

République Algérienne Démocratique Et Populaire Ministère De
L'enseignement Supérieure De La Recherche Scientifique



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin de cycle de Master en Génie Electrique

Spécialité Electrotechnique

Option : Technique de haute tension

Intitulé:

**Etude expérimentale de la décharge couronne continue
en polarité positive et négative dans la
configuration fils-plans**

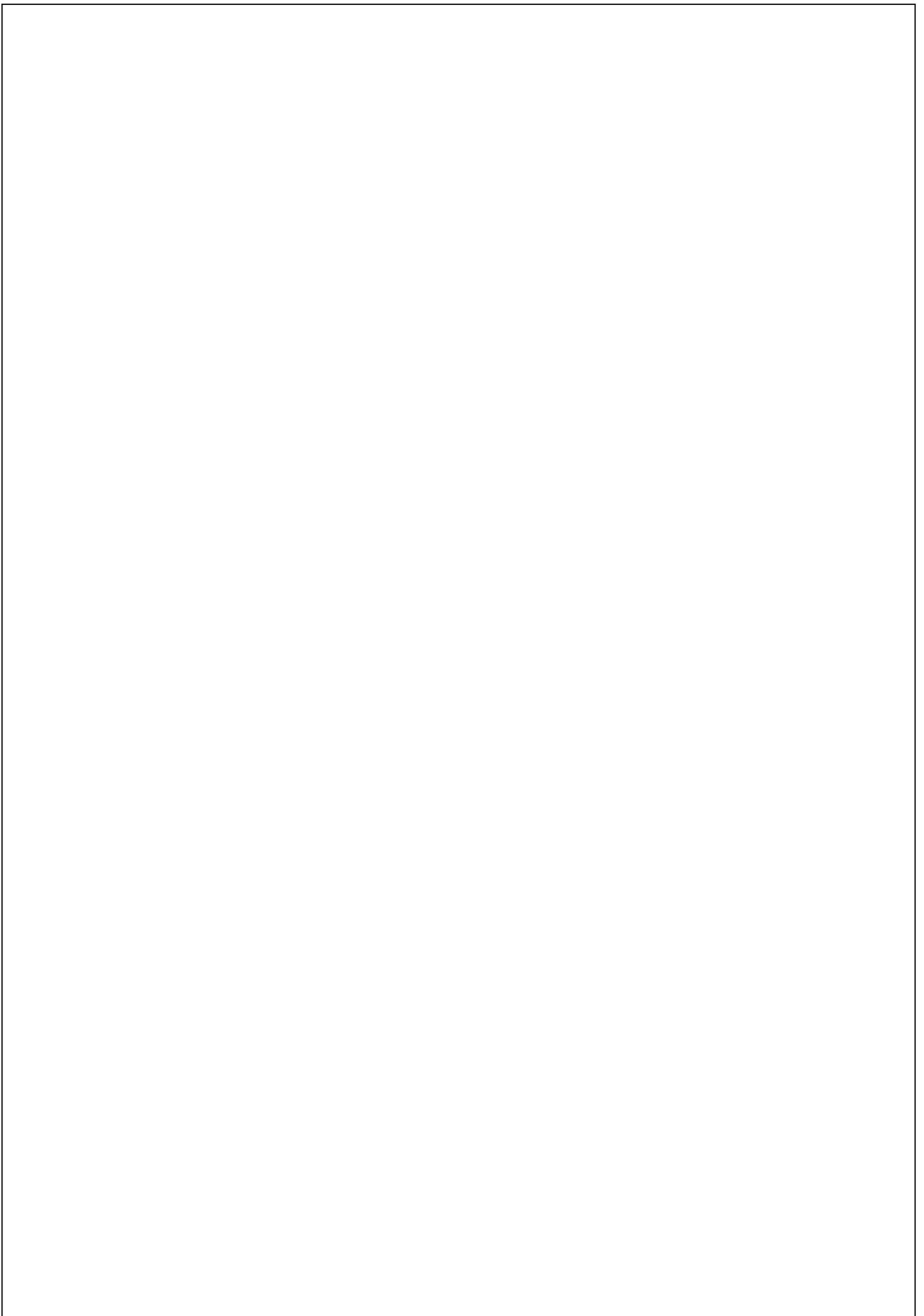
Réalisé par :

M^r BENCHERIF Nabil

M^r DJOUADI Toufik

Soutenu publiquement le 22/06/2017 devant le jury composé de :

<i>M^r</i> . R. Boudissa	Professeur	U. A. M. Bejaia	Président
<i>M^r</i> . M. S. Herzine	Doctorant	U. A. M. Bejaia	Examineur
<i>M^r</i> . A. Kasdi	M. C. A	U. A. M. Bejaia	Promoteur



DEDICACES

**Quand il y a la soif d'apprendre... Tout vient à point à qui sait attendre
Quand il y a le souci de réaliser un dessein..... La volonté et l'ambition sont
la clé du succès... Malgré les obstacles**

**Et les difficultés qui s'opposent avec la patience tout vient facile pour
arriver à notre fins... malgré tout nous pouvons déterminer notre mémoire.
Et que nous serions enchantés quand:**

**Nous dédions ce modeste travail à nos très chers parents, qui nous ont
donné beaucoup de courage, de patience durant toutes nos études, et nous
demandons à Dieu de les bénir à surveillance sur eux, en espérant qu'ils
seront toujours fiers de nous, comme nous dédions à tous nos chers
enseignants qui nous ont aidés,**

**À tous nos amis surtout promotion de technique de haute tension et les
autre amis chacun par son nom et à tout bon gens qui nous ont aidé à notre
travail.**

**Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices par toutes,
ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de notre étude.
Malgré tous les mots parlés, aucune dédicace ne pourrait exprimer nos
respects à eux.**

BENCHERIF Nabil, DJOUADI Toufik

REMERCIEMENTS

Au début, nous tenons à remercier et d'exprimer notre gratitude à Allah qui nous a donné la patience et la volonté pour nous de déterminer notre travail.

Nous avons l'agréable devoir d'exprimer notre gratitude et de remercier Notre encadreur "M .KASDI Ahmed".

pour maître la confiance qu'il est placé en nous et pour aider par ses informations et les conseils et les documents qu'il a mis à notre disposition et ses expériences qui nous ont permis de mener ce projet de fin d'étude.

**Nous adressons nos remerciements aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin pour réaliser ce travail.
Nous adressons nos remerciements aussi a :**

Monsieur R. Boudissa Professeur à l'université A. MIRA de Béjaia pour avoir accepté d'être Le président du jury.

Monsieur M. S. Herzine Doctorant à l'université A.MIRA de Béjaia pour avoir accepté d'être l'examineur.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à notre famille et toute notre proche et les amis, qui nous ont accompagnés et nous ont encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

BENCHERIF Nabil, DJOUADI Toufik

Table des matières

Chapitre 1 : Théorie de la décharge couronne

Introduction générale	(1)
I.1) Introduction	(2)
I.2) La décharge couronne	(2)
I.3) Différent types de la décharge couronne.....	(2)
I.3.1) décharge couronne positive.....	(2)
I.3.2) décharge couronne négative.....	(3)
I.4) Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)	(4)
I.5) Mécanisme de développement de la décharge couronne	(5)
I.5.1) Décharge de Townsend.....	(5)
I.5.1.1) Mécanismes de la décharge de Townsend.....	(5)
I.5.1.2) Critère de claquage de type Townsend.....	(8)
I.5.1.3) Loi de Paschen.....	(8)
I.5.2) Décharge par Streamers.....	(10)
I.5.2.1) Claquage par « Streamer ».....	(10)
I.5.2.2) Transition au « Leader ».....	(11)
I.6) Seuil d'apparition de la décharge couronne.....	(12)
I.7) Applications utilisant la décharge couronne.....	(13)
I.7.1) Paratonnerre	(14)
I.7.2) Filtre électrostatique	(14)
I.7.3) Dépollution des effluents gazeux.....	(15)
I.7.4) Générateurs d'ozone.....	(15)
I.7.5) Séparateur électrostatique.....	(16)

I.7.6) Autres application.....	(16)
I.8) Facteur influençant la décharge couronne.....	(16)
I.8.1) facteurs géométriques.....	(16)
I.8.1.a Rayon de la courbure.....	(16)
I.8.1.b Distance inter-électrodes.....	(17)
I.8.1.c La forme d'électrodes.....	(17)
I.8.1.d Etat de surface.....	(18)
I.8.2) Les facteurs physico-chimiques.....	(18)
I.8.2.a La densité de l'air.....	(18)
I.8.2.b La température.....	(18)
I.8.2.c L'humidité.....	(19)
I.9) Décharge couronne en géométrie multi-fils-deux plans.....	(19)
I.10) Développement de la Recherche sur la décharge couronne.....	(20)
I.11) Conclusion.....	(24)

Chapitre 2 : Théorie de la sonde polarisée de Tassicker

II.1) Introduction	(25)
II.2) La sonde polarisée	(25)
II.2.1) Principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire	(25)
I.3) Calcule du champ électrique E	(30)
II.4) Les paramètres de la décharge couronne	(31)
II.4.1) Champ électrique E aux plans de mesure.....	(31)
II.4.2) Densité de courant (J) au plan de mesure.....	(32)
II.4.3) Conductivité (σ) de l'effet couronne près du plan.....	(33)
II.5) Conclusion.....	(33)

Chapitre 3 : Etude expérimentale

III.1) Introduction.....	(34)
III.2) Dispositif expérimental.....	(34)
III.2.1) Description du dispositif utilisé.....	(36)
III.2.2) Source de haute tension	(38)
III.3) Systèmes de mesure.....	(42)
III.3.1) Mesure de tension.....	(42)
III.3.1.1) Tension appliquée aux fils	(42)
III.3.1.2) Tension de polarisation V_b	(42)
III.3.2) Mesure du courant	(42)
III.3.3) Mesure des paramètres physiques de l'air.....	(42)
III.4) Caractéristique courant-tension.....	(43)
III.5) Présentation et interprétation des résultats.....	(43)
III.5.1) Caractéristique courant-tension relevée.....	(43)
III.5.1.1) influence du nombre de fils sur le courant de décharge.....	(43)
III.5.1.2) Influence de la distance inter-fils ' a '.....	(44)
III.5.1.3) Influence de la polarité de la tension appliquée.....	(47)
III.5.1.4) influence de H (hauteur des fils par rapport aux plans).....	(49)
III.5.2) Densité de courant (J).....	(50)
III.5.2.1) Influence de la polarité de tension appliquée.....	(51)
III.5.2.2) Influence du niveau de tension appliquée sur la densité de courant....	(52)
III.5.2.3) Influence du nombre de fils sur la densité de courant	(54)
III.5.2.4) Influence de l'espacement (a) sur la densité de courant.....	(54)
III.5.3) champ électrique E.....	(56)
III.5.3.1) Influence de la tension appliquée et du nombre de fils sur le champ électrique....	(57)

III.6) Conclusion.....	(59)
Conclusion générale.....	(60,61)

Liste des figures

Figure I.1 : décharge couronne positive.....	3
Figure I.2 : la décharge couronne négative.....	4
Figure I.3 : caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan distance inter électrode 13 mm).....	4
Figure I.4 : Schéma d'une avalanche électronique.....	6
Figure I.5 : Loi de Paschen pour différents gaz	9
Figure I.6 : Étapes successives de développement d'un streamer	11
Figure I.7 : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre.....	14
Figure I.8 : Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.....	14
Figure I.9 : Les principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne.....	15
Figure I.10 : Composants de base de toute installation expérimentale d'ozonation	15
Figure I.11 : Utilisation de la décharge couronne dans la séparation électrostatique	16
Figure I.12 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne.....	17
Figure I-13 : Distribution du champ dans un système pointe-plan.....	18
Figure I-14 : Distribution du champ dans un système plan-plan.....	18
Figure. I.15 : Représentation schématique d'une décharge couronne continue en géométrie Fil-Plan.....	19
Figure II.1 : sonde circulaire de Tassicker	25
Figure II.2 : Schéma de la sonde polarisée circulaire.....	26
Figure. II.3a : Lignes de champs et équipotentiels en présence de décharge électrique avec la sonde non polarisée.....	27
Figure. II.3b : Lignes de champs et équipotentiels en absence de décharge électrique avec la sonde polarisée.....	27

Figure. II.3c : Lignes de champs et équipotentiels en présence de décharge électrique avec la sonde polarisée.....	27
Figure. II.3c : Lignes de champs et équipotentiels en présence de décharge électrique avec la sonde polarisée.....	27
Figure II.4 : Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée négativement.....	28
Figure. II.5 : Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée positivement.....	29
Figure. III.1 : Schéma représentative du dispositif expérimental.....	35
Figure III.2 : vue de face du dispositif	36
Figure III.3 : La composition du dispositif.....	37
Figure III.4 : La sonde polarisée circulaire (collecteur du courant).....	38
Figure III.5 : Schéma en bloc de la source de haute tension utilisée.....	39
Figure III.6 : Schéma électrique de la source de haute tension utilisée.....	40
Figure III.7 : Appareil de commande et Voltmètre de crête.....	40
Figure III.8 : Installation haute tension utilisée de laboratoire de Bejaia.....	41
Figure III.9 : Caractéristique courant-tension pour différents nombre de fils.....	43
Figure III.10 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans.....	44
Figure III.11 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans.....	45
Figure III.12 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans.....	45
Figure. III .13 : Caractéristiques courant-tension en géométrie 3fils-2plans.....	46
Figure.III.14 : Caractéristique courant-tension pour une géométrie 2fils-2plans.....	47
Figure .III.15 : Caractéristique courant-tension pour une géométrie 3fils-2plans.....	47
Figure .III.16 : Caractéristique courant-tension pour une géométrie 4fils-2plans.....	48
Figure .III.17 : Caractéristique courant-tension pour une géométrie 5fils-2plans.....	48
Figure III.18 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans.....	49
Figure III.19 : Caractéristique courant-tension en géométrie 5fils- 2plans.....	50

Figure III.20: Influence de la polarité de V_a sur la densité de courant J pour la configuration 3fils-2plans.....	51
Figure III.21: Influence de polarité de V_a sur la densité du courant J pour la configuration 4fils-2plans.....	51
Figure III.22: Variation de la densité de courant J pour la géométrie 3fils-2plans.....	52
Figure III.23: Variation de la densité de courant J pour la géométrie 4fils-2plans.....	53
Figure III.24: Variation de la densité de courant J pour la géométrie 5fils-2plans.....	53
Figure III.25: Variation de la densité de courant J pour la configuration 4fils-2plans	54
Figure .III.26: variation de la densité courant J pour la configuration 4fils-2plans.....	55
Figure .III.27 : Influence de l'espacement (a) sur la densité de courant J	56
Figure .III.28 : variation du champ électrique E pour la configuration 3fils-2plans.....	58
Figure .III.29 : variation du champ électrique E pour la configuration 4fils-2plans.....	57

Liste des symboles utilisée

Symbole	Définition	unité
E	<i>Le champ électrique</i>	(Kv / m)
N	Le nombre d'électrons produit par avalanche	
N ₀	Le taux de production d'électrons primaires par seconde	
d	Distance entre deux plans mis à la terre	(cm)
W _c	énergie cinétique	(J)
W _i	énergie d'ionisation	(J)
σ	La conductivité	(Ω ⁻¹ .m ⁻¹)
E _s	Le champ seuil	(Kv / cm)
L _{NE}	Longueur du cylindre et du plan collecteur	(cm)
<i>h</i> _{NE}	Hauteur du plan collecteur	(cm)
<i>h</i> _m	Taux d'humidité du milieu	%
r _s	Rayon de la sonde circulaire	(mm)
r _e	Rayon intérieure du plan (E)	(mm)
r _m	Rayon effectif de la sonde	(mm)
S _s	Surface réelle de la sonde	(mm ²)
g	Largeur de l'intervalle entre (S) et (E)	(mm)
R _e	Rayon extérieur du plan (E)	(mm)
I _{s0}	Courant mesuré à (V _b = 0)	(nA)
V _b	Tension de polarisation	(V)
E _b	Champ local	(V / mm)
I _s	Courant mesuré à (V _b ≠ 0)	(nA)
∅ _s	Flux à travers la sonde associé à (V _b ≠ 0)	(V.m)
∅ _{s0}	Flux à travers la sonde associé à (V _b =0)	(V.m)
π	Pi = 3,14	(SI)

C_0	La capacité formée par les surfaces des deux parties (S)et(E)	(μF)
ϵ_0	Permittivité électrique du vide	(F / m)
J	Densité de courant électrique	($\text{m}^2 / \text{V. s}$)
μ	Mobilité moyenne des ions	(mA / m^2)
ρ	Densité de la charge d'espace	(C / m^3)
S_m	La surface effective de la sonde	(m^2)
T	Température du milieu	(m^2)
P	pression du milieu	(mm Hg)
Vou U	Tension appliquée au fil	(Kv)

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1911 avec les travaux effectués par un des génies de cette époque, M. F. Peek. Depuis ce temps, un nombre impressionnant de travaux de recherche concernant l'effet de couronne sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont été effectués et publiés. Ces recherches portaient essentiellement sur les pertes par effet de couronne et l'interférence radiophonique.

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Le système des électrodes peut former diverses configurations à savoir fil –plan, pointe –plan, fil-cylindre, sphère-plan,...etc. Lorsque le champ devient important à proximité de l'électrode active, l'ionisation du gaz a lieu. A vrai dire il se forme deux zones :

- a) Une zone active, située près de l'électrode à forte courbure, dans laquelle le champ électrique est intense. Elle est caractérisée par l'ionisation poussée du gaz.
- b) Une zone de dérive, occupant l'espace inter électrode restant, dans laquelle le champ électrique est faible. Elle est caractérisée par une charge d'espace monopolaire dérivant vers la seconde électrode du système.

L'objectif principal de ce mémoire est de comprendre le phénomène lié à l'effet couronne. Nous avons 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. Le manuscrit est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à des considérations générales sur les mécanismes de développement de la décharge couronne. Dans ce chapitre, nous donnons une classification des différentes décharges en distinguant les caractéristiques de chaque type de décharge. Enfin, nous évoquons les différents mécanismes physiques impliqués dans les phases d'initiation, de développement et de propagation des décharges de type couronne positive et négative qui sont ensuite étudiées dans ce travail.

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 est consacré à l'étude expérimentale réalisée. Cette étude consiste à déterminer les différents paramètres de la décharge couronne en configuration multi-fils - 2plans. Nous avons relevé la densité de courant, la caractéristique courant-tension, et tracer les distributions du champ électrique et de la densité de courant au plan mis à la terre.

Chapitre I

I.1) Introduction :

Dans leur état normal, les gaz sont des isolants électriques. Cela tient au fait qu'ils ne contiennent pas de particules chargées libres, mais seulement des molécules neutres. Cependant, si on leur applique des champs assez intenses, ils deviennent plus au moins conducteurs. Les phénomènes complexes qui se produisent portent le nom de décharges dans les gaz et sont dus à l'apparition d'électrons et d'ions libres et le résultat d'une décharge dans un gaz est donc la production d'un gaz ionisé [1].

Les phénomènes de décharge électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [2] [3].

Il existe plusieurs types de décharges électrique et parmi lesquelles on distingue la décharge couronne.

I.2) La décharge couronne :

La décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Ce milieu est soumis à des champs électriques intenses mais non disruptifs. La décharge couronne est une décharge auto entretenue, elle ne nécessite aucune source externe d'ionisation pour se développer. Les électrodes peuvent former divers systèmes : pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre,etc. [4] [5].

Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1911 avec les travaux effectués par F.W.PEEK [6], qui a établi par des essais expérimentaux une loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de l'effet couronne.

Une des conséquences indésirable du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne. Ce phénomène se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs entourés par l'air, la décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [6] [7].

I.3) Différents types de décharge couronne :

I.3.1) Décharge couronne positive :

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand l'électrode active (ici une pointe) est portée à un potentiel positif et l'électrode passive (une plaque) à la terre. Dans ce cas, une zone à champ intense et de forte ionisation est créée autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers celle-ci (zone en pointillé sur la **Figure I.1** [8]).

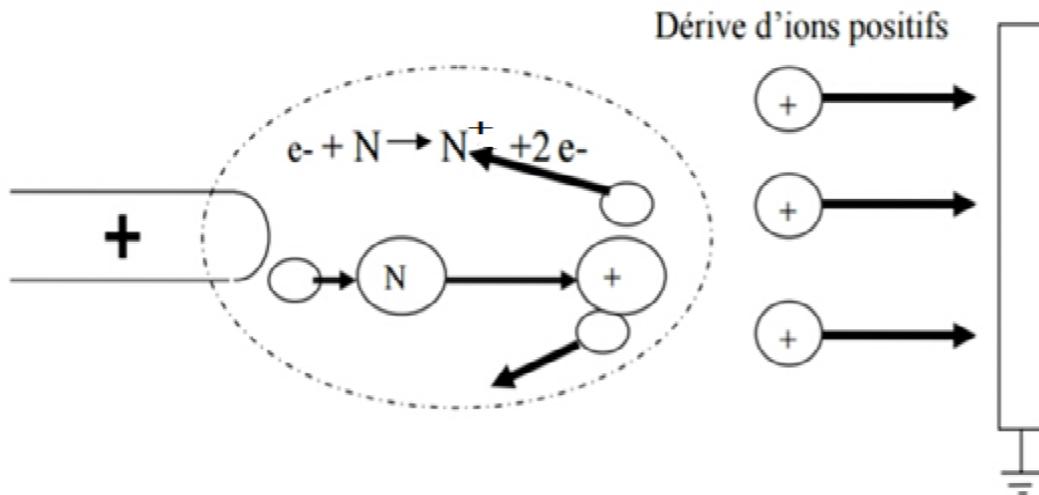


Figure I.1 : Décharge couronne positive.

Le phénomène est plus complexe dans ce cas parce que la zone à champ électrique intense n'est pas juxtaposée à la source des électrons. Les électrons qui sont au voisinage de la pointe produisent des avalanches, mais quand les électrons arrivent sur la pointe, ils ne produisent rien qui puisse entretenir le phénomène. La cathode ne joue pas le rôle de pourvoyeuse des électrons car cette cathode est située très loin de la zone où le champ électrique est intense. Si le champ est assez fort, les électrons germes produits sous l'action du rayonnement ultraviolet émis par une avalanche créent de nouvelles avalanches. Le champ est renforcé par l'avalanche, mais la formation d'une chaîne entre électrodes est peu probable, le champ devenant trop faible au voisinage de la cathode [9].

I.3.2) Décharge couronne négative :

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Goldman et Sigmond (1982) expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (**Figure I.2**) [8].

Des électrons sont extraits de la cathode par choc, chaque électron ainsi libéré produit une nouvelle avalanche qui s'en dégage. Ces avalanches ont une extension limitée. D'une part, le champ décroît rapidement dès qu'on s'éloigne de la pointe vers le plan collecteur. D'autre part, les avalanches qui se développent laissent derrière elles les ions positifs moins mobiles qui font écran entre les électrons et la pointe. Cette deuxième cause d'affaiblissement du champ vient renforcer la première [9].

Un nuage d'ions positifs est formé par les avalanches d'électrons. Quand le nuage positif est développé de manière suffisante, les avalanches arrêtent de se produire parce que le champ est très affaibli au-delà. Les ions positifs sont attirés par la pointe, donc ils sont neutralisés par la pointe si bien que la zone positive dont nous avons vu la formation disparaît [8].

