisées dans les laboratoires de recherche pour produire la décharge couronne, on trouve la configuration duale "fil-plan".

La **figure (II.3)** illustre l'ensemble du dispositif expérimental pour la géométrie Fil-Plan. Le système d'électrodes et les éléments sous haute tension sont isolés par une grille séparatrice (cage de Faraday (6)) pour protéger le manipulateur et les autres appareils de mesure basse tension.

L'électrode active (1), placée parallèlement à un cylindre (2) et tendue à une hauteur H par des plaques isolantes (3), est reliée à l'installation de haute tension continue  $V_a$ . Cette installation comprend principalement un générateur de basse tension (12). Grâce à un transformateur élévateur et un circuit redresseur, une haute tension continue de l'ordre de kilovolts (11) est produite.

Pour mesurer le courant de la décharge, un pico-ampèremètre (14) est connecté à la sonde circulaire de mesure (5). Cette sonde, en aluminium massif, est incorporée dans un plan de surface (E) doté de deux plans de garde (4) pour éviter les effets de bord. Le tout repose sur

un support isolant en bois. La sonde circulaire (5) est fixée à l'ensemble par une plaque en plexiglas et un écran en aluminium permettant l'évacuation à la terre des courants de fuite.

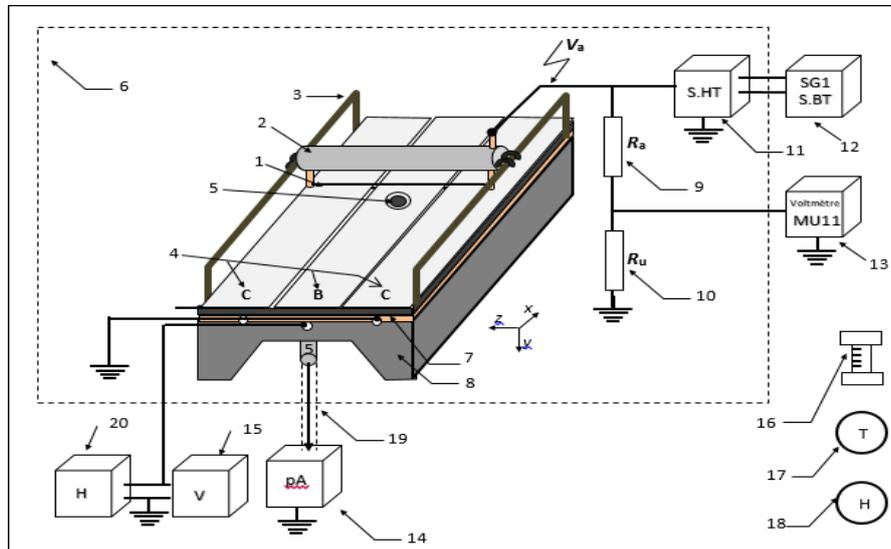


Figure II.3 Constitution du dispositif expérimental

1: fil très fin	11: source de haute tension
2: cylindre	12: source de base tension
3: supports des electrodes actives	13: voltmeter de crête
4: les plans de grades	14: Pico-ampèremètre
5: sonde circulaire	15: voltmètre
6: cage FARADAY	16: baromètre à mercure
7: plaque isolante en Bakélite	17: Thermomètre
8: support en bois	18: Hygromètre à cheveux
9: résistance d'amortissement	19: cable coaxiale
10: résistance de haute tension	20: source de polarisation basse tension



Figure II.4 Photo du dispositif expérimental

### II.2.3 Système de la décharge couronne en configuration triode

Cette configuration, illustrée dans les **figures (II.5, II.6 et II.7)** est appelée triode. Elle est composée d'une électrode duale et d'une grille métallique placée entre le fil de l'électrode duale et l'électrode plan reliée à la terre. La grille est reliée à la terre via une résistance électrique, de sorte que son potentiel dépend de cette résistance et de la tension appliquée à la source. Cette configuration est très intéressante car on peut imposer un potentiel désiré au niveau de la grille, par la suite on impose le courant collecté au niveau du plan. Ce principe de propriété est utilisé pour contrôler la valeur du potentiel ainsi que pour la charge des films isolants. C'est pourquoi de nombreuses recherches se sont particulièrement intéressées à cette configuration d'électrode.

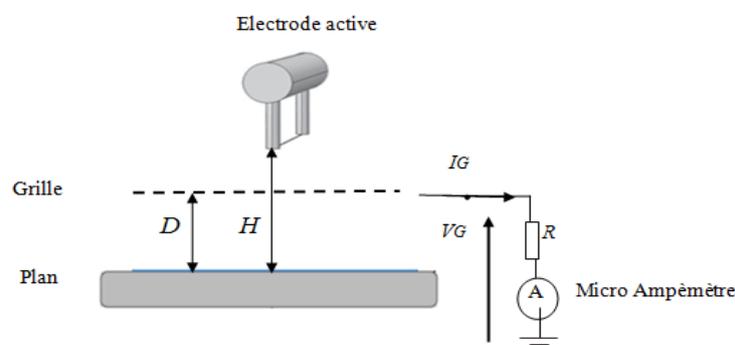
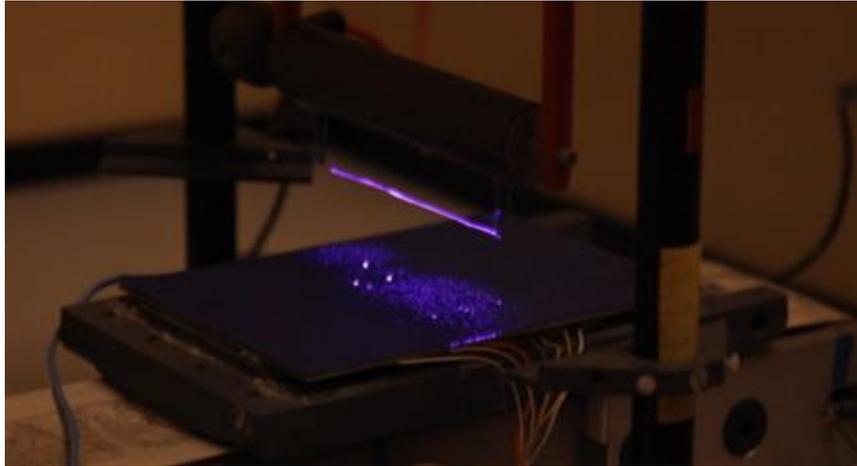
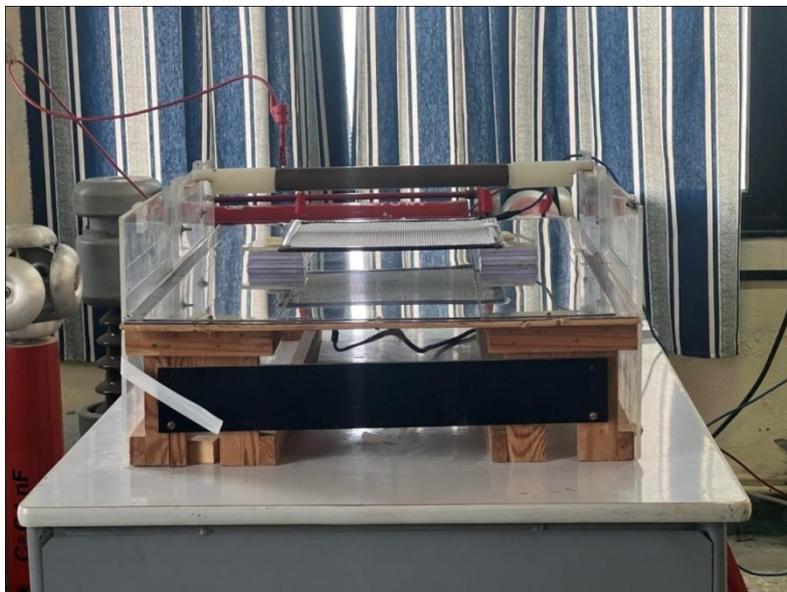


Figure II.5 Vue schématique de la configuration triode



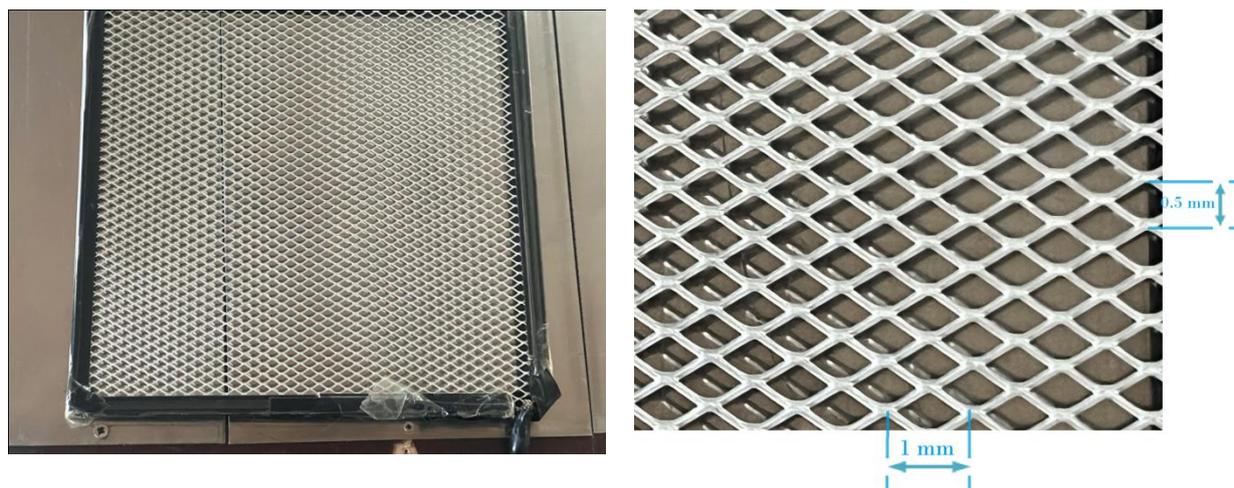
**Figure II.6** Aspect lumineux d'une décharge couronne



