

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira –Bejaia-

Département d'électrotechnique

**Mémoire de fin d'étude**

**Présenté par :**

**BELKACEMI Youghourta**

**En vue d'obtention du diplôme de Master en Génie Electrique**

**Option: Techniques de haute tension**

**Intitulé :**

**Etude expérimentale de la décharge couronne en configuration  
multi-fils - deux plans**

**Composition des membres du jury :**

<b>Mlle. N. Rouha</b>	<b>MCB</b>	<b>U. A. M. Bejaia</b>	<b>Présidente</b>
<b>Mme. A. Bendahmane</b>	<b>MAA</b>	<b>U. A. M. Bejaia</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>M. A. KASDI</b>	<b>MCB</b>	<b>U. A. M. Bejaia</b>	<b>Promoteur</b>

*Une théorie qui a donné de tels résultats  
Contient une grande part de vérité.*

*H. Lorentz*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

- *A mes chers parents : Abderrahmane et Houria (Que notre Dieu tout puissant les garde à nos cotés et leur procure une vie longue et prospère).*
- *A mes chers frères et sœurs : Belaid, Yazid, Rabah, Hania (pour l'occasion de son nouveau né) et Naima.*
- *A la mémoire de ma grand-mère Nouara.*
- *A toute la famille Belkacemi et à tous mes amis.*
- *A vous, les lecteurs de ce mémoire (J'espère qu'il vous sera d'une aide précieuse).*

## *Remerciements*

*Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein du Laboratoire de Génie Electrique de l'Université A. MIRA de Bejaïa (LGEB). Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur A. KASDI qui à assuré la direction de ce mémoire et qui s'est montré toujours disponible et toujours à l'écoute. Les bons moments passés avec lui dans la conception du dispositif expérimental ont été vraiment constructifs. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude et de mon plus profond respect. Je tiens à remercier Mademoiselle ROUHA enseignante à l'université A. MIRA de Bejaïa de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury. Mes remerciements vont également à Madame Bendahmane enseignante aussi à l'université A. MIRA de Bejaïa pour l'honneur qu'elle m'a faite en acceptant de juger ce travail en tant qu'examinatrice et d'avoir participé à ce jury.*

*Mes sincères remerciements vont aussi à tout mes amis (Adel, Hmidouche, Massi, Nourdine, Said, Arezki, Dinich, Sofiane, Karim, ... etc.) pour leurs aide et le soutien moral qu'ils m'ont procurés, spécialement : Massi (je manque de mots pour le décrire « Tanmirt-ik Tameqrant Ayamdakel n Lebda »), Adel (une des perles rares dont notre université à besoin) et Hmidouche (une personne pleine de coeur).*

*Enfin je ne saurais terminer cette partie concernant les remerciements sans y associer mes proches. Tout d'abord mes chers parents, dont le dévouement pour moi est sans limite, mes chers frères et sœurs qui m'ont encouragés et m'ont soutenus, que ce soit financièrement où à travers leurs précieux conseils. Il serait impossible de pouvoir leur exprimer toute ma reconnaissance, encore moins en quelques lignes, mais je tiens tout de même à les remercier chaleureusement et leur assurer toute ma gratitude. Il ne faut pas oublier aussi mes cousins et cousines.*

*Que tous mes collègues de cette promotion et agents de cette université, qui nous ont laissés travailler jusqu'à des heurs tardives, soient remerciés pour l'aide qu'ils m'ont apportée.*

*Merci mon Dieu*

# *Table des matières*

# Table des matières

## Chapitre I : La décharge couronne

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>I.2 La décharge couronne.....</b>	<b>2-3</b>
<b>I.3 Mécanisme de formation et processus physique de la décharge couronne.....</b>	<b>3</b>
<b>I.4 Domaine d'existence de la décharge couronne.....</b>	<b>3-5</b>
<b>I.4.1 Décharge de Townsend.....</b>	<b>5</b>
<b>I.4.1.1 Phénoménologie de la décharge.....</b>	<b>5-6</b>
<b>I.4.1.2 Effet de l'émission d'électrons secondaires.....</b>	<b>6-7</b>
<b>I.4.2 Mécanisme du streamer (dard).....</b>	<b>7-8</b>
<b>I.5 Caractéristique courant-tension de la décharge couronne.....</b>	<b>8-9</b>
<b>I.6 Les différents modes de décharges couronne.....</b>	<b>9</b>
<b>I.6.1 Décharge couronne en tension positive.....</b>	<b>9-10</b>
<b>I.6.2 Décharge couronne en tension négative.....</b>	<b>10-11</b>
<b>I.7 Champ seuil de la décharge couronne.....</b>	<b>11-12</b>
<b>I.8 Utilisations et conséquences négatives de l'effet couronne.....</b>	<b>12</b>
<b>I.8.1 Utilisations.....</b>	<b>12</b>
<b>I.8.2 Conséquences négatives.....</b>	<b>12</b>
<b>I.9 La précipitation électrostatique.....</b>	<b>13</b>
<b>I.9.1 Présentation des précipitateurs électrostatiques.....</b>	<b>13-14</b>
<b>I.9.2 Les différents modèles de précipitateurs électrostatiques.....</b>	<b>14</b>
<b>I.9.2.1 Le précipitateur électrostatique de forme tubulaire.....</b>	<b>14-15</b>

I.9.2.2 Le précipitateur électrostatique de géométrie nappe de fils- deux plans.....	15
I.10 Décharge couronne en géométrie multi-fils - deux plans.....	16-17
I.11 Conclusion.....	17

<b>Chapitre II : Théorie de la sonde polarisée de Tassicker</b>
---

II.1 Introduction.....	18
II.2 La sonde polarisée .....	18-19
II.2.1 La sonde polarisée circulaire.....	19-20
II.2.2 Principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire.....	20-22
II.3 Calcul du champ électrique $E$ .....	22-23
II.4 Théorie de la sonde.....	23-25
II.5 Détermination des paramètres de la décharge couronne.....	26
II.5.1 Détermination de la densité de courant ( $J$ ) au plan.....	26
II.5.2 Détermination du champ électrique ( $E$ ) au plan.....	26
II.5.3 Détermination de la conductivité ( $\sigma$ ) de l'effet couronne près du plan.....	27
II.6 Conclusion.....	27

<b>Chapitre III : Etude expérimentale</b>
---

III.1 Introduction.....	28
III.2 Présentation du dispositif expérimental.....	28
III.2.1 Composition du dispositif.....	29-30
III.2.2 Composition de la source de tension et du système de mesure.....	31-32
III.3 Mesure de Tension.....	33

<b>III.3.1 Tension appliquée aux fils (électrodes actives).....</b>	<b>33</b>
<b>III.3.2 Tension de polarisation <math>V_b</math> .....</b>	<b>33</b>
<b>III.4 Mesure de courant.....</b>	<b>33</b>
<b>III.5 Mesure des paramètres physiques de l'air.....</b>	<b>33-34</b>
<b>III.6 Caractéristique courant-tension.....</b>	<b>34-35</b>
<b>III.7 Présentation et interprétation des résultats.....</b>	<b>35</b>
<b>III.7.1 Caractéristique courant-tension relevée.....</b>	<b>35-38</b>
<b>III.7.2 La densité de courant (<math>J</math>).....</b>	<b>38</b>
<b>III.7.2.1 Influence de la tension appliquée, de la distance inter-fils et du nombre de fils sur la densité de courant.....</b>	<b>38-42</b>
<b>III.7.3 Le champ électrique (<math>E</math>).....</b>	<b>42</b>
<b>III.7.3.1 Influence de la tension appliquée et du nombre de fils sur le champ électrique.....</b>	<b>43-44</b>
<b>III.8 Conclusion.....</b>	<b>45</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>46-48</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>49-50</b>

## **Résumé**

*L'étude présentée dans ce manuscrit vise à approfondir les connaissances sur la décharge couronne qui s'avère être d'une grande importance pratique, vu ses innombrables applications (précipitation électrostatique d'aérosols, peinture électrostatique, fabrication d'ozone, traitement de surface, ...etc.) et cela malgré les inconvénients quelle entraîne sur les lignes de transport d'énergie électrique (pertes de puissance, bruit audible, dégradation chimique des isolants, ...etc.).*

*Dans le but de mesurer les paramètres électriques de la décharge couronne positive en géométrie nappe de fils – deux plans (la densité de courant et le champ électrique), une étude expérimentale à été faite. L'adaptation d'une sonde polarisée circulaire (appelée aussi sonde polarisée de Tassicker) nous a permis de mesurer les courants  $I_{s0}$  et  $I_s$  avec lesquels on a pu déduire la distribution de la densité de courant et du champ électrique. Les résultats obtenus sont représentés dans des graphes qui sont interprétés par la suite.*

## Liste des figures

Fig. I.1 – Caractéristique générale (schématique) des décharges électriques.....	4
Fig. I.2 – Descriptif d'un Streamer positif en géométrie pointe-plan.....	8
Fig. I.3 – Schéma représentatif de la décharge couronne continue positive en géométrie fil-plan.....	10
Fig. I.4 – Schéma représentatif de la décharge couronne continue négative en géométrie fil-plan.....	11
Fig. I.5 – Schéma d'illustration du processus de séparation dans les ESP.....	13
Fig. I.6 – Schéma d'un précipitateur électrostatique.....	14
Fig. I.7 – Schéma d'un précipitateur électrostatique de forme tubulaire.....	15
Fig. I.8 – Schéma d'un précipitateur électrostatique de géométrie fils-plans.....	15
Fig. I.9 – Représentation schématique d'une décharge couronne continue en géométrie fil-plan.....	16
Fig. I.10 – Représentation schématique d'une décharge couronne continue positive en géométrie multi-fils – 2plans.....	17
Fig. II.1 – Sonde circulaire de Tassicker.....	19
Fig. II.2 – Schéma de la sonde polarisée circulaire.....	20
Fig. II.3a – Lignes de champs et équipotentiels en présence de décharge électrique avec la sonde non polarisée.....	21
Fig. II.3b – Lignes de champs et équipotentiels en absence de décharge électrique avec la sonde polarisée.....	21
Fig. II.3c – Lignes de champs et équipotentiels en présence de décharge électrique avec la sonde polarisée.....	21
Fig. II.4 – Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée négativement.....	24

Fig. II.5 – Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée positivement.....	25
Fig. III.1 – Figure représentative du dispositif expérimental.....	29
Fig. III.2 – Figure représentative de la composition du dispositif.....	30
Fig. III.3 – Figure représentative de l'installation haute tension utilisée.....	31
Fig. III.4 –Schéma électrique d'une partie de l'installation haute tension utilisée.....	32
Fig. III.5 – Dispositif expérimental pour le relevé de la caractéristique courant-tension.....	35
Fig. III.6 – Caractéristique courant-tension en géométrie 3 fils-2plans.....	35
Fig. III.7 – Caractéristique courant-tension en géométrie 5 fils-2plans.....	36
Fig. III.8 – Caractéristique courant-tension pour différents nombre de fils.....	37
Fig. III.9 – Effet du diamètre du fil « $2R_f$ » sur la caractéristique courant-tension.....	37
Fig. III.10 – Variation de la densité de courant $J$ pour la configuration 3 fils-2plans.....	39
Fig. III.11 – Variation de la densité de courant $J$ pour la configuration 3 fils-2plans.....	39
Fig. III.12 – Variation de la densité de courant $J$ pour la configuration 5 fils-2plans.....	40
Fig. III.13 – Variation de la densité de courant $J$ pour la configuration 5 fils-2plans.....	41
Fig. III.14 – influence du nombre de fils sur la densité de courant $J$ .....	41
Fig. III.15 – Influence de l'espacement ( $a$ ) sur la densité de courant $J$ .....	42
Fig. III.16 – Variation du champ électrique $E$ pour la configuration 3 fils-2plans.....	43
Fig. III.17 – Variation du champ électrique $E$ pour la configuration 5 fils-2plans.....	44

## Liste des symboles utilisés

Symbole	Définition	Unité
$C_0$	La capacité formée par les surfaces des deux parties (S) et (E)	( $\mu$ F)
$d$	Distance entre deux plans mis à la terre	(cm)
$E$	Le champ électrique	(Kv/m)
$E_b$	Champ local	(V/mm)
$g$	Largeur de l'intervalle entre (S) et (E)	(mm)
$h$	Distance entre la nappe de fils et le plan collecteur	(cm)
$h_{NE}$	Hauteur du plan collecteur	(cm)
$hm$	Taux d'humidité du milieu	%
$I_{s0}$	Courant mesuré à $V_b = 0$	(nA)
$I_s$	Courant mesuré à $V_b \neq 0$	(nA)
$J$	Densité de courant	( $m^2/V.s$ )
$L_{NE}$	Longueur du cylindre et du plan collecteur	(cm)
$P$	Pression du milieu	mm Hg
$r_{SE}$	Rayon du fil	(mm)
$r_{NE}$	Rayon du cylindre	(cm)
$r_s$	Rayon de la sonde circulaire	(mm)
$r_e$	Rayon intérieur du plan (E)	(mm)
$R_e$	Rayon extérieur du plan (E)	(mm)
$r_m$	Rayon effectif de la sonde	(mm)
$S_s$	Surface de la sonde circulaire	( $mm^2$ )
$S_E$	Surface d'un plan circulaire	( $mm^2$ )
$T$	Température du milieu	$^{\circ}$ C

<b>V ou U</b>	Tension appliquée au fil	(Kv)
<b>U<sub>s</sub></b>	Tension seuil de l'effet couronne	(Kv)
<b>V<sub>b</sub></b>	Tension de polarisation	(V)
<b>ε<sub>0</sub></b>	Permittivité du vide	(F/m)
<b>μ</b>	Mobilité moyenne des ions	(mA/m <sup>2</sup> )
<b>π</b>	Pi=3,14	SI
<b>Φ<sub>s</sub></b>	Flux à travers la sonde associé à (V <sub>b</sub> ≠ 0)	(V.m)
<b>Φ<sub>s0</sub></b>	Flux à travers la sonde associé à (V <sub>b</sub> = 0)	(V.m)

# *Introduction Générale*

### Introduction générale

Il y a longtemps, les gens observaient des lumières bleuâtres qui apparaissaient parfois sur les pointes métalliques, sur diverses aspérités (mâts, paratonnerres, pics montagneux...) ou encore le feu de Saint Elme tout en ignorant de quoi il s'agissait. Ce phénomène a intrigué les physiciens dès qu'ils l'ont constaté. On lui donna alors le nom de *effet couronne* (*corona* en anglais) par évocation à l'aspect du halo lumineux périphérique au soleil observé lors des éclipses.

Cet effet (rare aux niveaux de tension de moins de 200KV), présente des inconvénients qui se manifestent sous forme de pertes en puissances, bruits acoustiques grésillement, bourdonnement, interférences radiophoniques, dégradation chimique des isolants organiques, apparition de phénomènes de corrosion dû à la présence d'ozone, radiation ultra-violet, vibrations des câbles, et bombardement ionique/électronique avec des effets peu connus sur la végétation et les personnes. Néanmoins, il présente aussi des aspects utiles comme ses applications à la précipitation électrostatique d'aérosols, production d'ozone, le traitement des surfaces, la peinture électrostatique et la séparation électrostatique (de matières conductrices et non conductrices).

Dans le but de mieux comprendre et de mieux convoiter le phénomène lié à l'effet couronne, on a réalisé une étude expérimentale au Laboratoire de Génie Electrique de l'Université de Bejaïa (L.G.E.B) permettant de mesurer le champ électrique ( $E$ ) et la densité de courant ( $J$ ) à l'aide de la sonde polarisée circulaire.

Ce manuscrit est présenté en trois chapitres. Dans le premier chapitre on a évoqué d'une manière laconique la nature ainsi que les mécanismes de développement de la décharge couronne. Le deuxième chapitre est consacré à la théorie et au principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire de Tassicker introduite pour la mesure du champ électrique. Le troisième chapitre décrit l'étude expérimentale réalisée. Cette étude consiste à déterminer les différents paramètres de la décharge couronne en configuration multi-fils - 2plans. Outre le relevé de la caractéristique courant-tension, on a pu tracer les distributions du champ électrique et de la densité de courant au plan mis à la terre.

# *Chapitre I*

## I.1 Introduction:

La théorie stipule que les gaz sont des isolants électriques parfait, cela revient au fait qu'ils ne contiennent pas de particules chargées libres, mais seulement des atomes ou molécules neutres. En pratique, un gaz possède toujours un certain nombre de charges électriques libres dues à l'action d'agents ionisants extérieurs permanents, tels que les radiations cosmiques, la radioactivité de la terre ou de celle de substances présentes dans l'atmosphère. L'application d'un champ électrique suffisamment intense à un gaz le rend plus au moins conducteur et les phénomènes complexes qui s'y produisent porte alors le nom de *décharge dans les gaz* [1], et dont il existe plusieurs types [2].

## I.2 La décharge couronne :

On insinue par le terme décharge couronne, l'ensemble des phénomènes évoluant dans un milieu gazeux, se situant entre deux électrodes, dont l'une d'elle est active de faible rayon de courbure (ex. pointe ou un fil mince) portée à un potentiel élevé, et l'autre passive de rayon de courbure important (ex. une plaque plate ou un cylindre) mise à la terre. Ce milieu est soumis à des champs intenses mais non disruptifs et les électrodes peuvent former diverses systèmes : pointe-plan, fil-cylindre, fil-plan, et sphère-plan, ...etc.

Ces phénomènes sont de natures optiques, acoustiques et électriques qui dépendent de trois classes de paramètres :

- ✓ **Paramètres électriques :** nature (alternative ou continue), polarité de la tension appliquée à l'électrode active (positive ou négative).
- ✓ **Paramètres géométriques :** forme, dimension et distance inter-électrode.
- ✓ **Paramètres du gaz inter-électrode :** nature, pression, température et humidité.