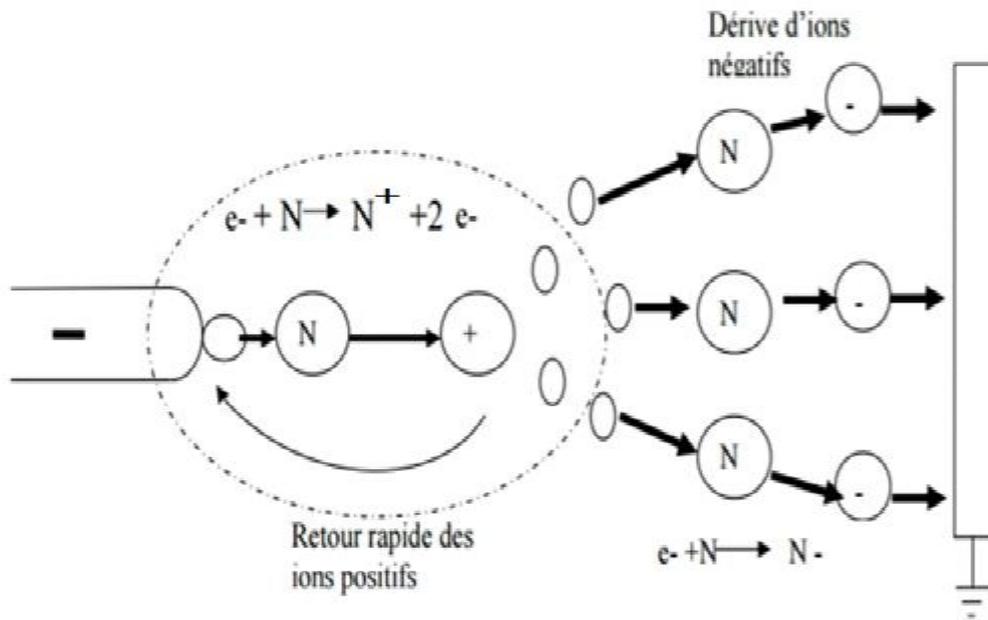


Figure I.2 : Décharge couronne négative.

L'effet d'écran disparaît quand tous les ions positifs ont été captés par la pointe ; on a, à nouveau, le champ initial et le phénomène recommence. Il a donc une allure cyclique, la durée du cycle étant égale au temps mis par la couche positive pour être balayée par la pointe [9] [10].

I.4) Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension) :

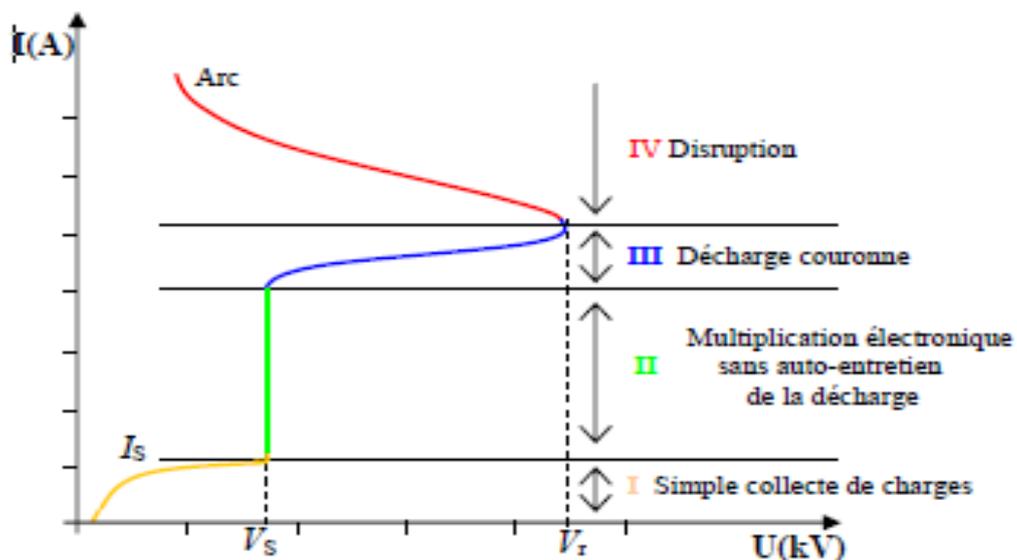


Figure I.3 : caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan distance inter électrode 13 mm)

La **figure I.3** décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne [11] [12] [13] [14].

- **Le premier régime** : consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter électrodes.
- **Le second régime** : qui se produit à partir d'une tension seuil « V_0 », traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.
- **Le troisième régime** : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs. La décharge est autoentretenu. C'est le régime de la décharge couronne, ou apparaissent les streamers, qui est responsable de la composante impulsionnelle du courant.
- **Le quatrième régime** : au-delà d'une tension appliquée « V_R », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale de gaz. Le champ réduit $\frac{E}{N}$.

Est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par apport à l'attachement électrique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

I.5) Mécanisme de développement de la décharge couronne :

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [15] [16] :

- Le premier concerne les décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier et notamment les effets secondaires à la cathode : c'est la décharge de Townsend.
- Le deuxième modèle mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concernant les décharges à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale : c'est la décharge par Streamers.

I.5.1) Décharge de Townsend

I.5.1.1) Mécanismes de la décharge de Townsend :

Les ions positifs produits dans l'espace inter-électrodes lors de l'avalanche électronique dérivent vers la cathode. Si ces ions ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode lesquels viendront renforcer l'avalanche. On définit le coefficient γ appelé coefficient d'émission secondaire ou second coefficient de Townsend qui représente le rapport entre le nombre d'électrons libérés à partir de la cathode et

le nombre d'ions positifs qui tombent sur la cathode. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz employé. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important. L'avalanche s'auto entretient et la décharge se produit même si la tension n'est plus appliquée.

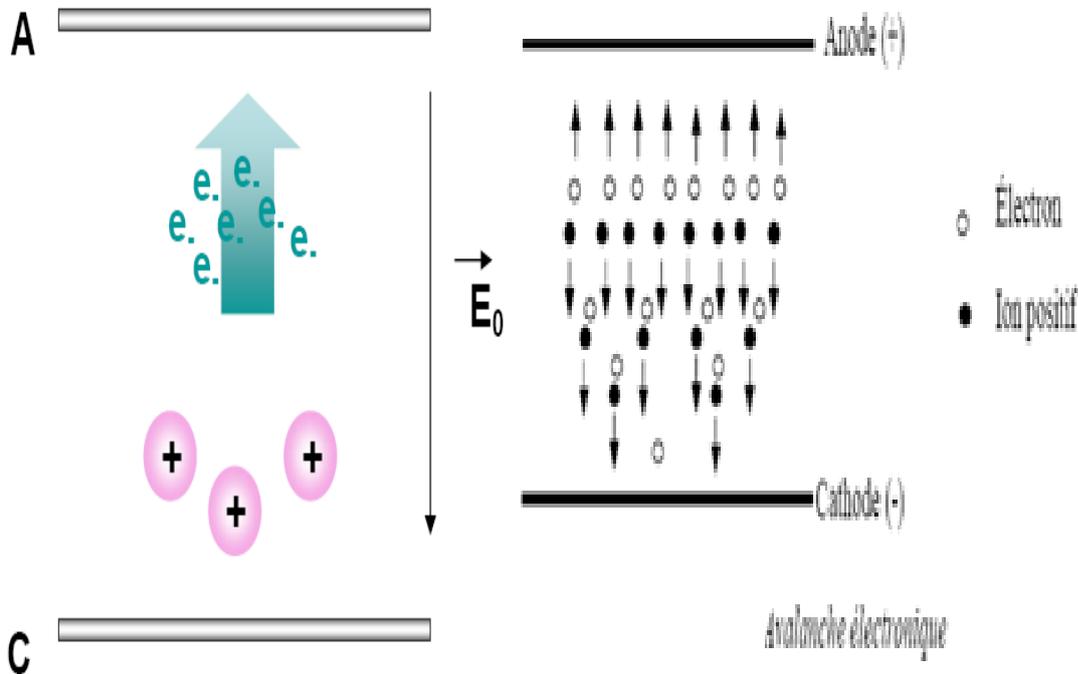


Figure I.4 : schéma d'une avalanche électronique (a) [17], (b) [18].

• Le Premier coefficient de Townsend

Townsend a introduit un coefficient multiplicateur α 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 de gaz, du champ local E et de la pression du gaz. Dans le cas d'un champ homogène, α est constant dans tout l'intervalle. Ainsi :

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

Ou :

- 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 :

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

Pour qu'une véritable décharge puisse se produire, il faut qu'une succession d'avalanches puisse avoir lieu. Pour Townsend [19,20], 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 [1].

Principalement celle résultant du bombardement de la cathode. En effet, sous l'effet du champ électrique, les ions positifs formés lors de la première avalanche sont accélérés et peuvent acquérir une énergie cinétique W_c suffisante pour arracher des électrons supplémentaires de la surface 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 :

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

- **Le deuxième coefficient de Townsend**

On caractérise alors cette émission par une grandeur macroscopique γ , dite deuxième coefficient de Townsend. Il est défini comme étant le rapport du nombre d'électrons émis par la cathode au nombre d'ions positifs qui y sont collectés et dépend de la nature du gaz inter électrodes et particulièrement du matériau constituant la cathode. Les N_0 électrons issus de la cathode créent, sur la distance d , $N_0(e^{\alpha d} - 1)$ paires d'ions-électrons, Ces ions positifs vont libérer $\gamma \cdot N_0(e^{\alpha d} - 1)$ nouveaux électrons initiaux.

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

$$N_0 = N_0 e^{\alpha d} \quad (\text{I.5})$$

$$N_d = \frac{N_0 e^{\alpha d}}{1 - \frac{\gamma}{\alpha} [e^{\alpha d} - 1]} \quad (\text{I.6})$$

Par définition :

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \gamma \quad (\text{I.7})$$

D'où le courant collecté à l'anode est [1] :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma [e^{\alpha d} - 1]} \quad (\text{nA}) \quad (\text{I.8})$$

I.5.1.2) Critère de claquage de type Townsend :

Le courant I obtenu dans une configuration de champ uniforme pour une distance-inter électrodes d est donné par [21]:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\frac{\alpha}{\alpha-\eta} \exp(\alpha-\eta)d - \frac{\eta}{\alpha-\eta}}{1 - \frac{\alpha\gamma}{\alpha-\eta} [\exp(\alpha-\eta)d - 1]} \quad (1.9)$$

Où d est la distance inter-électrodes, I_0 le courant initial émis par la cathode sous l'effet du rayonnement extérieur, α le coefficient d'ionisation, γ le coefficient d'émissions secondaires et η le coefficient d'attachement. Ce dernier caractérise la propriété qu'ont certains gaz à capturer des électrons (gaz dits électronégatifs).

Le critère de claquage selon le mécanisme de Townsend est donné par:

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha-\eta} [\exp(\alpha - \eta)d - 1] = 1 \quad (1.10)$$

Pour un champ uniforme et pour un gaz non électronégatif ($\eta = 0$), le critère de claquage se réduit à:

$$\gamma [\exp(\alpha d - 1)] = 1 \quad (1.11)$$

En champ non uniforme la relation (1.2) doit être modifiée pour tenir compte du fait que le coefficient d'ionisation dépend de la position ; on aura :

$$\gamma \int_0^d \exp\left[\int_a^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx = 1 \quad (1.12)$$

I.5.1.3) Loi de Paschen :

Pour déterminer la tension d'initiation d'une décharge, une description simple des phénomènes physiques mis en jeu conduit à la loi de Paschen utilisée comme approximation théorique [22][23][1]. Cette loi décrit le mécanisme de rupture de Townsend dans les gaz en considérant la multiplication d'électrons produits par collisions dans le gap pour lequel le paramètre prépondérant est le produit *pression-distance* (*distance inter-électrodes*) **Figure I.5**, associé à la création d'électrons secondaires par bombardement ionique à la cathode. Ces deux processus sont quantifiés par les coefficients de Townsend ; la relation s'écrit :

$$V_s = f(p.d) \quad (1.13)$$

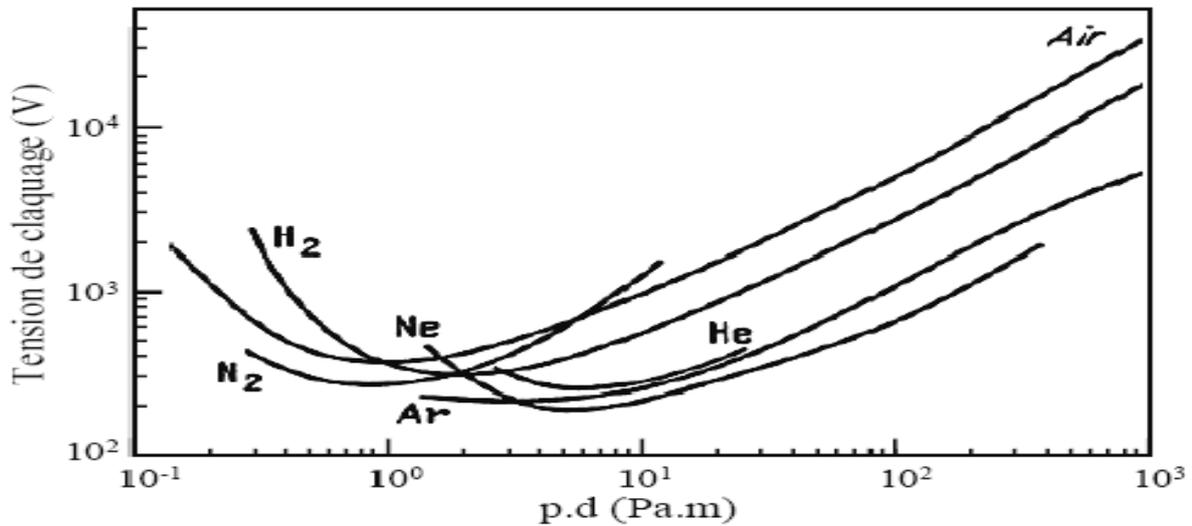


Figure I.5 : Loi de Paschen pour différents gaz [24, 25, 26, 27, 28, 29].

Le mécanisme proposé par Townsend permet d'expliquer de manière théorique la loi empirique de Paschen décrivant la tension nécessaire à l'apparition d'une décharge disruptive en fonction du produit « pd », équation (1.6) [24].

$$V_s = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(A \cdot p \cdot d) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (1.14)$$

Les constantes A et B, qui dépendent du gaz, peuvent être déterminées à partir du premier coefficient d'ionisation « α ».

Avec :

$$\alpha = A \cdot p \cdot \exp^{-B \cdot \frac{p}{E}} \quad (1.15)$$

Gaz	A (Torr·1.cm-1)	B (V. Torr·1.cm-1)	Domaine de validité $\frac{E}{p}$ (V. Torr·1.cm-1)
H2	5	130	150 – 600
N2	12	342	100 – 600
CO2	20	466	500 – 1000
Air	15	365	100 – 800
H2O	13	290	150 – 1000
HCl	25	380	200 – 1000
He	3	34	20 – 150
Ne	4	100	100 – 400
Ar	14	180	100 – 600
Kr	17	240	100 – 1000
Xe	26	350	200 – 800
Hg	20	370	200 – 600

Tableau I.1 : Valeurs des constantes A et B pour divers gaz [12].

Les travaux de Coliatene [26] montrent que la tension minimale (minimum de Paschen) d'initiation d'une décharge dans l'air en champ uniforme reste inchangée ($\approx 320\text{V}$) quelle que soit l'augmentation de la température. Cela signifie que ce minimum est «universel» [25].

I.5.2) Décharge par Streamers :

I.5.2.1) Claquage par « Streamer » :

Le mécanisme de claquage type Townsend s'explique par une série d'avalanches qui se développent entièrement dans l'espace inter-électrodes (les électrons initiaux se multiplient par des phénomènes d'ionisations). Ce mécanisme suppose plusieurs générations d'avalanches. Pourtant, l'expérience montre que, notamment pour des pressions de l'ordre des bars et à des distances de l'ordre des centimètres, le claquage intervient avant qu'un électron n'ait pu traverser tout l'espace entre les électrodes, tenant compte de la mobilité de l'électron et de la valeur du champ appliqué. Un mécanisme différent doit donc être envisagé pour expliquer ce type de claquage, c'est le mécanisme de streamer [30, 31, 32]. Dans ce modèle, on considère une avalanche électronique qui se développe à partir d'un seul électron germe dans un champ électrique intense, par exemple dans la région de champ électrique intense autour d'un fil ou d'une pointe ou lors de l'application d'une forte surtension en champ uniforme. Si le nombre d'électrons produit par cette avalanche, atteint une certaine valeur critique ($\sim 10^8$ dans l'air), la charge d'espace ainsi créée par les ions positifs va très fortement modifier la distribution locale du champ électrique. Devant la tête de l'avalanche, il se forme ainsi un volume où le champ électrique devient supérieur au champ critique et où une nouvelle avalanche va pouvoir se développer à partir d'électrons formés par l'action des radiations UV dans ce volume. Il se forme alors un canal de streamer qui se propage vers l'électrode opposée. Ce processus se répète jusqu'au claquage si le canal atteint l'électrode opposée ou s'arrête si la chute de tension dans le canal de streamer ne permet plus de maintenir un champ supérieur au champ critique en tête de ce canal. Plusieurs critères ont été proposés pour prédire la transition au streamer [33, 34, 35, 29, 32], soit fondés sur la déformation des lignes de champ par la charge d'espace formée par les ions positifs (les électrons présentant une vitesse beaucoup plus élevée que celle des ions ne forment pas une charge d'espace suffisamment localisée), soit fondés sur la taille de l'avalanche. Le critère le plus simple et le plus usité est celui basé sur la taille de l'avalanche qui s'écrit :

$$\int_0^{z_0} \bar{\alpha}(z) dz = K \quad (1.16)$$

z_0 est la longueur critique de l'avalanche pour laquelle sa taille atteint sa valeur critique N_c et K est un coefficient dont la valeur est souvent prise égale à 18 (i.e. $K = \ln(N_c)$ avec $N_c = 10^8$). Cependant, comme Pedersen [35] l'a montré, K ne peut pas être égal à $\ln(N_c)$, c'est donc un coefficient strictement empirique.

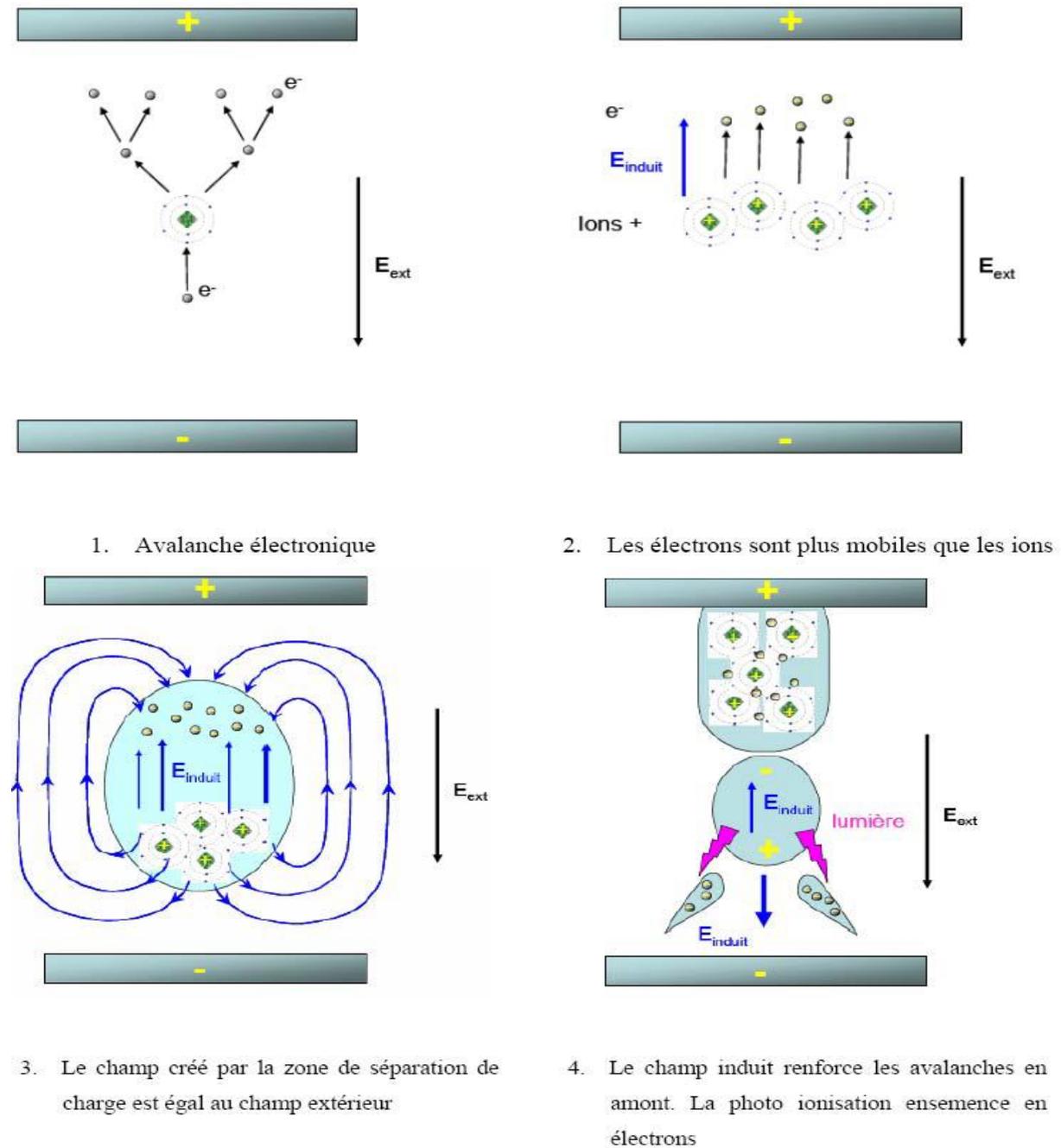


Figure I.6 : Étapes successives de développement d'un streamer [36,37].

I.5.2.2) Transition au « Leader » :

Dans certaines conditions et plus particulièrement pour les gaz très électronégatifs, le claquage observé ne s'explique ni par un mécanisme de type Townsend ni même par une formation de streamers. En effet, le claquage peut se produire pour un champ moyen bien inférieur au champ critique du gaz considéré (claquage de Townsend) mais également inférieur au champ requis pour la propagation des canaux de streamer (claquage par streamer). Un nouveau mécanisme intervient, il s'agit de la transition du streamer au leader. Cette transition est consécutive à la formation de streamers, puis à l'apparition d'un canal de

décharge préférentiel (i.e. où la plus grande partie du courant de décharge s'écoule) dont la température s'élève fortement en modifiant complètement les conditions de champ critique dans ce canal. Ainsi, le mécanisme de leader fait intervenir la formation d'un canal à température élevée ($T > 1500\text{K}$) et donc hautement conducteur. L'apparition du mécanisme de leader dépend fortement de la nature du gaz. Dans l'air, ce mécanisme apparaît pour des valeurs assez élevées du produit densité - distance ($Nd > 2,4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$; soit $p \cdot d > 100 \text{ cm} \cdot \text{bar}$) alors que dans le SF_6 le seuil est beaucoup plus faible : $Nd > 2,4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$; $p \cdot d > 1 \text{ cm} \cdot \text{bar}$). Dans la configuration d'électrodes pointe-plan, le champ dans l'espace inter-électrodes est considérablement amplifié autour de l'électrode de faible rayon de courbure, le champ est donc fortement non-uniforme. Si le champ près de cette électrode est supérieur au champ critique, il génère l'apparition d'une avalanche électronique. Dans le même temps, le champ chute très rapidement lorsqu'on s'éloigne de la pointe pour devenir inférieure au champ critique. On a alors une décharge localisée dans la zone de champ fort et on parle d'« effet couronne ». Cependant, dans certaines conditions (pression élevée, gaz électronégatif), une décharge peut se propager dans un intervalle où le champ minimum est inférieur au champ critique et au champ de propagation du streamer. La décharge ne se propage pas de manière continue dans ce cas, mais par étapes successives [38, 14] :

- Développement d'une couronne de streamers dans la zone du champ renforcé et par concentration du courant, échauffement du gaz dans une zone réduite de la couronne qui conduit à la formation d'un premier canal de leader ;
- Un développement rapide d'une zone d'ionisation en tête de ce canal leader accompagnée d'une brève ré-illumination du canal et d'une augmentation brève (impulsion) du courant ;
- Un temps de pause τ à la fin duquel la zone d'ionisation se transforme en une nouvelle section de canal leader et crée une nouvelle zone d'ionisation en avant de la décharge. On obtient un canal fortement conducteur qui se comporte comme une nouvelle électrode au bout de laquelle se forme un nouvel effet couronne. Par rapport au phénomène du streamer, le leader présente un canal unique qui est beaucoup plus chaud et conducteur que le streamer et au bout duquel il y a une couronne. Le champ de claquage est, alors, beaucoup plus faible ($\sim 5 \text{ kV/cm}$) que le champ critique qui caractérise le gaz.