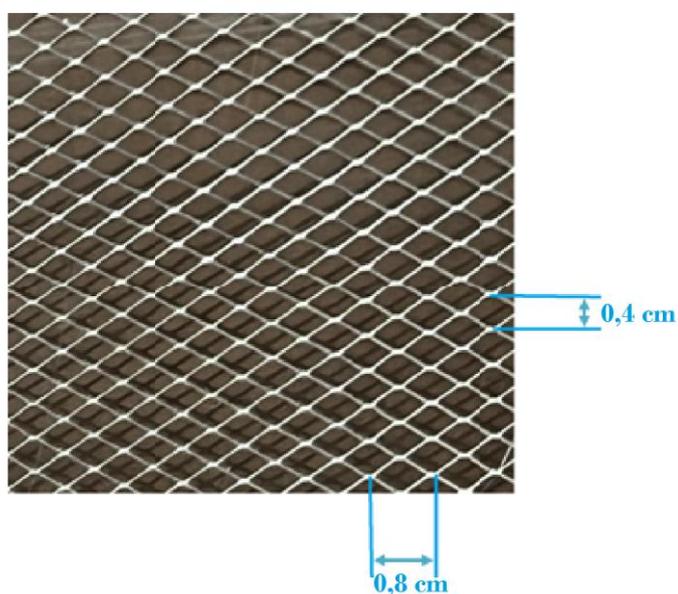
**Figure II.7** Vue longitudinale de la configuration triode

#### **II.2.4 Grille conductrice**

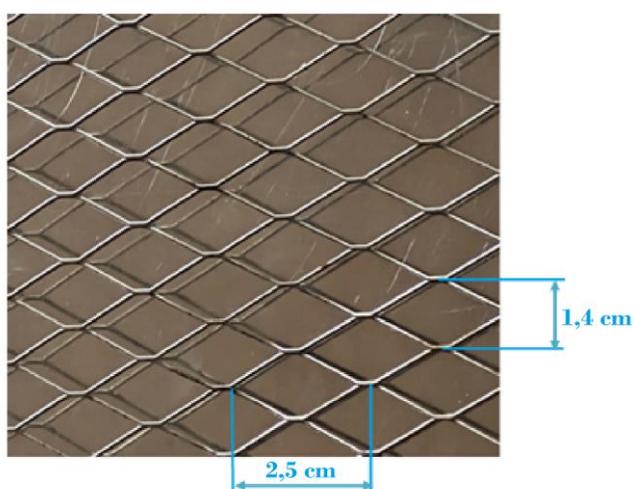
On a utilisé trois grilles avec des dimensions différentes. A chaque essai la grille métallique est insérée entre l'électrode active (le fil) et l'électrode plan reliée à la terre. La grille est reliée à la terre à travers une résistance électrique. Son potentiel  $V_G$  dépend de cette résistance et du courant  $I_G$  qui la traverse. Pour fixer le courant de la grille  $I_G$ , on règle la tension source jusqu'à avoir le courant de grille désiré.



**Figure II.8** Première grille conductrice



**Figure II.9** Deuxième grille conductrice



**Figure II.10** Troisième grille conductrice

## II.2.5 Matériels utilisés

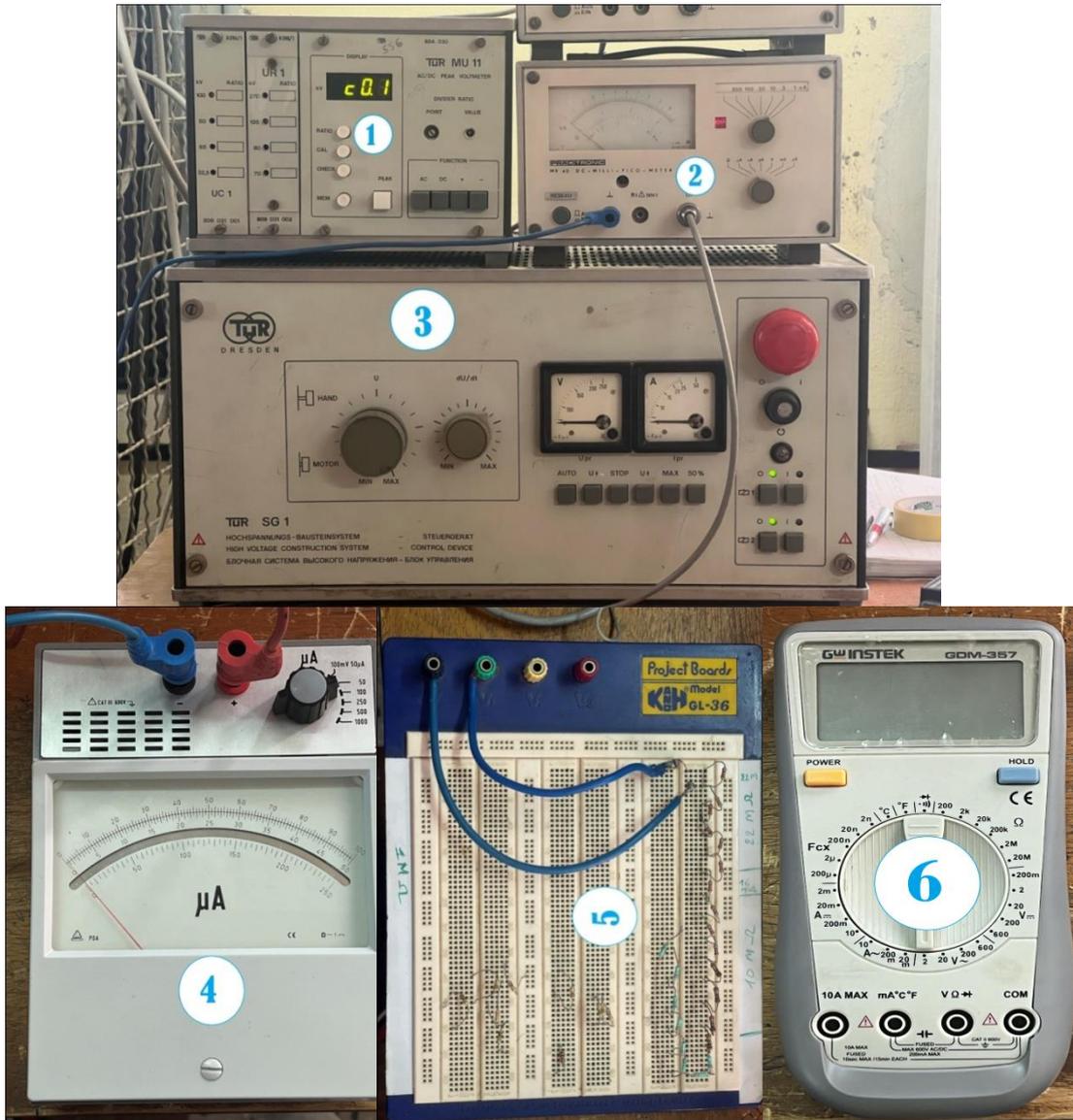
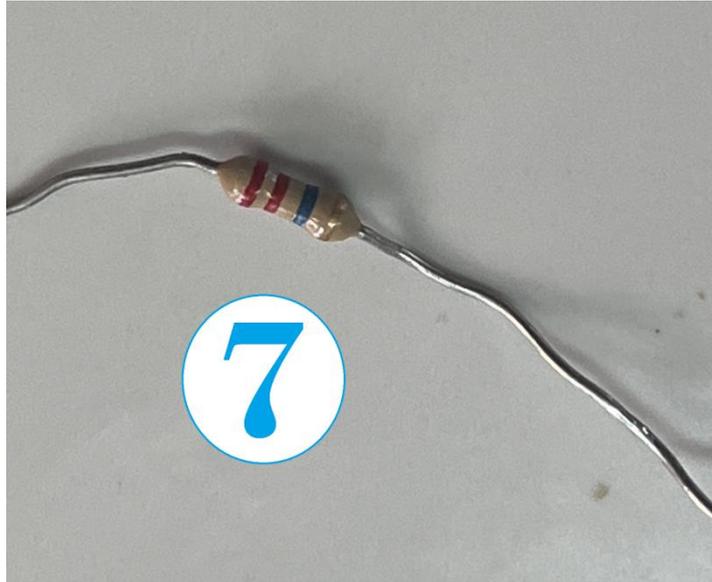


Figure II.11 Appareillage de mesure

1 : Voltmètre de crête	2 : Pico-ampèremètre
3 : Générateur de basse tension (SG1)	4 : Micro-ampèremètre
5 : Résistance variable de la grille	6 : Multimètre



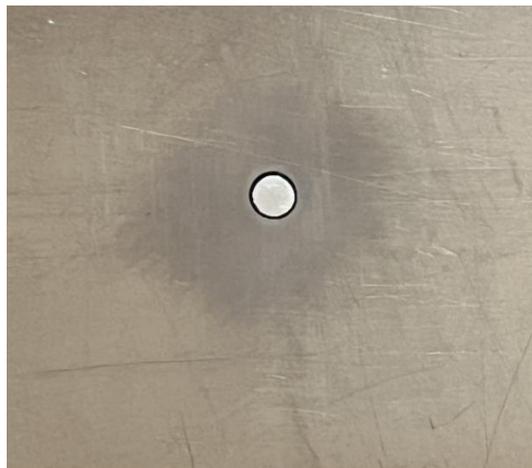
**Figure II.12** Résistance 22 M $\Omega$

### II.2.6 Sonde circulaire

La sonde circulaire est un simple capteur incorporé dans un même niveau de surface d'une électrode plan mis à la terre.

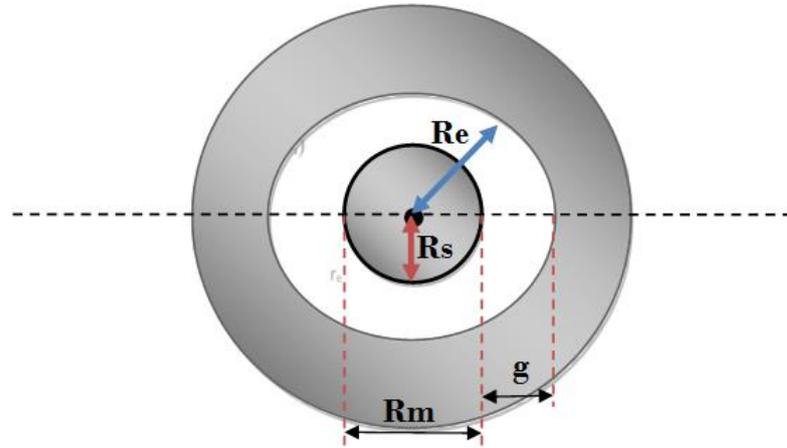
Il est recommandé de nettoyer régulièrement la sonde et les plans de garde avant chaque essai et de vérifier que le collecteur est au même niveau de surface que la plaque de polarisation.

Avant chaque essai, la vérification de la continuité entre toutes les plaques ainsi qu'avec la sonde de mesure est indispensable.