La décharge couronne qui, habituellement, a lieu à des pressions atmosphériques, ne nécessite aucune source extérieure pour se développer, on dit que c'est une décharge *autonome* ou *auto entretenue*. Néanmoins, elle a besoin d'un électron germe pour l'amorcer, et cet électron doit être situé au voisinage de l'électrode active ou le champ est très intense pour permettre la multiplication électronique (*avalanche électronique*).

La décharge couronne se forme après un certain temps qui correspond, au temps de création de l'électron germe et au temps de sa multiplication électronique ultérieure [2, 3].

L'*effet couronne* ou bien *corona discharge* en anglais, provient du fait qu'il évoque l'aspect du halo lumineux périphérique au soleil observé lors des éclipses [4]. Il a fait l'objet de premières publications en 1915 par F. W. Peek qui a alors établi une première loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de cet effet [5]. Les physiciens ont d'abord montrés que cet effet dépendait du champ électrique superficiel du conducteur, mais aussi de son diamètre, de son état de surface puis de la densité (et humidité) de l'air environnant. Concernant les lignes électriques, le phénomène a été surtout étudié pour le courant alternatif. Certains auteurs plaident depuis les années 1990 pour des études sur les lignes hautes tensions, très hautes tensions ou ultra hautes tensions, que ce soit en courant alternatif ou continu [4].

### I.3 Mécanisme de formation et processus physique de la décharge couronne :

En appliquant une tension continue positive suffisante ( $V_{\text{seuil}}$ ), sur un fil de faible rayon de courbure. On observe une partition de l'espace inter-électrode en deux régions. La première qui est voisine de l'anode (fil), où le champ est très intense, est le siège de l'ionisation du gaz (l'air), c'est la zone active.

Les électrons libres sont accélérés par le champ électrique provoquant ainsi des collisions avec les atomes ou les molécules du gaz, il y'a alors multiplication des électrons (*avalanche électronique*). Le reste de l'espace inter-électrode constitue la deuxième région où le champ électrique est faible, c'est la zone de dérive. Dans cette zone, les électrons ne peuvent pas se multiplier, les ions positifs créés par les collisions dérivent vers la cathode (plan) sous faibles champs en constituant ainsi une charge spatiale mono-polaire [3].

### I.4 Domaine d'existence de la décharge couronne :

Soit un système d'électrodes baignant entièrement dans un gaz (l'air ambiant par exemple). Sous l'action du champ électrique, les charges libres qui s'y trouvent, produites soit par des mécanismes artificiels (chauffage de la cathode, effet photoélectrique,...) soit par des mécanismes naturels (radioactivité naturelle, rayons cosmiques, ...), vont se déplacer en créant, dans le circuit extérieur, un courant de faible intensité dépendant de la tension appliquée. La **figure (I.1)** représente l'allure générale des caractéristiques tension-courant des décharges gazeuses [6].

Soit  $N_0$  le nombre de charges libres initiales qui se trouvent dans le gaz. En présence d'un faible champ électrique, les domaines (A) et (B) correspondent à des courants de très faibles intensités, de l'ordre de  $10^{-13}$  à  $10^{-14}$  A. Ils traduisent la simple collection des charges,

car celles-ci n'ont pas encore acquis une énergie suffisante pour ioniser les atomes ou molécules du gaz.

Le plateau qui caractérise le domaine (B) traduit le régime de saturation ou de Geiger ( $N=N_0$ ). Les domaines (C) et (D) sont ensuite atteints. Les électrons acquièrent une énergie suffisante pour que le gaz puisse être partiellement ionisé. Les nouveaux électrons vont être accélérés par le champ électrique existant (appliqué) et seront à leurs tours susceptibles de produire des ionisations ultérieures en formant ainsi des avalanches électroniques de type Townsend. Une fois que le courant dépasse les environs de  $10^{-6}$  A, on atteint la zone de transition (domaine E) qui est caractérisé par sa résistance dynamique négative. Dans ce cas, la photo-ionisation du gaz est considérée comme une nouvelle source d'ionisation, propre au milieu gazeux. Ces photons ionisants sont produits au cours du développement des avalanches de Townsend. Avant d'arriver à la formation de l'arc électrique (domaine G), caractérisé par un courant très élevé, il s'établit tout d'abord un nouveau type de décharge: la décharge luminescente. Celle-ci est caractérisée par le développement de streamers, de même nature que ceux apparus au seuil (domaine E) mais beaucoup plus vigoureux, à partir de l'anode et qui, en général, peuvent atteindre la cathode. Ces streamers peuvent, en pratique, se propager de façon autonome par photo-ionisation du gaz; leur développement ne dépend pas du circuit extérieur.

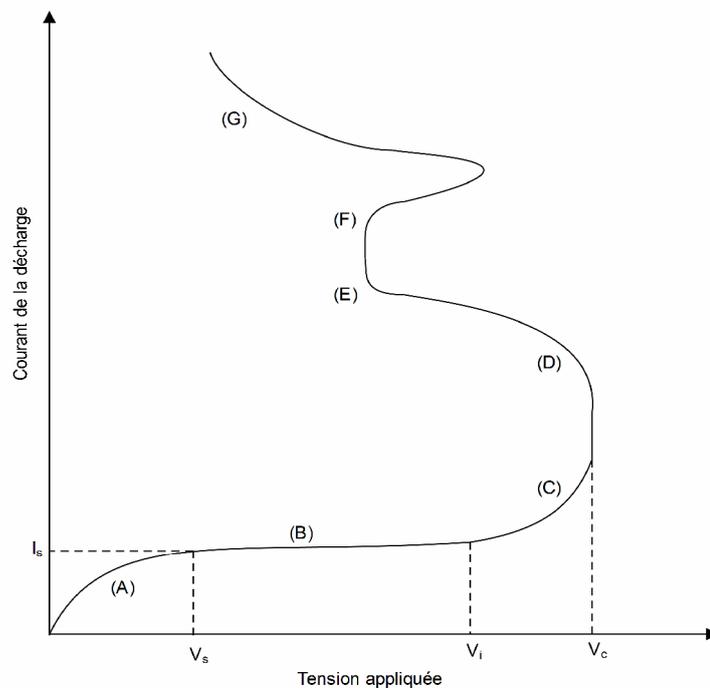


Fig. I.1 – Caractéristique générale (schématique) des décharges électriques [7].

En résumé, la décharge couronne est un phénomène électrique qui peut être considéré comme une superposition de deux régimes de décharges: celui de Townsend qui se développe au voisinage de l'anode et celui du streamer qui prend naissance juste après la photo-ionisation du gaz, due aux photons produits au cours de la première avalanche du type Townsend [7].

#### I.4.1 Décharge de Townsend :

##### I.4.1.1 Phénoménologie de la décharge :

Le mécanisme de la décharge de Townsend a suscité l'intérêt de plusieurs auteurs qui l'ont bien détaillé dans leurs travaux [8, 9]. En bref, la décharge de Townsend a lieu selon le mécanisme suivant :

Un électron « *germe* » accéléré par le champ électrique appliqué acquiert une énergie qui peut suffire, à partir d'une certaine valeur du champ électrique, à ioniser par collisions une particule neutre du gaz. Les nouveaux électrons créés vont participer à leur tour au mécanisme d'ionisation des molécules neutres produisant ainsi une multiplication ou avalanche électronique. Townsend a introduit un coefficient multiplicateur  $\alpha$  qui permet d'exprimer l'accroissement d'électrons  $dN$  le long d'un parcours élémentaire  $dx$  de l'avalanche tel que :

$$dN = N \cdot \alpha \cdot dx \quad (I.1)$$

Ce coefficient, appelé généralement le premier coefficient de Townsend, dépend de la nature du gaz, du champ local  $E$  et de la pression du gaz. Dans le cas d'un champ homogène,  $\alpha$  est constant dans tout l'intervalle. Ainsi :

$$N = N_0 e^{\alpha d} \quad \text{electrons} \quad (I.2)$$

Où :

- ✓  $N_0$  : Le taux de production d'électrons primaires par seconde.
- ✓  $N$  : Le nombre d'électrons produits par avalanche.

Si  $d$  est la distance inter-électrode, le courant mesuré est donné par :

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

Pour qu'une véritable décharge puisse se produire, il faut qu'une succession d'avalanches puisse avoir lieu. Pour Townsend [10, 11], la cause de ce phénomène est le bombardement de la cathode décrit comme suit : Au niveau de la cathode, les ions positifs

formés au cours des collisions ionisantes bombardent la cathode et peuvent en extraire des électrons [12].

#### I.4.1.2 Effet de l'émission d'électrons secondaires :

En effet, à la cathode, il se produit une émission d'électrons additionnels due à la présence d'ions positifs, et a un effet photoélectrique produit par les molécules gazeuses excitées. Dans certains cas, les molécules neutres et métastables peuvent jouer un rôle.

L'émission d'électrons secondaires sous le choc des ions positifs est un phénomène de première importance, qui est invoquée dans l'explication du mécanisme de l'entretien de la décharge. Un ion positif, animé d'une énergie cinétique  $W_c$  neutralise un électron de la cathode en libérant l'énergie d'ionisation  $W_i$ . Cet électron est extrait du métal en absorbant une énergie  $W_e$ . La condition nécessaire pour extraire un électron s'écrit :

$$W_c + W_i \geq 2W_e \quad (I.4)$$

Si le temps s'écoulant entre l'application de la tension et le claquage est de l'ordre de  $10^{-6}$  s, seule la contribution des photons générés au sein du gaz peut conduire à une émission secondaire d'électrons. Les ions positifs sont trop lents pour atteindre la cathode dans le laps de temps.

Supposons que  $N_x$  électrons à la distance  $x$  produisent non seulement  $\alpha N_x dx$  mais également  $w N_x dx$  nouveaux électrons à la cathode. Le nombre total d'électrons  $N_0'$  émis à la cathode est alors :

$$N_0' = N_0 + \int_0^d w N_x dx \quad (I.5)$$

Or :

$$N_x = N_0' e^{(\alpha x)} \quad (I.6)$$

Et :

$$N_0' = N_0 + \int_0^d w N_0' e^{(\alpha x)} dx = N_0 + \frac{w}{\alpha} N_0' [e^{(\alpha d)} - 1] \quad (I.7)$$

Où :

$$N_0 = N_0' \left( 1 - \frac{w}{\alpha} [e^{(\alpha d)} - 1] \right) \quad (I.8)$$

On a donc pour le nombre d'électrons à l'anode :

$$N_d = N_0 e^{(\alpha d)} \quad (\text{I.9})$$

$$N_d = \frac{N_0 e^{(\alpha d)}}{1 - \frac{w}{\alpha} [e^{(\alpha d)} - 1]} \quad \text{electrons} \quad (\text{I.10})$$

Par définition :

$$\frac{w}{\alpha} = \gamma \quad \text{est le deuxième coefficient de Townsend}$$

D'où le courant collecté à l'anode est [12] :

$$I = \frac{I_0 e^{(\alpha d)}}{1 - \gamma [e^{(\alpha d)} - 1]} \quad (\text{nA}) \quad (\text{I.11})$$

#### I.4.2 Mécanisme du streamer (dard) :

Il a été observé dans certains cas et particulièrement en géométrie pointe-plan que la décharge prend l'aspect de filaments se propageant entre les électrodes, c'est la formation du dard. Ce phénomène peut être défini par une succession d'avalanches continues. Dans ce cas, la photo-ionisation du gaz dans la charge d'espace générée par la première avalanche du type Townsend près de la cathode joue un rôle important. Ces photoélectrons amorcent des avalanches secondaires près de l'anode en créant une charge d'espace positive. Une étincelle se forme lorsqu'une avalanche d'électrons vient neutraliser cette charge d'espace, [figure \(I.2\)](#).

Cette théorie a été développée à la suite des travaux de Raether [13, 14], de Meek [15] et de Loeb [16, 17].

Ce phénomène du dard se développe en des temps de l'ordre de  $10^{-8}$  secondes alors que la décharge de Townsend nécessite des temps de l'ordre de  $10^{-5}$  secondes pour entraîner un claquage.

Des critères ont été proposés par Meek [15] et Raether [14] pour estimer le champ électrique permettant la transformation d'une avalanche en dard. Le critère établi par Raether est simple, il exprime que l'avalanche doit atteindre une taille critique  $L_c$  pour que le dard puisse se développer.

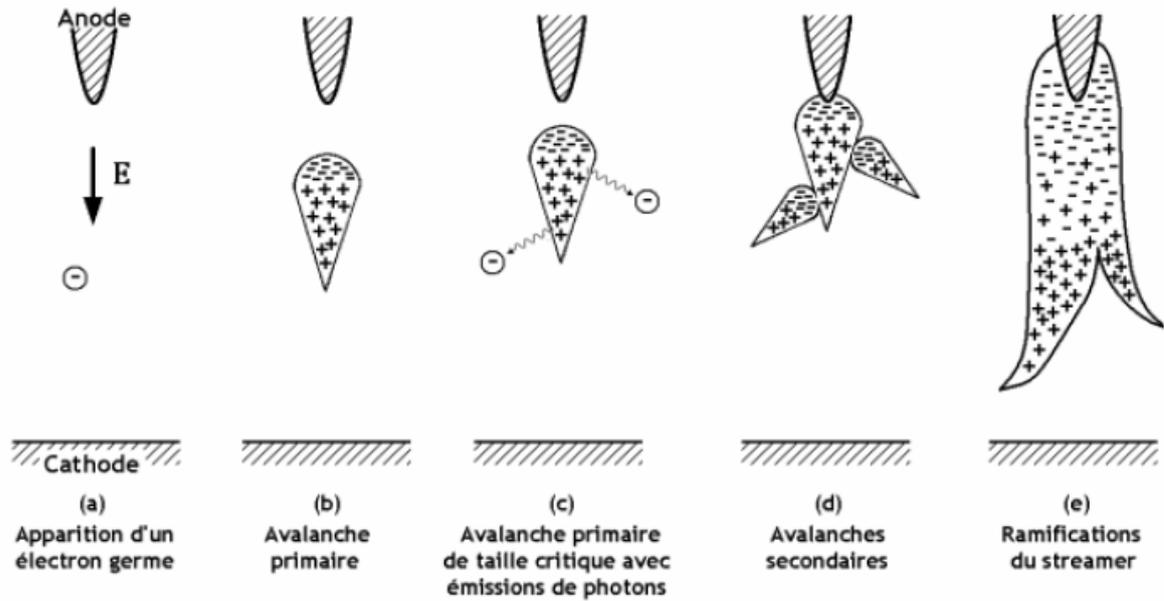


Fig. I.2 – Descriptif d’un Streamer positif en géométrie pointe-plan.

**I.5 Caractéristique courant-tension de la décharge couronne :**

La prédiction de la caractéristique courant - tension  $I = f(U)$  pour la configuration du précipitateur électrostatique conventionnel (fils – plans) est très complexe. Vu l’intérêt de cette caractéristique, plusieurs méthodes de calcul basées sur des hypothèses simplificatrices ont été rapportées dans la littérature [18]. Cooperman a proposé une loi courant tension théorique pour une configuration nappe de fils – deux plans. Il considère le cas où le champ électrostatique est important, comparé au champ de la charge d’espace. Pour des faibles valeurs de densité de courant, la relation courant tension proposée est :

$$J = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \mu}{d \cdot h^2 \cdot \log\left(\frac{R_0}{r_0}\right)} \cdot U \cdot (U - U_s) \quad (\text{m}^2/\text{V.s}) \tag{I.12}$$

Avec,  $\mu$  représente la mobilité moyenne des ions et  $U_s$  la tension seuil de l’effet couronne. La géométrie plane est équivalente à une géométrie cylindrique. La méthode de White consiste à imaginer la nappe de fils remplacée par un plan, alors le champ électrostatique devient uniforme et le problème est réduit à une seule dimension. Cette approximation est bonne, quand le champ de la charge d’espace est supérieur au champ électrostatique. L’expression de  $J$  en fonction de  $U$  est [19] :

$$J = \frac{9 \cdot \epsilon_0 \cdot \mu}{8 \cdot d^3} \cdot (U - U_0)^2 \quad (\text{m}^2/\text{V.s}) \quad (\text{I.13})$$

## I.6 Les différents modes de décharges couronne :

### I.6.1 Décharge couronne en tension positive :

La décharge couronne continue en polarité positive dans la géométrie fil-plan est représentée dans la [figure \(I.3\)](#). Elle se produit quand le fil (électrode anodique) est porté à un potentiel élevé positif et le plan (cathode) est mis à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour du fil, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (fil). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance du fil (inférieur 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 (le plan). Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs, est appelée région de « dérive ». 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 [\[20\]](#), la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de 210 m/s) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence de 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires [\[12\]](#).