I.6) Seuil d'apparition de la décharge couronne :

Pour évaluer le seuil de l'effet couronne à la surface de l'anode, Peek, en s'inspirant de la théorie de Townsend proposée en 1920, a suggéré pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air ambiant, et en tension alternative. Cette équation est appelée depuis la loi de Peek.

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (1.17)$$

Avec :

$E_0 = 30\text{kV/cm}$: Valeur de crête du champ électrique en conditions normales.

r : Rayon du conducteur en cm.

m_1 : Coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur (l'irrégularité géométrique du conducteur).

m_2 : Coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs souvent le produit ($m_1 m_2$) est remplacé par un seul coefficient : « m ».

δ : Densité de l'air.

$$\delta = \frac{P}{P_0} \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (1.18)$$

Le terme « $\left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right)$ » : est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur. Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur [39]. Depuis, de nombreuses formules empiriques et semi-empiriques du champ seuil de l'effet couronne ont été établies par divers auteurs. Dans tous les cas, l'expression du seuil « E_S » est donnée sous la forme générale suivante [40].

$$E_S = f\left(1 + \frac{G}{R_0^B}\right) \quad (1.19)$$

Avec :

E_S : Champ seuil d'apparition de la décharge.

G, B, f : Des constantes qui diffèrent d'un auteur à l'autre, elles dépendent de la géométrie de l'électrode et de la densité du gaz.

R_0 : Rayon du conducteur de l'électrode active.

Récemment, des études approfondies et des mesures expérimentales très précises ont été réalisées sur le seuil d'apparition de la décharge couronne. Ces auteurs ont proposé un modèle physico-mathématique qui généralise la loi de Peek. Ce modèle repose d'une part sur la notion de la longueur de l'avalanche « L_C » définie pour la première fois par Nasser et al [41], et de l'autre sur un critère qui a été proposé à l'origine par Meek et amélioré ultérieurement par Hartmann. Ce dernier suppose qu'à la tête de l'avalanche les électrons ne peuvent se multiplier en raison des champs « E_S » à la surface de l'anode et « E_P », dû à la charge d'espace en tête de l'avalanche, qui s'opposent. La somme algébrique est donc égale au champ critique du minimum d'ionisation « E_C » correspondant à « $\alpha - \eta = 0$ »[40].

$$E_C = E_S + E_P \quad (1.20)$$

L'expression du champ seuil à la surface de l'anode est :

$$E_S = E_C \left(1 + \frac{L_C}{R_0}\right) \quad (1.21)$$

E_C : calculé en fonction de la pression, de la température et de l'humidité absolue « H_a » est donné par l'expression suivante [49] :

$$E_C(\delta, H_a) = E_C(1.0) \delta (1 + \alpha \sqrt{H_a}) \quad (1.22)$$

I.7) Applications utilisant la décharge couronne :

Les décharges couronne sont utilisées dans de nombreux domaines où elles remplacent des techniques souvent plus polluantes (utilisation de solvants). Les décharges couronne offrent de nombreuses possibilités pour le traitement des gaz et plus particulièrement les gaz polluants [42] [43] [44] [45], notamment dans le cas des COV (méthanes [46] [47],

acétaldéhyde [48] [49], CFC [50]), du CO₂ [51], des NO_x [52] ou du SO₂ [12]. Les géométries de réacteur permettant d'obtenir simultanément plusieurs décharges (système multi-impulsions) semblent les plus adaptées puisqu'elles autorisent des débits de gaz à traiter plus importants. Les décharges couronnes sont aussi employées dans les processus électrostatiques [53]. Cependant elles restent pour certaines applications encore trop coûteuses d'un point de vue énergétique comparées à d'autres méthodes mieux maîtrisées. Mais les recherches effectuées sur le sujet tendent à accroître leur intégration dans le milieu industriel et ouvrent de nouvelles possibilités [54].

I.7.1) Paratonnerre :

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe, le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre (**figure I-7**).

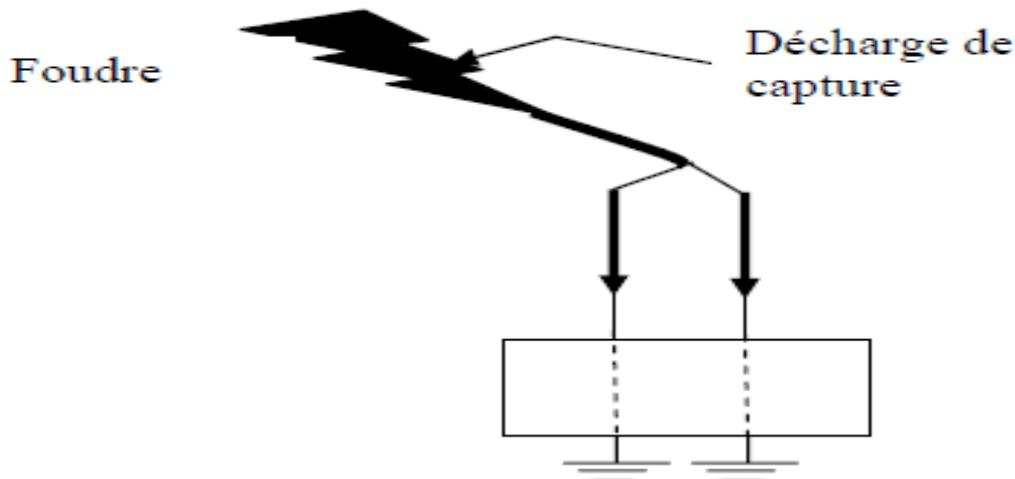


Figure I.7 : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre

I.7.2) Filtre électrostatique :

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (**Figure I.8**).

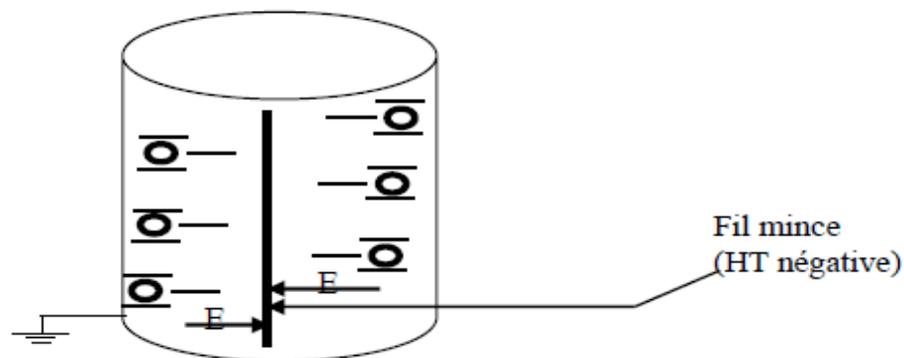


Figure I.8 : Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique

I.7.3) Dépollution des effluents gazeux :

Le traitement de gaz avec les décharges couronne se fait par des réacteurs. L'utilisation des réacteurs plasmas froids hors équilibre générés par des décharges électriques de type couronne nous permet de traiter les gaz à pression atmosphérique. Le traitement s'effectue soit en détruisant les espèces toxiques, soit en les transformant en espèces moins nocives et/ou plus facilement traitables par d'autres techniques de dépollution. Les espèces toxiques traitées peuvent être des oxydes d'azote et de soufre ou des composés organiques volatiles. Dans certains cas, le réacteur corona peut également servir de précipitation électrostatique et piéger les poussières ou les particules lourdes [53] [55]. Le traitement d'un gaz d'échappement par réacteur corona s'effectue en trois principales étapes comme il est indiqué sur la (figure I.9).

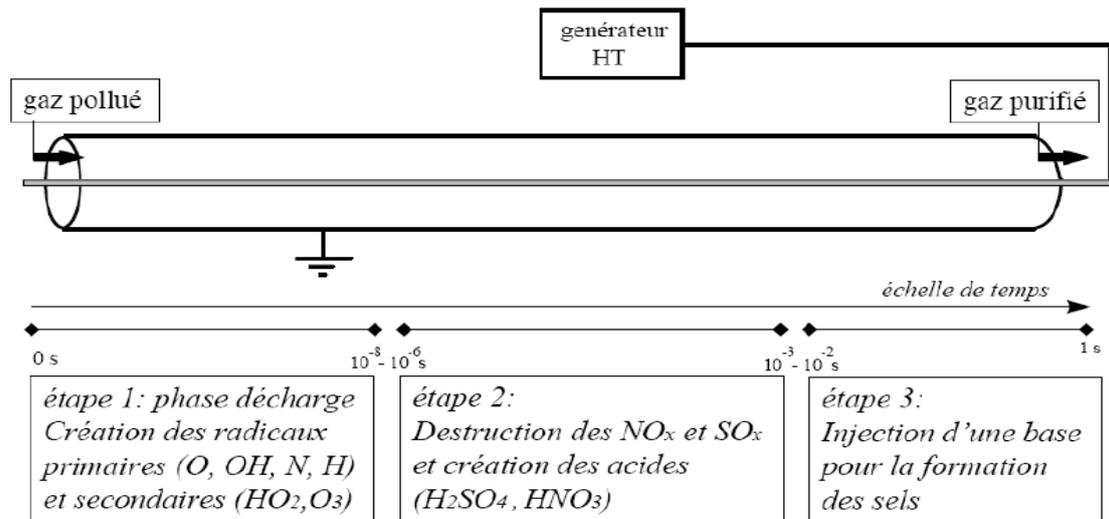


Figure I.9 : Les principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne [55].

I.7.4) Générateurs d'ozone :

Une des conséquences importantes de la décharge couronne est la production d'ozone autour des conducteurs actifs. Cette espèce, au fort pouvoir oxydant, est alors utilisée dans de nombreux domaines comme l'industrie agro-alimentaire, en tant que désinfectant ou conservateur, ou encore dans le traitement des eaux.

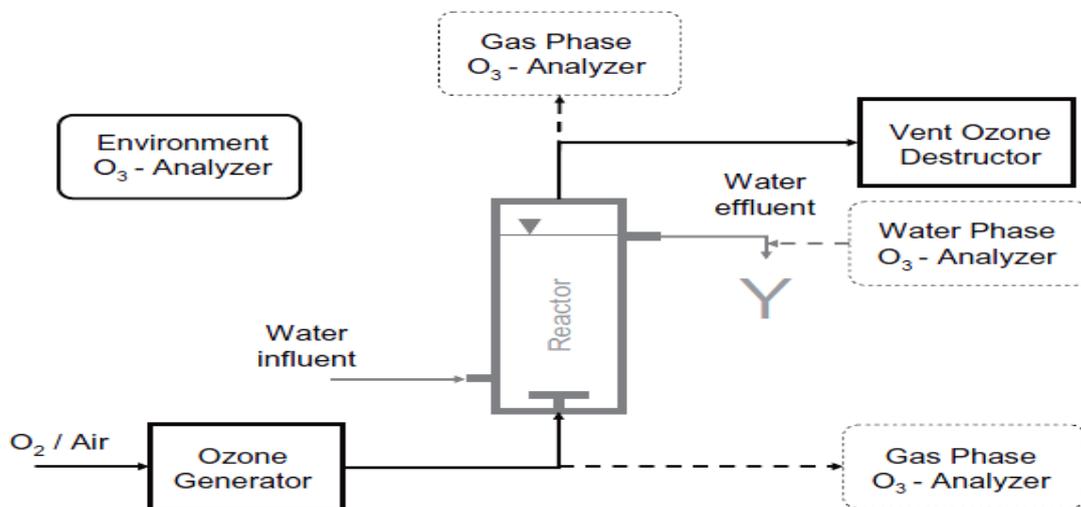


Figure I.10 : Composants de base de toute installation expérimentale d'ozonation [56].

I.7.5) Séparateur électrostatique :

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents [57]. (Figure I.11).

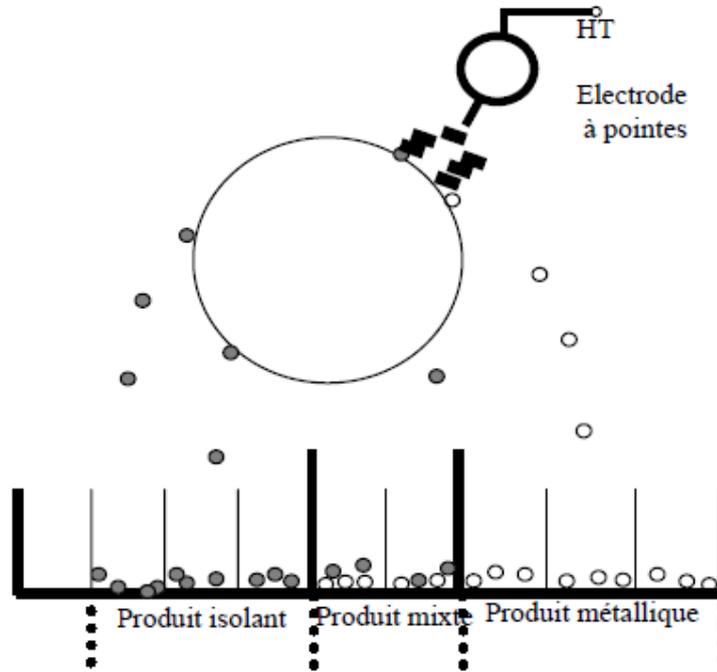


Figure I.11 : Utilisation de la décharge couronne dans la séparation électrostatique

I.7.6) Autres application :

Outre les applications citées précédemment, l'effet couronne est aussi utilisé dans l'élimination de l'électricité statique, dans les photocopieurs ou les imprimantes à jet d'encre [58].

I.8) Facteur influençant la décharge couronne :

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [59]. On distingue trois facteurs essentiels :

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

I.8.1) facteurs géométriques

I.8.1.a Rayon de la courbure :

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

I.8.1.b Distance inter-électrodes :

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la (figure I.12).

Il apparait clairement que le courant est plus important et croit plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter électrodes [60].

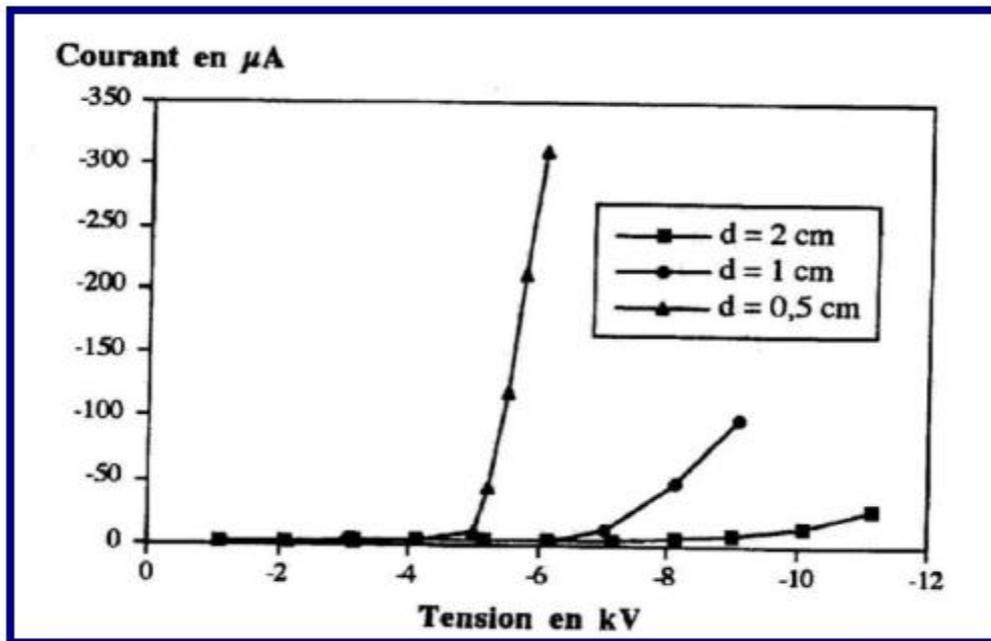


Figure I.12 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [60]

I.8.1.c La forme des électrodes :

Dans les systèmes d'électrodes utilisées, la distribution du champ électrique dans l'espace inter électrodes.

En champ non homogène, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan (Figure I.13). Par contre, en champ homogène (figure I.14), dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique, autrement dit, la décharge couronne est inexistante et les tensions U et U_d sont confondues [61].

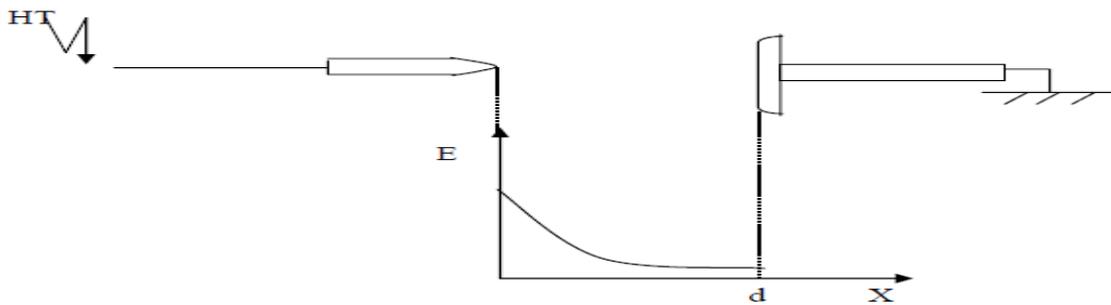


Figure I-13 : Distribution du champ dans un système pointe-plan

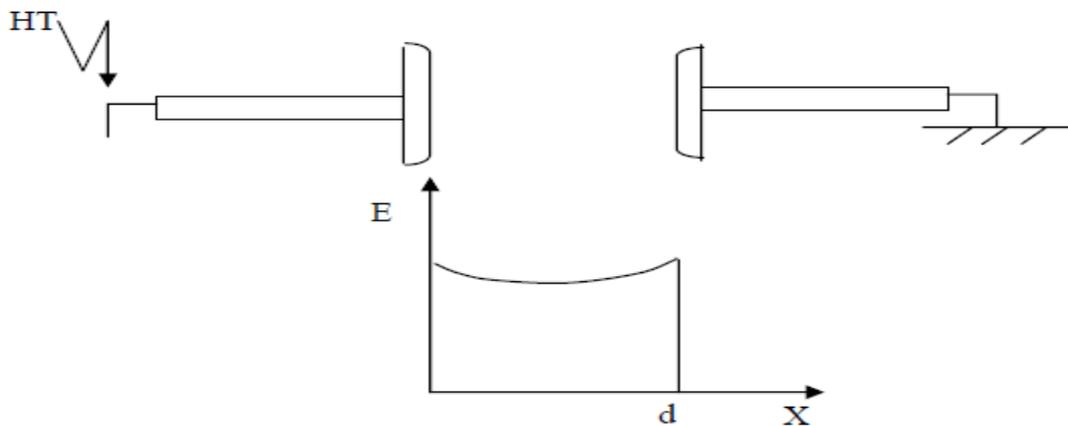


Figure I-14 : Distribution du champ dans un système plan-plan

I.8.1.d Etat de surface :

L'état de surface des conducteurs est un paramètre important par le fait que, plus il se dégrade plus les pertes augmentent et plus le champ perturbateur est élevé.

I.8.2) Les facteurs physico-chimiques

I.8.2.a La densité de l'air:

Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

I.8.2.b La température :

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne.

I.8.2.c L'humidité :

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante, surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme.

I.9) Décharge couronne en géométrie multi-fils-deux plans :

Si on applique une tension continue positive ou négative suffisante (V 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 caractérisée par une charge d'espace unipolaire de même signe que celui de la tension appliquée, (fig. I.15). A l'interface des deux zones, le champ électrique est égal au champ critique E_c du minimum d'ionisation correspondant à $\alpha - \eta = 0$.

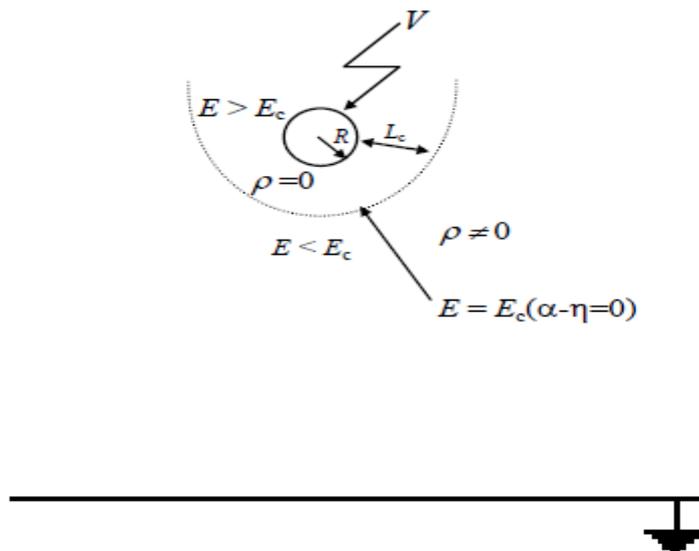


Fig. I.15 : Représentation schématique d'une décharge couronne continue en géométrie Fil-Plan

En ce qui concerne la décharge couronne négative en géométrie multi-fils - 2 plans, à laquelle on s'est intéressé pour la réalisation de notre étude expérimentale, les phénomènes observés sont les mêmes, par contre, dans le cas de l'électrode à couronne négative, les électrons seront refoulés vers le plan. En traversant la zone de dérive où le champ est faible, les électrons s'attachent à des molécules ou à des atomes et forment ainsi une charge d'espace monopolaire négative.

I.10) Développement de la Recherche sur la décharge couronne :

Dès les débuts de l'électrotechnique des hautes tensions, l'effet couronne a attiré l'attention des chercheurs. Ce phénomène a fait l'objet de plusieurs études afin de déterminer les paramètres qui gouvernent cette décharge.

Les travaux de Ryan et Henline en 1924 et de Hesselmeyer et Kosrko en 1925 et de Holm en 1927 [62] sont les premiers travaux effectués sur le phénomène couronne, mais ils ne sont pas des études de laboratoire, c'est simplement des théories.

Cependant les études en laboratoire ont commencé au cours du siècle passé.

La première étude sur l'effet couronne a été faite par R.W.Peek en 1929 qui a établi une première loi empirique exprimant le champ de seuil d'apparition de la lueur. La loi qui est encore en usage [63].

$$E_{peek} = 31.m.\delta. \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta R_0}} \right)$$

De là une grande étape a été franchie et des travaux ne cessent de s'effectuer afin de caractériser ce phénomène et de déterminer ses paramètres.

Par la suite de nombreuses recherches ont été effectuées pour expliquer la formation des pertes par effet couronne.

Dans cette recherche on cite quelques travaux qui ont été élaborés.

Goldman et al [64] indique qu'un courant positif de $50\mu A$ se décomposerait en un courant unipolaire continu de $20\mu A$, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à $30\mu A$ percutant la cathode à une fréquence de 10KHZ.

Goldman et al [64] ont identifié trois composantes du courant dans le cas d'une tension alternative :

- Le courant capacitif dû à l'intervalle gazeux entre les électrodes qui jouent le rôle d'un condensateur.
- Le courant synchrone, continu et en phase avec la tension appliquée.
- Le courant impulsionnel, somme des impulsions « streamers » pour les alternances positives et des impulsions de « Trichel » lors des alternances négatives.

Goldman et Sigmond [65] expliquaient que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode. Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers la plaque. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc.

Les premiers essais en laboratoire datent de 1932 [62] grâce au développement des systèmes de haute tension. En 1940 c'est le rôle de Loeb, Meek et Raether qui proposent un nouveau modèle de propagation de l'avalanche électronique lors de la décharge [63].