**Figure II.13** Vue de face de la sonde circulaire

→ **Dimensions de la sonde**



**Figure II.14** Vue de dessus de la sonde circulaire

$$\text{✚} \text{ Rayon de la sonde collectrice : } R_S = \frac{4.7 \text{ mm}}{2} = 2.35 \text{ mm} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{✚} \text{ Rayon du trou : } R_e = \frac{5}{2} = 2.5 \text{ mm} \quad ; g = R_e - R_S = 0.15 \text{ mm} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{✚} \text{ Rayon moyen : } R_M = R_S + \left(\frac{g}{2}\right) = 2.425 \text{ mm} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{✚} \text{ La surface total de la sonde : } S_S = \pi \times R_S^2 = 18.474 \text{ mm}^2 \quad (\text{II.4})$$

### II.3 Méthode de mesure

#### II.3.1 Mesure de tension appliquée aux électrodes actives

La tension continue  $U$  est mesurée au moyen d'un voltmètre de crête (MU11) via un diviseur résistif composé d'une résistance haute tension  $R_\theta$  et d'une résistance basse tension  $R_u$ , de plus le (MU11) présente une résistance d'entrée  $R_e$  de  $4.24\text{M}\Omega$ . Le voltmètre de crête mesure la tension  $U$  aux bornes de la résistance basse tension et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée  $V_a = K \cdot u$  (**figure II.11**), avec ;

$$K = \frac{R_\theta + (R_e // R_u)}{(R_e // R_e)} = \frac{R_e R_\theta + R_u R_\theta + R_e R_u}{R_e R_u} = 666 \quad (\text{II.5})$$

#### II.3.2 Mesure du courant

Le courant  $I_s$  traversant la sonde est mesuré à l'aide d'un pico-ampèremètre relié au collecteur par un câble coaxial blindé. La précision des mesures dépend à la fois de la position du collecteur par rapport à la plaque de polarisation de la sonde et du courant de fuite causé par l'accumulation de poussière environnante entre les deux parties.

### II.3.3 Mesure des paramètres de l'air

Étant donné que la décharge couronne est fortement influencée par les paramètres physiques de l'air [7], il est nécessaire de connaître les conditions dans lesquelles elle se produit. Lors de l'étude expérimentale, nous avons mesuré la pression à l'aide d'un baromètre à mercure, la température à l'aide d'un thermomètre à mercure, et l'humidité à l'aide d'un hygromètre à cheveux, les relevés de ces trois paramètres ont été effectués systématiquement avant chaque essai.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus dans les conditions suivantes :

- ⊗ Température : 20 °C - 25 °C.
- ⊗ Humidité relative : 43% - 61%.
- ⊗ Pression : 1000 hpa - 1020 hpa.

### II.3.4 Mesure de la densité de courant $J$

La distribution de la densité de courant sur le plan est déterminée en se déplaçant d'un pas de un centimètre en allant de la position initiale située juste au-dessus de la sonde (collecteur)( $x=0$ ) jusqu'à une position  $x = 6\text{cm}$ .

La densité de courant  $J$  est définie comme étant le courant par unité de surface. Sa valeur est obtenue à partir du rapport entre le courant collecté par la sonde circulaire et la surface de cette sonde (**figure II.14**) :

$$J = \frac{I_s}{S} \quad (\text{II.6})$$

## II.4 Conclusion

Ce chapitre décrit les différentes parties composants le dispositif expérimental responsable de la génération de la décharge couronne et de la mesure des paramètres de cette décharge. Cette installation expérimentale a inclus les sources d'alimentation électrique, les systèmes d'électrodes et les systèmes de mesures électriques.

Le prochain chapitre est réservé à l'étude expérimentale de la décharge couronne dans une configuration d'électrode de type fil-grille-plan et à la présentation et l'analyse des différents résultats obtenus.

# Chapitre (III)

### III.1 Introduction

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'influence des différents paramètres sur le développement de la décharge couronne dans une configuration triode alimentée par une tension continue de polarité positive. Cette étude expérimentale sera aménagée en deux parties. La première partie traite la caractérisation de la décharge couronne dans la configuration triode en traçant les caractéristiques courant-tension du plan en fonction de divers paramètres (la position de la grille par rapport à l'intervalle inter-électrode, différentes résistances de la grille, effet d'insertion d'une grille dans le dispositif, etc...).

La deuxième partie s'intéresse à distribution de la densité de courant en fonction de la position du fil par rapport à la sonde pour les différentes positions et résistances de la grille, ensuite pour les différents potentiels imposés au niveau de la grille. Cette partie examine également l'influence de la géométrie de la grille sur la décharge couronne.

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

Le courant recueilli par le plan est appelé  $I_{Total}$ . La mesure de ce courant est effectuée par un pico-ampèremètre et celle du courant de la grille  $I_G$  est obtenue par un micro-ampèremètre. Par contre la tension appliquée  $V_a$  est mesurée à l'aide du voltmètre de crête.

#### III.2.1 Effet de la présence de la grille

Dans cette partie, deux distances inter-électrodes (distance entre le fil et le plan) ont été considérées :  $H = 7,1$  cm et  $H = 5,8$  cm. La position de la grille par rapport au plan est  $D = 2,5$  cm et la résistance reliée à la grille est  $R_1 = 22$  M $\Omega$ .

Les figures (III.1 et III.2) illustrent la variation du courant de la décharge  $I_{Total}$  en fonction de la tension appliquée  $V_a$  à l'électrode active de polarité positive en présence et en absence de la première grille.

✚ Variation du courant du plan dans le cas d'une hauteur  $H = 7,1$  cm et une distance  $D = 2,5$  cm

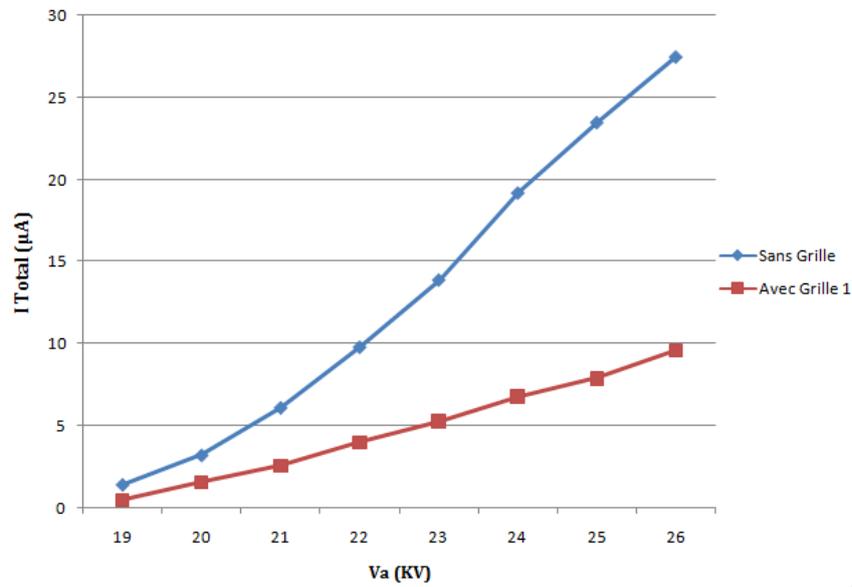


Figure III.1 Caractéristique  $I_{Total}(V)$  avec et sans la grille,  $H = 7,1$  et  $D = 2,5$  cm.

✚ Distance inter-électrode  $H = 5,8$  cm et une distance  $D = 2,5$  cm

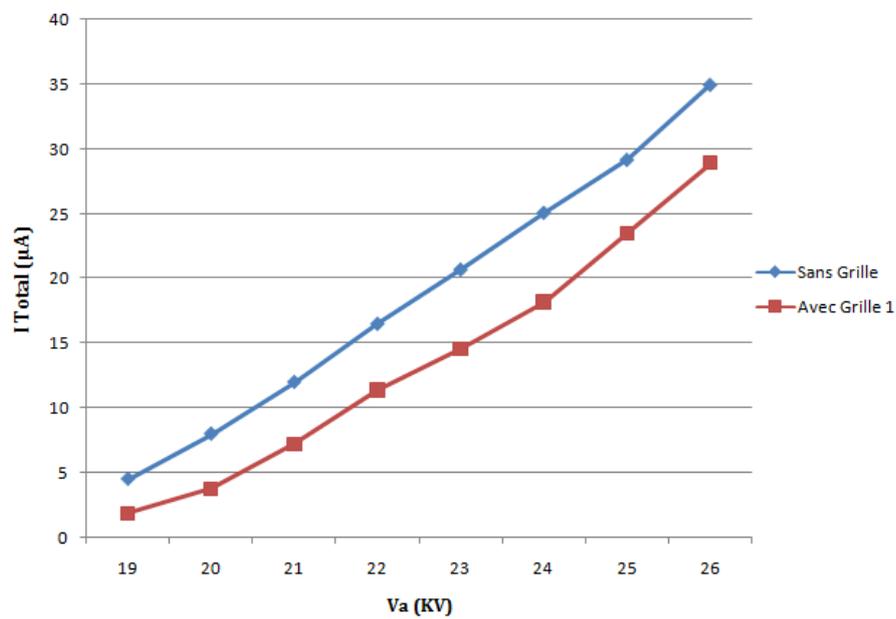
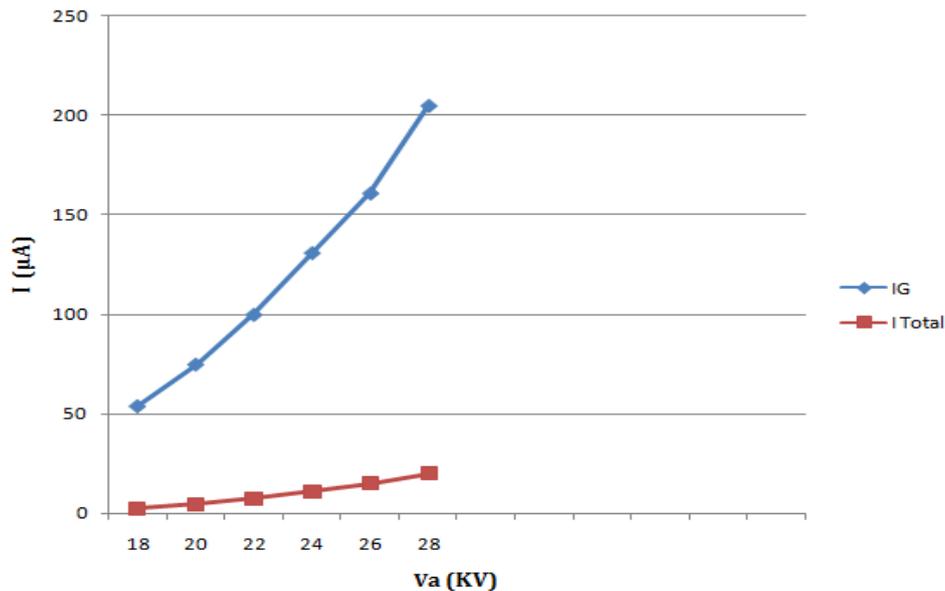


Figure III.2 Caractéristique  $I(V_a)$  avec et sans présence de la grille  $H = 5,8$  et  $D = 2,5$  cm



**Figure III.3** Caractéristique  $I = f(V_a)$  pour les courant du plan et courant de grille,  $H=5,8$  cm,  $D=2$  cm,  $R_1=22M \Omega$

La grille N°1 est celle utilisée dans ces essais et insérée entre le fil et le plan.