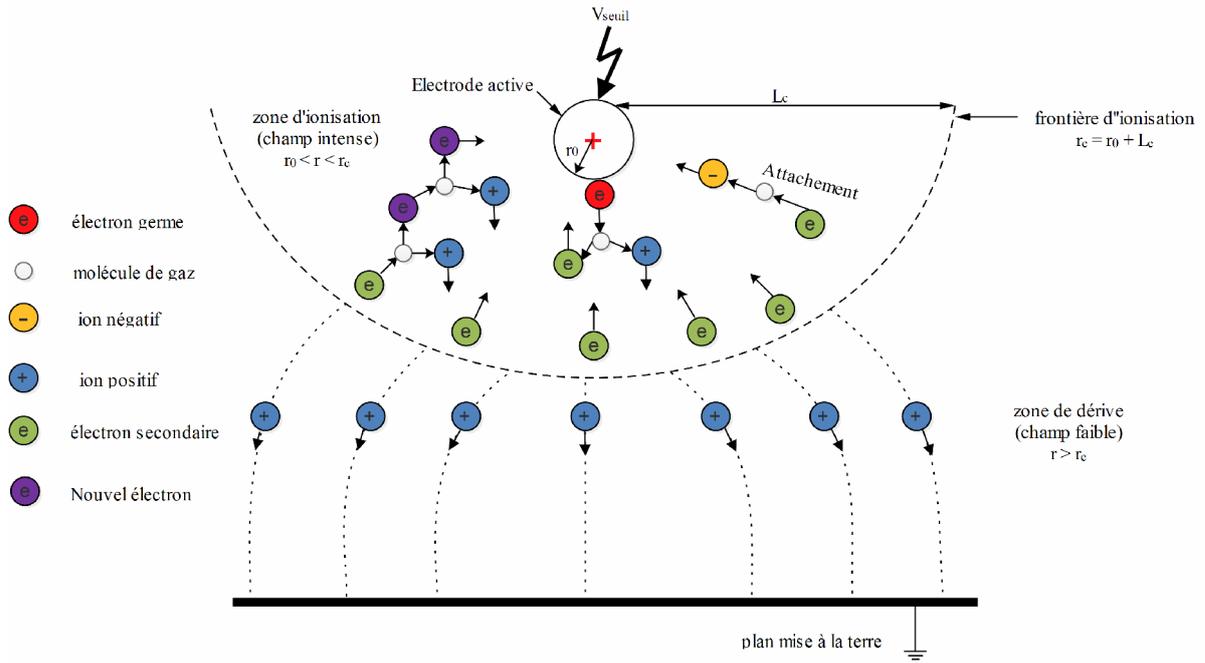


Fig. I.3 – Schéma représentatif de la décharge couronne continue positive en géométrie fil-plan.

### I.6.2 Décharge couronne en tension négative :

Dans le cas où le fil est porté à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour du fil. Goldman et Sigmond en 1982 [21] expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode, [figure \(I.4\)](#).

Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers le plan. De plus, lorsque la tension appliquée dépasse un seuil, il y a passage à l'arc. Le courant de cette décharge est du à des impulsions de Trichel où la fréquence qui dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode.

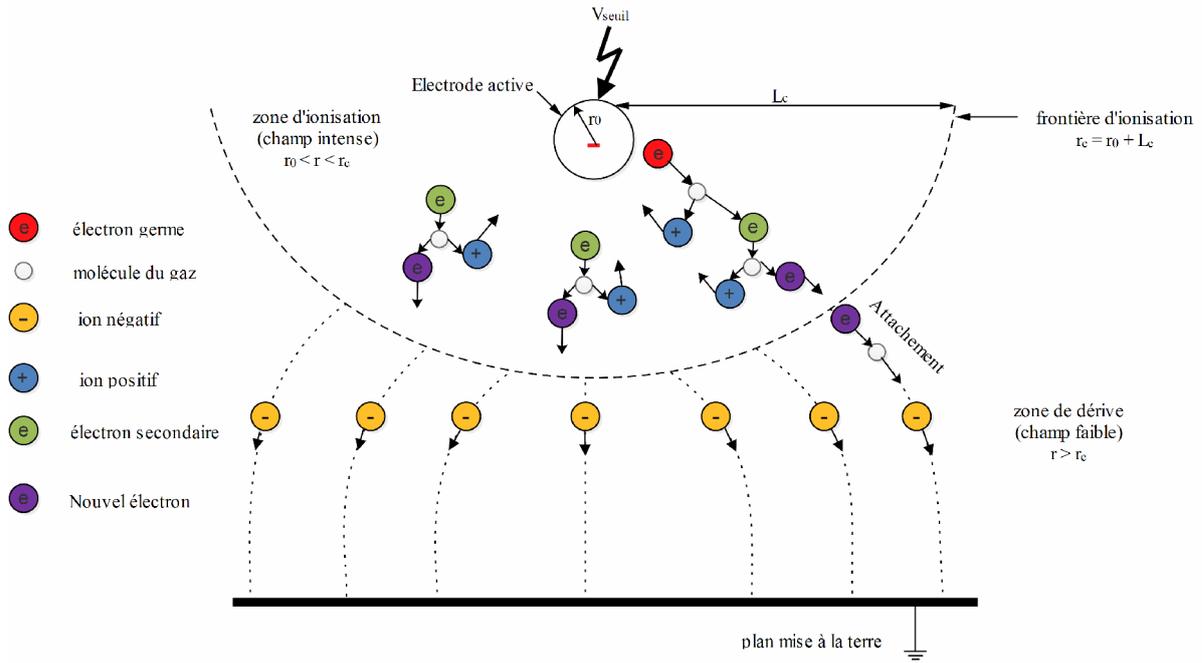


Fig. I.4 – Schéma représentatif de la décharge couronne continue négative en géométrie fil-plan.

Les mécanismes physico-chimiques au sein des décharges couronnes sont assez complexes et sont actuellement étudiés par les physiciens des plasmas, car ils ne sont pas encore totalement connus [12].

### I.7 Champ seuil de la décharge couronne :

Pour un intervalle de géométrie donnée, il existe un champ minimal d'apparition de la première couronne ou pour lequel la décharge couronne débute, connue sous le nom de champ seuil. La prédétermination du champ seuil pour une électrode ou un système d'électrodes données, revêt d'une importance particulière dans le domaine d'application de la décharge couronne. Peek a proposé une loi empirique pour l'électrode cylindrique lisse dans l'air [22, 23 et 24]:

$$E_0 = A \cdot \delta \left( 1 + \frac{B}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \quad (\text{Kv/cm}) \quad (\text{I.14})$$

Où  $E_0$  est le champ seuil d'apparition en Kv/cm,  $r$  le rayon du conducteur et  $\delta$  la densité relative de l'air qui est fonction de la température  $T$  en °C et de la pression  $P$  en torr. Selon la littérature, les valeurs de  $A$  et  $B$  sont respectivement égales à 31 Kv/cm et 0,308.

$$\delta = \frac{0,392 \cdot P}{273 + T} \quad (\text{I.15})$$

L'état de surface du conducteur est très important. La relation (I.13) n'est vérifiée que pour des surfaces parfaitement polies. La rugosité superficielle diminue le champ seuil. En tenant compte de cette influence, on attribue aux conducteurs un coefficient expérimental  $m$  inférieur à 1, appelé coefficient d'état de surface, le champ seuil  $E_s$  d'un conducteur non poli s'exprime alors par [19]:

$$E_s = m \cdot E_0 \quad (\text{Kv/cm}) \quad (\text{I.16})$$

## I.8 Utilisations et conséquences négatives de l'effet couronne :

L'effet couronne peut être utilisé à des fins industrielles intéressantes. Néanmoins, elle peut apparaître de façon indésirable sur les composantes des lignes à haute tension.

### I.8.1 Utilisations :

La génération de charges électriques dans le phénomène d'effet de couronne est utilisée dans plusieurs procédés industriels tels que la précipitation et la vaporisation électrostatique. En chargeant des particules ciblées à l'aide des charges électriques générées par l'effet de couronne, on peut recueillir des poussières nuisibles avant leur évacuation dans l'air (précipitateurs) ou encore expulser de fines particules (ex: peinture) à un débit très précis et régulier (vaporisateurs).

Au niveau des lignes électriques, l'effet de couronne autour des conducteurs a pour effet de réduire l'amplitude et de ralentir la propagation des surtensions (ex: choc manœuvre, choc de foudre ... etc.) [25].

### I.8.2 Conséquences négatives :

Au niveau du transport de l'énergie électrique, l'effet de couronne est une source de pertes électriques, d'interférences radiophoniques et télévisuelles, de bruits audibles, de la détérioration de l'état de surface des composantes et de vibrations mécaniques. De plus. Les sous-produits de l'effet de couronne dans les milieux isolants de certains disjoncteurs ( $\text{SF}_6$ ) et transformateurs (huile), diminuent leur pureté et leurs propriétés isolantes. Minimiser l'effet de couronne demeure un défi de taille dans la conception des composantes hautes tensions. Les décharges électriques dans l'air génèrent aussi de l'ozone, qui est un gaz irritant [25].

Parmi les différentes applications de la décharge couronne citées précédemment et qui s'avère être l'objet de notre étude, nous distinguons la précipitation électrostatique d'aérosols.

### I.9 La précipitation électrostatique :

La précipitation électrostatique consiste à charger les particules présentes dans les fumées à l'aide d'une électrode active afin de les attirer vers une électrode collectrice grâce à la force de Coulomb. Entre les deux électrodes, l'interaction entre le champ électrique, la dynamique du fluide et la dynamique des particules est à l'origine de phénomènes physiques très complexes [26], figure (I.5).

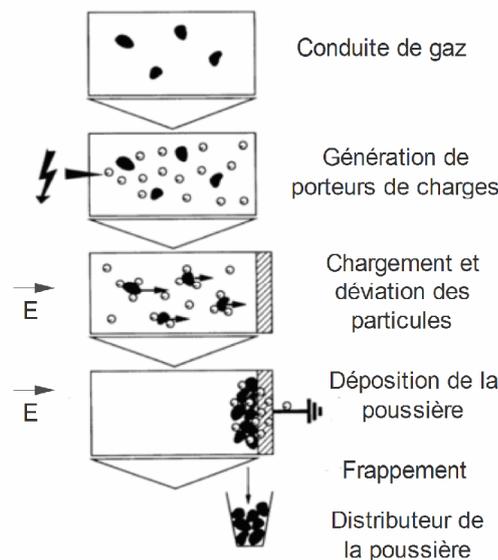


Fig. I.5 – Schéma d'illustration du processus de séparation dans les ESP [27].

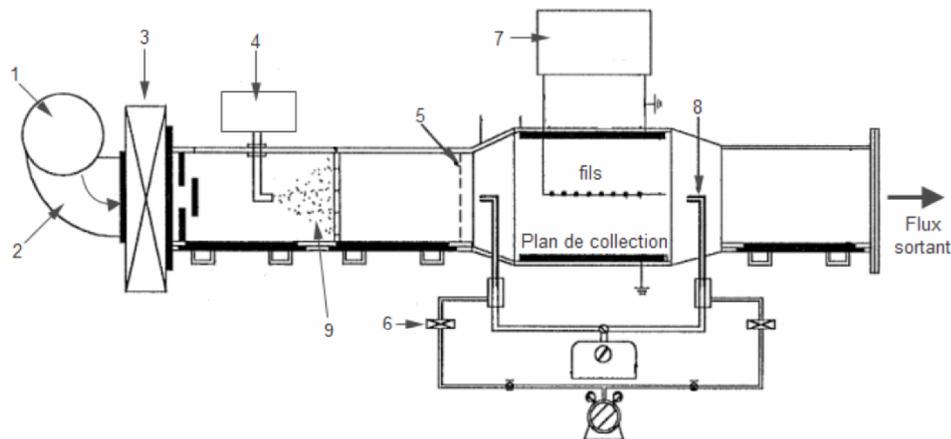
#### I.9.1 Présentation des précipitateurs électrostatiques :

Les précipitateurs électrostatiques sont des installations qui enlèvent de fines particules en suspension dans le gaz en les chargeant puis en les séparant du gaz à l'aide d'un champ électrique. Ces appareils sont connus aussi sous le nom de séparateurs de poussières [28], figure (I.6).

Les précipitateurs électrostatiques ont été employés pendant presque un siècle pour la collection des particules de poussière, de vapeur et de brume. Les applications initiales étaient basées principalement sur les applications chimiques/métallurgiques, et cela pour réduire la pollution atmosphérique et pour le rétablissement des sous-produits valables, par exemple le

nettoyage des gaz combustibles, ou des pertes matérielles des processus de fonte en métal. Plus récemment, l'application principale a été de lutter contre la pollution atmosphérique [27].

Les précipitateurs électrostatiques présentent de nombreux avantages de fonctionnement dans une large gamme de température du gaz et obtiennent une haute efficacité de collecte de particules par rapport à des dispositifs mécaniques tels que les cyclones et les filtres à manches [29].



- |  |  |
|--|--|
| 1 : Ventilateur.                                 | 6 : Filtre.                            |
| 2 : Pièce d'air.                                 | 7 : Bloc THT.                          |
| 3 : Filtre.                                      | 8 : Tube de prélèvement iso-cinétique. |
| 4 : Micro conducteur de la poussière.            | 9 : Cendres flottantes.                |
| 5 : Générateur de turbulence (grille de maille). |  |

Fig. I.6 – Schéma d'un précipitateur électrostatique [30].

## I.9.2 Les différents modèles de précipitateurs électrostatiques :

### I.9.2.1 Le précipitateur électrostatique de forme tubulaire :

Le précipitateur de forme tubulaire est un système d'électrodes fil-cylindre (le fil est placé dans l'axe du cylindre), **figure (I.7)**, l'air poussiéreux circule à l'intérieur du cylindre et parallèlement à sa paroi. Le champ électrique à l'intérieur du cylindre provoque l'électrisation des particules en suspension qui sont entraînées par la suite vers l'électrode collectrice (paroi du cylindre) [31].

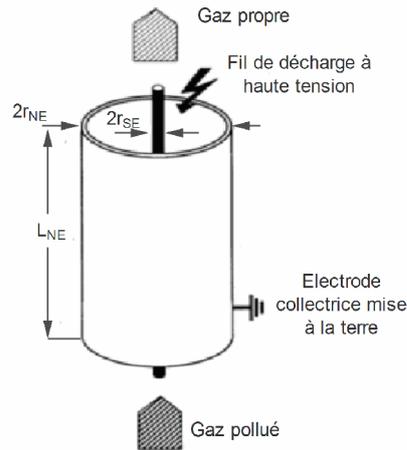


Fig. I.7 – Schéma d'un précipitateur électrostatique de forme tubulaire [27].

### I.9.2.2 Le précipitateur électrostatique de géométrie nappe de fils- deux plans :

Dans ce type de précipitateur, les gaz poussiéreux circulent horizontalement et à basse vitesse (environ  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ) entre des plans mis à la terre, distants d'une distance  $d$  [31]. Entre ces plans collecteurs destinés à capter les poussières, sont disposées des électrodes émissives constituées de fils portés à une haute tension. Sous l'effet du champ électrique inter-électrode, les poussières se chargent et migrent dans ce champ.

La tension appliquée à la nappe de fils du précipitateur doit être la plus élevée possible, mais en dessous d'une tension dite de claquage ou de transition vers l'arc électrique. Cette tension dépend de la nature du gaz et des paramètres physiques de l'air [32], figure (I.8).

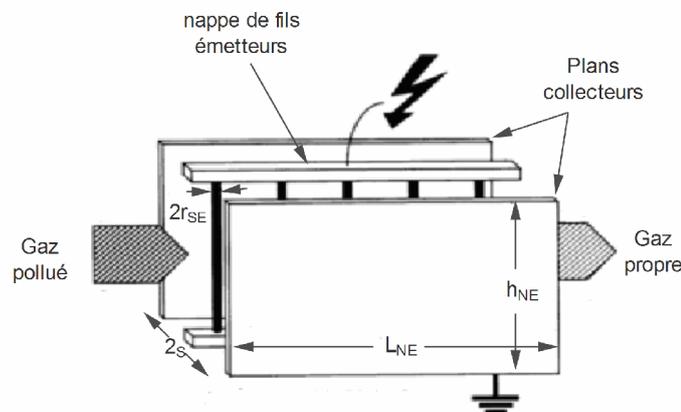


Fig. I.8 – Schéma d'un précipitateur électrostatique de géométrie fils-plans [27].

### I.10 Décharge couronne en géométrie multi-fils - deux plans :

Comme nous l'avons expliqués précédemment dans le mécanisme de formation de la décharge couronne concernant la géométrie fil-plan, en appliquant une tension positive où négative, l'espace inter électrode se divise en deux zones, l'une active à fort champ électrique caractérisée par une charge d'espace nulle et l'autre de dérive à faible champ électrique caractérisée par une charge d'espace unipolaire de même signe que celui de la tension appliquée, **figure (I.9)**. A l'interface des deux zones, le champ électrique est égale au champ critique du minimum d'ionisation correspondant à  $\alpha - \eta = 0$ .

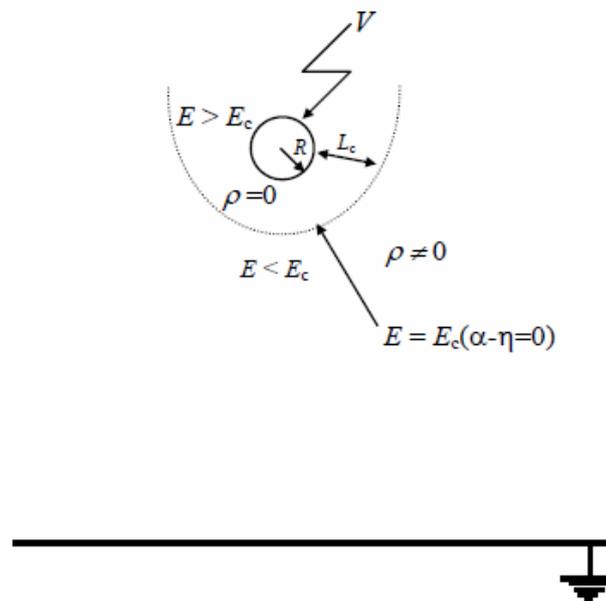


Fig. I.9 – Représentation schématique d'une décharge couronne continue en géométrie fil plan [2].

En ce qui concerne la décharge couronne positive en géométrie multi-fils – 2plans, à laquelle on s'est intéressé pour la réalisation de notre étude expérimentale, les phénomènes observés sont les mêmes, seulement la répartition des zones diffère. En effet, dans l'espace inter-fils, les ions positifs qui dérivent des deux fils adjacents se trouvent piéger et se repoussent entre eux. On appelle cette zone « zone de répulsion ».

Ce qui caractérise cette géométrie, c'est le nombre de zones et de charges produites, cela s'explique par le fait qu'on utilise une nappe de fils (dont le nombre de fils est supérieur à 2) mise sous haute tension et deux plans mis à la terre, **figure (I.10)**.