En 1970 les chercheurs se sont intéressés à l'amplitude de vibrations mécaniques induites par l'effet couronne sur les conducteurs portés à la haute tension utilisés pour le transport d'énergie électrique observé à cause de présence de pluie, des brouillards etc. [66]

En 1979 Janischewskyj et Gela [67], ont appliqué la technique des éléments finis pour résoudre les équations de la décharge couronne en configuration fil-cylindre à partir de l'hypothèse de Deutsch. Ils ont aussi utilisé cette hypothèse pour calculer les pertes d'énergie dans le système fil-plan en 1980 [68], mais pour le calcul du champ électrique et la densité de courant ils ont été moins précis.

Takuma, Ikeda et Kawamoto [69], ont réussies à remplacer l'hypothèse de Kaptzov par une autre hypothèse qui définit que la densité de la charge d'espace sur la surface de l'électrode active est constante en 1981. En utilisant une procédure basée sur la méthode des éléments finis pour la résolution des équations de la décharge couronne en configurations cylindres-coaxiaux et fil plan.

En 1983 Davis et Hoburg [70] ont développé une méthode pour calculer les distributions du champ électrique et de la densité de la décharge d'espace dans un précipitateur électrostatique.

Cette méthode hybride combinant deux méthodes ; la méthode des éléments finis et la méthode des caractéristiques [71].

Abdel-Salam et Al [72], ont réussi en 1983 à appliquer une méthode itérative utilisant les éléments finis pour modéliser la ligne de transmission à CCHT sans utiliser des données expérimentales.

En 1986 M. Farzaneh a visualisé le mouvement des décharges d'espace [73] grâce à un code de calcul produit par EDF [74] pour analyser la formation des pertes.

Une analyse complète sur la physico-chimie de la décharge électrique avec deux électrodes immergées dans l'eau a été lancée par Clements et Al en 1987.

Depuis les années 1990 la spectroscopie d'émission est employée pour montrer la production de quantité significative des radicaux d'hydrogène dans la phase liquide [75].

Pour la première fois en 1993 Abdel-Salam et Al-Hamouz [76] [77] appliquent la technique des éléments finis pour l'analyse du problème des champs ionisants en configurations cylindres-coaxiaux et fil-plan.

En 2001 Yala [78], a utilisé une méthode hybride basée sur la technique des éléments finis et la méthode des tubes de flux afin de résoudre des équations régissant le problème couplé, champ électrique-charge d'espace, de la décharge couronne monopolaire et permettant le

calcul des paramètres électriques de la décharge couronne en particulier le champ électrique dans les systèmes d'électrodes fil-cylindre coaxial et fil-plan.

Fujioka et Al [79] ont utilisé la même méthode, la méthode des éléments finis pour une autre configuration, c'est la configuration bipolaire.

AbdAelsaad et Al [80], ont créé un algorithme basé sur la MEF, ils abandonnent l'hypothèse de Kaptzov qu'ils remplacent par l'utilisation d'un polynôme en reliant la tension appliquée au champ électrique sur le fil. Cette relation utilisée par Abdel-Salam et Hamouz [76].

En 2003 [81], Yala, Kasdi et Zeboudj ont proposés une nouvelle méthode, ils ont couplé la technique des éléments finis comme un outil numérique et un schéma itératif pour résoudre l'équation de poisson dans un système fil-plan. Ils ont utilisé le modèle qui sépare la couronne en deux régions distinctes, région d'ionisation et région de dérive, basé sur l'épaisseur de la zone d'ionisation et la première hypothèse de Deutsch. Ils ont prouvé que cette méthode est efficace en l'appliquant à la géométrie fil-plan où le champ a été mesuré par la sonde polarisée linéaire. L'accord entre les valeurs de la densité de courant et du champ électrique calculés par rapport aux valeurs mesurées été satisfaisant.

Adamiak en 2004 [82], a proposé une technique numérique pour déterminer les distributions du champ électrique et la densité de charge. Ils ont traité le cas d'une décharge positive dans le gaz pour une géométrie pointe-plan, se basant sur les limites et la méthode des éléments finis pour obtenir les composantes harmoniques de l'espace de charge du champ électrique, cette méthode détermine la distribution de densité de courant sur le sol. Ils ont comparé les valeurs calculées avec celles mesurées à l'aide d'une aiguille de cylindre conique avec une pointe de forme sphérique, cette étude appartient à l'hypothèse de Kptzov.

En 2006 Bassem Khaddour [83] détermina les distributions du champ électrique et de densité de charge dans la configuration lame-plan. Il a développé un code numérique utilisant la méthode des éléments finis MEF pour résoudre l'équation de poisson et la méthode des caractéristiques MC pour résoudre l'équation de conservation de la charge. Les deux équations couplées sont résolues par approximations successives en redéfinissant le maillage structuré et la partie la plus importante du travail. L'algorithme converge bien pour différentes distributions de la charge définies sur la lame injectrice. Les résultats des solutions numériques obtenues pour une loi d'injection imposée sur la lame plate en très bon accord avec les mesures de densité de courant sur l'électrode plane d'un dispositif lame-plan.

Zeboudj et Oussalah [84] ont présenté un travail sur la décharge couronne négative en géométrie fil-plan. L'équation de poisson est résolue à partir de la méthode des éléments finis et l'équation de continuité qui mettait à jours la densité de charge d'espace a été résolue en utilisant la méthode simplifiée des caractéristiques, qui néglige la diffusion ionique. Le modèle numérique utilisé prend en compte la région d'ionisation. Ils ont proposé

l'introduction d'un potentiel correspondant au champ critique du minimum d'ionisation directement dans la formation des éléments finis comme condition de Dirichlet. On remarque que les calculs sont en bon accord avec des données expérimentales avec une erreur négligeable de la tension calculée au début. Les calculs numériques sont comparés aux données expérimentales mesurées avec la sonde polarisée linéaire.

En 2007, Kasdi [70] a proposé une technique numérique itérative en vue de résoudre les équations gouvernant le problème couplé charge d'espace-champ électrique caractérisant la décharge couronne. Cette technique consiste à employer la méthode des éléments finis FEM pour résoudre l'équation de Poisson et la méthode des caractéristiques MOC pour évaluer la densité de la charge d'espace à partir de la relation de la continuité du courant. Le modèle évite de recourir à l'hypothèse simpliste de Deutsch. Ce travail a été effectué sans tenir compte du vent et de la diffusion des ions.

En 2013 [85], Adamiak s'est basé sur les travaux les plus importants sur la simulation numérique des processus dans les précipitateurs électrostatiques. Il a fait son étude sur la configuration fil-plaque. Un progrès continu a été démontré entre les premiers travaux publiés et les publications récentes où les prédictions numériques montrent un étroit accord avec les données expérimentales.

En 2014, R. Jekidel, D. Mahi, A. Ameer et A. Ouchar [86] présentent une méthode de simulation de charge en présentant une méthodologie d'analyse sur la répartition du champ électrique généré par une ligne aérienne à haute tension 400 kV. Cette étude est faite pour la réduction et l'atténuation de l'intensité de champ électrique au moyen des écrans. Pour calculer le champ électrostatique, ils se sont basés sur la méthode de simulation de charge avec logiciel matlab, ils ont comparé les résultats de simulation avec ceux obtenus par le logiciel multi-physique (comsol 3,5a) qui est basé sur la méthode des éléments finis.

En 2014 [87], E. Potrymai et I. Perstnovont ont proposé un travail qui est basé sur la modélisation physique et numérique de la décharge couronne dans un dépoussiéreur électrostatique (ESP). En reliant les équations de Maxwell et la méthode des éléments finis (FEM), les équations sont résolues avec succès en utilisant COMSOL Multiphysics. Ils ont étudié la distribution de charge électrique et le comportement du champ électrique à l'intérieur de l'ESP en se basant sur une méthode de simulation. Ce travail se concentre principalement sur les études en fonction de temps de la décharge couronne.

En 2015 [88], Ahmed Kasdi, Youcef Zebboudj et Hakim Yala ont proposé un travail d'analyse sur la décharge couronne positive et stable en courant continu dans l'air atmosphérique dans un système fil-cylindre. Pour obtenir une solution générale des équations de la charge d'espace couplé à un problème de champ électrique ils ont développé une technique d'éléments finis itérative. Cette technique permet de résoudre l'équation de Poisson à l'aide de la méthode des éléments finis et trouver la densité de charge à l'aide de la méthode des caractéristiques (MOC) à partir d'une relation de continuité du courant. Le champ couronne ionisant a été modélisé avec succès en utilisant COMSOL MULTIPHYSICS pour

résoudre le système d'équation couplées avec des conditions aux limites. Ils ont comparé les résultats de la simulation avec ceux mesurés, les résultats obtenus sont en bon accord.

Kasdi en 2016 [89], a proposé une recherche numérique et expérimentale d'un type de dépoussiéreur électrostatique en nappe de fils-plan sous des conditions d'air pur. Pour développer les performances du dispositif, de nombreuses configurations d'électrodes sont testées. Les équations régissant la décharge couronne sont résolues avec succès en utilisant comsol Multiphysics. Le travail simule toute la géométrie et toutes les décharges des fils afin de prendre en compte leur effet mutuel. Il montre un bon accord entre les résultats du modèle numérique qui ont été comparés avec les mesures expérimentales.

I.11) Conclusion :

Nous avons rappelé dans ce chapitre les décharges électriques dans le cas générale et nous sommes intéressés particulièrement aux décharges couronne générées entre deux électrodes par l'application d'un champ électrique pour l'intérêt qu'elle représente dans notre travail et ce afin de bien comprendre le phénomène physique d'une telle décharge.

Nous avons évoqué les deux modèles de décharge Townsend et streamer. Comme les décharge couronne que nous étudions sont des décharge filamentaire (décharge positive et négative).

Nous avons aussi décrit les différents mécanismes à l'origine de la formation et de propagation de ce type de décharge.

Chapitre II

II.1) Introduction :

La décharge couronne est caractérisée par plusieurs paramètres tels que la tension, le champ ou le courant. La connaissance de ces paramètres est nécessaire que ce soit dans les domaines d'application de la décharge couronne où dans les cas où, au contraire, il faut diminuer de ses effets. Parmi ces paramètres, nous allons nous intéresser à la densité de courant, la caractéristique courant-tension et le champ électrique. La mesure de ce dernier est loin d'être facile à cause de la présence d'une charge monopolaire à proximité du plan causé par la dérivation vers le plan des ions produits dans la zone d'ionisation lors de la décharge couronne. Pour la mesure du champ électrique, il y'a plusieurs méthodes utilisées par le passé, tels que les machines à champ (moulins à champ et fluxmètre électrostatique) et les sondes capacitatives introduites pour la première fois par Collins et Meek en 1965. Un autre type de sonde est par la suite introduit ; c'est la sonde polarisée.

II.2) La sonde polarisée :

Il ya deux types de sondes polarisées, les sondes circulaires et les sondes linéaires. Ce sont de simples capteurs incorporés dans une électrode mise à la terre de sorte que la sonde et l'électrode soient au même niveau. Le principe de ces sondes est introduit par Tassicker en 1974 [90] sur un modèle de forme circulaire et développé par Selim et Waters en 1980 [91].

Dans nos travaux, nous nous sommes intéressés à la sonde polarisée circulaire.

II.2.1) Principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire:

La sonde polarisée circulaire est considérée comme un plan circulaire de surface S_s et de rayon r_s , placé au milieu d'une électrode (E) de surface S_E et de rayons intérieur et extérieur respectivement r_e et R_e d'une façon que les surfaces S_s et S_E soient au même niveau et forment un intervalle d'air de largeur $g = r_e - r_s$.

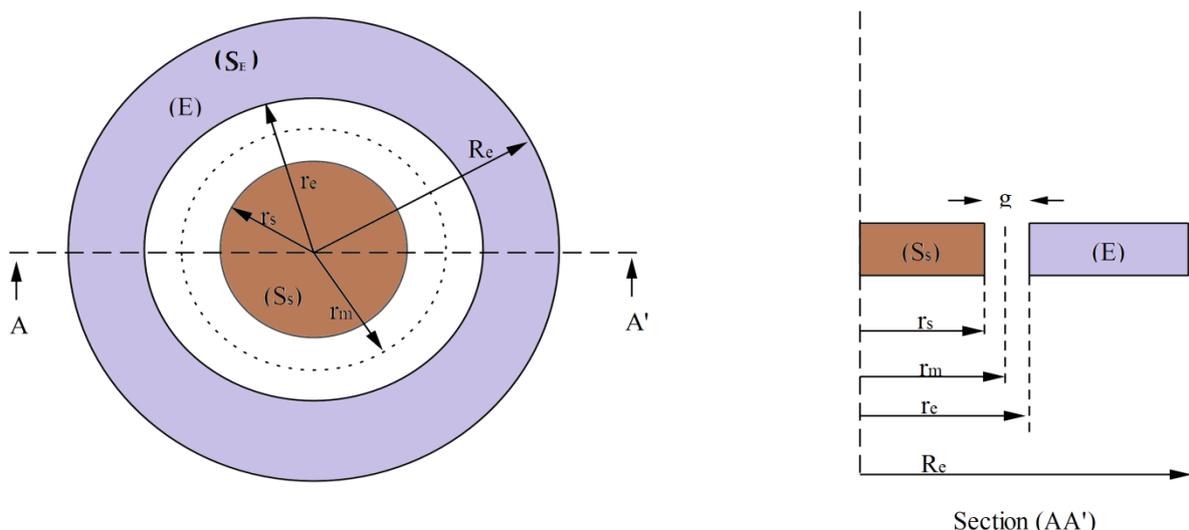


Figure II.1 : sonde circulaire de Tassicker [19].

Le principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire est basé sur la mesure du courant collecté par la surface de la sonde pour ensuite déduire le champ électrique à sa surface.

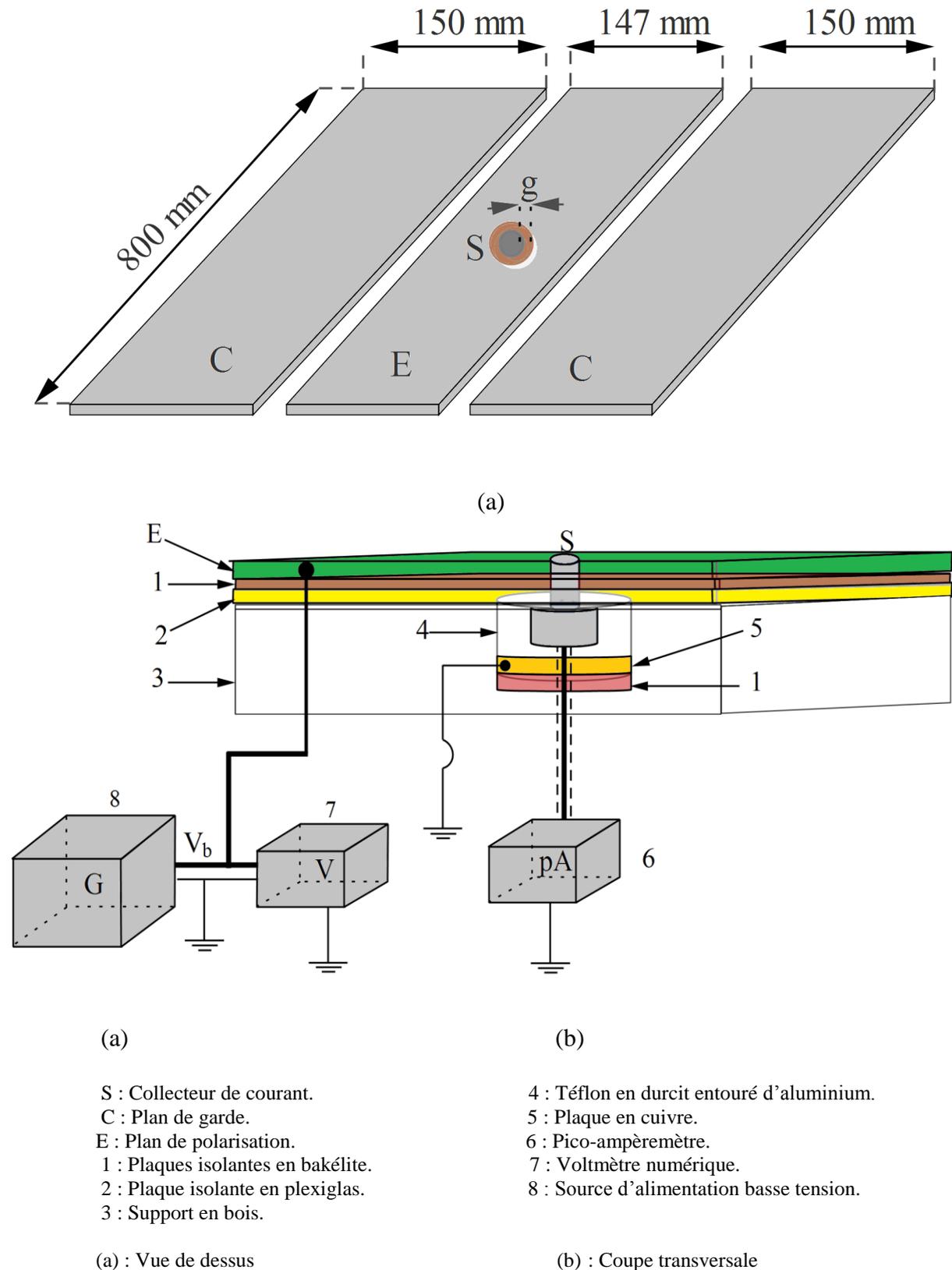


Figure II.2 : Schéma de la sonde polarisée circulaire.

La détermination de l'intensité de ce champ est obtenue en mesurant le courant résultant de la décharge couronne en absence et en présence de la tension de polarisation.

Quand il n'y a pas de polarisation ($V_b = 0$) le courant mesuré est I_{s0} (Figure II.3a).

Quand la plaque (E) est polarisée ($V_b \neq 0$) (Figure II.3b) il y a création d'un champ local E_b qui se superpose au champ extérieur E (Figure II.3c). Le courant I_s mesuré par la sonde va augmenter si la tension de polarisation est positive, et réduit si la tension de polarisation est négative.

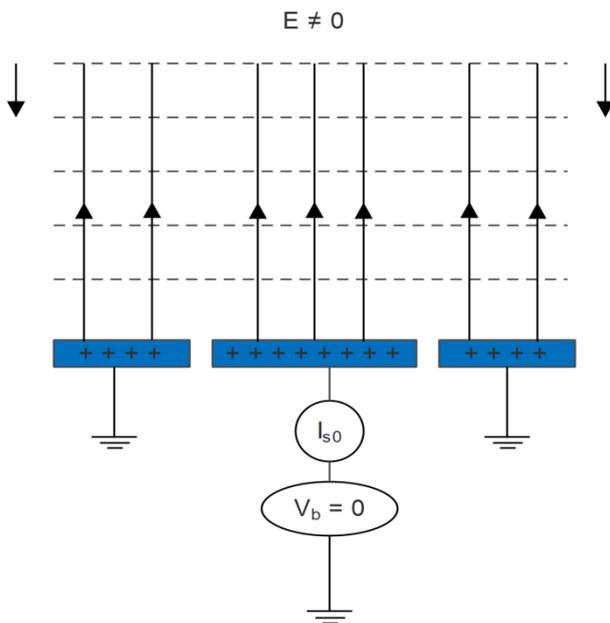


Fig. II.3a : Lignes de champs et équipotentielles en présence de décharge électrique avec la sonde non polarisée.

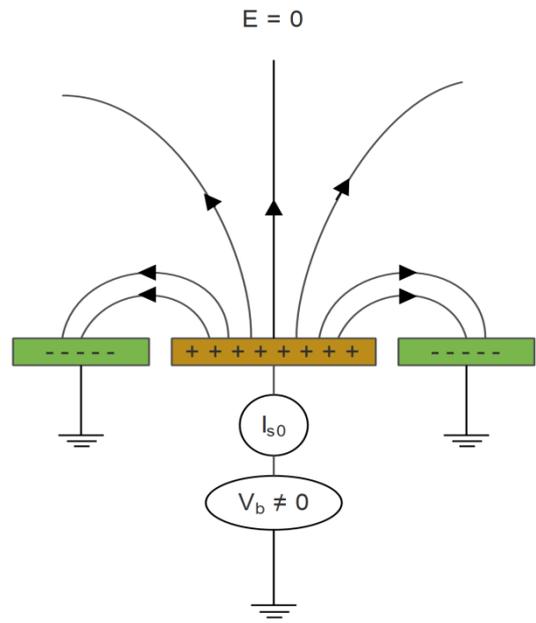


Fig. II.3b : Lignes de champs et équipotentielles en absence de décharge électrique avec la sonde polarisée.

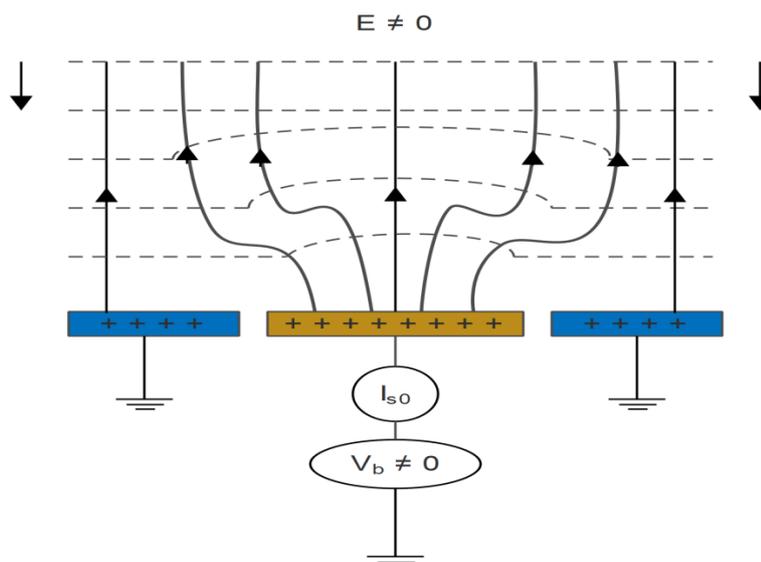


Fig. II.3c : Lignes de champs et équipotentielles en présence de décharge électrique avec la sonde polarisée.

La difficulté de mesure du champ se trouve aux extrémités de la sonde (S) et au tour de l'électrode (E). 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
$$\frac{I_s}{I_{s0}} = \frac{\phi_s}{\phi_{s0}} = 1 + \frac{C_0}{\pi \cdot r_m \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{V_b}{r_m \cdot E} \quad (\text{II.1})$$

Qui se base sur l'égalité des quantités $\frac{I}{I_{s0}}$ et $\frac{\phi_s}{\phi_{s0}}$ n'est plus valable.

D'après Selim et Waters il existe deux cas de distribution du flux :

- **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).

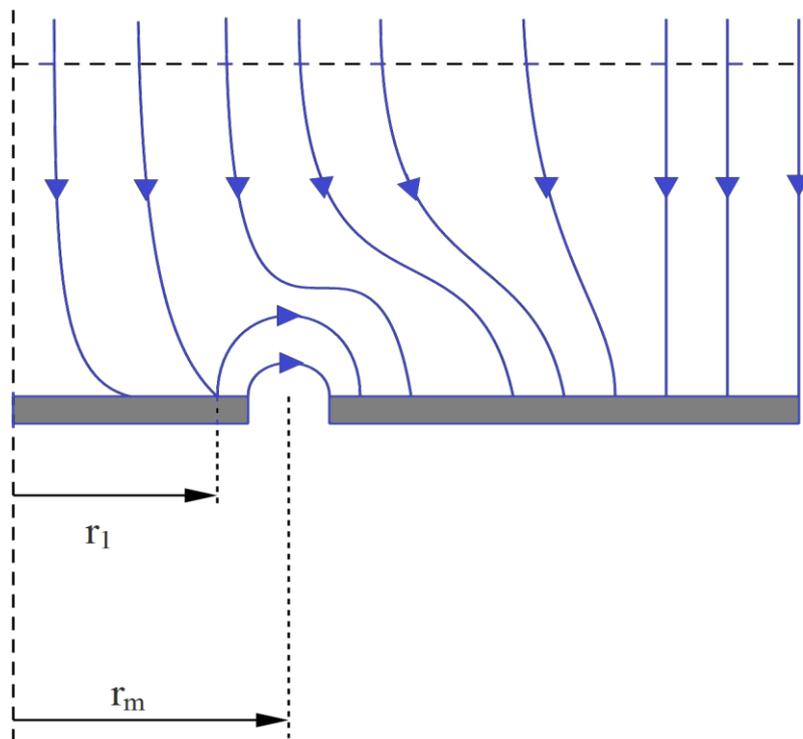


Figure II.4 : Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée négativement.