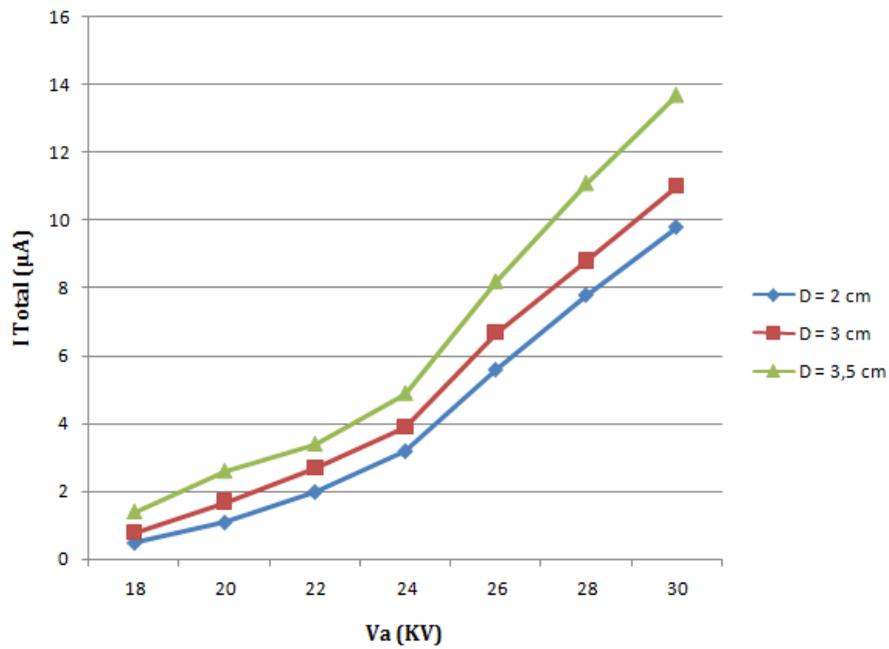
Ces résultats montrent qu'en présence de la grille et pour la même distance entre le fil et le plan de masse  $H$ , le courant  $I_{Total}$  collecté au plan pour le système d'électrode de type « triode » est inférieur à celui enregistré en configuration fil-plan. La grille représente un obstacle devant le développement de la décharge surtout lors que la grille est proche du fil ionisant **figure III.1**. Le courant collecté au plan diminue car une partie de ce courant traverse la grille et par la suite est acheminé vers la terre. Ce qui veut dire que l'absence de la grille provoque une décharge couronne plus intense au niveau de l'électrode plane.

Sur la **figure III.3** est présentée la caractéristique du courant de décharge et celle du courant de la grille N°1. La figure montre une variation quadratique du courant en fonction de la tension appliquée. Une différence entre le courant de grille et celui du plan est très remarquable. Ceci veut dire que la décharge couronne diminue en intensité avec l'insertion de la grille entre le fil et le plan.

### III.2.2 Effet de la position de la grille

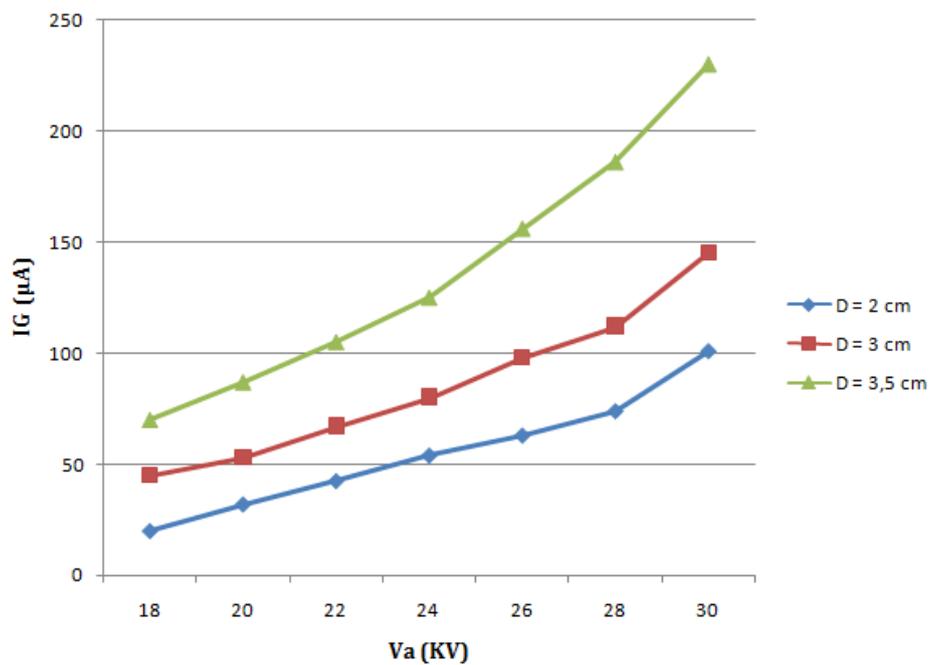
Les **figures III.4 et III.5** présentent les variations du courant de décharge et du courant de la grille  $I_G$  en fonction de la position de la grille  $D$  dans l'espace inter-électrode fil- plan. La distance entre l'électrode fil et le plan est  $H = 7,1$  cm et la résistance de la grille utilisé est  $R_1 = 22 M\Omega$ . Trois géométries différentes ( $D=2$  cm,  $D=3$  cm,  $D=3,5$  cm) ont été considérées.

✚ Variation du courant du plan



**Figure III.4** Effet de la position de la grille pour la caractéristique  $I_{\text{Total}} = f(V_a)$  pour  $H_{\text{max}} = 7,1$  cm et  $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$

✚ Variation du courant de grille



**Figure III.5** Effet de la position de la grille pour la caractéristique  $I_G = f(V_a)$  pour  $H_{\text{max}} = 7,1$  cm et  $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$

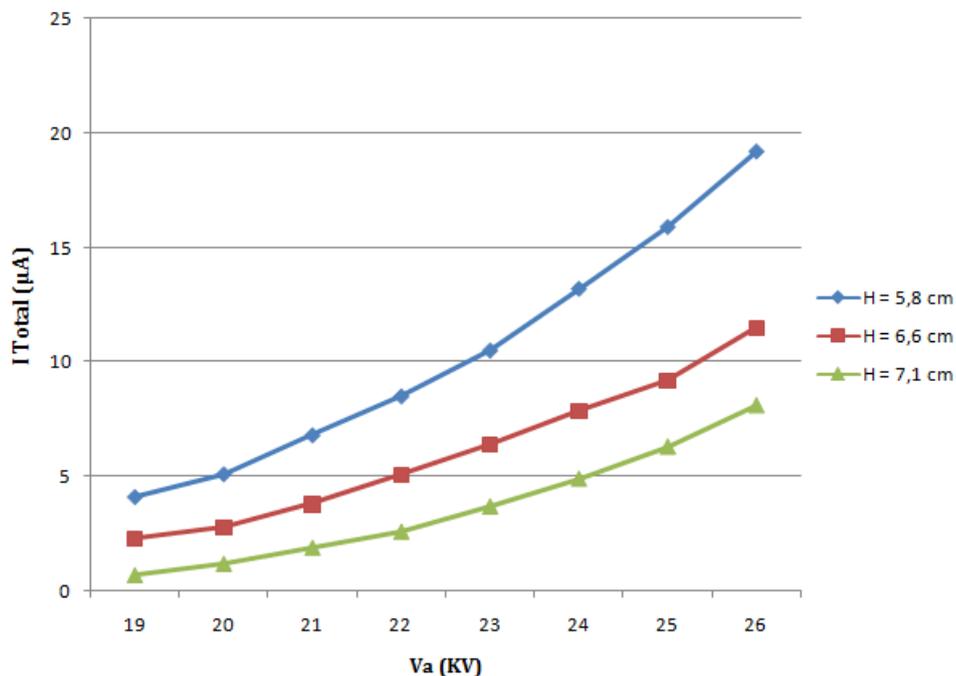
A partir de ces résultats nous constatons que le courant recueilli par le plan diminue en s'approchant de l'électrode ionisante et que le courant de grille augmente en s'approchant de l'électrode ionisante. En effet plus la grille s'éloigne du plan et s'approche du fil, les ions positifs produits de la décharge couronne positifs ont plus de chances de percuter la grille métallique, ce qui permet d'augmenter le courant traversant la grille.

Ceci réduit la différence du potentiel entre la grille et le fil. D'où le champ électrique s'affaiblit et le courant recueilli par le plan diminue.

### III.2.3 Effet de la distance entre le fil et le plan

A partir de la **figure III.6**, on observe l'évolution du courant de l'électrode plane en fonction de la tension appliquée pour différentes distances entre le fil ionisant et le plan. La grille est placée à une distance  $D=2$  cm du plan et la résistance de la grille est prise égale à  $R_I$ . Les distances inter- électrodes prises en considérations sont :  $H_{\min}=5,8$  cm,  $H_{\text{moy}}=6,6$  cm et  $H_{\max}=7,1$  cm.

#### ✚ Variation du courant du plan



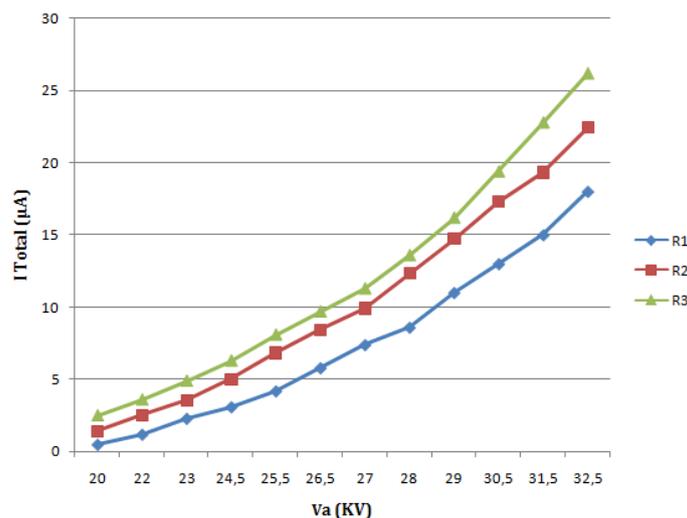
**Figure III.6** Caractéristique  $I_{\text{Total}} = f(V_a)$  pour  $D = 2$  cm et  $R_I = 22$  M $\Omega$ .