## *Chapitre II*

## II.1 Introduction :

Parmi les paramètres caractérisant la décharge couronne, on distingue le champ électrique. La grandeur de ce dernier est plus déterminante pour la fiabilité et la durée de vie de l'isolation et s'avère aussi être la plus délicate à mesurer. Les ions positifs produits dans la zone d'ionisation lors de la décharge couronne positive en géométrie fil-plan, dérivent vers le plan et forment ainsi une charge d'espace mono-polaire. La présence de cette dernière à proximité du plan cause des difficultés lorsqu'on veut mesurer le champ électrique. L'acuité de ces difficultés apparaît lorsqu'on sait qu'une mesure précise doit distinguer la charge induite de la charge conduite. De nouvelles techniques de mesure du champ électrique sont introduites, elles concernent les sondes polarisées. Leur expérimentation est en pleine évolution [3, 33-35]. Il existe deux types de dispositifs pour la mesure du champ électrique, à savoir:

- a) Les machines à champs : tels que les moulins à champs [36], et les fluxmètres électrostatiques [37].
- b) Les sondes à champ statique : telles que les sondes capacitatives introduites par Collins et Meek en 1965, qui opèrent en absence du courant de conduction, elles sont bien adaptées à la mesure du champ dans la zone active [38, 39], et les sondes polarisées, qui diffèrent des précédentes par leurs principes de fonctionnement [40, 3, 33-34].

Le dispositif le plus adéquat à notre système est la sonde polarisée de Tassicker [40]. En effet, non seulement elle est plus adaptée pour les mesures de champs statiques et de la densité de courant, mais elle se prête aussi à la miniaturisation, à l'inverse des autres dispositifs de mesures.

Dans ce deuxième chapitre, nous présentons l'étude théorique de la sonde afin de mesurer le champ électrique en géométrie multi-fils – deux plans dont les électrodes actives sont soumises à une haute tension continue des deux polarités (négative et positive).

## II.2 La sonde polarisée:

Les sondes polarisées sont de simples capteurs, de forme circulaire ou linéaire, incorporées dans un même niveau de surface dans une électrode mise à la terre sur laquelle on veut mesurer le champ électrique. Le principe en est introduit par Tassicker en 1974 [40] sur un modèle de forme circulaire et développé plus tard par Selim et Waters en 1980 [41]. Le signal de la sonde polarisée dérive du courant de conduction qui la traverse. Ce courant est

contrôlé par un champ électrique crée localement par polarisation de la sonde. La connaissance du courant et du champ local permet de déduire l'intensité du champ extérieur.

### II.2.1 La sonde polarisée circulaire :

Le principe de fonctionnement de la sonde polarisée de Tassicker est basé sur la mesure du courant collecté par la surface de la sonde, pour ensuite déduire le champ électrique à sa surface. En partant de ce principe, il considère que la sonde est un plan circulaire ( $S_s$ ) de rayon  $r_s$ , centré au milieu d'une électrode (E) de rayons intérieur et extérieur respectivement  $r_e$  et  $R_e$ . Les surfaces  $S_s$  et  $S_E$  des deux parties ainsi formées sont au même niveau et forment un intervalle d'air annulaire de largeur  $g = r_e - r_s$  [42], figure (II.1).

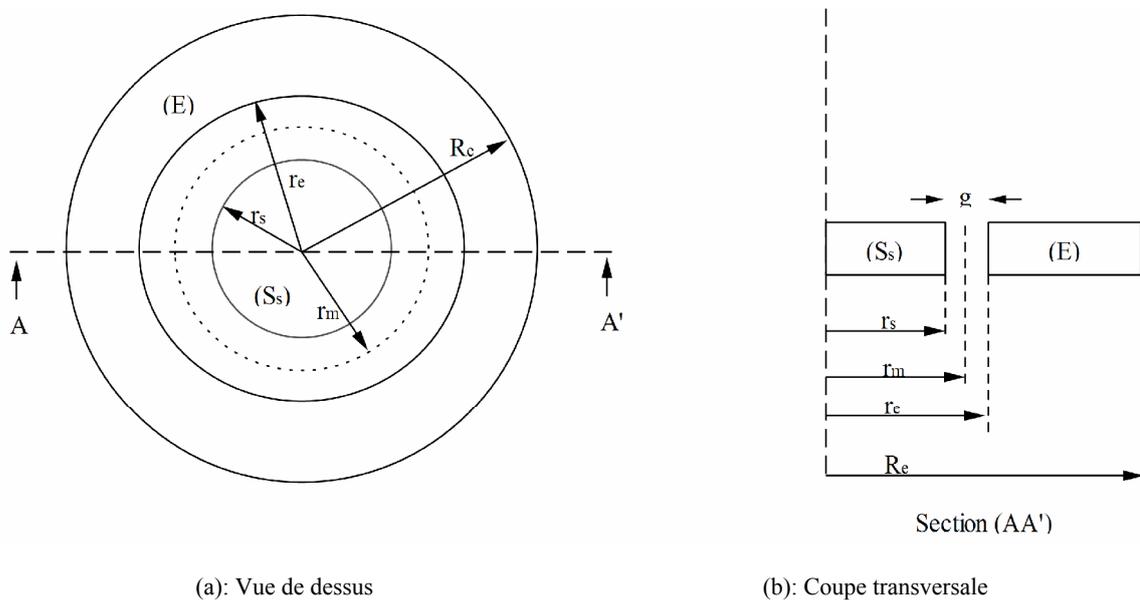


Fig. II.1 – Sonde circulaire de Tassicker [12].

La sonde circulaire, réalisée au Laboratoire de Génie Electrique de l'Université A. Mira de Bejaïa, est constituée principalement d'un collecteur (S), de forme circulaire, logé dans une plaque de polarisation (E) et laissant entre elles un intervalle d'air de largeur  $g$ . Cet ensemble est alors incorporé dans un même niveau de surface avec les plans de gardes (C), voir la figure (II.2a). Tous ces éléments (S, E et C) sont en acier inoxydable et reposent sur une plaque isolante en bakélite (1) placées sur une autre plaque isolante en plexiglas (2) et le tout repose sur un support en bois (3), figure (II.2b) [12].



$$\frac{I_s}{I_{s0}} = \frac{\phi_s}{\phi_{s0}} = 1 + \frac{C_0}{\pi \cdot r_m \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{V_b}{r_m \cdot E} \tag{II.1}$$

Où  $\Phi_s$  et  $\Phi_{s0}$  les flux à travers la sonde, associés respectivement à  $(V_b \neq 0)$  et  $(V_b = 0)$ ,  $r_m$  et le rayon effectif de la sonde,  $C_0$  la capacité formée par les surfaces des deux parties (S) et (E). Le champ  $E$  peut être déduit si l'on calcul la capacité  $C_0$ .

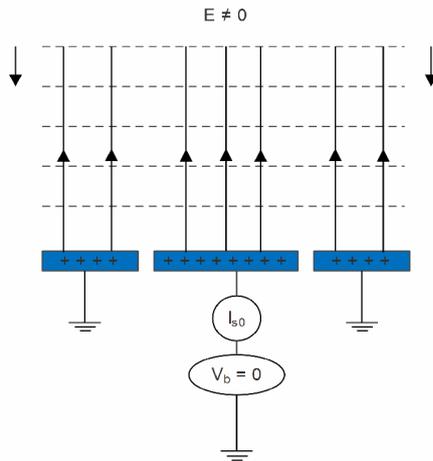


Fig. II.3a – Lignes de champs et équipotentiels

en présence de décharge électrique avec la sonde non polarisée [12].

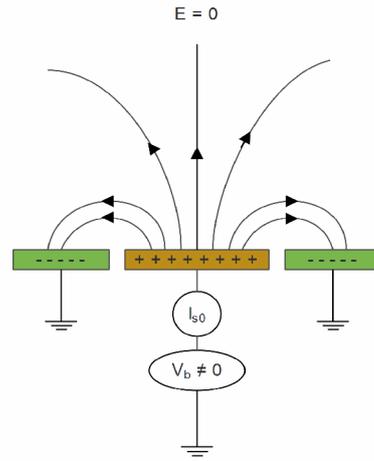


Fig. II.3b – Lignes de champs et

équipotentiels en absence de décharge électrique avec la sonde polarisée [12].

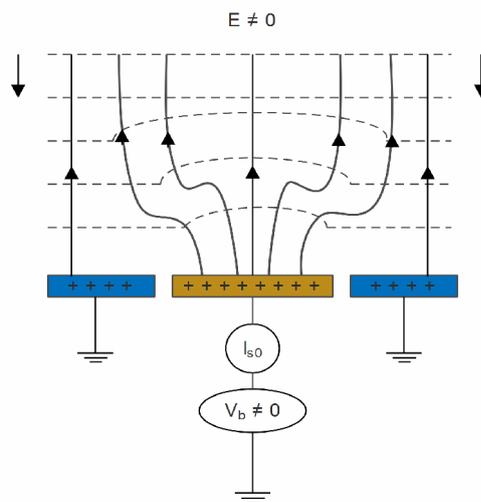


Fig. II.3c – Lignes de champs et équipotentiels

en présence de décharge électrique avec la sonde polarisée [12].

Tassicker a utilisé une expression analytique donnée par Spence [43] :

$$C_0 = 4 \cdot r_m \cdot \varepsilon_0 \cdot \left[ 1,07944 + 0,5 \cdot \ln \left( \frac{1+r_m}{2 \cdot g} \right) \right] \quad (\mu\text{F}) \quad (\text{II.2})$$

La relation (II-1) donne une caractéristique  $I_s/I_{s0} = f(V_b)$  linéaire. Cependant, aux fortes valeurs de  $V_b$ , lorsque le champ de polarisation  $E_b$  (dû à la tension  $V_b$ ) devient supérieur au champ électrique  $E$  à mesurer, il se produit une déviation de la caractéristique par rapport à la linéarité. L'étude expérimentale développée par Tassicker [40] et plus tard, par d'autres auteurs [3, 34], montre cette tendance.

Le collecteur de sonde est également utilisé pour mesurer la densité de courant normale  $J$  quand la sonde est non polarisée ( $V_b = 0$ ) [44], la relation qui nous permet de calculer cette densité est la suivante :

$$J = \frac{I_0}{\pi \cdot r_m^2} \quad (\text{mA/m}^2) \quad (\text{II.3})$$

### II.3 Calcul du champ électrique $E$ :

Le calcul du champ électrique  $E$  est basé sur la mesure du courant  $I$  collecté par la surface  $S_s$  de la sonde. Ce courant peut s'écrire :

$$I = J \cdot S_s \quad (\text{II.4})$$

$$J = \frac{\mu \cdot \rho}{\varepsilon_0} \cdot D \quad (\text{II.5})$$

$$I = \frac{\mu \cdot \rho}{\varepsilon_0} \cdot D \cdot S_s = \frac{\mu \cdot \rho}{\varepsilon_0} \cdot \phi_s \quad (\text{nA}) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

- ✓  $\mu$  : Mobilité moyenne des ions [ $\text{m}^2/\text{V.s}$ ] ;
- ✓  $\rho$  : Densité de la charge d'espace [ $\text{C}/\text{m}^3$ ] ;
- ✓  $D$  : Vecteur du déplacement électrique ;

- ✓  $\phi_s$  : Flux du vecteur D à travers la sonde ;
- ✓  $S_s$  : Surface réelle de la sonde ;
- ✓  $J$  : Densité de courant électrique ;
- ✓  $\epsilon_0$  : Permittivité électrique du vide ;

Lorsque la sonde est polarisée positivement, nous avons deux contributions du flux  $\Phi_s$ , l'un provenant du champ  $E$  à mesurer et l'autre provenant de la tension de polarisation  $V_b$ . Le flux  $\Phi_s$  à travers la sonde est donné par :

$$\phi_s = \phi_{s0} + \phi_{s1} \quad (\text{II.7})$$

Où  $\Phi_{s0}$  est le flux du champ à mesurer et  $\Phi_{s1}$  la contribution du champ de polarisation  $E_b$ . Ces flux sont donnés par :

$$\phi_{s0} = S_m \cdot E \cdot \epsilon_0 \quad (\text{II.8})$$

$$\phi_{s1} = C_0 \cdot V_b \quad (\mu\text{F} \cdot \text{V}) \quad (\text{II.9})$$

Avec  $S_m = \pi \cdot r_m^2$  est la surface effective de la sonde,  $r_m$  étant le rayon effectif et  $C_0$  est la capacité du condensateur constitué par la sonde (S) et l'électrode (E) [12].

#### II.4 Théorie de la sonde :

La difficulté se trouve aux extrémités de la sonde (S) et au tour de l'électrode (E). En effet, les chercheurs ont observés que le champ résultant dans ces zones après polarisation s'inverse à cause des fortes valeurs de  $E_b$ , ainsi le flux associé n'est plus opérationnel de même que la charge concernée. Alors, l'équation (II.1) qui se base sur l'égalité des quantités

$\frac{I}{I_0}$  et  $\frac{\phi_s}{\phi_{s0}}$  n'est plus valable. Selim et Waters ont alors considéré deux cas :

- **Cas où  $E_b$  s'oppose à  $E$  :**

On observe l'inversement du champ résultant au point  $r_l$  qui fait partie de la sonde, **figure (II.4)**.

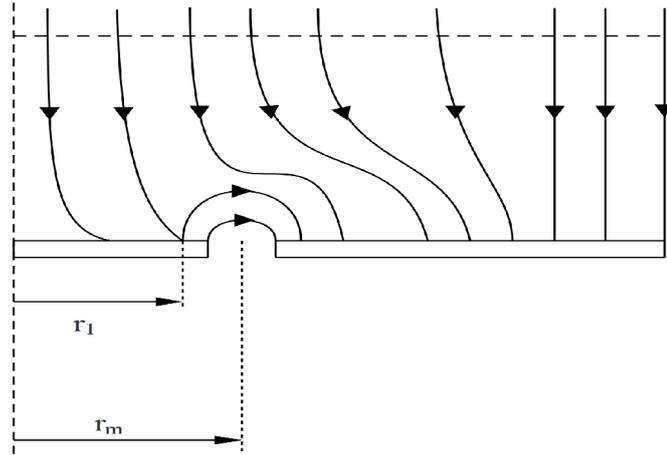


Fig. II.4 – Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée négativement [12].

Lors de l'application d'une tension  $V_b$  non nulle, le flux à travers la sonde est donné par :

$$\phi_s = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \int_0^{r_l} (E - E_b) \cdot r \cdot dr \quad (\text{II.10})$$

$r_l$  est le point appartenant à la sonde où  $E + E_b = 0$ . Le flux à travers la sonde (S), pour  $V_b = 0$  est donné par :

$$\phi_s = \pi \cdot r_m^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E \quad (\text{II.11})$$

A partir des équations (II.10) et (II.11), on peut déduire le rapport des courants comme suit :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\phi_s}{\phi_{s_0}} = \frac{2}{r_m^2 \cdot E} \cdot \int_0^{r_l} (E - E_b) \cdot r \cdot dr \quad (\text{II.12})$$

- **Cas où  $E_b$  s'ajoute à  $E$  :**

Dans ce cas, le champ résultant s'inverse en un point  $r_2$  appartenant à l'électrode (E), **figure (II.5)** où  $E + E_b = 0$ .

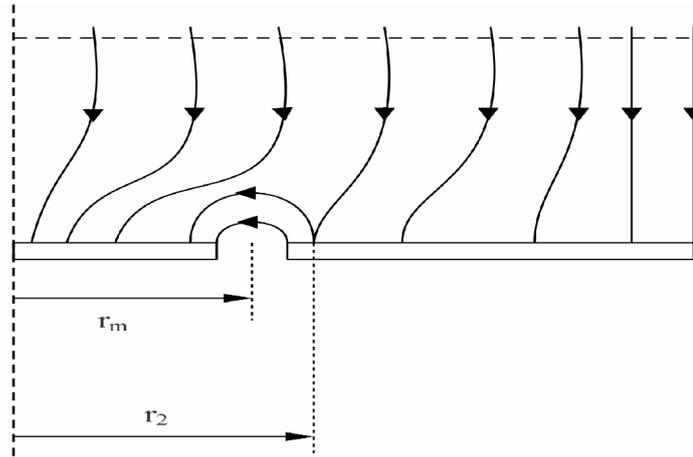


Fig. II.5 – Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée positivement [12].

Le rapport  $\frac{I}{I_0}$  est donné par :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{E \cdot R_b^2 - 2 \cdot \int_{r_2}^{R_b} (E - E_b) \cdot r \cdot dr}{E \cdot r_m^2} \quad (\text{II.13})$$

Lorsqu'on approxime successivement  $r_1 = r_m$  (à  $V_b < 0$ ) et  $r_2 = r_m$  (à  $V_b > 0$ ), les équations (II.12) et (II.13) deviennent identiques à l'équation (II.1) donné par Tassicker. L'approximation n'est pas justifiée dans le cas de faibles valeurs de  $V_b$  car une grande partie du flux provient de la polarisation de la sonde dans les régions situées entre  $r_1$  et  $r_m$  pour les polarisations négatives ( $V_b < 0$ ) et entre  $r_2$  et  $r_m$  pour les polarisations positives ( $V_b > 0$ ).

L'utilisation des équations (II.12) et (II.13) pour déterminer le champ  $E$  appliqué nécessite un calcul numérique du champ local  $E_b$ . La méthode de calcul présente des difficultés aux extrémités de la sonde (S) et de l'électrode (E).

Le modèle de Selim et Waters nécessite un calcul numérique du champ local  $E_b$  où la méthode est complexe. Nous optons ainsi pour la méthode de Tassicker pour sa simplicité dans les mesures du champ électrique [12].