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

$$\phi_s = 2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \int_0^{r_1} (E - E_b) \cdot r \cdot dr \quad (\text{II.2})$$

r_1 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 :

$$\Phi_{S0} = \pi r_m^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E \quad (\text{II.3})$$

A partir des équations (II.2) et (II.3), on peut déduire le rapport des courants comme suit :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\phi_s}{\phi_{s_0}} = \frac{2}{r_m^2 \cdot E} \cdot \int_0^{r_1} (E - E_b) \cdot r \cdot dr \quad (\text{II.4})$$

- **Cas où E_b s'ajoute à E :**

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

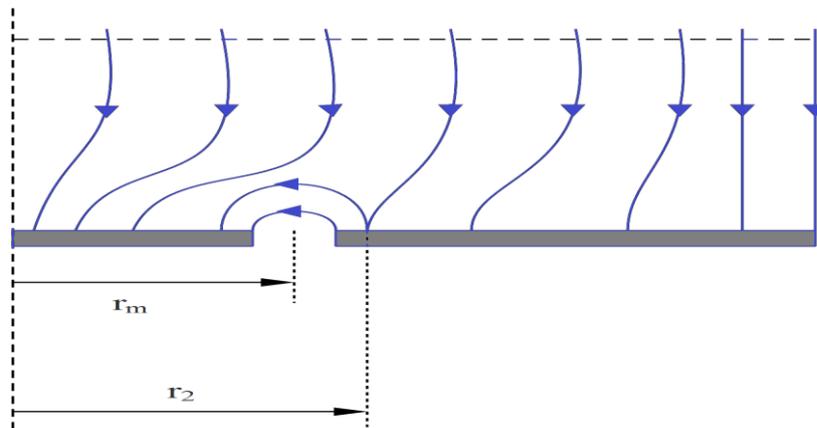


Fig. II.5 : Distribution du flux à la surface de la sonde dans le cas où la sonde est polarisée positivement.

Le rapport $\frac{I}{I_{s0}}$ est donné par :

$$\frac{I}{I_{S0}} = \frac{E \cdot R_b^2 - 2 \cdot \int_{r_2}^{R_b} (E - E_b) \cdot r \cdot dr}{E \cdot r_m^2} \quad (II.5)$$

Lorsqu'on approxime successivement $r_1 = r_m$ (à $V_b < 0$) et $r_2 = r_m$ (à $V_b > 0$), les équations (II.4) et (II.5) deviennent identiques à l'équation (II.1) donné par Tassicker. Dans le cas de faibles valeurs de V_b , l'approximation n'est pas justifiée 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.4) et (II.5) 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 [19].

I.3) Calcul du champ électrique E :

La détermination du champ électrique E en un point donné du plan de mesure se fait par la mesure des courants collectés par la surface de la sonde en ce point. Pour calculer les valeurs expérimentales du champ électrique E :

$$I = J \cdot S_s \quad (II.6)$$

$$J = \frac{\mu \cdot \rho}{\varepsilon_0} \cdot D \quad (II.7)$$

$$I = \frac{\mu \cdot \rho}{\varepsilon_0} \cdot D \cdot S_s = \frac{\mu \cdot \rho}{\varepsilon_0} \cdot \phi_s \quad (nA) \quad (II.8)$$

Avec :

- μ : Mobilité moyenne des ions [$m^2/V \cdot s$] ;
- ρ : Densité de la charge d'espace [C/m^3] ;
- D : Vecteur du déplacement électrique ;
- ϕ_s : Flux du vecteur D à travers la sonde ;
- S_s : Surface réelle de la sonde ;
- J : Densité de courant électrique ;
- ε_0 : Permittivité électrique du vide ;

Lorsque la sonde est polarisée, nous avons deux contributions du flux ϕ_s :

- La première provient du champ E à mesurer.

➤ Le deuxième provient de la tension de polarisation V_b .

Le flux ϕ_s à travers la sonde est donné par :

$$\phi_s = \phi_{s0} + \phi_{s1} \quad (\text{II.9})$$

ϕ_{s0} : Le flux du champ à mesurer.

ϕ_{s1} : La contribution du champ de polarisation E_b .

Ces flux sont donnés par :

$$\phi_{s0} = S_m \cdot E \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{II.10})$$

$$\phi_{s1} = c_0 \cdot V_b \quad (\mu F \cdot V) \quad (\text{II.11})$$

Avec: $S_m = \pi \cdot r_m^2$

S_m : La surface effective de la sonde.

r_m : Le rayon effectif.

C_0 : La capacité du condensateur constitué par la sonde (S) et l'électrode (E).

II.4) Les paramètres de la décharge couronne :

II.4.1) Champ électrique E aux plans de mesure :

La connaissance du rapport des courants I_s / I_{s0} en fonction de la tension de polarisation V_b , nous permet de déterminer le champ électrique aux plans de mesure à partir des courants collectés par la sonde polarisée.

I_{s0} : est le courant collecté sans polarisation de la sonde.

I_s : est celui collecté en polarisant la sonde avec une tension V_b .

Pour la sonde polarisée circulaire, le champ électrique E au plan est déterminé par cette relation :

$$\frac{I_s}{I_{s0}} = \frac{\phi_s}{\phi_{s0}} = 1 + \frac{C_0}{\pi \cdot r_m \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{V_b}{r_m \cdot E} \quad (\text{II.12})$$

C_0 Représente la capacité entre la sonde et le plan de mesure, sa valeur est définie à base de la formule de Spence :

$$C_0 = 4 \cdot r_m \cdot \varepsilon_0 \cdot \left[1,07944 + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{1+r_m}{2 \cdot g} \right) \right] \quad (\mu F) \quad (II.13)$$

- r_m : Le rayon effectif de la sonde ($r_m = (r_s + r_e)/2$).
- ε_0 : $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ dans l'air sec.

r_s et r_e sont respectivement les rayons de la sonde et le rayon intérieur de l'électrode (E).

Pour $r_s = 2,35 \text{ mm}$, $r_e = 2,5 \text{ mm}$ et $g = 0,15 \text{ mm}$, $C_0 = 0,18 \text{ pF}$

Le principe de la relation (II.12) 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.13) on aura :

$$P_e = \frac{C_0}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E} \quad (II.14)$$

Pour la valeur du champ E au plan :

$$E = \frac{C_0}{\pi \cdot r_m^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot P_e} \quad (K_V/m) \quad (II.15)$$

II.4.2) Densité de courant (J) au plan de mesure :

Pour les mesures du courant électrique, un électromètre (pico-ampèremètre) à courant continu de type MV 40 est utilisé. La plage de mesure permise par cet appareil s'étend de 10^{-13} à $3 \cdot 10^{-4}$ ampères. La mesure du courant s'effectue avec une précision de $\pm 1,5 \%$.

Nous avons mesuré la densité du courant de décharge J au plan lorsqu'elle n'est pas polarisée à partir de la sonde (S) de Tassicker.

La densité du courant est donnée par la relation suivante :

$$J = \frac{I_{s0}}{S_m} \quad (A/m^2) \quad (II.16)$$

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.4.3 Conductivité (σ) de l'effet couronne près du plan :

Lors de l'apparition de l'effet couronne, l'espace inter-électrode se divise en deux régions :

Une zone d'ionisation à champ fort ou la charge d'espace est considérée nulle et une zone de dérive des ions positifs à champ faible. La conductivité moyenne de l'air –électrode est constante (de l'ordre de $10^{-12}(\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$), 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.

La conductivité σ est donnée par la relation suivante :

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

Donc pour déterminer la conductivité σ 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.

II.5) Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à une étude théorique de la sonde polarisée circulaire de Tassicker et le principe de son fonctionnement, et d'autres travaux qui s'appuient sur une étude expérimentale pour voir l'influence d'autres paramètres tels que : la densité de courant J , le champ électrique E et la conductivité σ .

Chapitre III

III.1) Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous allons présenter une étude expérimentale dans le but de déterminer les différents paramètres électriques de la décharge couronne et faire une comparaison entre la décharge couronne positive et la décharge couronne négative en géométrie multi-fils – 2 plans. Cette étude a été menée au laboratoire de haute tension de l'université de Béjaia.

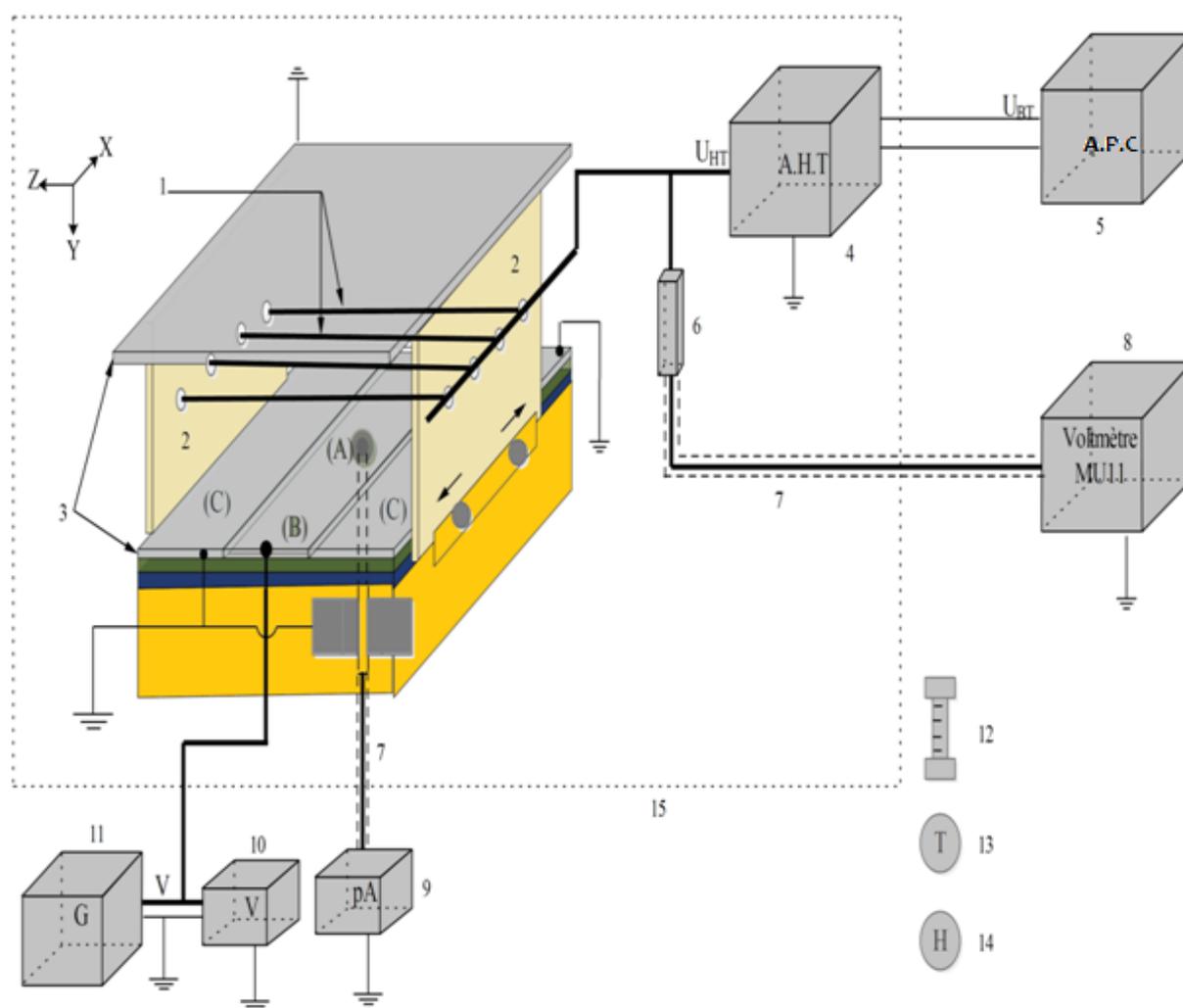
Nous avons commencé dans notre étude par relever la caractéristique courant-tension de la décharge afin de déterminer la tension seuil d'apparition de l'effet couronne. Dans un second temps, nous avons mesuré le champ électrique et la densité de courant à la surface du plan mis à la terre en utilisant la sonde circulaire de Tassicker.

Le principe des essais consiste à mesurer le courant collecté par la sonde pour différentes tensions de polarisation V_b et pour différentes tensions appliquées aux conducteurs actifs. Ces 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) Dispositif expérimental

L'ensemble du dispositif expérimental pour la géométrie multi-fils-2plans réalisé est représenté sur la figure (III.1). Il est composé d'une source de haute tension continue et du système d'électrodes isolés par une grille de protection (15) du manipulateur et des autres appareils de mesure basse tension.

La source de haute tension continue (4), est composée principalement d'un appareil de commande source A.C (5) qui alimente un transformateur élévateur suivi d'un circuit redresseur. La haute tension continue générée est de l'ordre de 140 kilovolts. Les électrodes actives (1), auxquels nous avons appliqué cette tension, sont tendues à une hauteur h par deux supports isolants en plexiglas (2) à mi-chemin entre deux plans mis à la terre (3). Pour mesurer le courant de décharge, un pico-ampèremètre (9) est connecté à la sonde circulaire de mesure (A). Le plan de mesure (B) est relié à une alimentation continue basse tension (11) aux bornes de laquelle est connecté un voltmètre numérique (10) pour mesurer la tension de polarisation V_b appliquée. On dispose aussi d'un thermomètre à mercure (13), d'un hygromètre à cheveux (14) et d'un baromètre à mesure (12) 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 : Appareil de commande manuelle (A.P.C) | 14 : Hygromètre à cheveux |
| 6 : Résistance haute tension | 15 : Grille d'isolation |

Figure III.1 : Schéma représentatif du dispositif expérimental

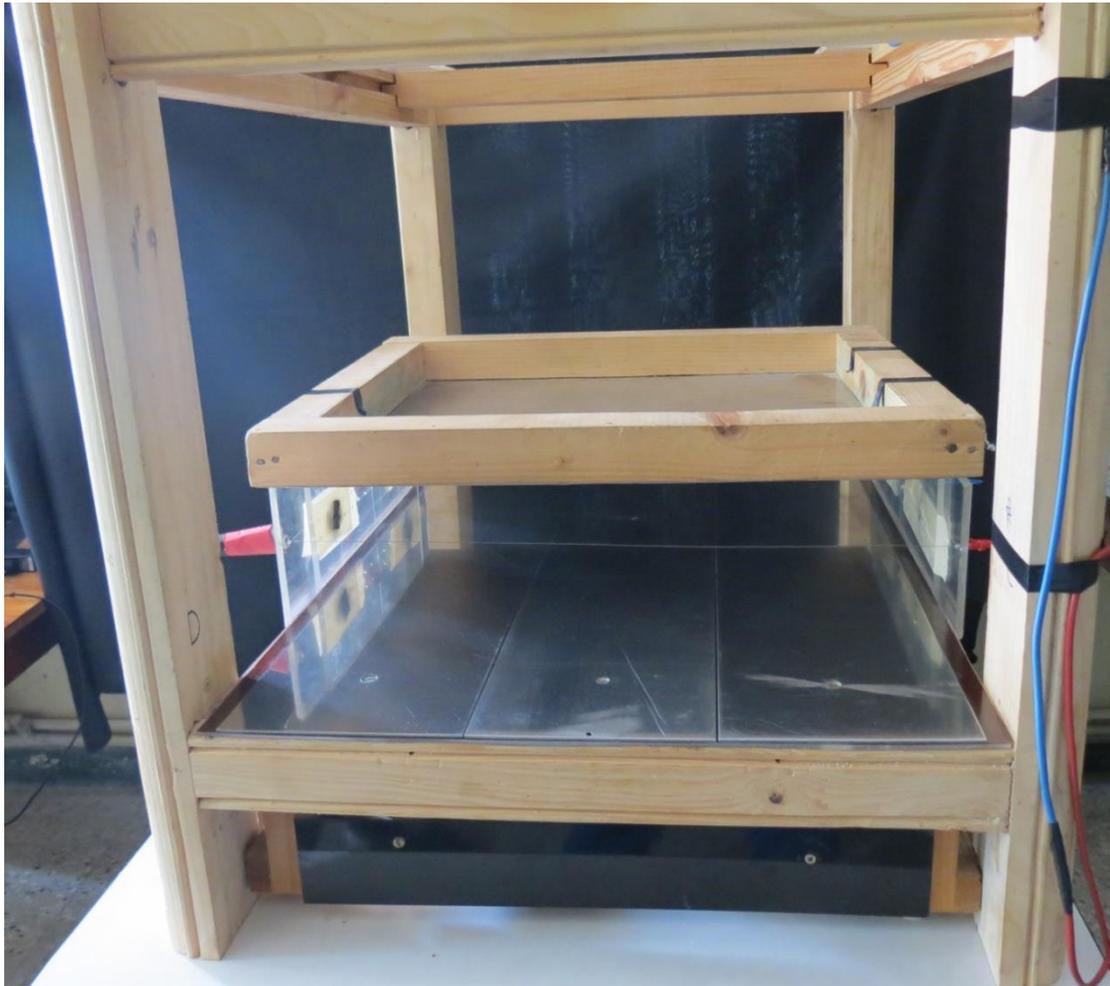
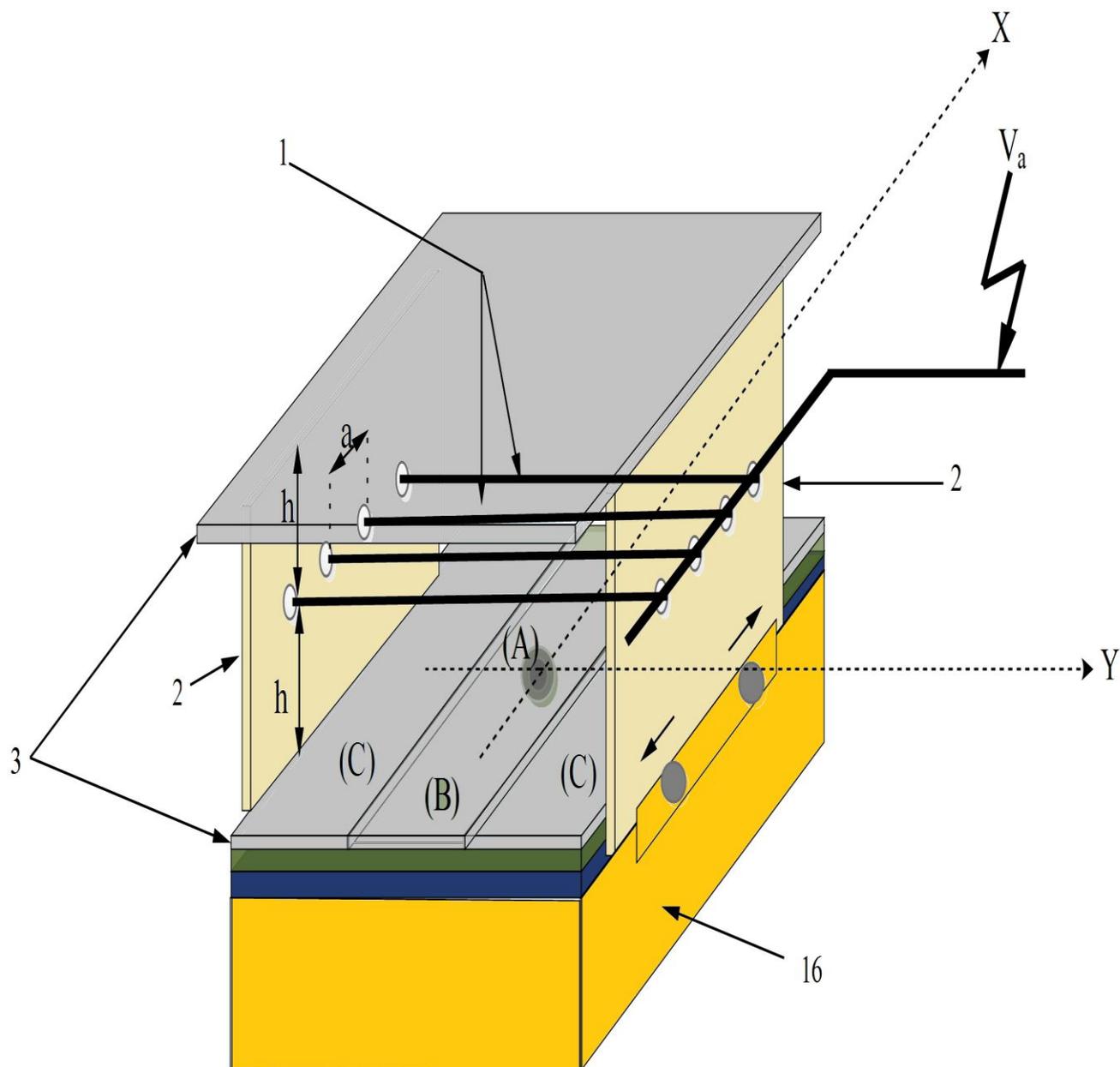


Figure III.2 : Vue de face du dispositif

III.2.1) Description du dispositif utilisé:

Le dispositif utilisé dans notre étude est constitué de deux plans de collection parallèles (3) et d'un ensemble de fils (1) de faible rayon de courbure ($R_f = 0.2\text{mm}$), mis sous haute tension et accrochés horizontalement à mi-chemin entre les deux plans, (figure III.3). La distance a entre ces fils est variable ($a=20$ à 190mm), de même que la hauteur h des deux plans ($h= 50\text{mm}$ et $h= 65\text{mm}$). Les fils sont portés au potentiel V_a , délivré par une source de haute tension. Les plans de garde (C) entourent la plaque de mesure (B) formant avec celle-ci des intervalles d'air très réduits pour assurer la continuité de la distribution du champ aux bords de la sonde (A). Cette dernière est de diamètre de $\Phi = 4.7$ mm et étant fixe incorporée dans un même niveau de surface (figure III.4) dans une électrode plane de forme rectangulaire (plan de mesure). Les plans supérieur et inférieur sont faits d'acier inoxydable. Le plan inférieur est composé de deux plans de garde (C) qui entourent le plan de mesure (B). La mesure du champ électrique E et de la densité de courant J en différents points du plan se fait par le déplacement des électrodes actives fixées sur des supports coulissants.