Ces Courbes mettent en évidence le fait que lorsque l'intervalle entre électrodes augmente le champ électrique moyen dans cette intervalle diminue, d'où la diminution du courant mesuré au niveau du plan.

### III.2.4 Effet des résistances

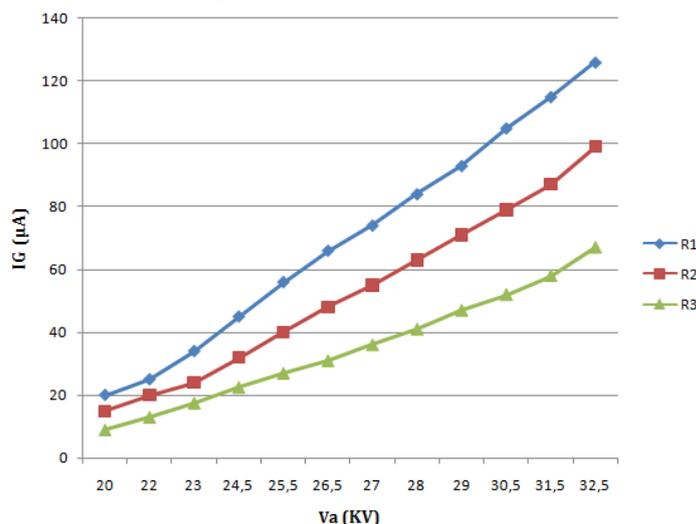
La géométrie considérée est caractérisée par un intervalle inter-électrode  $H = 7,1$  cm et une grille positionnée à  $D = 2$  cm du plan. Sur les **figures III.7 et III.8** a été présentée la variation du courant du plan  $I_{Total}$  et du courant de grille  $I_{Gen}$  fonction de la tension appliquée  $V_a$  à l'électrode active pour trois résistances de grille différentes ( $R_1=22\text{ M}\Omega$ ,  $R_2=66\text{ M}\Omega$ ,  $R_3=132\text{ M}\Omega$ ).

#### ✚ Variation du courant du plan



**Figure III.7** Effet des résistances sur la caractéristique  $I_{Total} = f(V_a)$  pour  $H = 7,1$  cm et  $D=2$  cm

#### ✚ Variation du courant de grille



**Figure III.8** Effet des résistances sur la caractéristique  $I_G = f(V_a)$  pour  $H = 7,1$  cm et  $D=2$  cm

Dans ces conditions la grille est placée proche du fil. Les caractéristiques de courants des **figures III.7 et III.8** montrent que le courant recueilli par le plan et le courant de grille augmentent avec la tension appliquée au niveau du fil ionisant. Ceci met en évidence

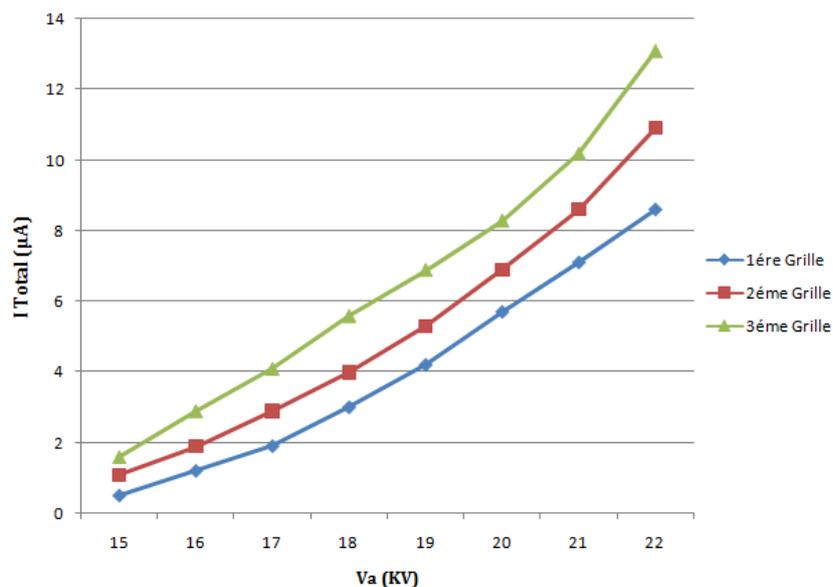
l'intensification du champ électrique avec l'augmentation de l'intensité de la haute tension appliquée. D'autre part l'augmentation de la résistance de la grille réduit le courant de grille.

Par contre le courant mesuré au plan augmente avec la résistance. Cela peut s'expliquer par la déviation des lignes du champ vers la direction du plan qui présente le chemin le moins résistant lorsque la grille présente une résistance plus grande.

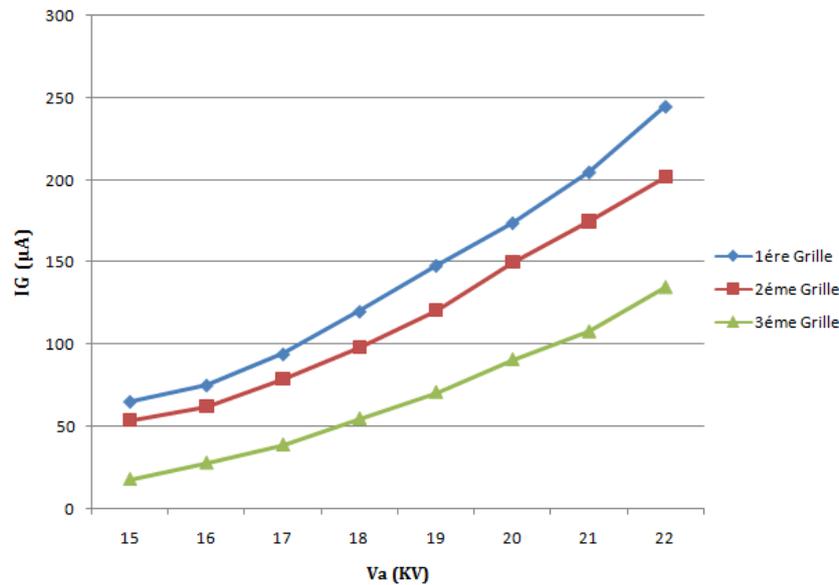
### III.2.5 Effet des dimensions de la grille

Les figures (III.9 et III.10) illustrent une comparaison de l'évolution des courants obtenus en fonction de la haute tension appliquée au niveau de l'électrode active dans le cas de trois grilles de dimensions géométriques différentes. Chaque grille est insérée entre le fil et le plan à une même position  $D = 2,5$  cm. L'intervalle inter-électrode est fixé à  $H = 5,8$  cm. Les trois grilles métalliques utilisées sont constituées de mailles ayant la forme losange mais de tailles différentes.

#### ✚ Variation du courant au plan



**Figure III.9** Effet des dimensions de la grille pour la caractéristique  $I_{Total} = f(V_a)$  pour  $H = 5,8$  cm et  $D = 2,5$  cm



**Figure III.10** Effet des dimensions de la grille pour la caractéristique  $I_G = f(V_a)$  pour  $H = 5,8$  cm et  $D = 2,5$  cm

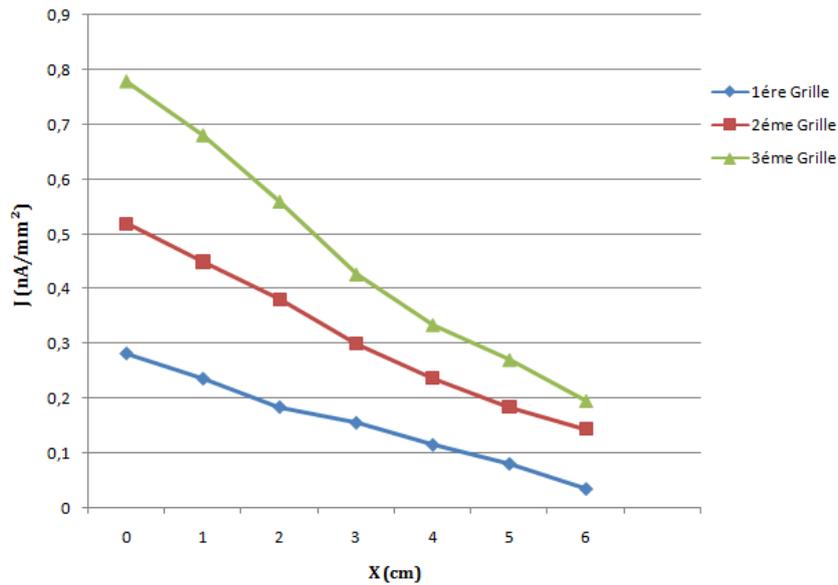
L'évolution du courant de décharge mesuré sur le plan et celle du courant de grille indiquent leur dépendance de la taille de la grille insérée entre le fil et le plan. La **figure III.9** montre que le courant mesuré au niveau du plan est plus grand dans le cas de la grille 3 formée par des mailles de taille plus grande. La **figure III.10** montre que lorsque la dimension de la maille est réduite (cas de la grille 1), le courant recueilli par la grille augmente car la matière métallique occupe plus d'espace dans la constitution de la grille. Ce qui fait réduire le courant dans le plan.

### III.3 Distribution de la densité du courant sur le plan

Les graphes de la distribution de la densité de courant sur le plan pour les différents paramètres ont été tracés en déplaçant l'électrode par rapport de la sonde d'un pas de 1cm jusqu'à 6 cm.

#### III.3.1 Effet de la géométrie de la grille

La distance inter-électrode a été fixée à 7,1 cm et la grille a été placée à une position  $D = 2$  cm. Par contre la résistance de la grille a été réglée à  $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$ . Sur la **figure III.11**, est présentée la variation de la densité du courant  $J$  sur le plan pour chacune des trois grilles.



**Figure III.11** Effet de la géométrie de la grille sur la variation de la densité du courant J pour  $H_{\max} = 7,1$  cm,  $D=2$  cm,  $I_G= 50 \mu A$  et  $R_1 = 22 M\Omega$

Par analyse des résultats illustrés sur la **figure III.11**, on constate que la densité de courant présente un maximum au droit de la sonde correspondant à la position  $x=0$  cm puis diminue de plus en plus jusqu'à atteindre la distance  $x=6$  cm pour les différentes grilles. On constate aussi qu'en chaque point du plan la densité de courant est plus grande dans le cas de la grille 3 formée par des mailles plus larges. Ceci signifie qu'un flux important d'ions traverse la maille de la grille dans la direction du plan.