## II.5 Détermination des paramètres de la décharge couronne :

### II.5.1 Détermination de la densité de courant ( $J$ ) au plan :

Nous avons vu précédemment, que la sonde (S) de Tassicker nous permettait de mesurer la densité du courant de décharge  $J$  au plan lorsqu'elle n'est pas polarisée. La densité du courant est donnée par la relation suivante :

$$J = \frac{I_{s0}}{S_m} \quad (\text{mA/m}^2) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

- $I_{s0}$  : Le courant de décharge collecté par la sonde lorsqu'elle n'est pas polarisée ( $V_b=0$ ).
- $S_m$  : La surface effective de la sonde ( $S_m = \pi \cdot r_m^2$ ).
- $r_m$  : Le rayon effectif de la sonde ( $r_m = (r_e + r_s)/2$ ).

### II.5.2 Détermination du champ électrique ( $E$ ) au plan :

Le champ électrique  $E$  au plan est déterminé par la relation (II.1), que nous rappelons ci-dessous :

$$\frac{I_s}{I_{s0}} = \frac{\phi_s}{\phi_{s0}} = 1 + \frac{C_0}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{V_b}{r_m \cdot E}$$

Le principe est d'évaluer la pente  $P_e$  de la caractéristique expérimentale  $I_s/I_{s0} = f(V_b)$ .

L'évaluation se fera pour des faibles valeurs de la tension de polarisation  $V_b$  pour lesquelles la caractéristique expérimentale est linéaire.

Par identification avec l'équation (II.2) on aura :

$$P_e = \frac{C_0}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \epsilon_0 \cdot E} \quad (\text{II.15})$$

D'où la valeur du champ  $E$  au plan :

$$E = \frac{C_0}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \epsilon_0 \cdot P_e} \quad (\text{Kv/m}) \quad (\text{II.16})$$

### II.5.3 Détermination de la conductivité ( $\sigma$ ) de l'effet couronne près du plan :

Lorsqu'un faible champ électrique est appliqué à une électrode active, la conductivité moyenne de l'air inter-électrode est constante (de l'ordre de  $10^{-12}$  ( $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )). Le phénomène de conduction est ohmique. Mais en augmentant la valeur du champ appliqué, la conduction ohmique n'est plus respectée à partir d'une certaine valeur de ce champ. La loi courant-tension n'est plus linéaire, elle obéit à la loi quadratique formulée par Townsend [11, 45].

La conductivité  $\sigma$  est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (\text{II.17})$$

Donc pour déterminer la conductivité  $\sigma$  de l'effet couronne au voisinage immédiat du plan mis à la terre, il suffit de mesurer la densité du courant  $J$  et le champ électrique  $E$  sur le plan [42].

### II.6 Conclusion :

Dans ce deuxième chapitre, on s'est intéressé à l'étude théorique de la sonde polarisée circulaire de Tassicker, vu son importance majeure dans la détermination des paramètres de la décharge couronne (la densité de courant  $J$ , le champ électrique  $E$ , et la conductivité  $\sigma$ ).

## *Chapitre III*

### III.1 Introduction :

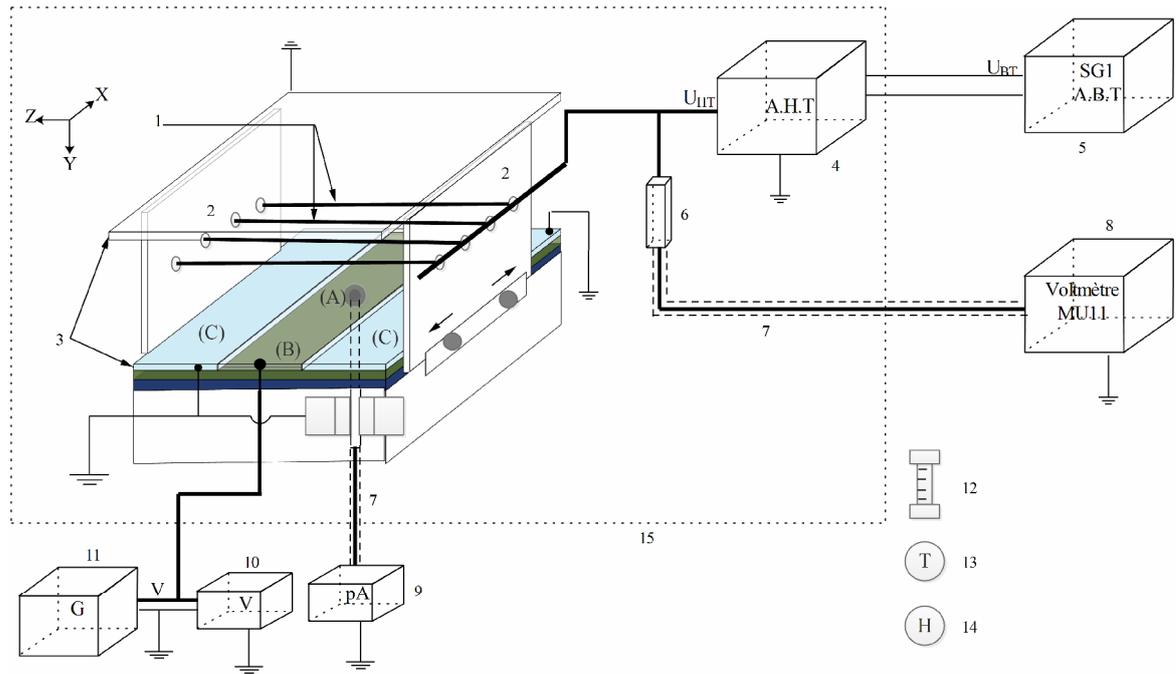
Dans ce troisième chapitre, nous allons présenter l'étude expérimentale pour la détermination des paramètres électrique de la décharge couronne continue positive en géométrie multi-fils – 2 plans.

Pour avoir la décharge couronne, il est nécessaire d'appliquer une tension suffisante qui se situe au-dessus d'une tension seuil d'apparition de l'effet couronne. Cela passe par le relevé de la caractéristique courant-tension de la décharge. Dans un second temps, on a mesuré le champ électrique sur la surface du plan mis à la terre grâce à la sonde circulaire présentée dans le chapitre II. Le principe des essais consiste à mesurer le courant collecté par la sonde et cela pour différentes tensions de polarisation  $V_b$ , à tension appliquée aux conducteurs constante. Pour relever des mesures sur plusieurs points de la surface du plan, il suffit de déplacer le support sur lesquels sont suspendues les électrodes actives par rapport au centre de la sonde. Par la suite, toutes les mesures relevées nous permettent de déterminer les distributions du champ électrique  $E$  et de la densité de courant  $J$  à la surface du plan.

### III.2 Présentation du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental utilisé se compose d'une source de haute tension continue et du système d'électrodes isolés par une grille de protection (15) d'un ensemble d'appareils basse tension, **figure (III.1)**.

La source de haute tension continue (4), résultante de l'élévation et du redressement d'une tension alternative variable (5), alimente des électrodes actives (1). Ces dernières sont accrochées horizontalement par deux supports isolants en plexiglas (2) à mi-chemin entre deux plans mis à la terre (3). On a connecté un pico-ampèremètre (9) au collecteur de la sonde (A) afin de faire la mesure du courant issu de la décharge couronne. Le plan de mesure (B) est relié à une alimentation continue basse tension (11). Dans le but de mesurer la tension de polarisation  $V_b$ , on a connecté un voltmètre numérique (10) aux bornes de l'appareil (11). On dispose aussi d'un baromètre à mercure (12), d'un thermomètre à mercure (13) et d'un hygromètre à cheveux (14) pour mesurer les paramètres physiques de l'air ambiant.



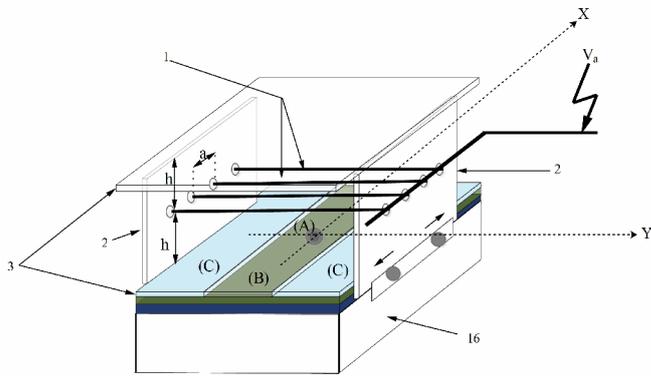
- |                                       |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| (A) : Collecteur de courant.          | 7 : Câbles coaxiaux.             |
| (C) : Plans de garde.                 | 8 : Voltmètre de crête (MU11).   |
| (B) : Plan de mesure.                 | 9 : Pico-ampèremètre.            |
| 1 : Electrode active.                 | 10 : Voltmètre numérique.        |
| 2 : Supports des électrodes.          | 11 : Alimentation basse tension. |
| 3 : Plans de collections.             | 12 : Baromètre à mercure.        |
| 4 : Alimentation haute tension.       | 13 : Thermomètre à mercure.      |
| 5 : Alimentation basse tension (SG1). | 14 : Hygromètre à cheveux.       |
| 6 : Résistance haute tension.         | 15 : Grille d'isolation.         |

Fig. III.1 – Figure représentative du dispositif expérimental [2].

### III.2.1 Composition du dispositif :

Le dispositif est constitué de deux plans de collection parallèles (3) et d'un ensemble de fils (1) de rayons  $R_f = 0,2mm$  mis sous haute tension et qui sont accrochés horizontalement à mi-chemin entre les plans, **figure (III.2a)**. Les fils sont espacés entre eux d'une distance  $a$  (40mm et 60mm) et situés à une distance  $h = 50mm$  des plans de mesures. Une tension continue  $V_a$ , délivrée par une source de haute tension variant entre 0 et  $\pm 140$  KV est appliquée aux fils. Le collecteur de courant (A), d'un diamètre de  $\Phi = 4,7mm$  est

incorporé dans un même niveau de surface (figure (III.2d)) dans une électrode plane de forme rectangulaire (plan de mesure) laissant un intervalle d'air  $g = 0.15mm$  entre eux.



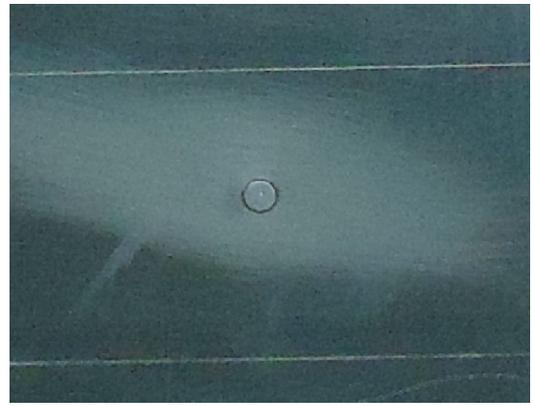
(a)



(b)



(c)



(d)

(A) : Collecteur de courant.

(C) : Plans de garde.

(B) : Plan de mesure.

1 : Electrodes actives.

2 : Supports des électrodes.

3 : Plans de collection.

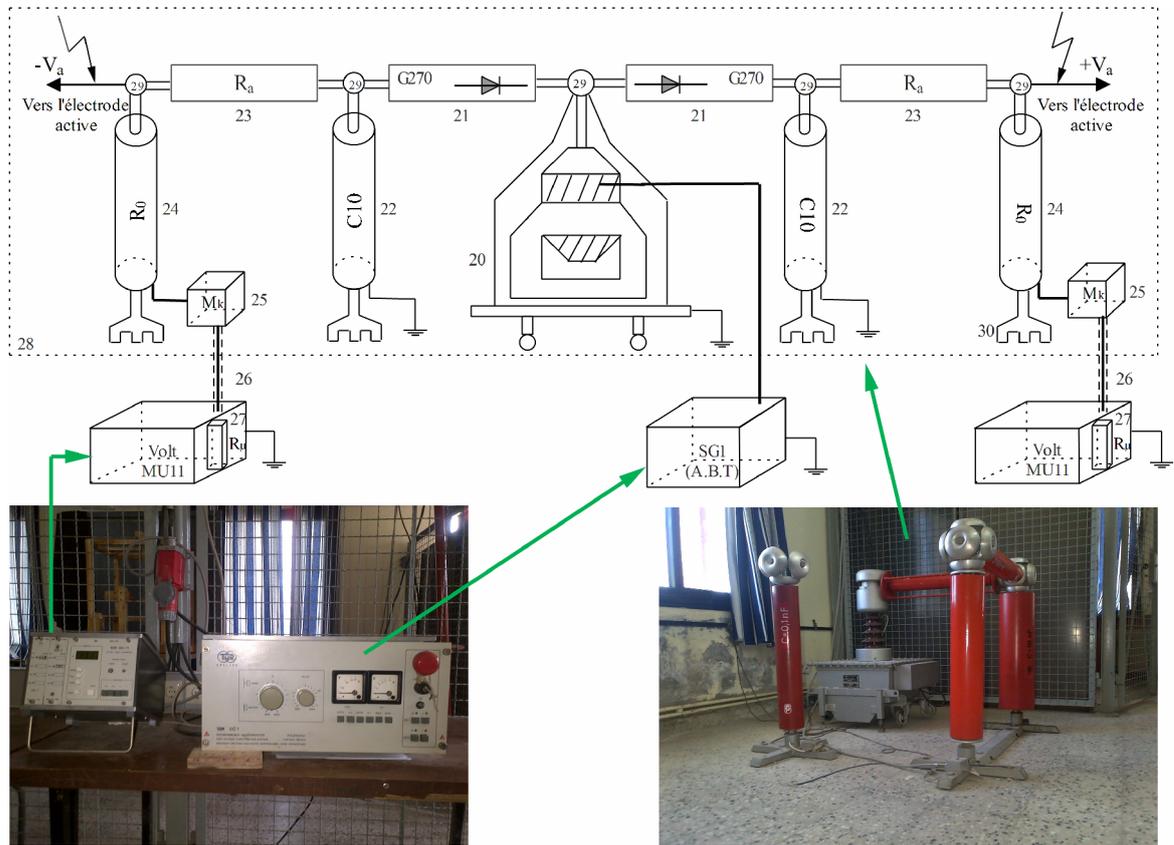
16 : Support en bois.

Fig. III.2 – Figure représentative de la composition du dispositif.

Les plans supérieur et inférieur sont faits d'acier inoxydable. Le plan inférieur est composé d'un plan de mesure (B) entouré de deux plans de garde (C). Les supports verticaux isolants (2) sont mis sur un système coulissant qui est fixé sur le support en bois (16), et cela dans le but de permettre le déplacement libre de l'ensemble.

III.2.2 Composition de la source de tension et du système de mesure :

Afin de mesurer les paramètres de la décharge couronne en configuration multi-fils – 2 plans, nous avons besoin d’une source de tension continue de polarité positive. Pour cela, nous avons utilisé une installation haute tension qui délivre des tensions variant de 0 à  $\pm 140Kv$ , continue ou alternative, de polarité positive ou négative, **figure (III.3)**.



SG1 : Alimentation basse tension.

26 : Câble coaxial.

20 : Transformateur haute tension (T100).

27 : Résistance basse tension ( $R_{\mu}$ ).

21 : Diode haute tension (G270).

MU11 : Voltmètre de crête.

22 : Condensateur de lissage (C10).

28 : Grille de protection.

23 : Résistance d’amortissement ( $R_a$ ).

29 : Nœuds de liaison.

24 : Résistance haute tension ( $R_0$ ).

30 : support d’éléments.

25 : Boîte de connexion.

Fig. III.3 – Figure représentative de l’installation haute tension utilisée [2].

Cette installation est composée :

- D'une source basse tension SG1 ;
- D'un transformateur haute tension T100, alimenté par la source SG1 ;
- De deux diodes haute tension G270 ;
- De deux condensateurs de lissage C10.

L'enroulement primaire du transformateur élévateur T100 (20) utilisé dans cette installation (ayant un faible pas de variation de 100 V environ et délivrant des hautes tensions) est alimenté par une source basse tension variable (SG1) via un câble (26). On a associé à ce transformateur deux redresseurs mono-alternance afin d'obtenir une haute tension continue. Chacun de ces deux redresseurs sont constitués d'une diode haute tension (21) à base de silicium et d'un condensateur de lissage C10 (22) de capacité de 10nF. Une résistance  $R_a$  (23) de 106 k $\Omega$  relie le condensateur au système d'électrodes. Son rôle est d'amortir le courant, protégeant ainsi la diode des surintensités. Pour la mesure de la haute tension continue  $V_a$ , nous disposons d'un diviseur de tension résistif composé d'une résistance haute tension  $R_0$  (24) de 248,5 M $\Omega$  et d'une résistance basse tension  $R_u$  (27) de 501 k $\Omega$  incorporée dans le voltmètre de crête MU11. Ces deux résistances sont reliées par un câble coaxial (26) blindé [2].

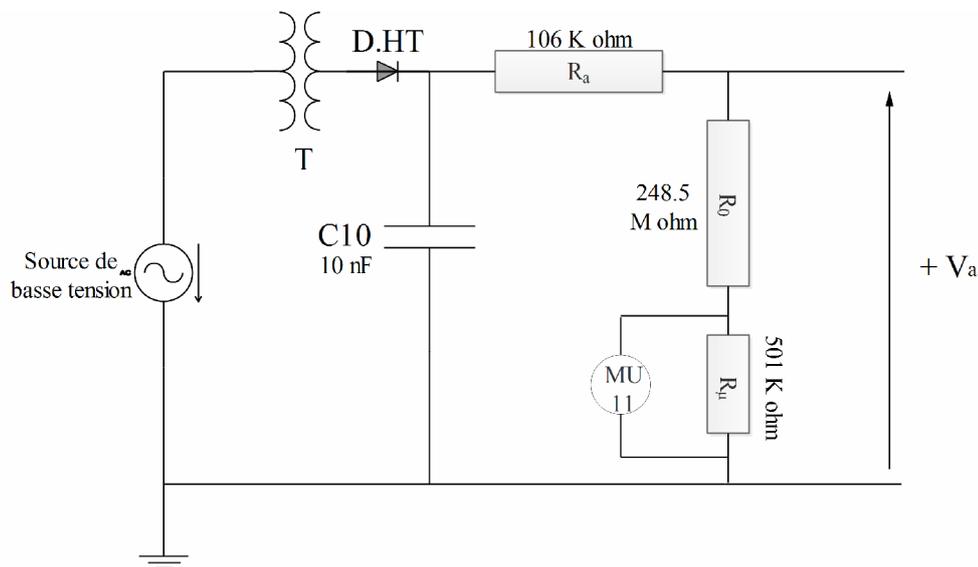


Fig. III.4 –Schéma électrique d'une partie de l'installation haute tension utilisée.