(1) : Electrode active

(2) : Supports des électrodes

(3) : Plans de collections

(16) : support en bois

(a) : distance inter-fils

(A) : Collecteur de courant

(B) : Plan de mesure

(C) : Plans de garde

(Va) : Tension appliquée

(h) : distance entre fils et les plans

Figure III.3 : Composition du dispositif



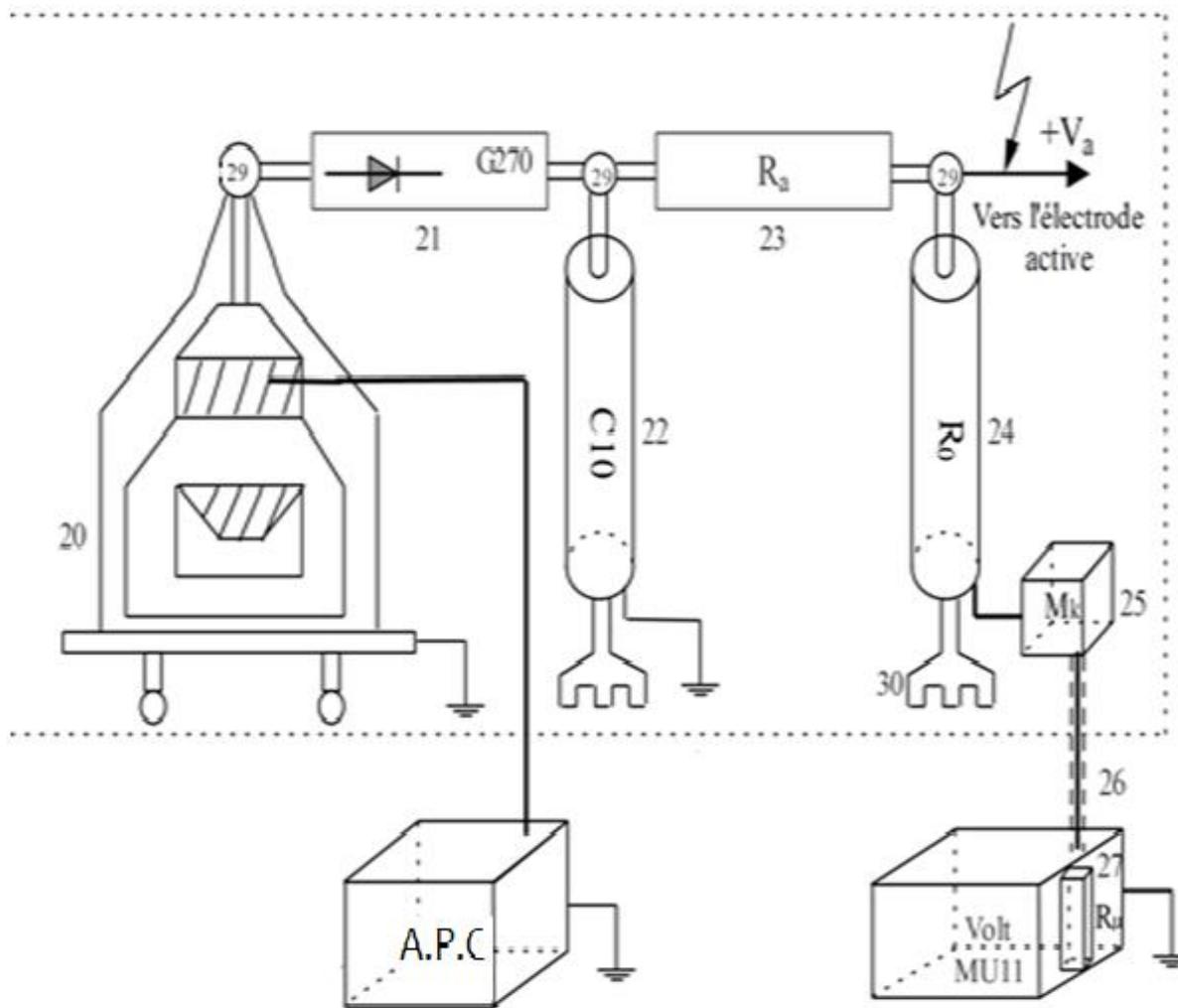
Figure III.4 : Sonde polarisée circulaire (collecteur de courant)

III.2.2) Source de haute tension

Pour pouvoir mesurer les paramètres de la décharge couronne positive et négative en géométrie multi-fils- 2 plans et faire une comparaison entre ces deux types de décharges, nous avons besoin d'une source de haute tension continue délivrant des tensions de polarité positive et négative. Pour cela, nous avons utilisé une installation haute tension présente au laboratoire de haute tension de l'université de Béjaia, qui délivre des tensions variantes entre 0 à ± 140 kV, alternative ou continue, de polarité positive ou négative, (figure III.5). Cette installation est composée :

- D'un appareil de commande.
- D'un transformateur de haute tension T100, alimenté par un appareil de commande A.P.C.
- D'une diode à haute tension G270.
- D'un condensateur de lissage C10.

Un appareil de commande (A.P.C) alimente l'enroulement primaire du transformateur élévateur T100 (20) utilisé dans cette installation via un câble (26). Afin d'obtenir une haute tension continue nous avons associé à ce transformateur un redresseur mono-alternance. Ce redresseur est constitué d'une diode haute tension (21) à base de silicium et d'un condensateur de lissage C10 (22) de capacité de 10 nF. Le condensateur est relié au système d'électrodes par une résistance R_a (23), son rôle est d'amortir le courant, protégeant ainsi la diode des surintensités. Nous disposons d'un diviseur de tension résistif composé d'une résistance haute tension R_0 (24) de 248.5 M Ω et d'une résistance basse tension R_u (27) de 501 k Ω incorporée dans le voltmètre de crête MU11, cette résistance est reliée par un câble coaxial (26) blindé, pour la mesure de la haute tension continue V_a



A.P.C : Appareil de commande

26 : Câble coaxial

20 : Transformateur haute tension (T100)

27 : Résistance basse tension (R_p)

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_o)

30 : support d'éléments

25 : Boîte de connexion

Figure III.5 : Schéma en bloc de la source de haute tension utilisée

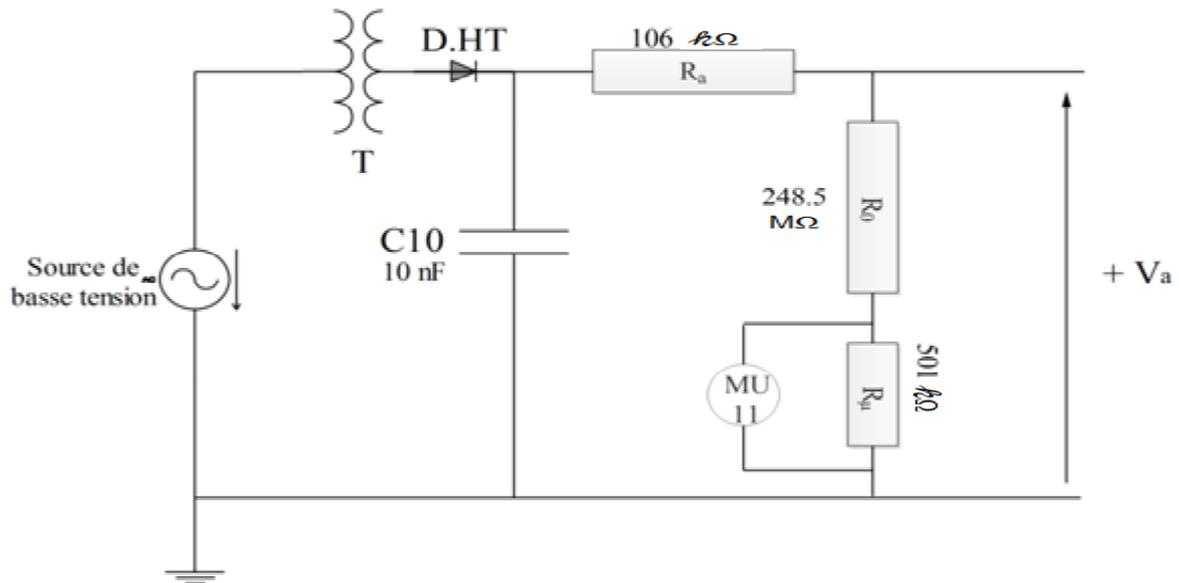


Figure III.6 : Schéma électrique de la source de haute tension utilisée



(1) A.P.C : Appareil de commande

(2) MU11 : Voltmètre de crête

Figure III.7 : Appareil de commande et voltmètre de crête



20 : Transformateur haute tension (T100)

21 : Diode haute tension (G270)

22 : Condensateur de lissage (C10)

23 : Résistance d'amortissement (R_a)

24 : Résistance haute tension (R_0)

28 : Grille de protection

Figure III.8 : Installation haute tension utilisée au laboratoire de Béjaia

III.3) Systèmes de mesure :

III.3.1) Mesure de tension :

III.3.1.1) Tension appliquée aux fils :

La mesure de la tension V_a appliquée aux fils s'effectue à l'aide du diviseur résistif et le voltmètre de crête MU11 décrit précédemment. Cela s'effectue par la mesure de la tension U aux bornes de la résistance basse tension (R_u) avec le voltmètre de crête qui affiche numériquement la valeur de la tension appliquée $V_a = K \times U$, où K représente le rapport du diviseur. En outre, le voltmètre présente une résistance d'entrée R_e de 4.24 M Ω 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.3.1.2) Tension de polarisation V_b :

Le plan de mesure (B) de la sonde est relié à l'alimentation continue basse tension stabilisée, délivrant une tension V_b négative ou positive variant entre 0 et 250 V. On dispose d'un voltmètre numérique ayant une grande impédance d'entrée pour mesurer cette tension.

III.3.2) Mesure de courant :

Le courant I_s collecté par la sonde est mesuré à l'aide d'un pico ampèremètre (fig. III.1, élément n°09) relié par l'intermédiaire d'un câble coaxial blindé au collecteur (A). Pour obtenir de bonnes mesures, il faut s'assurer :

- Que la sonde est bien positionnée par rapport au plan de mesure d'une manière à ce quelle laisse un petit intervalle g entre elle et ce plan de mesure.
- De bien nettoyer régulièrement la sonde et les plans avant chaque essai pour éviter le courant de fuite causé par l'accumulation de poussière environnante entre la sonde et les plans.
- Que la sonde est au même niveau de surface que les plans de garde et de mesure avant chaque essai et re-contrôler les continuités entre toutes les plaques ainsi qu'avec la sonde de mesure.

III.3.3) Mesure des paramètres physiques de l'air :

Les paramètres physiques de l'air sont considérés comme des paramètres influençant sur la décharge couronne, il est alors nécessaire de connaître les conditions dans lesquelles cette décharge a lieu. Nous avons utilisé un baromètre à mercure pour la pression, un thermomètre à mesure pour la température, et un hygromètre à cheveux pour l'humidité.

III.4) Caractéristique courant-tension :

Le relevé de la caractéristique courant-tension ($I(V)$) est nécessaire pour fixer les niveaux de tension à appliquer aux électrodes actives (fils) avant d'effectuer la mesure du champ. Pour cela, on relie le plan de mesure (B), via un câble coaxial, à un pico-ampèremètre pour permettre la mesure du courant collecté par tout le plan.

Le principe suivi dans cette mesure consiste à augmenter la tension appliquée (V_a) aux électrodes actives, 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 de courant correspondant.

III.5 Présentation et interprétation des résultats :

III.5.1 Caractéristique courant-tension relevée :

III.5.1.1 Influence du nombre de fils sur le courant de décharge

La figure (III.09) montre l'influence du nombre de fils sur le courant de décharge. Nous constatons que le courant mesuré croît à chaque fois que le nombre de fils augmente. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du nombre de régions ionisées autour de chaque fils.

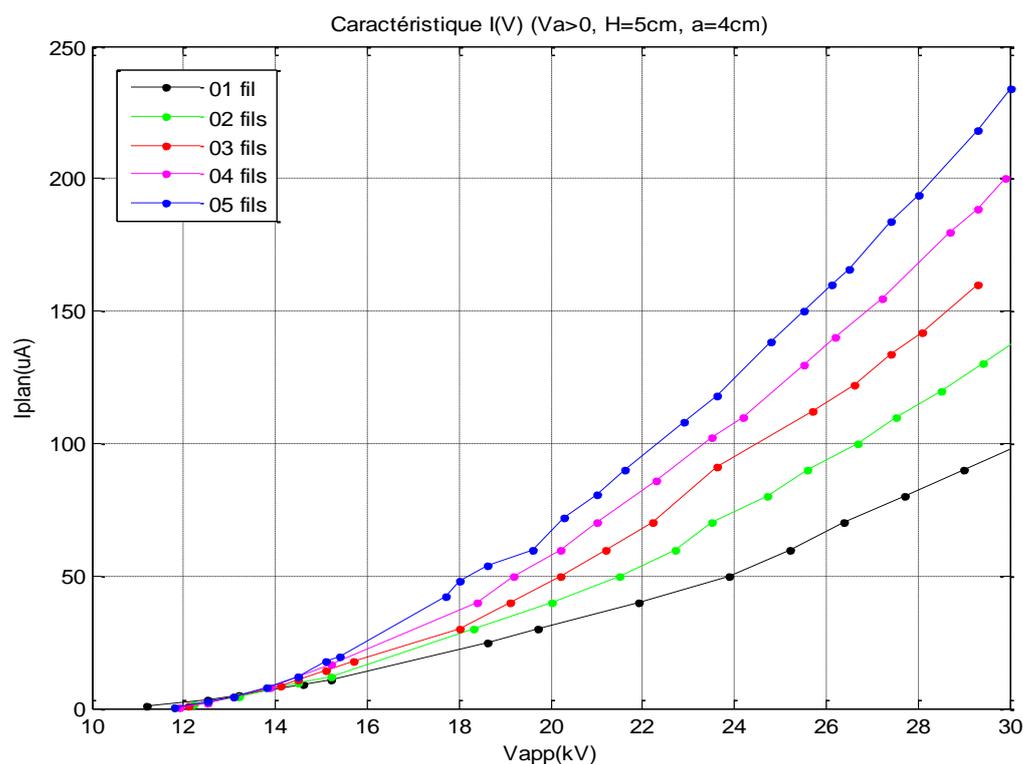


Figure III.9 : Caractéristiques courant-tension pour différents nombres de fils

($a=4\text{cm}$, $H=50\text{mm}$)

III.5.1.2 Influence de la distance inter-fils 'a' :

Les figures ci-dessous représentent les caractéristiques courant-tension de la décharge couronne en géométrie multi-fils-2 plans pour un nombre de fils fixé à 3, une distance inter-fils (a) variable et agissant sur les deux paramètres suivants :

- La polarité de la tension appliquée.
- La distance H séparant les fils des plans de mesures.

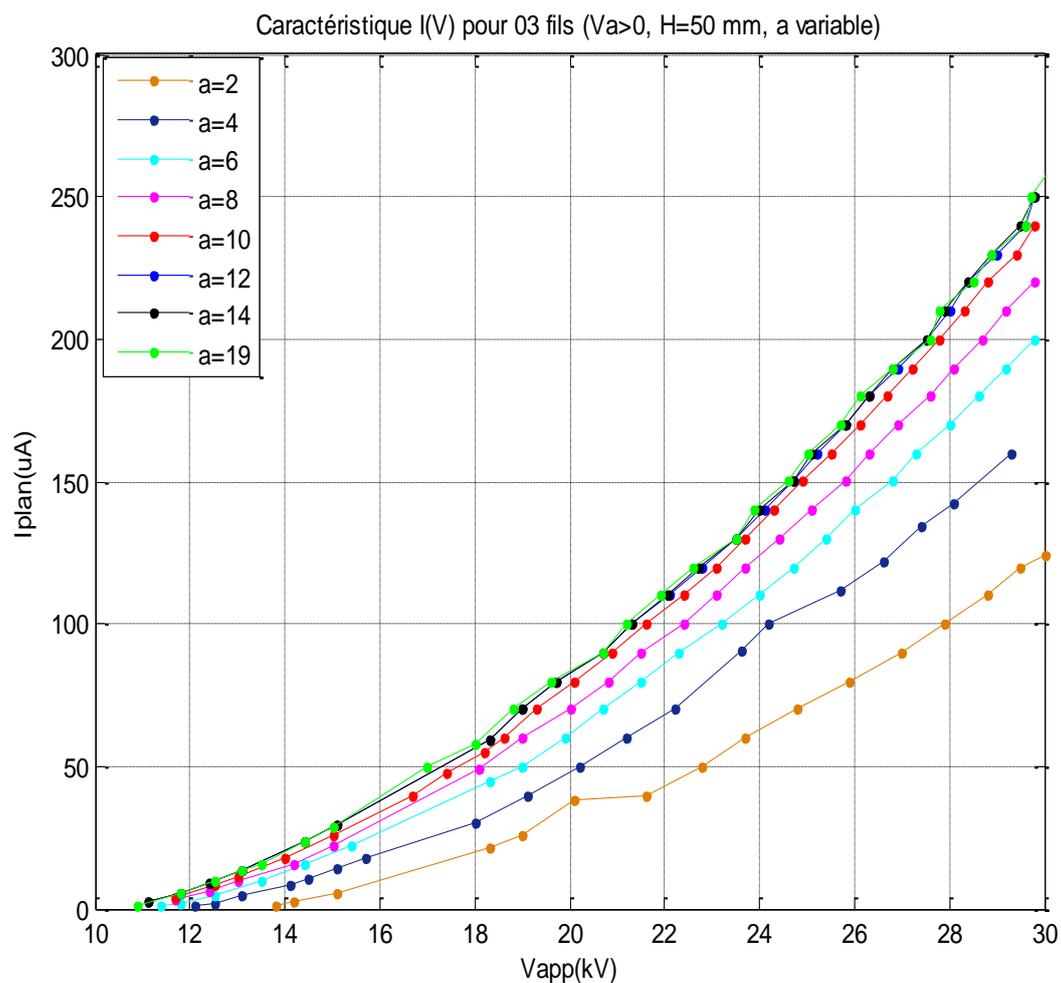


Figure III.10 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans ($V_a > 0$, $H = 50$ mm, a variable)

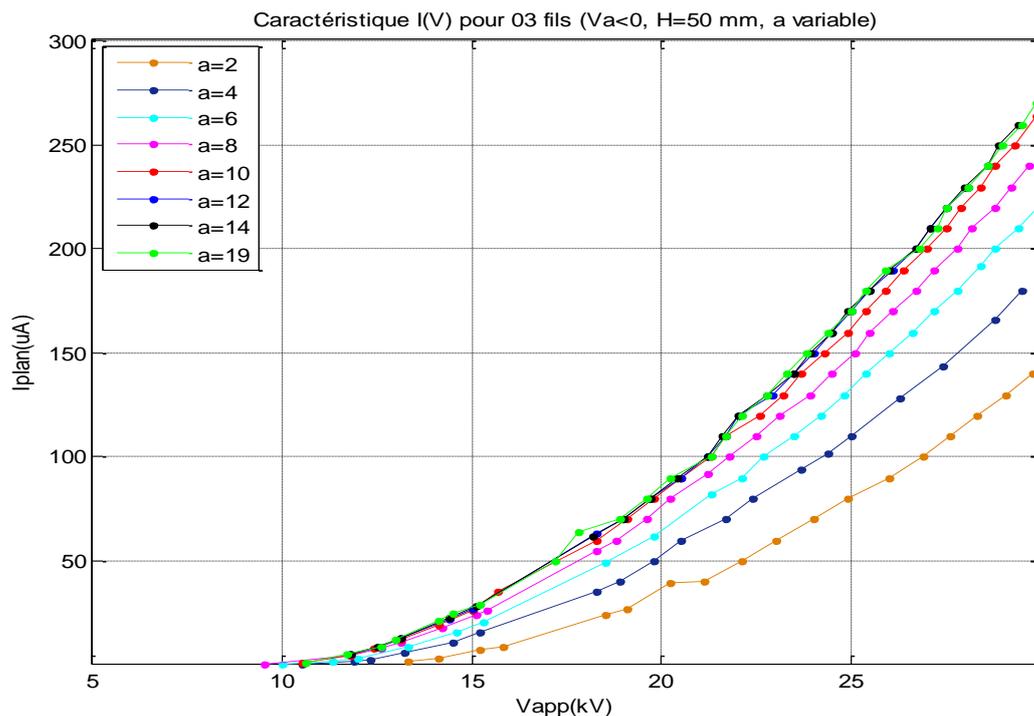


Figure III.11 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans ($V_a < 0$, $H = 50$ mm, a variable)

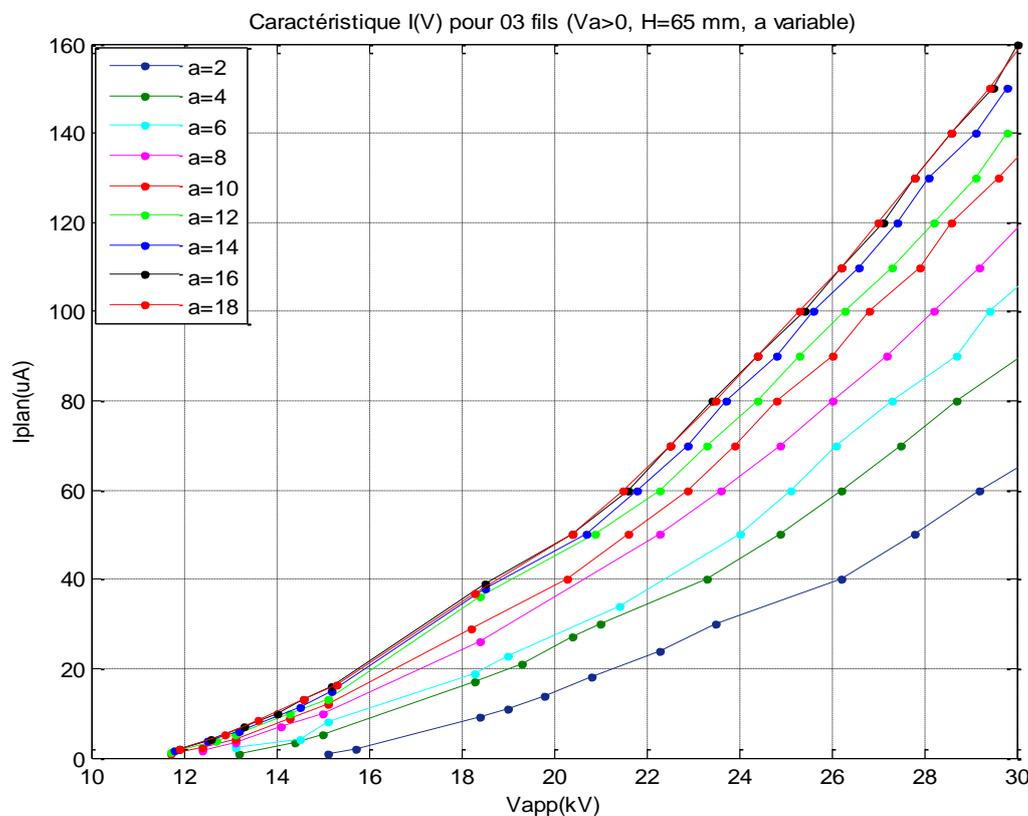


Figure III.12 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans ($V_a > 0$, $H = 65$ mm, a variable)

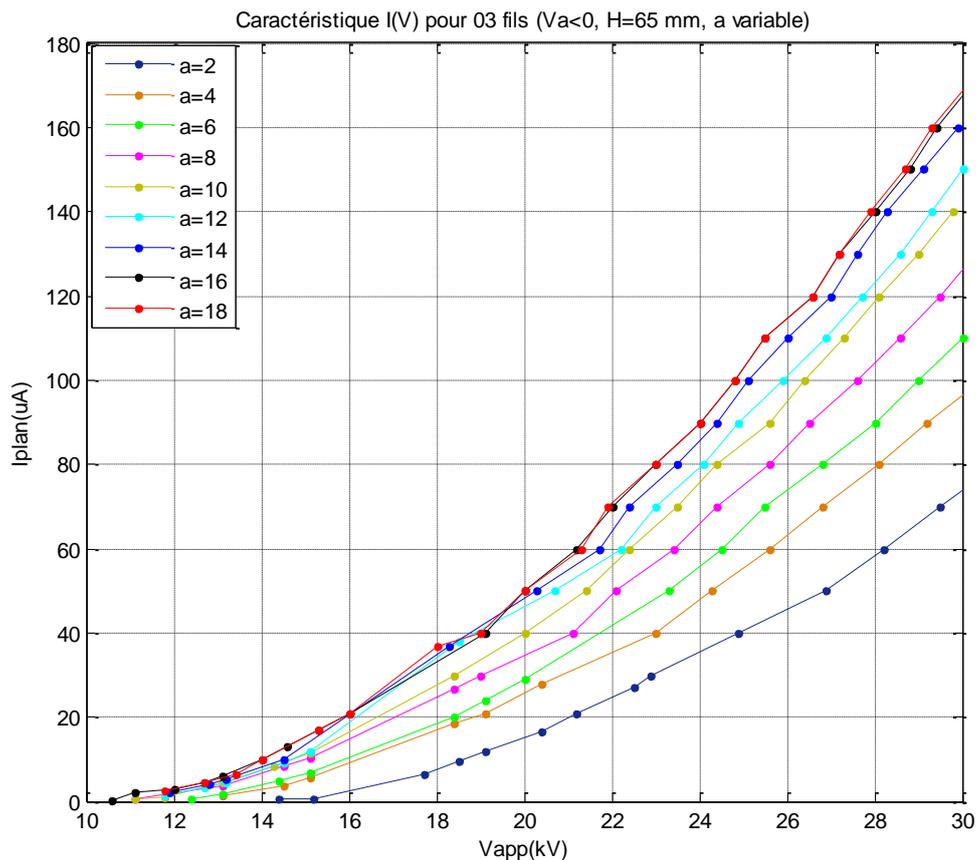


Figure III.13 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils- 2plans ($V_a < 0$, $H = 65$ mm, a variable)

D'après ces courbes, Nous constatons que les courants mesurés au plan (I_p) varient en fonction de la distance inter-fils (a). En effet, l'augmentation continue de la distance a fait augmenter le courant mesuré. 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 de l'extrémité sont moins exposés). Cela fait que le courant de la décharge émis de coté opposé de deux fils adjacents est réduit. Cet effet augmente avec la diminution de l'espacement (a) réduisant ainsi le courant dérivant de chaque fil donc le courant total collecté au plan de mesure est réduit.