### III.3.2 Effet de la position de la grille

L'objectif des essais de cette partie est de voir l'évolution de la distribution de la densité de courant en fonction des différentes positions de la grille. Les **figures (III.12, III.13 et III.14)** regroupent les courbes de la densité de courant sur le plan  $J(x)$  respectivement pour les résistances de grille ( $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ ) dans le cas des trois distances différentes ( $D=2$  cm,  $D=3$  cm,  $D=3,5$  cm). La hauteur du fil  $H = 7,1$  cm et le courant dans la grille est fixé à  $50 \mu A$ .

✚ Résistance  $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$

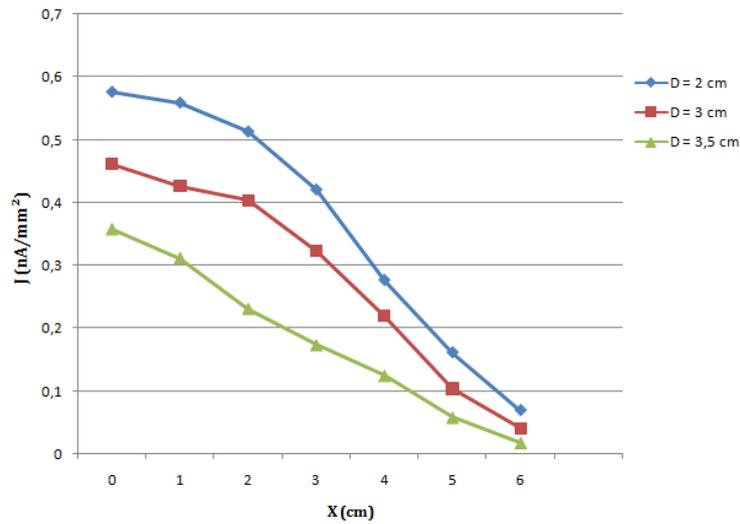


Figure III.12 Effet de la position de la grille sur la variation de la densité du courant  $J$  pour  $H_{\text{max}} = 7,1 \text{ cm}$  et  $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$

✚ Résistance  $R_2 = 66 \text{ M}\Omega$

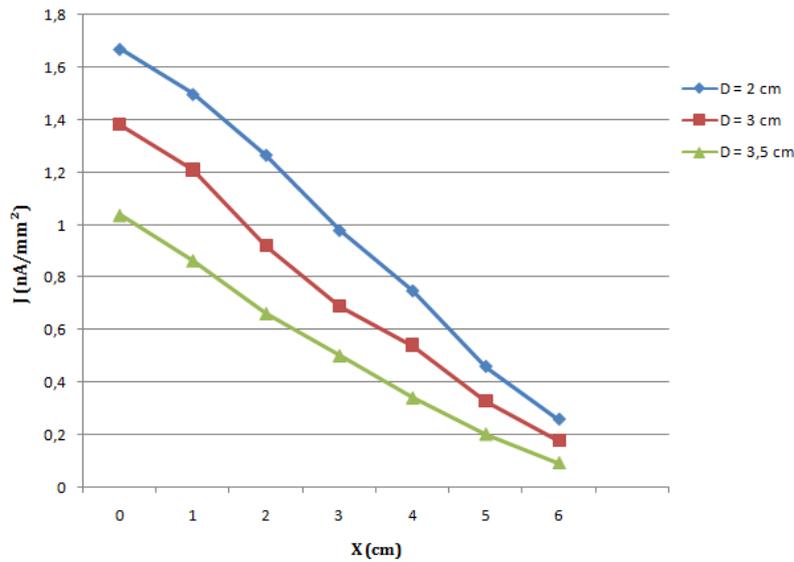
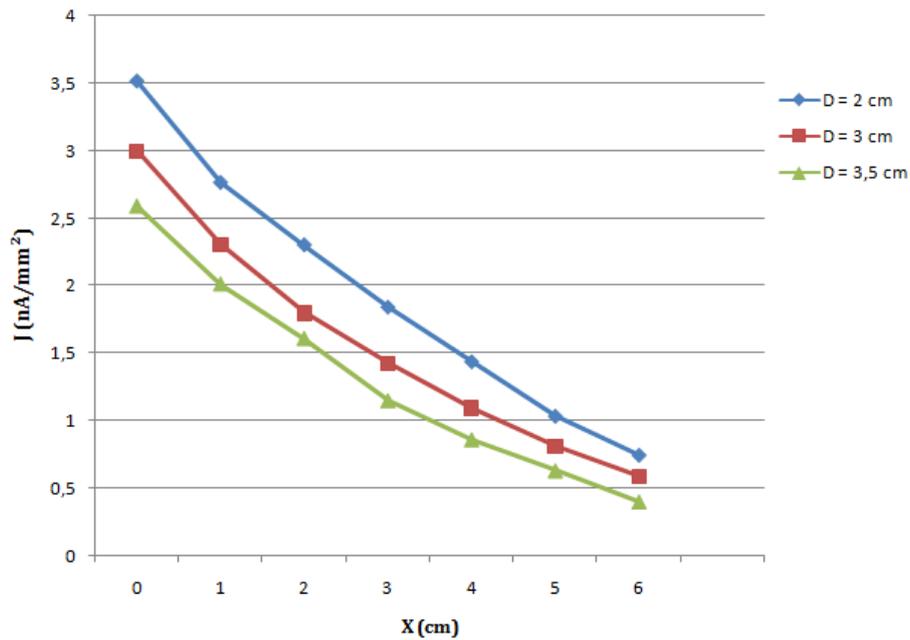


Figure III.13 Effet de la position de la grille sur la variation de la densité du courant  $J$  pour  $H_{\text{max}} = 7,1 \text{ cm}$  et  $R_2 = 66 \text{ M}\Omega$

**Résistance  $R_3 = 132 \text{ M}\Omega$**



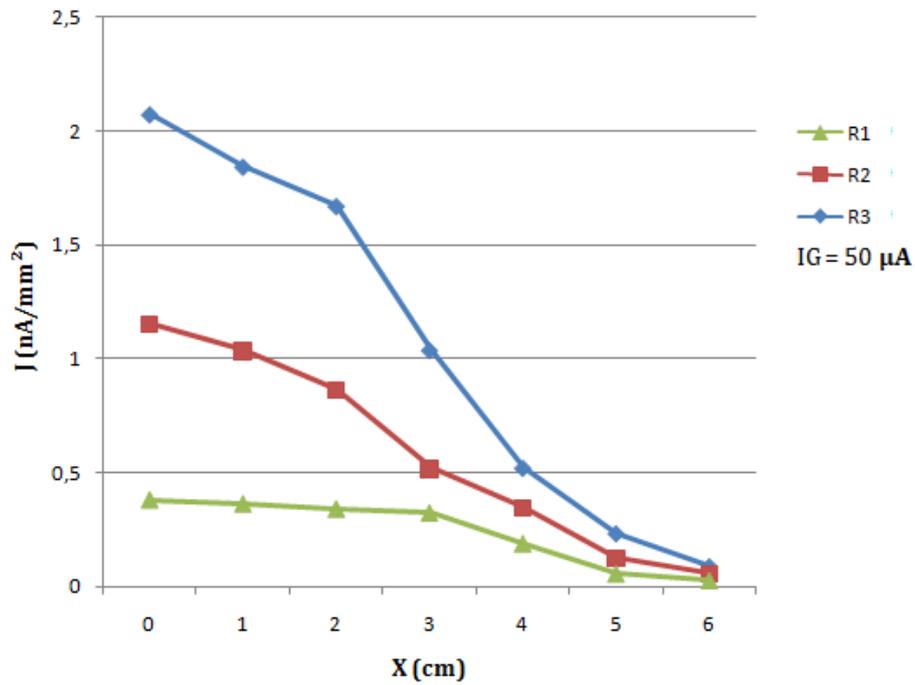
**Figure III.14** Effet de la position de la grille sur la variation de la densité du courant  $J$  pour  $H = 7,1 \text{ cm}$  et  $R_3 = 132 \text{ M}\Omega$

Nous remarquons comme précédemment que la densité de courant sur le plan diminue progressivement en allant du point  $x=0 \text{ cm}$  jusqu'au point  $x=6 \text{ cm}$  par rapport à l'axe de la sonde et ceci pour chaque résistance de grille. Nous remarquons aussi que la densité de courant augmente lorsque la distance grille-sonde diminue. En effet lorsque la grille est proche du fil ionisant, c'est-à-dire la distance  $D$  est grande, la grille présente un obstacle devant la déviation des lignes du champ et la zone de couverture du champ électrique est étroite, ce qui réduit le courant arrivant au plan.

### III.3.3 Effet des résistances

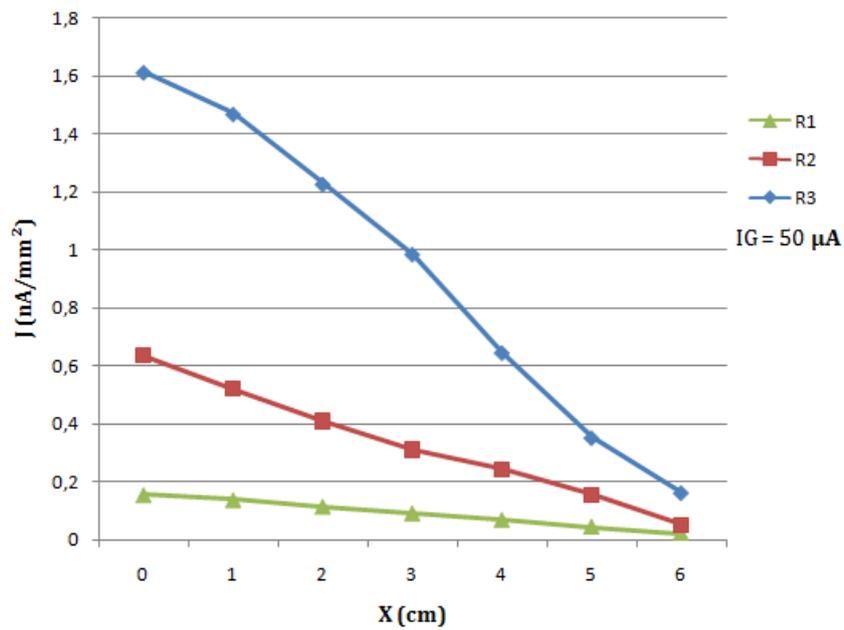
L'objectif de cette expérience est de montrer l'influence de la résistance de la grille sur la densité de courant. Pour ce faire l'intervalle inter-électrode  $H$  est pris égale à  $7,1 \text{ cm}$  et la résistance de grille prend trois différentes valeurs ( $R_1=22 \text{ M}\Omega$ ,  $R_2=66 \text{ M}\Omega$ ,  $R_3=132 \text{ M}\Omega$ ) pour chaque position de la grille dans l'espace inter-électrode.