### III.3 Mesure de Tension :

#### III.3.1 Tension appliquée aux fils (électrodes actives):

Le diviseur résistif et le voltmètre de crête MU11 décrit précédemment nous permet la mesure de la tension appliquée  $V_a$  aux fils. Cela s'effectue par la mesure de la tension  $u$  aux bornes de la résistance basse tension  $R_u$  intégrée dans le voltmètre, et affiche ainsi numériquement la valeur de la tension appliquée  $V_a = k \cdot u$ , où  $k$  représente le rapport du diviseur. De plus, le voltmètre présente une résistance d'entrée  $R_e$  de 4.24 M $\Omega$  dont nous tenons compte dans l'évaluation du rapport  $k$  [2] :

$$k = \frac{R_0 \cdot R_e + R_0 \cdot R_u + R_u \cdot R_e}{R_u \cdot R_e} = 555,62 \quad (\text{III.1})$$

#### III.3.2 Tension de polarisation $V_b$ :

Le plan de mesure (B) est relié à une alimentation continue basse tension stabilisée (élément n°12 de la figure (III.1)), délivrant une tension  $V_b$  négative ou positive et pouvant varier de 0 à 250 V. Cette tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre numérique ayant une grande impédance d'entrée [2].

### III.4 Mesure de courant :

La mesure du courant  $I_s$  collecté par la sonde se fait par un pico-ampèremètre (élément n°10 de la figure (III.1)), ce dernier est relié par un câble coaxial blindé au collecteur (A). Pour obtenir de bonnes mesures, il faut s'assurer:

- Que la sonde est bien positionnée, d'une manière à ce qu'elle laisse un petit intervalle  $g$  entre elle et le plan de mesure ( $g = 0.15\text{mm}$  dans notre cas).
- Que le collecteur est au même niveau avec les plans de garde et de mesure.
- De nettoyer régulièrement la sonde et les plans avant chaque essai, pour éviter l'accumulation de poussière environnante qui causent par la suite l'apparition du courant de fuite [2].

### III.5 Mesure des paramètres physiques de l'air :

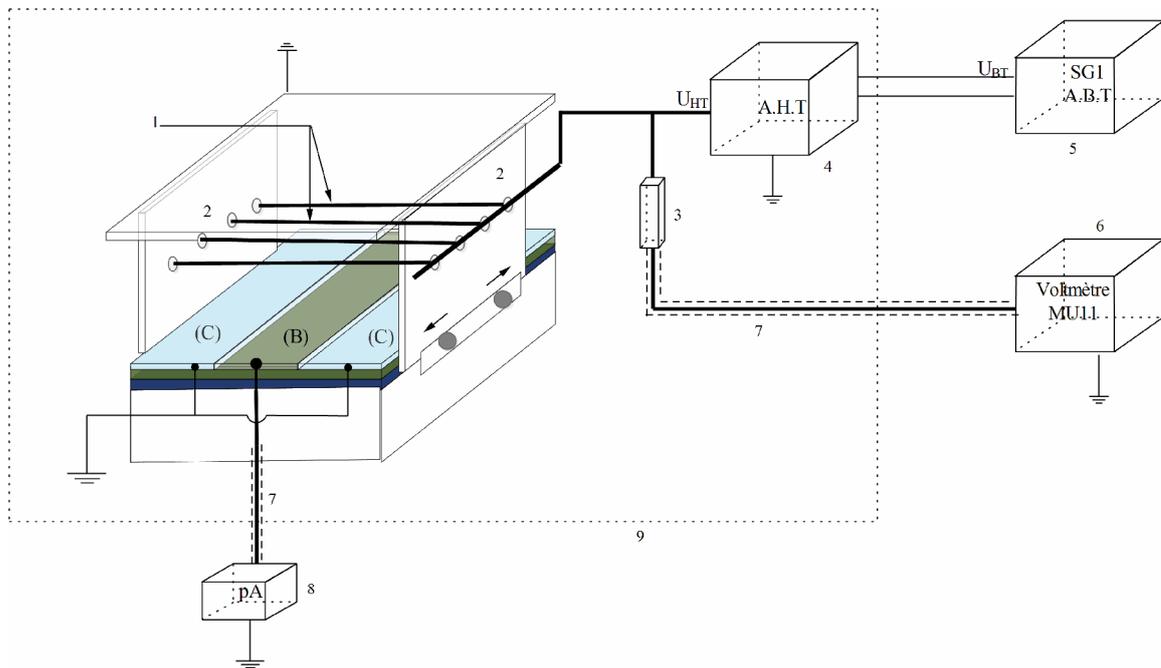
Pendant notre étude expérimentale, afin de relever les paramètres physiques de l'air qui sont considéré comme des paramètres influençant sur la décharge couronne, nous avons utilisé un baromètre à mercure (élément n°13 de la figure (III.1)) pour la pression, un

thermomètre à mercure (élément n°14 de la figure (III.1)) pour la température, et un hygromètre à cheveux (élément n°15 de la figure (III.1)) pour l'humidité [2].

**III.6 Caractéristique courant-tension :**

Avant d'effectuer la mesure du champ il faut fixer les niveaux de tension à appliquer aux électrodes actives (fils). Cependant, cela n'est possible que par le relevé de la caractéristique courant-tension ( $I(V)$ ).

La figure (III.5), représentée ci-dessous, montre le dispositif expérimental utilisé pour relever cette caractéristique.



- (B) : Plan de mesure.
- (C) : Plans de garde.
- 1 : Electrodes actives.
- 2 : Supports des électrodes.
- 3: Résistance haute tension.
- 4: Alimentation haute tension.
- 5 : Alimentation basse tension (SG1).
- 6 : Voltmètre de crête MU11.
- 7 : Câble coaxial.
- 8 : Pico-ampèremètre.
- 9 : Grille d'isolation.

Fig. III.5 – Dispositif expérimental pour le relevé de la caractéristique courant-tension.

Le relevé se fait généralement par un enregistreur, mais malheureusement nous n'avons pas eu cet appareil en notre possession, ce qui nous a incité à procéder de la sorte : On a relié le plan de mesure (B), via un câble coaxial, à un pico-ampèremètre, et cela pour

permettre la mesure du courant collecté par le plan. Le principe de l'essai consiste à augmenter lentement la tension ( $V_a$ ) appliquée aux électrodes actives d'un pas d'environ 1 KV, de la valeur  $V_1$  inférieure à la tension seuil  $V_s$  d'apparition de l'effet couronne, jusqu'à la valeur  $V_2$  supérieure à  $V_s$  et de noter à chaque fois la valeur du courant correspondante.

### III.7 Présentation et interprétation des résultats :

#### III.7.1 Caractéristique courant-tension relevée :

Les figures (III.6), (III.7), (III.8) et (III.9), représentées ci-dessous, illustrent les caractéristiques courant-tension de la décharge couronne en géométrie multi-fils – 2plans. On a étudié cette caractéristique en agissant sur différents paramètres, qui sont : Le nombre de fils utilisé, le diamètre des fils ( $2R_f$ ) et la distance inter-fils ( $a$ ), et cela afin de voir leurs influences sur le courant de décharge.

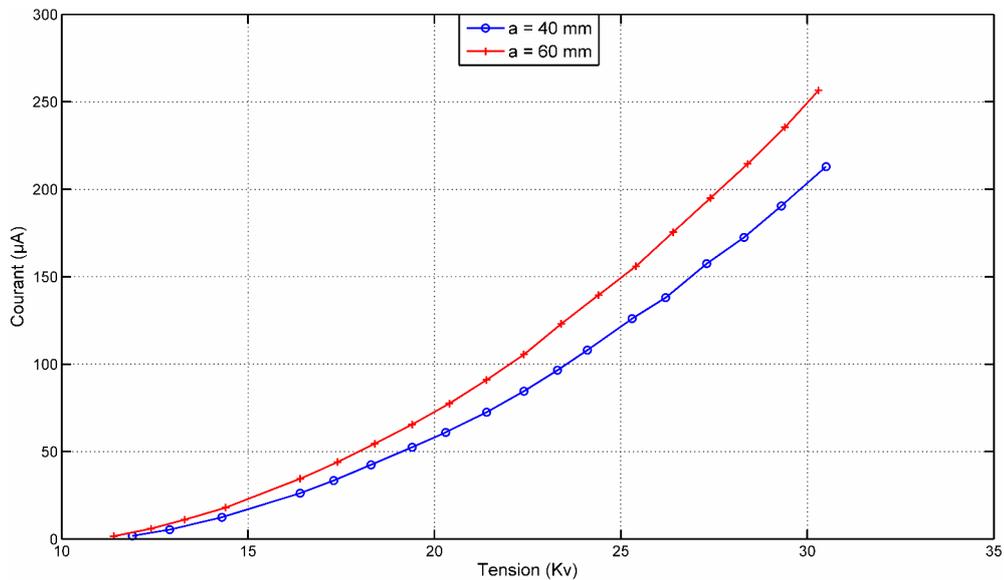


Fig. III.6 – Caractéristique courant-tension en géométrie 3 fils-2 plans.

(a = 40mm ; a = 60mm)

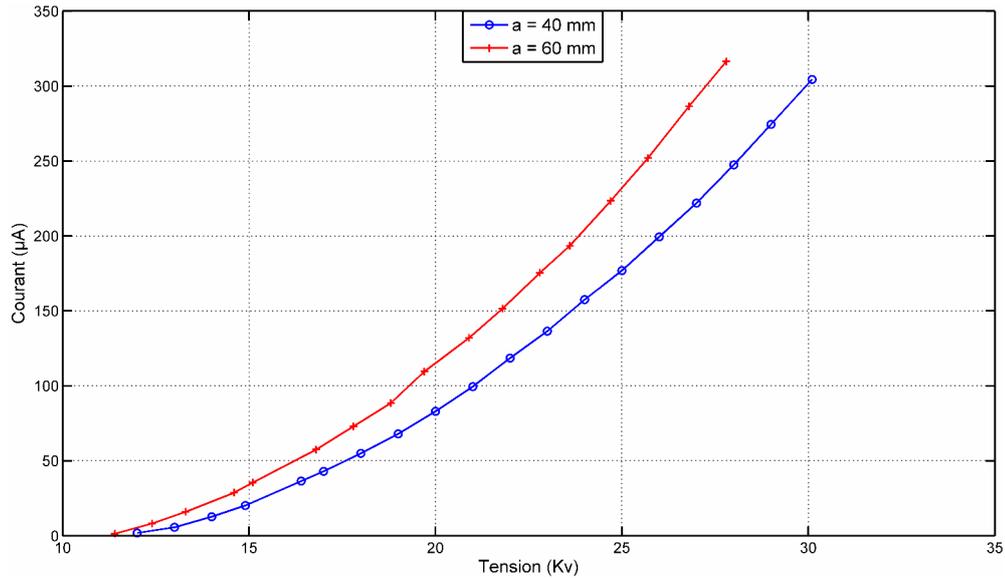


Fig. III.7 – Caractéristique courant-tension en géométrie 5 fils-2 plans.

( $a = 40\text{mm}$  ;  $a = 60\text{mm}$ )

D'après les courbes de la [figure \(III.6\)](#) et [\(III.7\)](#), on constate que le courant mesuré ( $I_m$ ) est proportionnel à la tension appliquée ( $V_a$ ), c'est-à-dire qu'en augmentant la tension appliquée le courant mesuré augmente lui aussi.

On note aussi, que la caractéristique courant-tension obtenue pour  $a = 40\text{mm}$  et pour  $a = 60\text{mm}$  diffère pour les deux cas (en utilisant 3 fils et 5 fils). En effet, pour une tension appliquée ( $V_a$ ) fixe, on observe une croissance remarquable du courant issu de la décharge couronne avec l'augmentation de l'espace inter-fils ( $a$ ). Ceci peut être attribué à l'effet d'armature exercé par chaque fil sur l'autre, principalement les fils au milieu de la nappe (les deux fils à l'extrémité sont moins exposés). En conséquence, le courant de la décharge émit des côtés opposés de deux fils adjacents est réduit. Cet effet augmente avec la diminution de l'espacement réduisant ainsi le courant dérivé de chaque fil et, par conséquent, tout le courant rassemblé au plan de mesure est réduit.

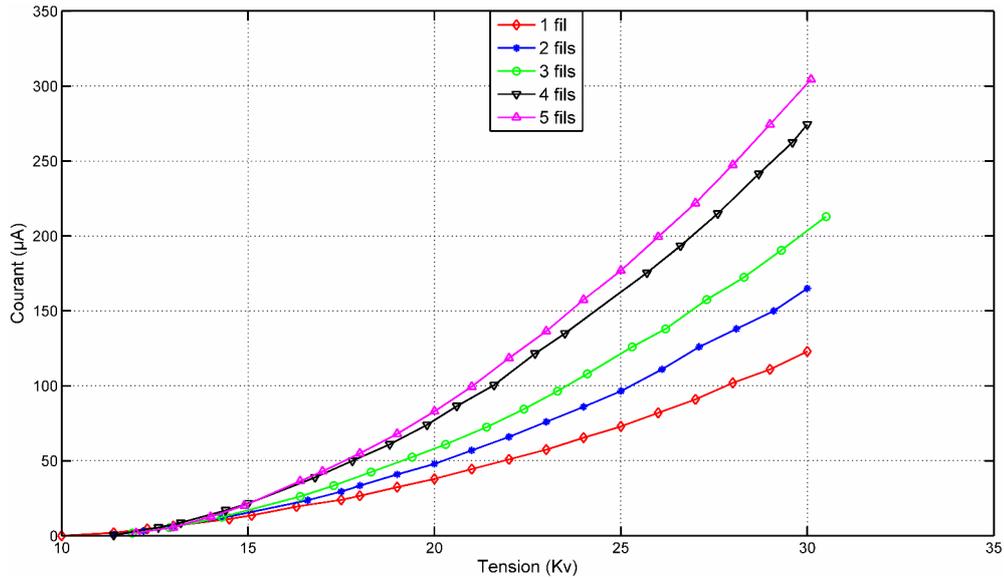


Fig. III.8 – Caractéristique courant-tension pour différents nombre de fils.

( $R_f = 0.2\text{mm}$  ;  $a = 40\text{mm}$ )

La figure (III.8) montre l’influence du nombre de fils sur le courant de décharge, on constate que le courant mesuré croit à chaque fois qu’on ajoute un fil. Ceci peut être expliqué par l’augmentation du nombre de régions ionisées autour de chaque fil, par conséquent l’augmentation du nombre d’ions positifs issus de cette ionisation.

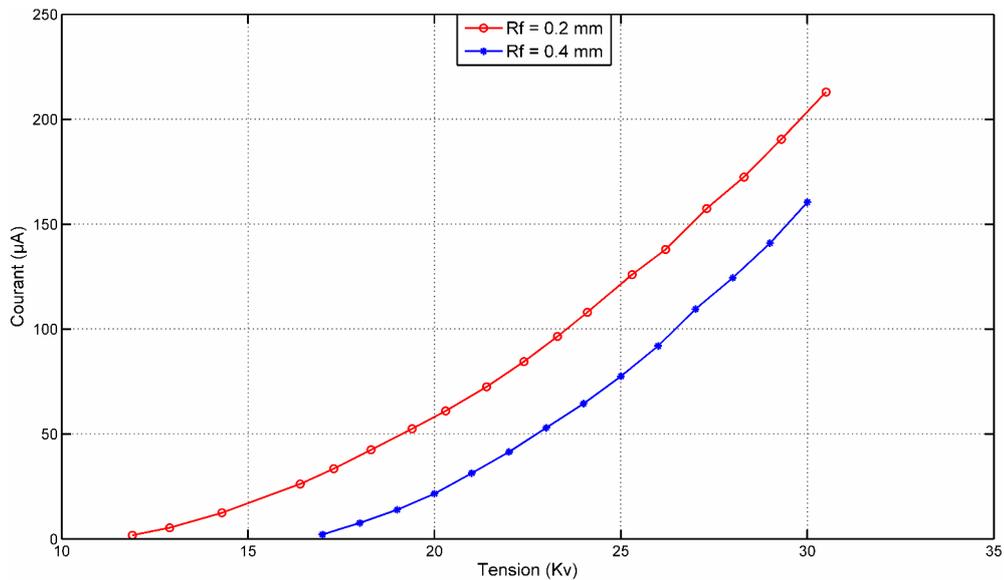


Fig. III.9 – Effet du diamètre du fil « $2R_f$ » sur la caractéristique courant-tension.

(configuration : 3fils-2plans avec  $a = 40\text{mm}$ )

La figure (III.9) représentée ci-dessus, illustre la caractéristique courant-tension en géométrie 3fils-2plans pour  $a = 40mm$  pour deux valeurs du rayon des fils ( $R_f$ ), à savoir 0.2 et 0.4 millimètre.

On note que le courant mesuré pour un fil de faible rayon de courbure (0.2mm) est plus élevé que celui mesuré avec un fil de grand rayon de courbure (0.4mm) et cela pour la même tension appliquée. On peut expliquer ça, par le fait que le champ est très intense à proximité d'une électrode active de faible rayon de courbure, contrairement à celle avec un grand rayon de courbure, par conséquent, il y'aura plus de charges produites, ce qui veut dire plus de courant collecté.