Notons qu'à partir d'une certaine distance *limite* de a ($a = 12$ cm pour $H = 5$ cm et $a = 16$ cm pour $H = 6.5$ cm), toute augmentation de l'espacement inter-fils n'est pas accompagné par l'accroissement du courant car il n'existe plus d'influence mutuelle entre les fils de la nappe, c'est comme si on a plusieurs décharges indépendantes les unes des autres.

III.5.1.3 Influence de la polarité de la tension appliquée

Les figures III.14, III.15, III.16 et III.17 représentées ci-dessous, illustrent les caractéristiques courant-tension en géométrie 2fils-2plans, 3fils-2plans, 4fils-2plans et 5fils-2plans, pour les distances $a=4\text{cm}$ et $a=6\text{cm}$, $H=5\text{cm}$.

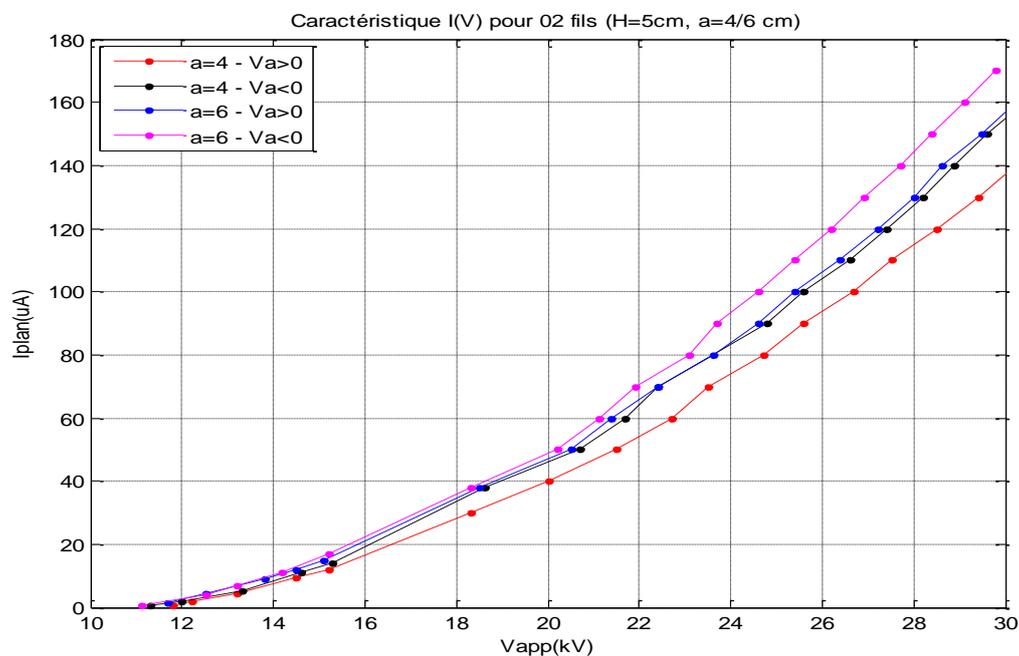


Figure.III.14 : Caractéristique courant-tension pour une géométrie 2fils-2plans
($a=4\text{cm}$, $a=6\text{cm}$)

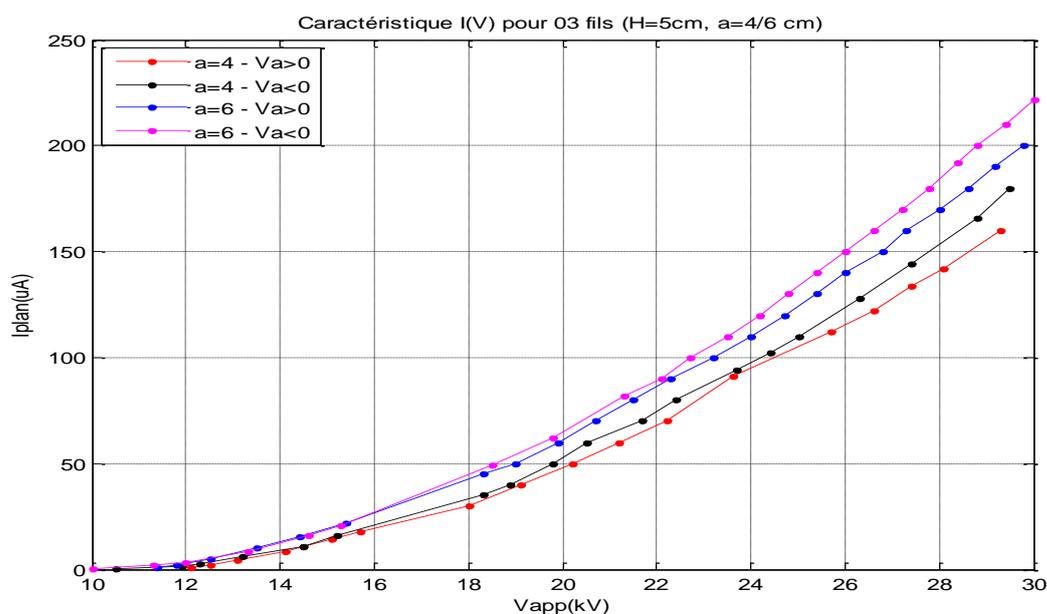


Figure III.15 : caractéristique courant-tension pour une géométrie 3fils-2plans
($a=4\text{cm}$, $a=6\text{cm}$)

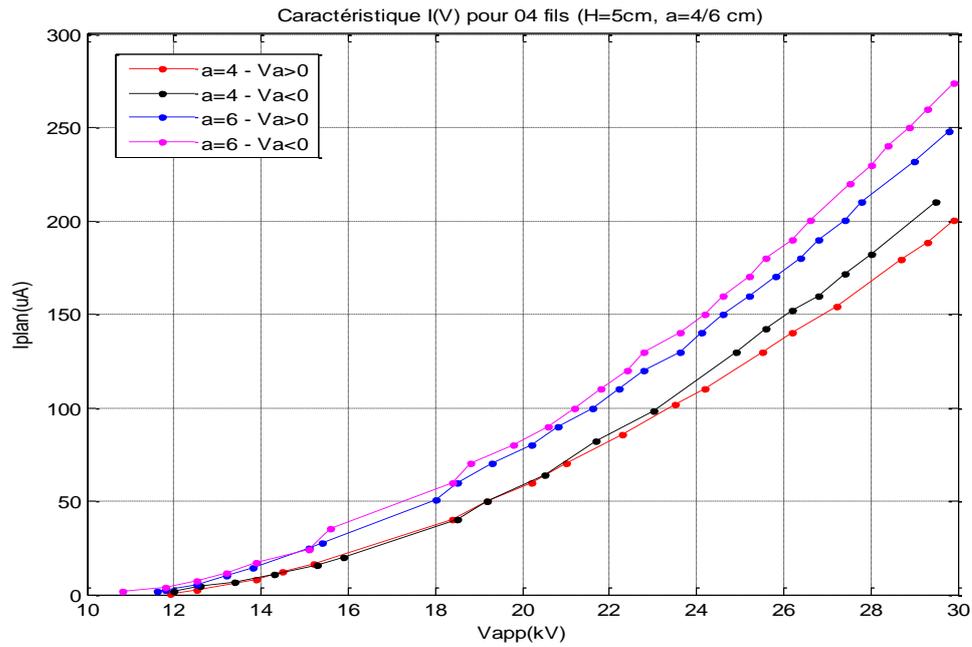


Figure III.16 : caractéristique courant-tension pour une géométrie 4fils-2plans
(a=4cm, a=6cm)

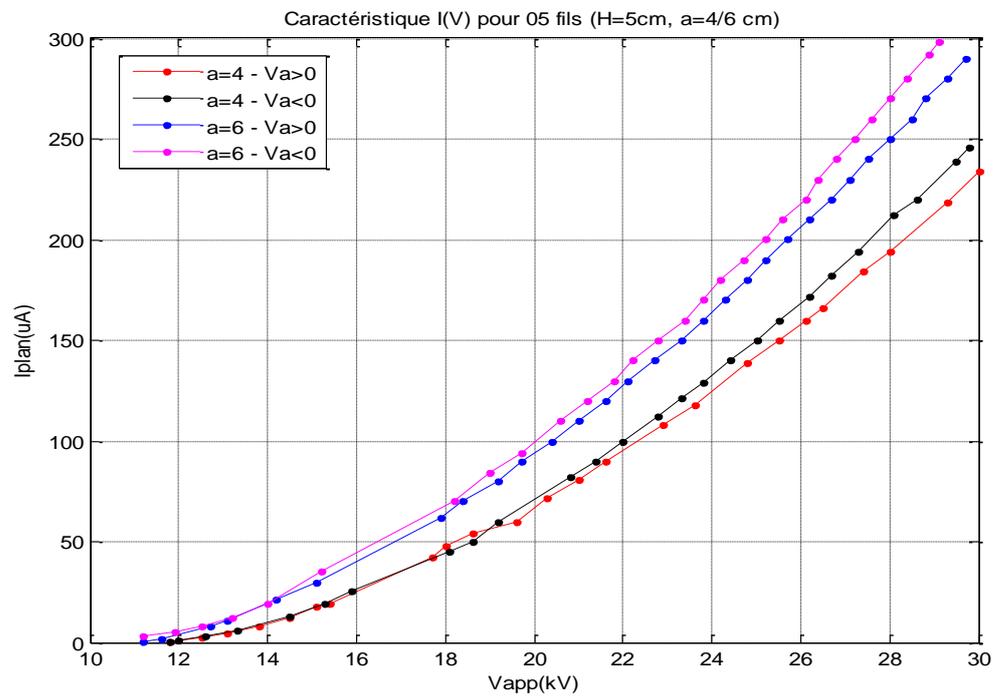


Figure III.17 : caractéristique courant-tension pour une géométrie 5fils-2plans
(a=4cm, a=6cm)

D'après ces courbes, Nous constatons que le courant mesuré est plus grand quand la polarité de la tension appliquée (V_a) est négative. Cela est dû au fait que la décharge couronne négative survient avant la décharge positive.

III.5.1.4 Influence de H (hauteur des fils par rapport aux plans) :

Les figures (III.18 et III.19) montrent l'influence de la hauteur H sur le courant de la décharge pour les deux cas (en utilisant 3 fils, 5 fils et $a=4\text{cm}$ et $a=6\text{cm}$ respectivement). Nous observons que le courant mesuré (I_p) est inversement proportionnel à la hauteur H , c'est-à-dire qu'en augmentant la hauteur H le courant mesuré diminue. Ce la peut être expliqué par la relation donnant la tension seuil V_s de l'apparition de l'effet couronne en géométrie Fil-plan :

$$V_s = E_s \times R_{fil} \cdot \ln\left(\frac{2H + R_{fil}}{R_{fil}}\right) \quad \text{III.2}$$

Comme le montre cette relation, on voit bien que l'augmentation de la hauteur H fait augmenter la tension d'apparition de l'effet couronne V_s , ce qui se manifeste par la diminution de courant mesuré.

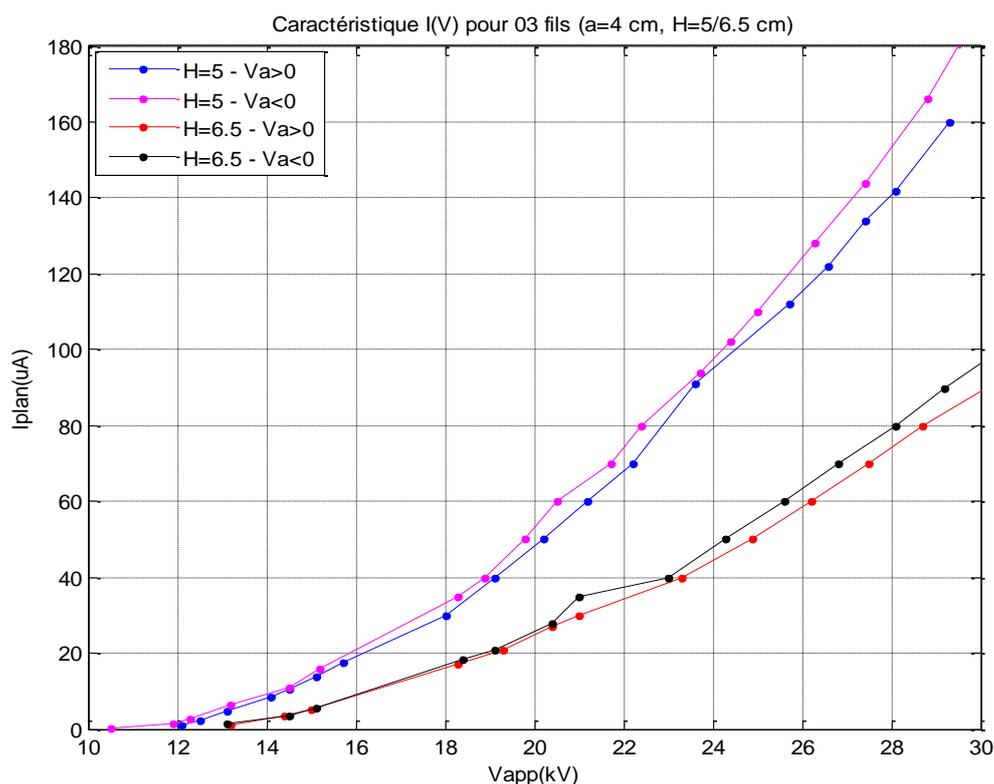


Figure III.18 : Caractéristique courant-tension en géométrie 3fils-2plans ($a=4\text{ cm}$)

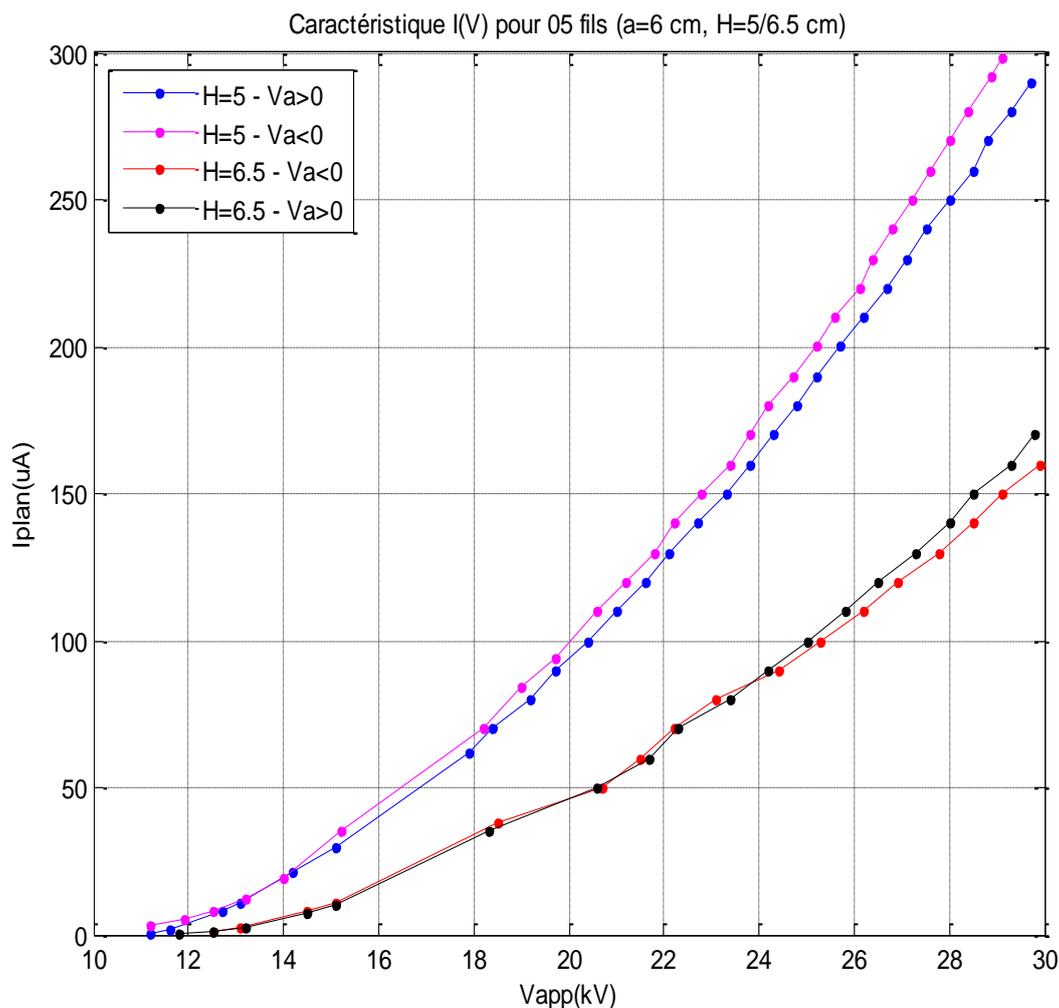


Figure III.19 : Caractéristique courant-tension en géométrie 5fils- 2plans ($a= 6$ cm)

III.5.2) Densité de courant (J) :

La valeur de la densité de courant (J) est obtenue à partir de l'équation (III.3), qui divise le courant I_{s0} mesuré par le pico-ampèremètre en absence de polarisation ($V_b = 0$), par la surface effective S_m ($S_m = \pi \cdot r_m^2 = 18.4745 \text{ mm}^2$).

$$J = \frac{I_{s0}}{S_m} \quad (\text{III.3})$$

Les résultats représentés ci-dessous, sont obtenus pour une tension appliquée ± 20 kV, et pour une tension de polarisation ($V_b = 0$). Les mesures de J sont faites le long du plan de mesure (de position (-16 cm) à la position (+16 cm)). Cela afin de montrer la symétrie de la configuration par rapport à $x = 0$.

III.5.2.1 Influence de la polarité de la tension appliquée :

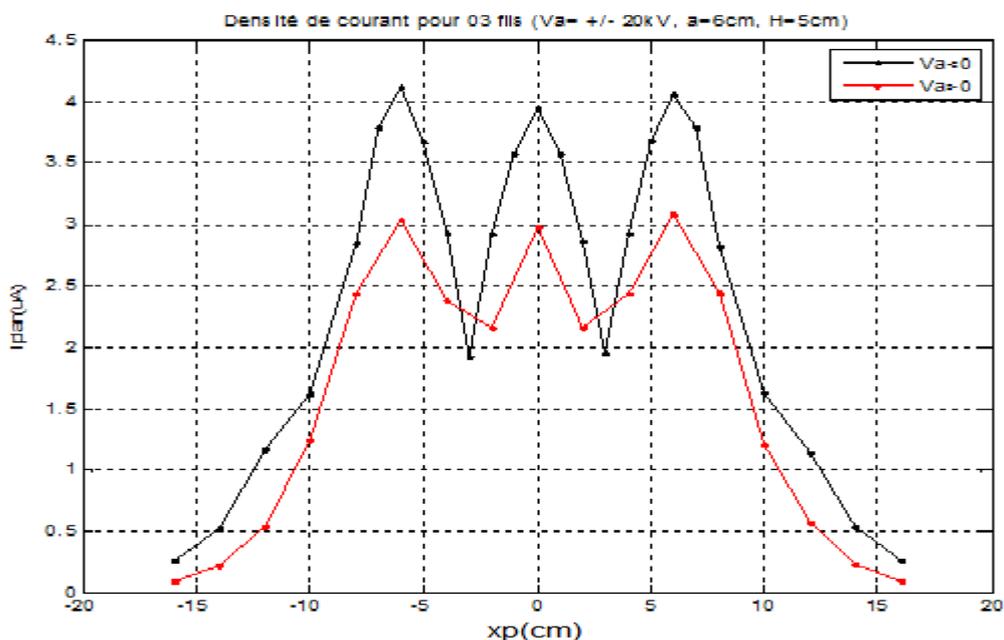


Figure III.20: Influence de la polarité de V_a sur la densité de courant J pour la configuration 3fils-2plans

($H=50\text{mm}$; $a=60\text{mm}$; $T=27^\circ\text{C}$; $P=1010\text{HPa}$; $hm=50\%$).

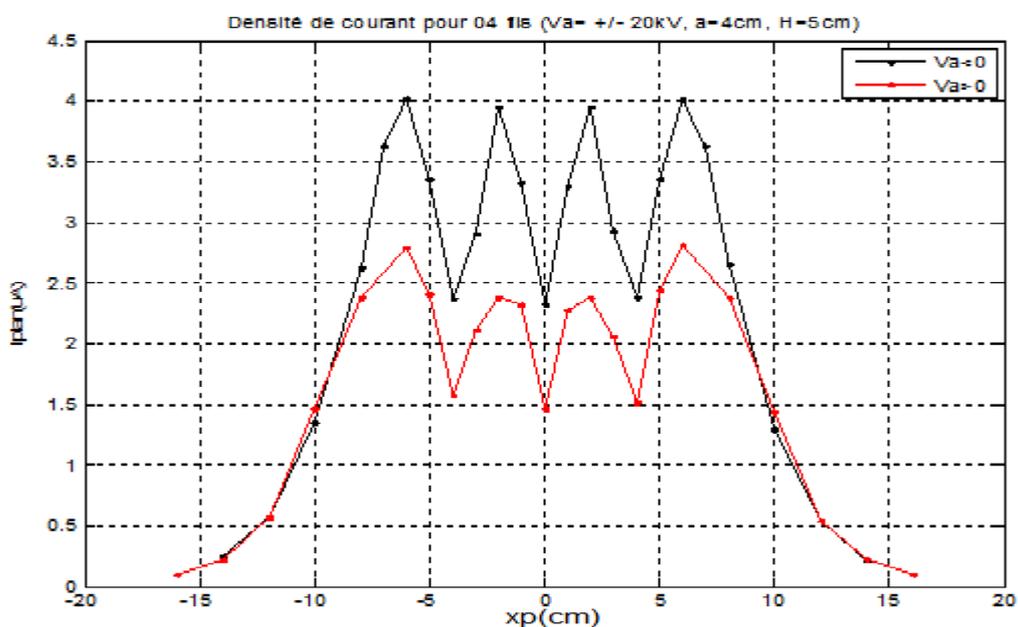


Figure III.21: influence de polarité de V_a sur la densité du courant J pour la configuration 4fils-2plans

($V_a < 0$, $H=50\text{mm}$; $T=27^\circ\text{C}$; $P=1010\text{HPa}$; $hm=50\%$).