**✚ Distance D = 2 cm**



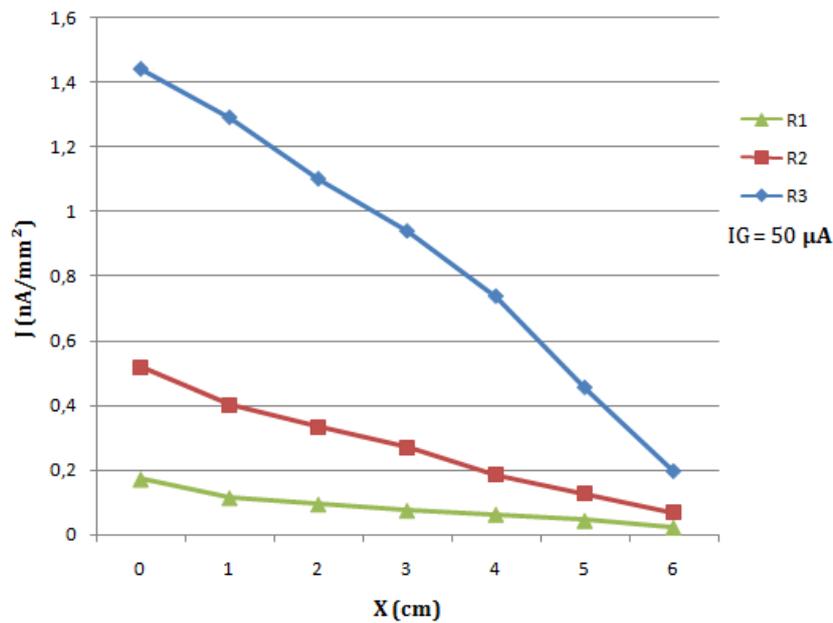
**Figure III.15** Effet des résistances sur la variation de la densité du courant J pour H = 7,1 cm et D = 2 cm et  $I_G = 50 \mu A$

**✚ Distance D = 3 cm**



**Figure III.16** Effet des résistances sur la variation de la densité du courant J pour H = 7,1 cm et D = 3 cm et  $I_G = 50 \mu A$

**Distance D = 3,5 cm**



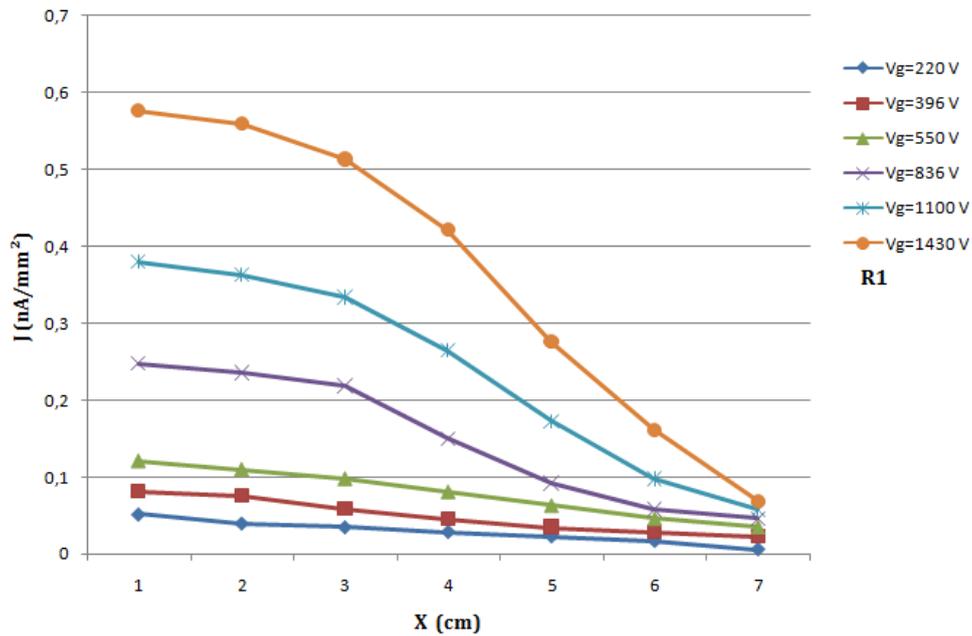
**Figure III.17** Effet des résistances sur la variation de la densité du courant  $J$  pour  $H = 7,1 \text{ cm}$  et  $D = 3,5 \text{ cm}$  et  $I_G = 50 \mu\text{A}$

Les figures (III.15, III.16 et III.17) montrent que les courbes de la distribution de la densité de courant ont le même profil en fonction de la résistance pour toutes distances  $D$  de la grille. La densité de courant est maximale au point  $x=0 \text{ cm}$  correspondant au point situé au droit du fil puis diminue en s'éloignant. Ces courbes montrent aussi que la densité de courant augmente lorsque la résistance reliée à la grille augmente. Ceci s'explique par le fait que plus cette résistance de la grille, est grande moins de charges peuvent être acheminées à travers celle-ci vers la masse, ce qui augmente la quantité de charges qui dérivent vers le plan.

### III.3.4 Effet du potentiel de la grille $V_g$

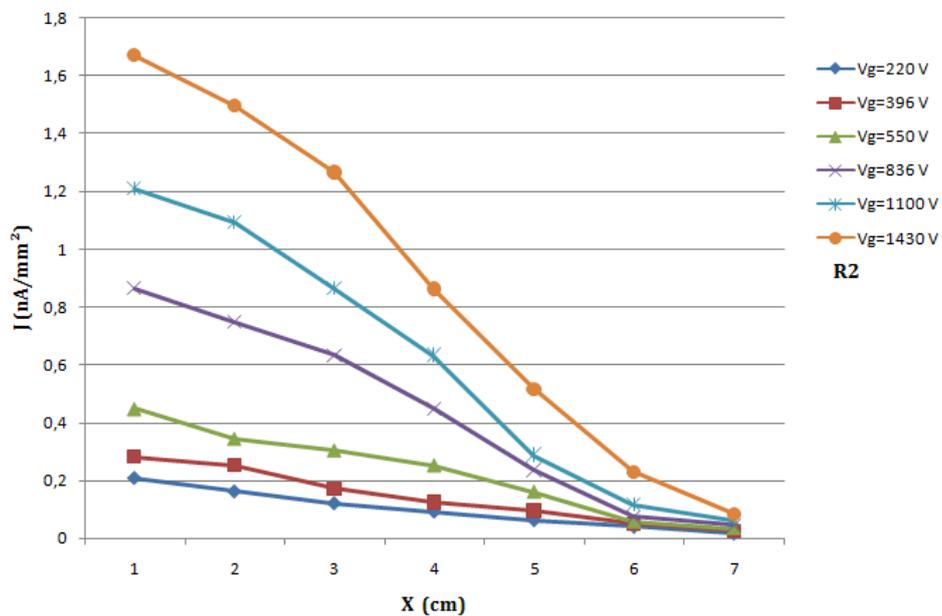
Afin de voir l'effet d'imposer un potentiel au niveau de la grille sur la distribution de la densité de courant, nous avons mené quelques essais de mesure de la densité de courant en procédant comme précédemment avec variation du potentiel de la grille. L'intervalle inter-électrode  $H$  a été fixé à  $7,1 \text{ cm}$  et la position de la grille à une distance  $D = 2 \text{ cm}$  pour trois résistances différentes. Puis on a imposé plusieurs potentiels de grille  $V_g$  en allant de  $0,22 \text{ kV}$  jusqu'au  $1,43 \text{ kV}$ .

**Résistance  $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$**



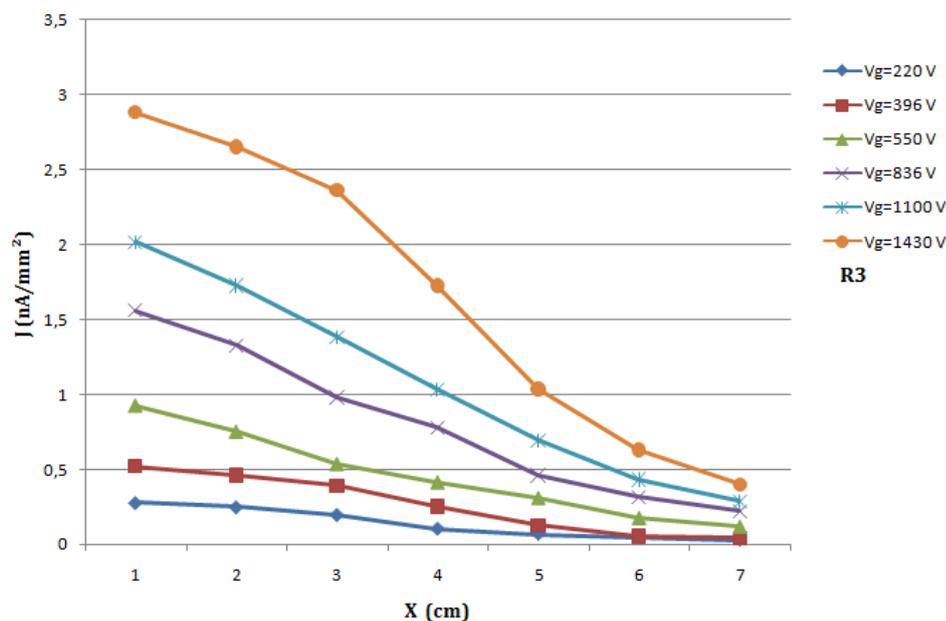
**Figure III.18** Effet du potentiel de la grille sur la variation de la densité du courant  $J$  pour  $H = 7,1 \text{ cm}$  et  $D = 2 \text{ cm}$  et  $R_1 = 22 \text{ M}\Omega$

**Résistance  $R_2 = 66 \text{ M}\Omega$**



**Figure III.19** Effet du potentiel de la grille sur la variation de la densité du courant  $J$  pour  $H = 7,1 \text{ cm}$ ,  $D = 2 \text{ cm}$  et  $R_2 = 66 \text{ M}\Omega$