### III.7.2 La densité de courant ( $J$ ) :

Comme il a été défini au chapitre précédent (II.5.1), la densité de courant est obtenue en divisant le courant  $I_{s0}$  mesuré par le pico-ampèremètre en absence de polarisation ( $V_b = 0$ ), par la surface effective  $S_m$  ( $S_m = \pi \cdot r_m^2 = 18,4745mm^2$ ).

Les résultats représentés ci-dessous, sont obtenus pour différents niveaux de tensions appliquées (20, 23 et 26 Kv) et pour une tension de polarisation ( $V_b = 0$ ).

Il est utile de noter que la mesure de la densité de courant le long du plan (de position (-16cm) à la position (+16cm)), a été seulement faite pour une tension appliquée de 20KV et pour la configuration 3fils-2plans avec  $a = 40mm$ , cela afin de montrer la symétrie de la configuration par rapport à  $x=0$  ; mêmes valeurs obtenues sur le demi-plan positif ( $x>0$ ) que du côté négatif ( $x<0$ ).

#### III.7.2.1 Influence de la tension appliquée, de la distance inter-fils et du nombre de fils sur la densité de courant :

Les figures (III.10) et (III.11) montrent la distribution de la densité de courant ( $J(mA/m^2)$ ) le long du plan de mesure en fonction de la position ( $x(cm)$ ) en géométrie 3fils-2plans pour respectivement  $a = 40mm$  et  $a = 60mm$  dans des conditions atmosphériques.

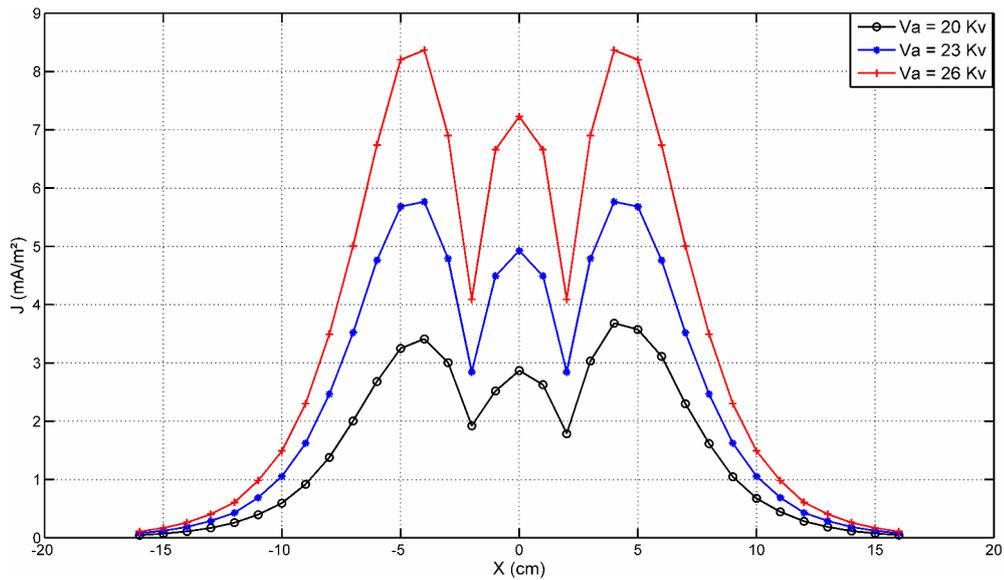


Fig. III.10 – Variation de la densité de courant  $J$  pour la configuration 3fils-2plans

( $h = 50\text{mm}$  ;  $a = 40\text{mm}$  ;  $T = 31^\circ\text{C}$  ;  $P = 754.5 \text{ mm Hg}$  ;  $hm = 54\%$ ).

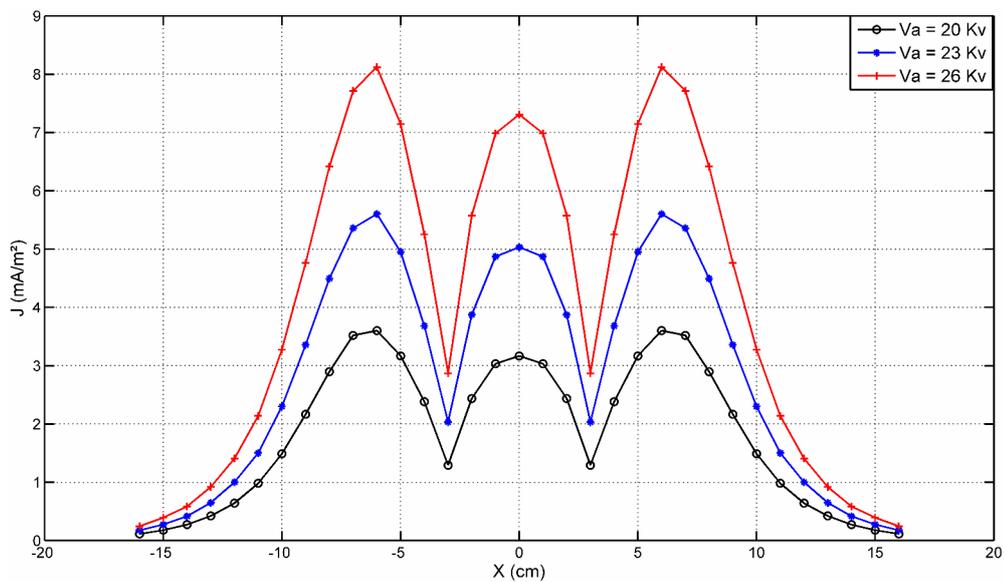


Fig. III.11 – Variation de la densité de courant  $J$  pour la configuration 3fils-2plans

( $h = 50\text{mm}$  ;  $a = 60\text{mm}$  ;  $T = 32^\circ\text{C}$  ;  $P = 755.5 \text{ mm Hg}$  ;  $hm = 60\%$ ).

A première vue, on observe que les graphes sont sous forme d'une vague et présentent des valeurs de densité de courant élevées aux points de position (-4, 0, et 4) et (-6, 0, et 6) pour respectivement  $a = 40\text{mm}$  et  $a = 60\text{mm}$ . Cela revient au fait qu'aux pieds des fils la densité de courant est maximale, puis diminue graduellement partant de là. Il convient aussi

de noter que les deux fils aux extrémités de la configuration présente les valeurs les plus élevées de la densité de courant contrairement à celui du milieu. En effet, l'effet mutuel entre les fils entraîne la réduction de l'émission du courant de la décharge couronne, excepté les deux fils externes qui sont influencés par seulement un fil voisin.

Les figures (III.12) et (III.13) illustrent la distribution de la densité de courant ( $J(mA/m^2)$ ) le long du plan de mesure en fonction de la position ( $x(cm)$ ) en géométrie 5fils-2plans pour respectivement  $a = 40mm$  et  $a = 60mm$  dans des conditions atmosphériques.

D'après les courbes représentées ci-dessous, on distingue de fortes densités de courant aux points de positions (-8, -4, 0, +4 et +8) et (-12, -6, 0, +6 et +12), qui correspondent aux positions situées aux pieds des fils. On note d'avantage, que les valeurs de ses densités diminuent graduellement en partant des fils de l'extrémité vers ceux du milieu.

Les explications qu'on peut apporter à toutes ses observations pour cette géométrie, sont les mêmes que celles faites pour la configuration 3fils-2plans. La seule différence réside dans le nombre de fils utilisés, ce qui implique la mesure d'une densité un peu plus importante (cf. figure III.14).

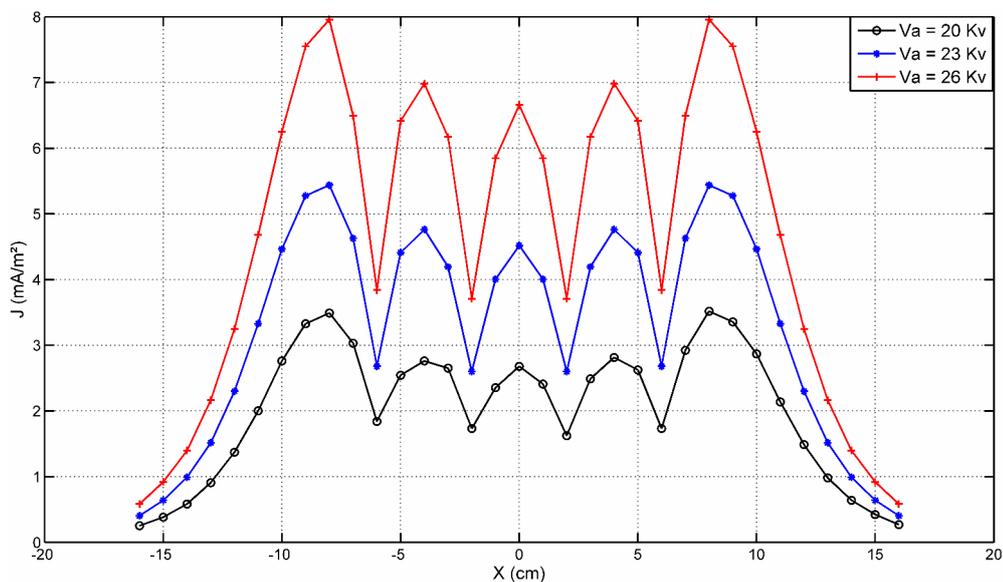


Fig. III.12 – Variation de la densité de courant  $J$  pour la configuration 5fils-2plans

( $h = 50mm$  ;  $a = 40mm$  ;  $T = 32.9\text{ }^{\circ}C$  ;  $P = 752.8\text{ mm Hg}$  ;  $hm = 58\%$ ).

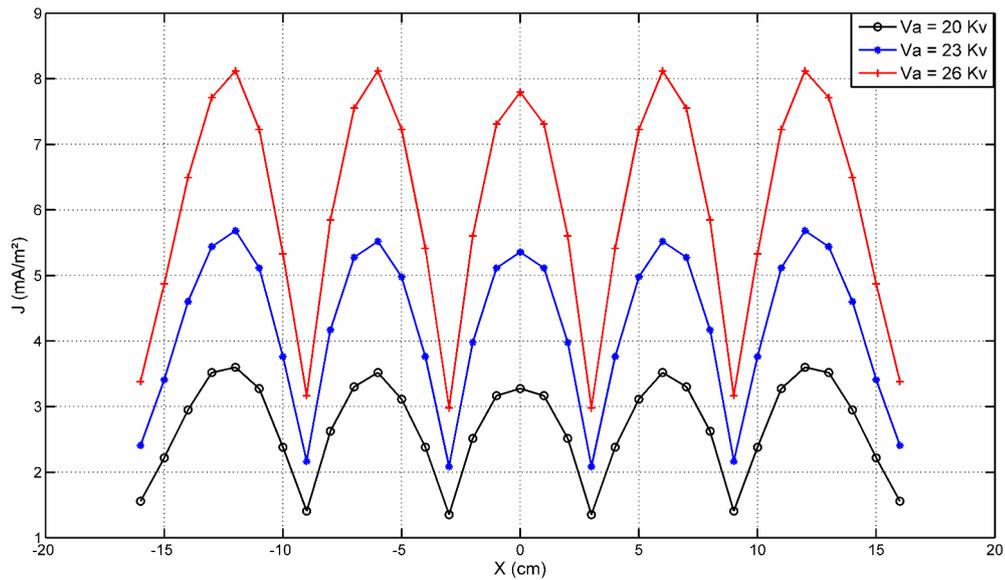


Fig. III.13 – Variation de la densité de courant  $J$  pour la configuration 5fils-2plans

( $h = 50\text{mm}$  ;  $a = 60\text{mm}$  ;  $T = 31.5\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $P = 754.5\text{ mm Hg}$  ;  $hm = 52.5\%$ ).

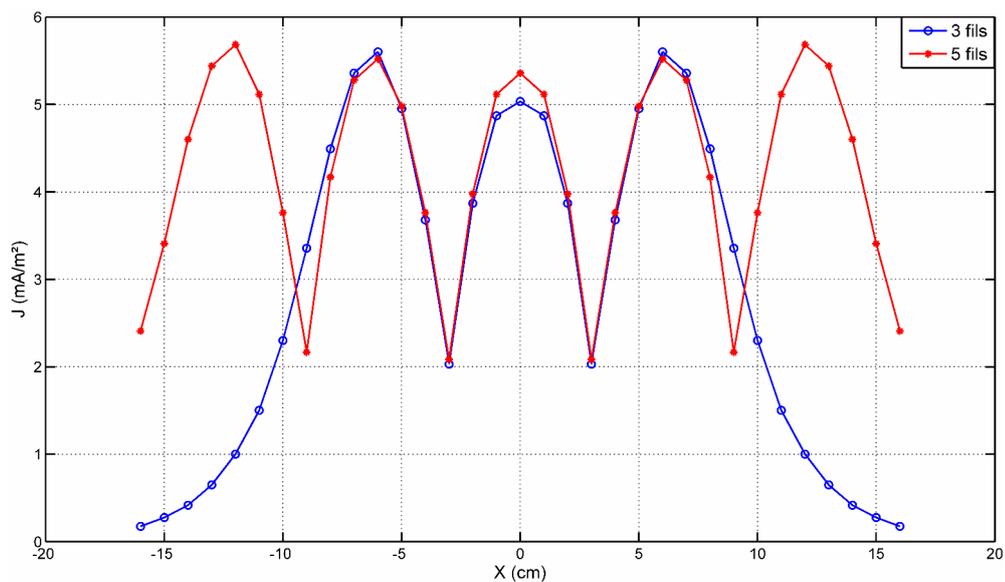


Fig. III.14 – influence du nombre de fils sur la densité de courant  $J$ .

On note aussi que la densité de courant est proportionnelle à l'espacement ( $a$ ), autrement dit : les valeurs de la densité de courant sont légèrement plus élevées pour une distance inter-fils de  $a = 60\text{mm}$  par rapport à  $a = 40\text{mm}$ , la **figure (III.15)** nous montre cette différence pour une tension appliquée de  $23\text{Kv}$  (idem pour les autres tensions et pour la configuration 3fils-2plans). Comme expliqué précédemment, le courant de la décharge émit des côtés opposés de deux fils adjacents est réduit à cause de l'effet d'armature exercé par

chaque fil de l'autre, principalement les fils au milieu de la nappe (les deux fils à l'extrémité sont moins exposés).

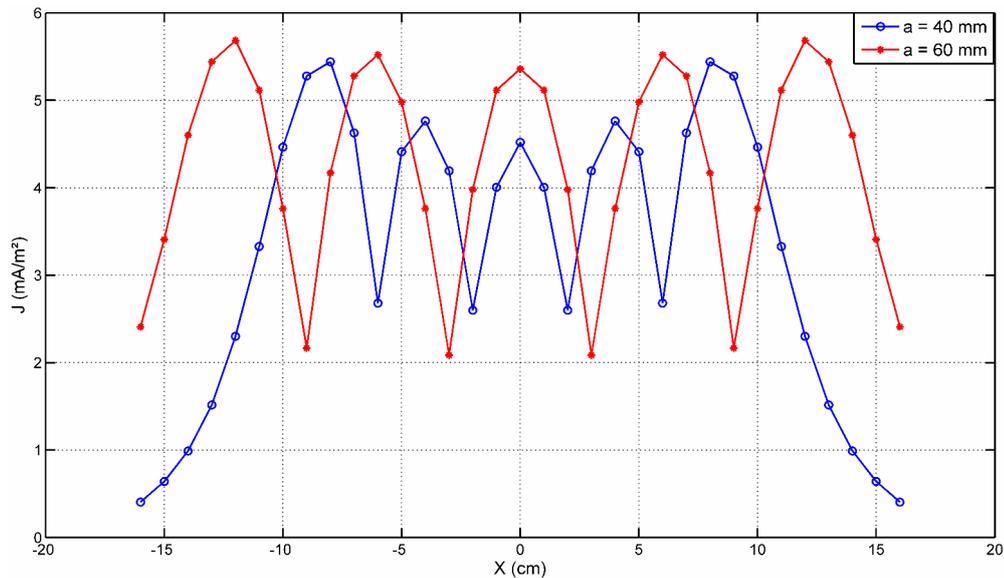


Fig. III.15 – Influence de l'espacement ( $a$ ) sur la densité de courant  $J$ .

### III.7.3 Le champ électrique ( $E$ ) :

Dans ce qui suit, le relevé des courbes est réalisé en appliquant différentes tensions (20 et 23 KV) assez suffisantes pour la création de la décharge couronne, la détermination du champ électrique  $E$  en un point donné du plan de mesure se fait par la mesure des courants collectés par la sonde en ce point. On a tout d'abord mesuré le courant  $I_{s0}$  issu de la décharge pour  $V_b=0$ . En polarisant la sonde, on a relevé pour différentes valeurs de  $V_b$  les courants  $I_s$ . Pour déterminer le champ en un autre point du plan, il suffit de déplacer (dans la direction de l'axe des  $x$ ) les supports en plexiglas sur lesquels sont suspendus les fils par rapport à la sonde. Les données expérimentales ainsi recueillies sont introduites dans un programme informatique. Le programme de calcul, établi sous le logiciel Matlab et basé sur la théorie de la sonde polarisée circulaire, nous a permis de déterminer la valeur du champ électrique  $E$  pour chaque valeur du rapport  $I_s/I_{s0}$  correspondant à une tension de polarisation. La valeur du champ en ce point est alors estimée en prenant la moyenne de ces différentes valeurs.

Les résultats expérimentaux qu'on présente sont réalisés pour la configuration multi-fils-2 plans où le diamètre des conducteurs est fixé à 0,4 mm [2].

Comme pour la densité de courant, la vérification de l'existence d'une symétrie a été faite pour une valeur de 20 Kv seulement de la tension appliquée, pour la configuration 3fils-2plans et pour  $a = 40\text{mm}$ .