**Résistance  $R_3 = 132 \text{ M}\Omega$**



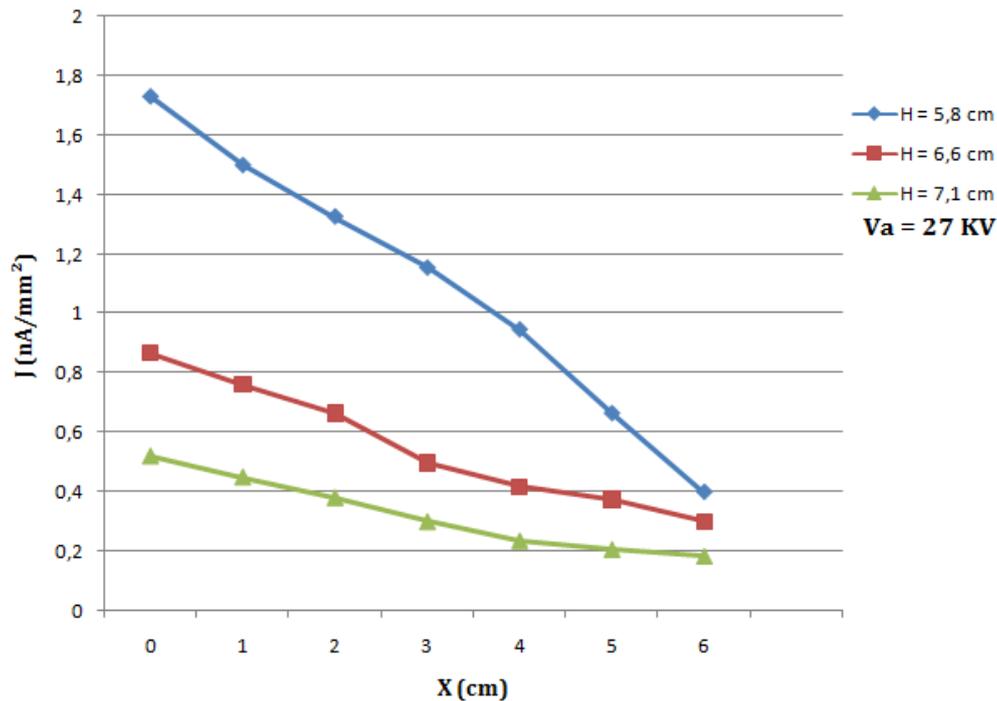
**Figure III.20** Effet du potentiel de la grille sur la variation de la densité du courant  $J$  pour  $H = 7,1 \text{ cm}$ ,  $D = 2 \text{ cm}$  et  $R_3 = 132 \text{ M}\Omega$

L'analyse des courbes des **figures (III.18, III.19 et III.20)** permet de constater que la distribution de la densité de courant est affectée par la variation du potentiel de la grille et que la densité de courant obtenu au plan est plus considérable lorsque le potentiel de grille est important. En effet, pour un potentiel de grille élevée, la différence de potentiel entre la grille et le plan devient importante, ce qui provoque un champ électrique plus élevé dans la zone grille plan assurant la dérive d'une quantité importante de charges vers le plan. Ce qui impose en conséquence une densité de courant à l'électrode plane plus élevée. On constate que la décharge couronne est plus grande en intensité lorsque la grille est reliée à une résistance plus grande.

Ces résultats expérimentaux de la répartition de la densité de courants à la surface du plan sont très utiles, si on a besoin de charger par décharge couronne une surface d'un filtre ou d'un film photographique.

### III.3.5 Effet de l'espace inter-électrode $H$

Concernant l'influence de l'espacement entre le fil et le plan sur la répartition de la densité sur la surface du plan, nous avons effectué les essais expérimentaux dans les conditions géométriques associées à une distance de la grille par rapport au plan  $D = 2,5 \text{ cm}$  et de résistance  $R = R_I$ . L'électrode active est alimentée par tension continue d'amplitude  $V_a = 27 \text{ kV}$ . L'espace inter-électrode  $H$  est variable ( $H = 5,8 \text{ cm}$ ,  $H = 6,6 \text{ cm}$  et  $H = 7,1 \text{ cm}$ ).



**Figure III.21** Effet de l'espace inter-électrode sur la variation de la densité du courant J pour  $D = 2,5\text{cm}$  et  $V_a = 27\text{ kV}$

D'après la représentation illustrée sur la **figure III.21** pour la distribution de la densité de courant en fonction de l'espace entre le fil et l'électrode plane, nous confirmons les résultats précédents concernant l'évolution du courant capté par le plan associée à des grandes distances. En effet, le champ électrique moyen varie en inverse avec la distance entre deux électrodes.

Ce résultat est très intéressant dans une application pratique nécessitant un chargement optimal, alors la recherche d'une position optimale est nécessaire.

### III.4 Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus des caractéristiques courant-tension et de la distribution de la densité de courant, ont révélés l'importance des paramètres géométriques de la configuration triode pour le développement de la décharge couronne et son comportement en présence de la grille. Ainsi, nous pouvons ressortir les conclusions suivantes :

- Le système de configuration de type dual, c'est-à-dire sans grille, génère une décharge couronne plus intense.

- La grille placée près de l'électrode active provoque la diminution des caractéristiques courant-tension et de la densité de courant. Une position optimale doit être envisagée afin d'assurer une meilleure charge au niveau plan.
- La distance inter-électrodes doit être la plus minimale possible permettant d'éviter les claquages électriques.
- Une grille métallique du système d'électrode de type « **triode** » contenant des mailles plus larges permet le passage d'une quantité plus importante de charges au plan.
- Pour une même géométrie du système triode avec la grille reliée à des grandes résistances ou son potentiel est plus important, le courant total recueilli au niveau de l'électrode plane est plus important.

# Conclusion Générale

## **CONCLUSION**

Ce travail a exploré les phénomènes liés à la décharge couronne, mettant en lumière à la fois ses mécanismes fondamentaux et ses applications industrielles variées. Nous avons, dans un premier temps, décrit les mécanismes de développement de cette décharge, en détaillant les paramètres influençant son apparition et sa stabilité. Cette étude initiale a également présenté quelques-unes des nombreuses applications industrielles de la décharge couronne, soulignant ainsi son importance pratique.

Ensuite, nous avons présenté le dispositif expérimental utilisé pour générer la décharge couronne et mesurer ses paramètres. Ce dispositif comprenait les sources d'alimentation électrique, les systèmes d'électrodes, et les systèmes de mesures électriques nécessaires à une caractérisation de la décharge. Cette description technique a fourni les bases méthodologiques indispensables pour l'étude expérimentale.

Les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence l'impact crucial des paramètres géométriques et de la configuration d'électrodes sur le développement et le comportement de la décharge couronne. Notamment, il a été observé que la configuration sans grille génère une décharge plus intense. Tandis qu'en présence de la grille, la position de cette dernière influence significativement sur les caractéristiques courant-tension et la sur la densité de courant. De plus, l'optimisation de la distance inter-électrodes et la conception des mailles de la grille contribuent pour améliorer l'efficacité et la stabilité de la décharge couronne.

En conclusion, cette étude a permis non seulement la compréhension théorique et pratique de la décharge couronne, mais a également ouvert des perspectives pour l'optimisation des dispositifs industriels utilisant cette technologie. Les résultats obtenus soulignent l'importance des paramètres géométriques et de la configuration adoptée pour optimiser les performances et l'efficacité des systèmes basés sur la décharge couronne.

# BIBLIOGRAPHIE

## **Références Bibliographiques**

- [1] A. ALYEN, « Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009.
- [2] L.PARISSI, « Étude d'un procédé de traitement d'air chargé en composés organiques volatiles par décharge moyenne fréquence avec barrière diélectrique : mécanisme mis en œuvre et recherche d'optimisation », Thèse de Doctorat de l'université de Paris VI, 1999.
- [3] T. DJILALI&L.AMINE, « Etude de la décharge couronne en géométrie pointe plan sous tension continu », Mémoire de master de l'université Mouloud Mammeri de TIZIOUZOU, 2016 .
- [4] M.GOLDMAN, R.S.SIGMOND , « Corona insulation », IEEE Trans. Elec. Ins. EI. 12/2, PP, 90 - 105, 1982.
- [5] L.DASCALESCU, « An introduction to ionized gases, theory and applications », Thèse de Doctorat de l'université de technologie de Toyohashi, 1993.
- [6] B.MEDJDOUB& Y.AISSOU, « Décharge couronne fil -plan en polarité positive », Mémoire de master de l'université A. Mira, Bejaia.
- [7] A.KASDI. « Études théorique et expérimentale de la décharge couronne bipolaire », Thèse de Doctorat de l'université A.MIRA, Bejaia, 2007.
- [8] E.DESJARDINS, « Etude spectroscopique de décharges à barrières diélectrique », Mémoire du grade de Maitre en physique de l'université de Montréal, 2017.
- [9] R.FARHI, C.MOREL, G.CHERON «Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité », Articles de l'institut national de recherche et de sécurité (INRS), 2006.
- [10] S.ABDELLI, C.AIANE, « L'effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne », Mémoire de master de l'université A. Mira, Bejaia, 2018.
- [11] G.ZOUAOU, « Étude de la distribution du champ électrique généré par la décharge couronne en géométrie duale-plan et fil-plan », Mémoire de master de l'université A. Mira, Bejaia, 2021.
- [12] O.IDOUGHI & A.AMEUR, « étude de l'effet couronne dans les précipitateurs électrostatique d'aérosols », Mémoire de master de l'université A. Mira, Bejaia, 2017.
- [13] N.BENCHERIF& T.DJOUADI, « Etude expérimentale de la décharge couronne continue en polarité positive et négative dans la configuration fils-plans », Mémoire de master de l'université A. Mira, Bejaia, 2017.
- [14] P.MOUREAUX et J-L.POYARD, « Phénomènes électrostatiques », Article de l'institut national de recherche et de sécurité (INRS) ,2019.

- [15] K.FALVIEN, «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique», Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [16] B.KHIR, ABD. ZIDI &H.LABBI, « Etude et réalisation d'un sectionneur de haute tension », Mémoire de master de l'université ECHAHID H.LAKHDAR, d'El-Oued, 2021.
- [17] H.KADI, « Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension », Mémoire de master de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [18] S.MIHOUBI& H.KERDOUSSI, « Décharge Couronne en Configuration Coaxiale : Application à la neutralisation des charges », Mémoire de master de l'université 8Mai 1945, Guelma, 2020.
- [19] T.BEDJAOUI&N.MEDJEKDOUD, «Caractérisation de la décharge couronne dans un système à configuration Triode», Mémoire de master de l'université A. Mira, Bejaia, 2017.
- [20] Y.BARAHAMI, « Technique de la haute tension », Support pédagogique de l'école supérieur en génie électrique et énergétique, Oran, 2020.
- [21] C.GARY, «Effet couronne en tension alternative»,Articles de l'institut national de recherche et de sécurité (INRS), 2006.
- [22] B.TABTI, «Contribution à la caractérisation des filtres à électrets pour la mesure du déclin du potentiel de surface», Thèse de Doctorat de l'université de Poitier, 2011.
- [23] R.D.MEDINA « Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement », Thèse de Doctorat de l'université Toulouse, 2008.