### III.7.3.1 Influence de la tension appliquée et du nombre de fils sur le champ électrique :

Les figures (III.16) et (III.17) montrent les allures de la distribution du champ électrique  $E$  (KV/m) en fonction de la distance du plan  $x$ (cm) pour respectivement des distance inter-fils de  $a = 40\text{mm}$  en configuration 3fils-2plans et 5fils-2plans.

On note tout d'abord que le champ électrique est proportionnel à la tension appliquée et cela pour les deux géométries. Cela revient à l'augmentation du nombre de décharges émises.

On constate aussi, que la distribution du champ électrique aux points de positions  $[(-4, 0, +4) ; (-8, -4, 0, +4, +8)]$  pour  $a = 40\text{mm}$  (correspondant aux positions situées aux pieds des fils) présente des valeurs élevées, puis diminue progressivement dans la zone inter-fils, formant ainsi des ondulations uniformes. En effet, l'accroissement du champ électrique est dû au fait qu'au dessous des fils la charge d'espace  $\rho$  est la plus concentrée (le champ engendré par la charge d'espace et celui engendré par l'application de la tension ont le même sens) et que la distance conducteur-plan est minimale. Par contre, la diminution progressive du champ électrique au voisinage du fil s'explique par le fait que le champ issu de l'application de la tension et celui dû aux charges d'espaces se retranchent.

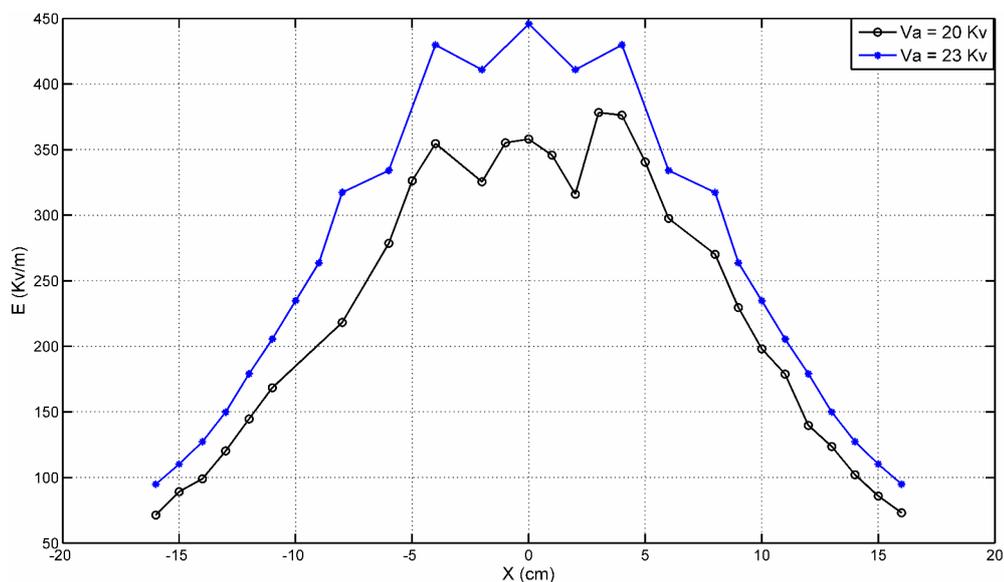


Fig. III.16 – Variation du champ électrique  $E$  pour la configuration 3fils-2plans

( $h = 50\text{mm}$  ;  $a = 40\text{mm}$  ;  $T = 31\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $P = 754.5\text{ mm Hg}$  ;  $hm = 54\%$ ).

On ajoute à toutes ses observations que le champ électrique présente la même allure que celle de la densité de courant. Cependant, la seule différence réside dans son uniformité. En effet, d'après l'hypothèse de Kaptzov : « la hausse du champ résulte directement de l'augmentation de la production de la charge d'espace sur l'électrode active et qui est due à son tour à l'augmentation de la valeur du coefficient d'ionisation » [46]. Comme on a utilisé le même diamètre des fils ainsi qu'une même tension appliquée, cela implique l'obtention du même champ sur chaque fil (égale au champ seuil), par conséquent, la mesure d'une même valeur du champ aux pieds des fils.

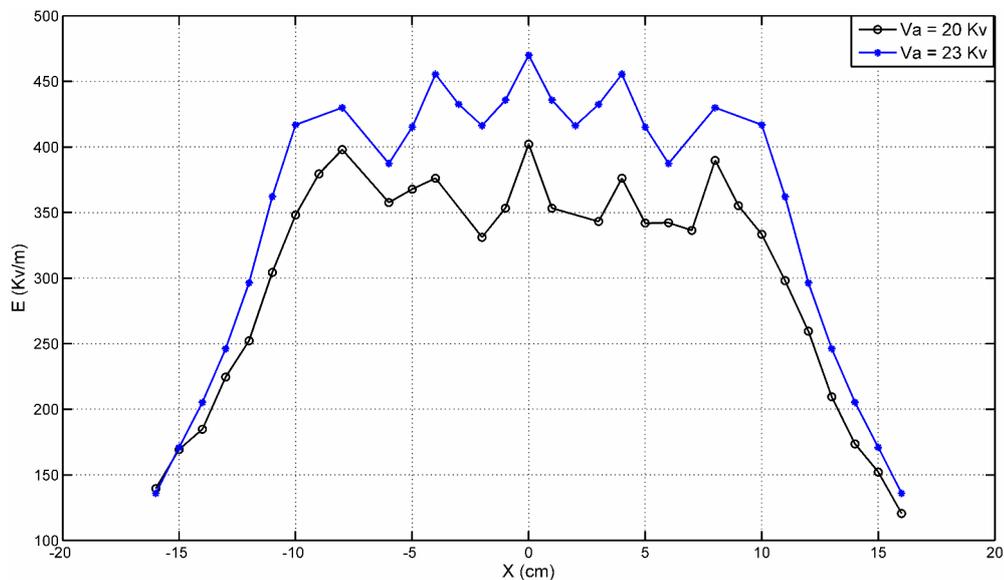


Fig. III.17 – Variation du champ électrique  $E$  pour la configuration 5fils-2plans

( $h = 50\text{mm}$  ;  $a = 40\text{mm}$  ;  $T = 32.9\text{ }^\circ\text{C}$  ;  $P = 752.8\text{ mm Hg}$  ;  $hm = 58\%$ ).

Pour illustrer la délicatesse de la mesure du champ, on a réalisé une expérience qui consistait à voir l'influence d'ajouter (ou soustraire)  $0.5\text{nA}$  aux valeurs des courants  $I_s$  (de l'ordre de  $100\text{ nA}$ ) obtenues lors d'une série de mesure pour une position fixe ( $x$ ). On a introduit par la suite ces résultats dans un programme de calcul réalisé avec le logiciel matlab. Après simulation, on a remarqué une variation considérable du champ allant du simple au double par rapport à la valeur obtenue avant l'introduction de l'erreur simulée ( $0.5\text{nA}$ ).

**III.8 Conclusion :**

D'après les résultats obtenus, on a constaté que les paramètres qui régissent la décharge couronne ; la caractéristique courant-tension, la densité de courant ainsi que le champ électrique augmentent avec l'augmentation de la tension appliquée et que ces deux derniers présentent un même profil au plan (leurs valeurs respectives présentent toutes un maximum aux pieds des conducteurs et diminuent en partant de là).

On note aussi que ces paramètres sont influencés par le nombre de fils utilisés, la distance inter-fils ainsi que le diamètre des fils choisis.

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Ce document nous a permis de présenter le contexte général dans lequel s'insère notre projet de fin d'étude, qui est consacré à l'étude expérimentale de la décharge couronne en géométrie multi-fils – deux plans. Les résultats présentés dans ce manuscrit ont été obtenus après plusieurs séries d'expériences menées au Laboratoire de haute tension de l'université Abderrahmane Mira de Bejaia.

Ce document comporte trois chapitres, les deux premiers sont théoriques et traitent d'une manière générale la théorie de la décharge couronne ainsi que celle de la sonde polarisée circulaire de Tassicker. Le troisième est purement expérimental et vise à déterminer les paramètres qui gouvernent la décharge couronne, à savoir : la caractéristique courant-tension, la densité de courant ainsi que le champ électrique. Ce dernier s'avère être le plus délicat et le plus important à mesurer.

Pendant nos expériences, on a veillé à :

- Eliminer les effets de bords et les courants de fuites par la mise en place de plans de gardes mis à la terre.
- Utiliser la sonde polarisée de Tassicker, qui s'avère être la mieux adaptée à notre système pour la mesure du champ électrique à la surface du plan.
- L'entretien régulier du plan de mesure par un bon nettoyage (on a utilisé le Panreac pour sa propriété de séchage rapide) afin d'éviter l'accumulation de la poussière, qui peut entraîner la création d'un courant de fuite.
- Tenir compte des paramètres physiques de l'air pour la normalisation.
- Utiliser un pas de déplacement de 1cm pour embrasser la majorité de la surface du plan de mesure.

Notre étude expérimentale comporte deux parties. La première partie a consisté à déterminer la tension seuil d'apparition de la décharge couronne positive en nappe de fils-deux plans et cela afin de nous permettre de fixer les niveaux de tensions à appliquer aux électrodes actives, cela passe par le relevé de la caractéristique courant. Cette première étude effectuée en agissant sur différents paramètres (le nombre de fils utilisés, le diamètre des fils ( $2R_f$ ) et la distance inter-fils ( $a$ )) nous renseigne que :

- Le courant mesuré ( $I_m$ ) est proportionnel à la tension appliquée ( $V_a$ ).
- Pour une tension appliquée ( $V_a$ ) fixe, on observe une croissance significative du courant issu de la décharge couronne avec l'augmentation de l'espace inter-fils ( $a$ ).
- Le courant mesuré croît à l'augmentation du nombre de fils utilisés.
- Le courant mesuré est inversement proportionnel au diamètre du fil.

La deuxième partie visait à mesurer la densité de courant ( $J$ ) et le champ électrique ( $E$ ) à la surface du plan de mesure, en adaptant la sonde polarisée de Tassicker. Ces mesures ont été effectuées pour différents niveaux de tensions, divers espacement ainsi que plusieurs nombre de fils. Les résultats obtenus et présentés sous forme de graphes grâce à un programme mis en œuvre avec le logiciel de calcul matlab, montrent un bon accord entre elles et les prévisions théoriques et nous ont menés à tirer les conclusions suivantes :

✓ La densité de courant ainsi que le champ électrique sont proportionnel à la tension appliquée.

✓ Les valeurs de la densité de courant et celles du champ électrique présentent toutes un maximum aux pieds des conducteurs et diminuent en partant de là.

✓ Pour la densité de courant, les fils à l'extrémité présentent des valeurs plus élevées par rapport à ceux du milieu. Contrairement au champ électrique qui est le même pour tous les conducteurs.

✓ La densité de courant comme le champ électrique sont influencés par le nombre de fils utilisés, l'espacement inter-fils ainsi que par le leur diamètre.

Notre choix c'est porté sur la configuration multi-fils – deux plans, car elle s'avère être la plus utilisée dans la maintenance d'un environnement saint et dans l'amélioration de l'air ambiant. L'intérêt de cette géométrie est l'augmentation du nombre de régions ionisées, qui permettent à leur tour l'augmentation du nombre de charges produites, par conséquent, procurer à notre précipitateur électrostatique un bon rendement. Afin de parvenir à tous cela, une étude des paramètres de la décharge couronne est primordiale, car la connaissance de ces derniers va nous aider à contrôler les effets indésirables de la décharge couronne et va aussi nous permettre de développer ses applications.

Ce travail n'étant pas achevé, nous ne saurons le terminer sans citer quelques éventualités de recherches qui peuvent permettre d'améliorer l'étude de ce phénomène. En effet, la mesure des paramètre régissant l'effet couronne en appliquant différentes tensions, en utilisant

plusieurs fils, en variant la distance inter-fils ainsi que le diamètre des fils et en faisant plusieurs séries d'expériences, sans oublier de tenir en compte les conditions atmosphériques (température, pression et humidité), ne nous fera que nous rapprocher un plus vers une compréhension presque parfaite de ce phénomène, ce qui nous amènera par la suite à l'innovation et à la conception de d'autre applications dans plusieurs domaines qui bouleverseront notre manière de vivre.

## *Références Bibliographiques*

## Références Bibliographiques

- [1] E. Badareu, I. Popescu, 1984, *Gaz ionisé : décharges électriques dans les gaz*, Edition Dunod, Paris.
- [2] A. KASDI, 2007, Thèse de Doctorat, Uni. A. Mira de Bejaia, Algérie.
- [3] Y. Zebboudj, 1988, Thèse de doctorat, Uni. Paris IV.
- [4] G. Claude, 1998, *Effet couronne sur les réseaux électriques aériens*, Techniques de l'ingénieur.
- [5] F. W. Peek, 1929, *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*, McGraw-Hill.
- [6] R. Papoular, 1963, *Phénomènes électrique dans les gaz*, Dunod, Paris.
- [7] H. Yala, 2001, Mémoire de fin de cycle, Uni. A. Mira de Bejaïa, Algérie.
- [8] C. Gray, 1984, *Les propriétés diélectriques de l'air dans les lignes hautes et les très hautes tensions*, Eyrolles.
- [9] G. Le Roy, C. Gray, B. Hutzler, J. Lalot et C. Dubanton, 1984, *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*, Edition Eyrolles.
- [10] J. M. Townsend, 1914, *Electricity in gases*, Oxford university press.
- [11] J. M. Townsend, 1948, *Electron in gases*, Hutchinson, London.
- [12] M. Aissou, 2013, Thèse de Doctorat, Univ. A. Mira de Bejaïa, Algérie.
- [13] H. Raether, 1935, Phys., Vol. 94, pp. 576 et zeit. Tech. Phys. Vol. 16, pp. 435.
- [14] H. Raether, 1841, Zeit. Phys, Vol. 117, pp. 394-524.
- [15] J. M. Meek, 1940, Phys. Rev, Vol. 57, pp. 722-728.
- [16] L. B. Loeb, 1939, J. Appl. Phys, Vol. 10, pp. 142.
- [17] L. B. Loeb, 1948, Rev. Mod. Phys, Vol. 20, pp. 151.
- [18] L. Hami, 1998, Thèse de Magister, Uni. A. Mira de Bejaïa, Algérie.
- [19] B. Tabti, 2002, Thèse de Doctorat, Uni. A. Mira de Bejaïa, Algérie.
- [20] J. F. Loiseau, J. Batina, F. Noel et R. Peyrous, 2002, *Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 35, pp. 1020-1031.
- [21] M. Goldman, R. S. Sigmond, 1982, *Corona insulation*, IEEE Trans. Elec. Ins., EI. 12/2, pp. 90-105.
- [22] A. J. Medlin, 1998, *Electro-hydrodynamic modelling of fine Particle Collection in Electrostatic Precipitators*, Uni. New South Wales.
- [23] C. Cary, *Effet couronne en tension alternative*, Technique de l'ingénieur.
- [24] C. Cary, 1984, *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*, Edition Eyrolles.
- [25] C. Potvin, 2000, Mémoire de fin d'étude, Uni. Chicoutimi. Québec.
- [26] B. Dramane, 2009, Thèse de Doctorat, Uni. Poitiers.
- [27] K. R. Parker, 1997, *Applied Electrostatic Precipitation*, Chapman and Hill, pp. 6-8.
- [28] L. Hami, Thèse de Magister, Uni. A. Mira de Bejaïa, Algérie.
- [29] S. H. Kim, H. S. Park et K. W. Lee, 2001, *Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles*, Journal of Electrostatics, Vol. 50, pp. 177-190.
- [30] S.H. Kim, K.W. Lee, 1999, *Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models*, J. Electrostatics, Vol. 48, pp. 3-25.
- [31] J. Remil, 1990, *Procédés de dépoussiérage des gaz dans l'industrie*, p. 53-59.

- [32] A. Kasdi, 2016, *Computation and measurement of corona current density and V-I characteristics in wires-to-plates electrostatic precipitator*, Journal of Electrostatics, Vol 81, pp. 2.
- [33] A. Bouziane, G. Hartmann, K. Hidaka, M. C. Taplamacioglu et R. T. Waters, 1994, pro. IEE., Vol. 141, pp. 111-117.
- [34] S. Mouhoubi, 1996, Thèse de Magister, Uni. A. Mira de Bejaïa, Algérie.
- [35] R. Ikene, Y. Zebboudj, 1997, *Sonde linéaire de mesure du champ électrique et application de la distribution du champ lors de la décharge couronne positive en géométrie fil-plan*, IEE.
- [36] E. O. Selim, 1979, Thèse de Phd, UWIST, U.K.
- [37] R. T. Waters, T. E. S. Richard et W. B. Stark, 1972, IEE, Vol. 6, pp. 119.
- [38] J. M. Meek, J. D. Craggs, 1978, Electrical breakdown of Gases, Wiley.
- [39] M. M. C. Collins, J. M. Meek, 1965, ICIPG, Belgrade, pp.581-585.
- [40] O. J. Tassicker, 1974, Proc. IEE, Vol. 121, pp. 213-220.
- [41] E. O. Selim, R. T. Waters, 1980, IEEE Trans., Vol. IA-16, n°3, pp. 458-463.
- [42] S. A. Amar, 1997, Mémoire de Magister, Uni. A. Mira de Bejaïa, Algérie.
- [43] D. A. Spence, 1970, Proc. Cambridge Phil. Soc, Vol. 68, pp. 529-545.
- [44] H. A. Said, H. Nouri et Y. Zebboudj, 2015, *Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator*, Journal of Electrostatics, Vol. 73, pp. 19-25.
- [45] J. M. Townsend, 1902, Phil. Mag., Vol. 3, pp. 557.
- [46] N. A. Kaptzov, 1947, OCIZ, pp. 587-630.