Les figures (III.20) et (III.21) montre la distribution de la densité de courant ($J(\text{mA}/\text{m}^2)$) le long du plan de mesure en fonction de la polarité de la tension appliquée (polarité positive et polarité négative) en géométrie 3 fils-2plans.

Nous observons que les graphes ont une allure ondulatoire et présentent des valeurs de densité de courant élevées aux points de positions (-6, 0 et +6cm) pour la (figure III.20) et aux points de positions (-6, -2, 2, +6cm) pour la (figure III.21) et ce pour les deux polarités de tension. Cela revient au fait qu'aux pieds des fils, où la densité de charge d'espace est concentrée, la densité de courant est maximale, puis diminue partant de là.

Nous remarquons aussi que les deux fils aux extrémités des deux configurations présentent les valeurs les plus élevées de la densité de courant par rapport à ceux du milieu. En effet, l'effet mutuel entre les fils entraine la réduction de l'émission du courant de la décharge couronne, excepté les deux fils externes qui sont influencés par seulement un fil voisin.

En fin, Nous remarquons que la polarité de la tension appliquée à une influence sur la valeur de la densité de courant J . On voit que les valeurs de la densité de courant mesurées pour la tension appliquée négative sont sensiblement plus élevées que les valeurs de J relevée pour la tension appliquée positive. Cela est dû au fait que la décharge couronne négative survient avant la décharge positive.

III.5.2.2 Influence du niveau de tension appliqué sur la densité de courant:

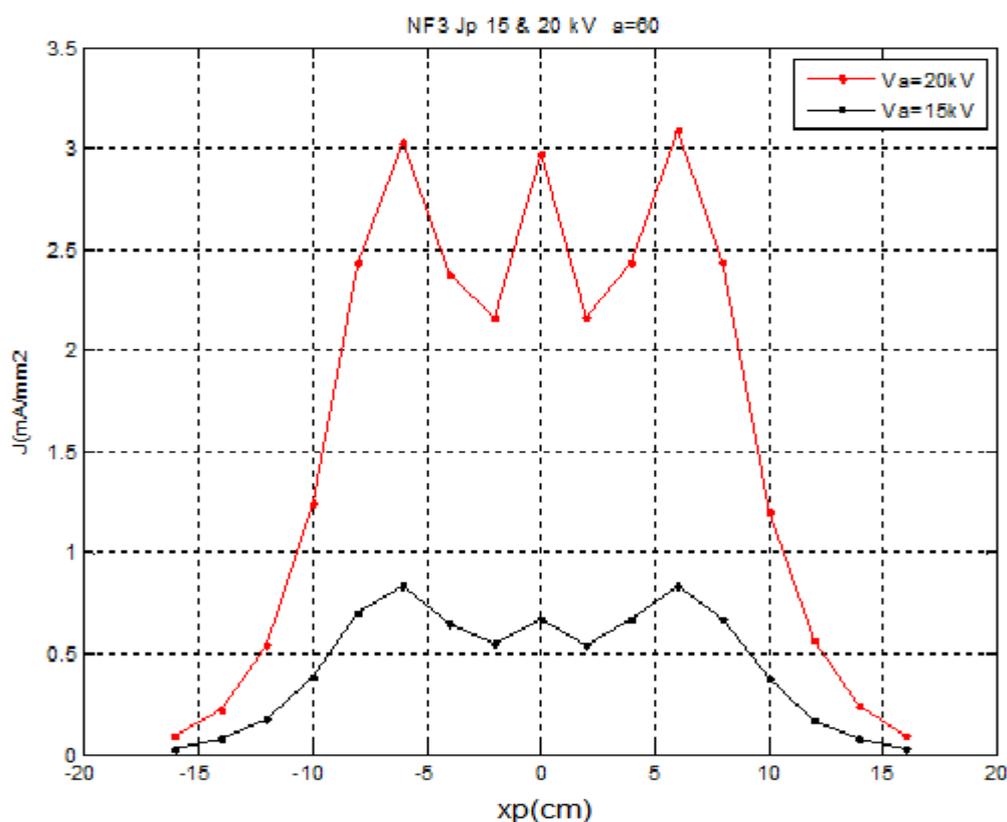


Figure III.22 : variation de la densité courant J pour la géométrie 3fils-2plans

($h = 50 \text{ mm}$; $a = 60 \text{ mm}$; $T = 24^\circ \text{C}$; $P = 1011 \text{ HPa}$; $hm = 71\%$).

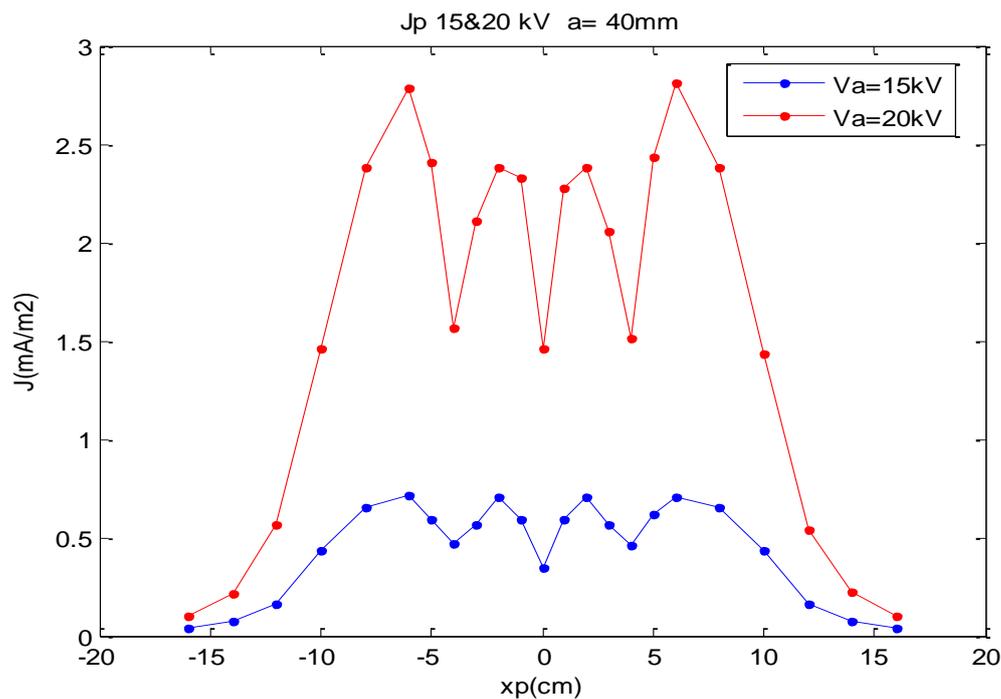


Figure III.23 : variation de la densité courant J pour la géométrie 4fils-2plans

(h= 50mm ; a = 40mm ; T = 23°C ; P = 1005 HPa ; hm = 50%).

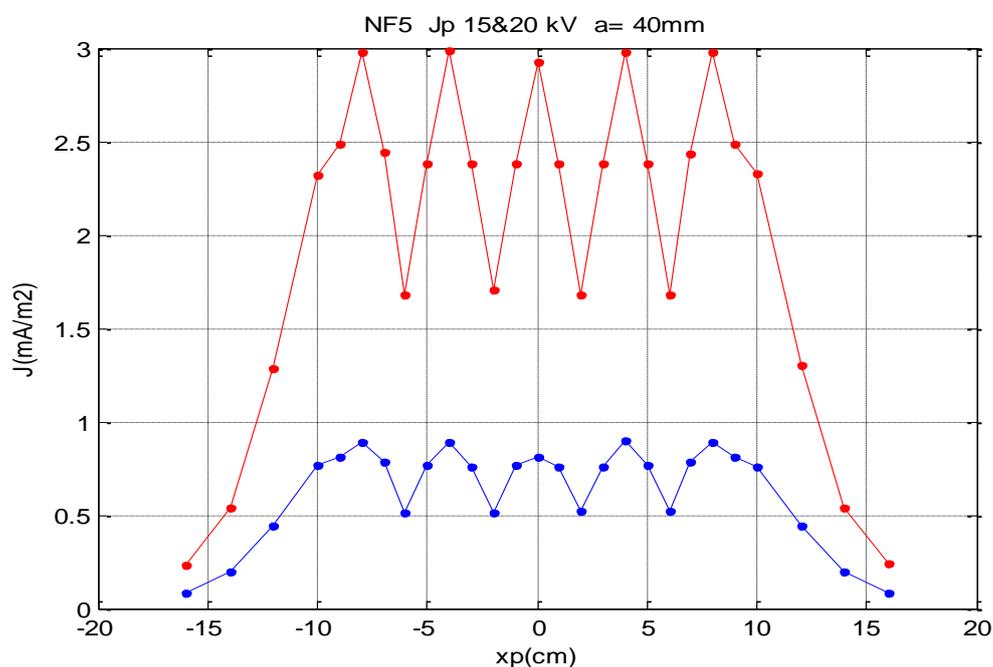


Figure III.24 : variation de la densité courant J pour la géométrie 5fils-2plans

(h= 50mm ; a = 40mm ; T = 23°C ; P = 1005 HPa ; hm = 50%)

Les figures (III.22 à III.24) montrent la distribution de la densité de courant ($J(\text{Am}/\text{m}^2)$) le long du plan de mesure en fonction des niveaux de tension appliqués qui sont respectivement 15 et 20 kV.

Nous remarquons que la valeur de la densité de courant augmente avec la valeur de la tension appliquée. L'explication qu'on peut apporter à cette observation est que le courant est proportionnel à la tension appliquée autrement dit le courant augmente avec l'augmentation de la tension appliquée.

III.5.2.3 Influence du nombre de fils sur la densité de courant:

Sur les figures III.23 et III.24 ($h=50\text{mm}$ et $a=40\text{mm}$) ci-dessus, nous remarquons que les valeurs les plus élevées de J sont relevées pour la configuration à 5 fils. Donc la région d'ionisation totale autour de fils, ou les charges sont produites, augmente avec le nombre de fils, de cette façon la charge d'espace sera augmentée.

III.5.2.4 Influence de l'espacement (a) sur la densité de courant:

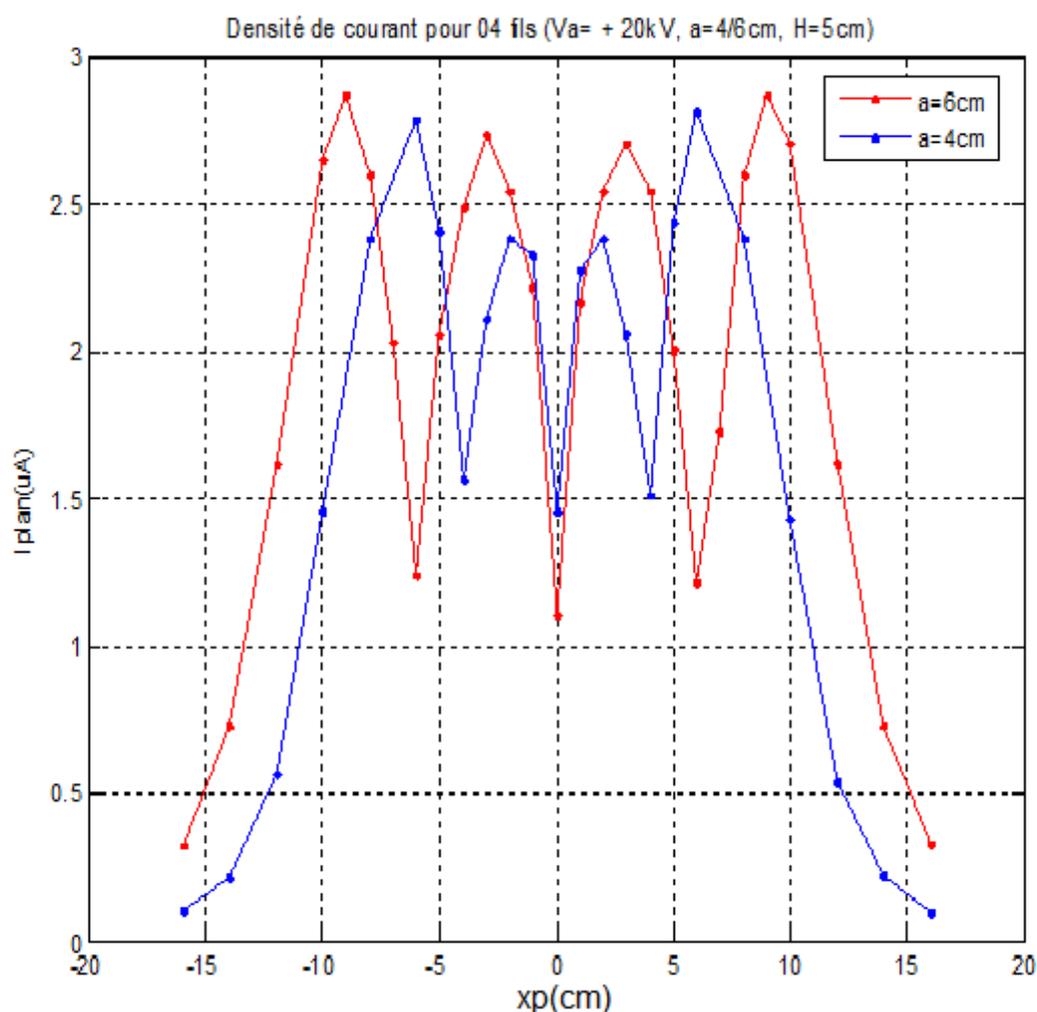


Figure III.25: Variation de la densité de courant J pour la configuration 4fils-2plans

($V_a > 0$, $H = 50\text{mm}$; $T = 24^\circ\text{C}$; $P = 1003\text{HPa}$; $h_m = 61\%$).

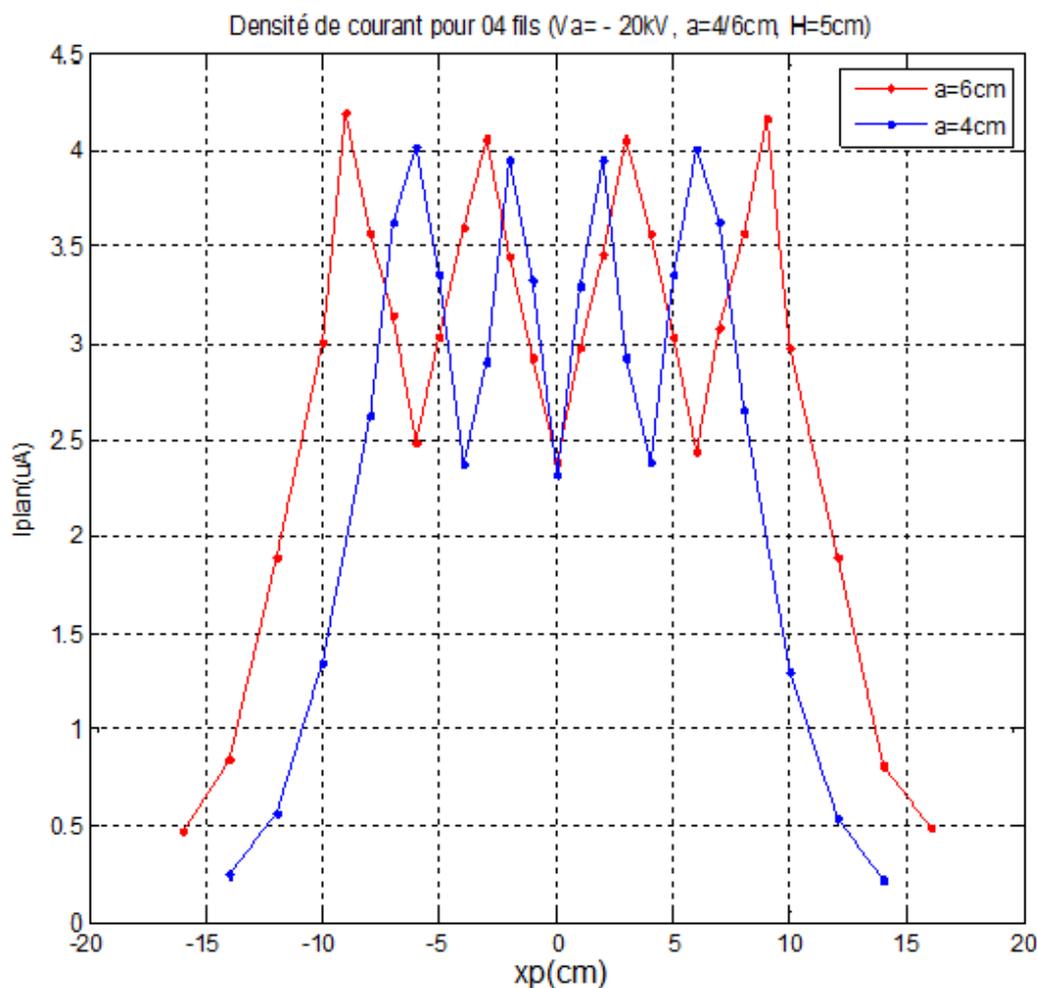


Figure III.26: Variation de la densité de courant J pour la configuration 4fils-2plans

($V_a < 0$, $H = 50\text{mm}$; $T = 24^\circ\text{C}$; $P = 1003\text{HPa}$; $hm = 61\%$).

Les figures (III.25) et (III.26) illustrent les distributions de la densité de courant le long du plan de mesure en fonction de la position ($x(\text{cm})$) en géométrie 4 fils-2plans pour respectivement $V_a = +20\text{ kV}$ et $V_a = -20\text{ kV}$ dans les conditions atmosphériques présentés.

D'après les courbes représentées ci-dessus, Nous distinguons une différence aux positions des points de fortes densités de courant en fonction de la distance inter-fils (a). On remarque que la densité de courant est proportionnelle à l'espacement (a). Les valeurs de la densité de courant sont légèrement plus élevées pour une distance inter-fils de $a=6\text{cm}$ par rapport à $a=4\text{cm}$ pour les deux tensions appliquées.

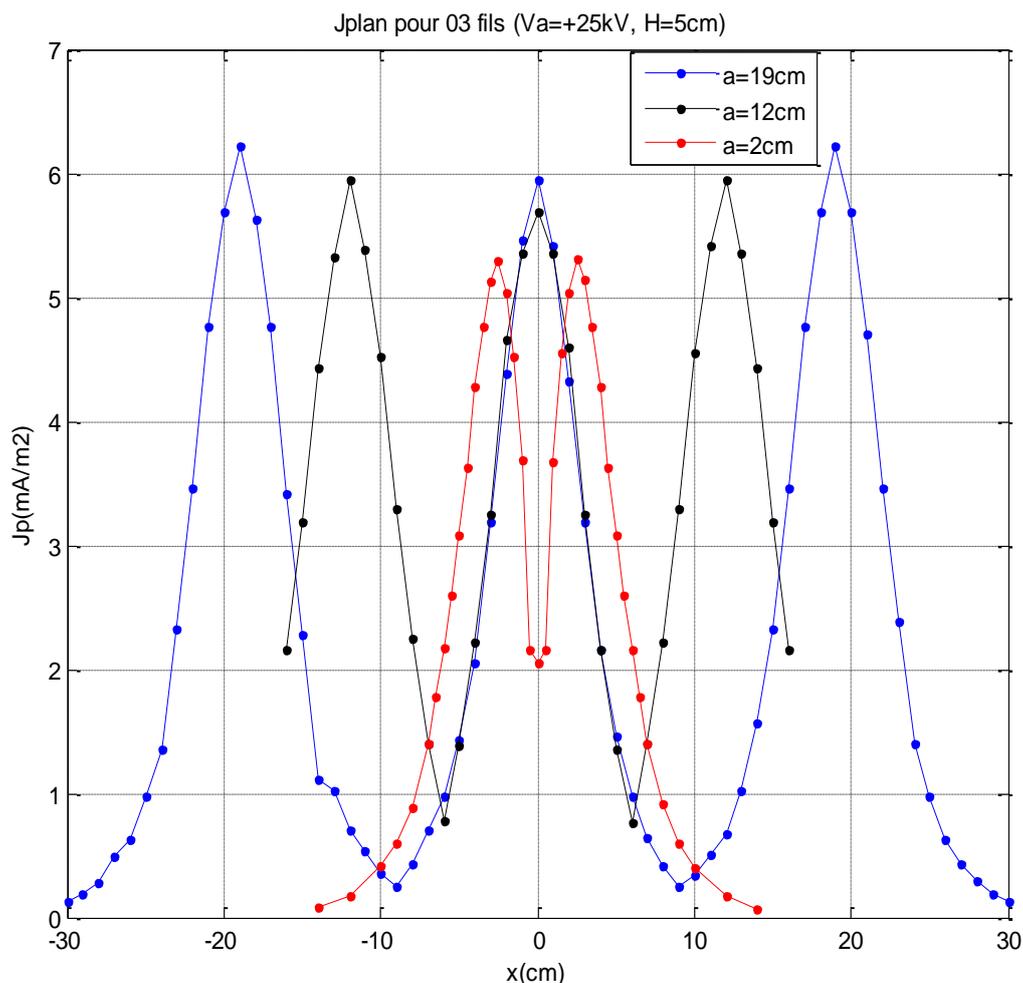


Figure III. 27 : Influence de l'espacement (a) sur la densité de courant J .

($V_a < 0$, $H = 50mm$; $T = 23^\circ C$; $P = 1005HPa$; $hm = 60\%$).

La figures (III.27) illustre la distributions de la densité de courant le long du plan de mesure en fonction de la position ($x(cm)$) en géométrie 3fils-2plans pour respectivement $a = 2cm$, $a = 12cm$ et $a = 19cm$ dans des conditions atmosphériques. On observe aussi que la densité de courant est proportionnelle à l'espacement (a).

III.5.3) Champ électrique E :

Pour la création de la décharge couronne, on applique une tension constante et suffisante aux électrodes actives. Nous avons appliqué deux niveaux de tension, 15 et 20 kV. 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. Nous mesurons d'abord le courant I_{S0} dû uniquement à la décharge ($V_b = 0$). En polarisant la sonde. On a relevé pour différentes valeurs de V_b des 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 électrodes actives par rapport à la sonde. Les données expérimentales ainsi recueillies sont traitées en faisant appel à un programme informatique. Ce programme de calcul que nous avons établi sous le logiciel Matlab et basé

sur la théorie de la sonde polarisée circulaire, nous permet 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 que nous présentons sont réalisés pour la configuration multi – fils-2plans ou le diamètre des conducteurs est fixé à 0.2mm, pour les tensions appliquée 15 et 20 kV.

III.5.3.1) Influence de la tension appliquée et du nombre de fils sur le champ électrique:

Les figures (III.28) et (III.29) montrent les allures de la distribution du champ électrique E (kV/m) en fonction de la distance du plan x (cm) pour une distance inter-fils de $a = 60mm$ en configuration 3fils-2plan et 4fils-2plans avec différentes tensions appliquées. On note que le champ électrique est proportionnel à la tension appliquée pour les deux géométries. D'après les courbes représentées ci-dessous, la distribution du champ électrique aux points de positions [(-6,0,+6) ; (-9,-3,+3,+9)] présentent des valeurs élevées pour $a = 60mm$.

Nous constatons pour les distributions du champ électrique relevées sur le plan que les positions situées aux pieds des fils présentent des valeurs élevées, puis diminuent progressivement dans la zone inter-fils, formant ainsi des ondulations. L'augmentation de la tension appliquée c'est-à-dire du champ électrique implique un effet inverse de la densité de la charge d'espace au voisinage de l'électrode active [92]. Le retranchement de cette dernière et celui du champ électrique issu de l'application de la tension a tendance à réduire le champ au niveau de cette électrode c'est à dire au voisinage du fil.

Nous notons aussi que, contrairement à la densité de courant où les fils à l'extrémité présentent des valeurs plus élevées par rapport à ceux du milieu, le champ électrique présente les mêmes valeurs aux pieds des conducteurs. 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 » [92]. 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. Le champ électrique à la surface de l'électrode active demeure à sa valeur seuil.

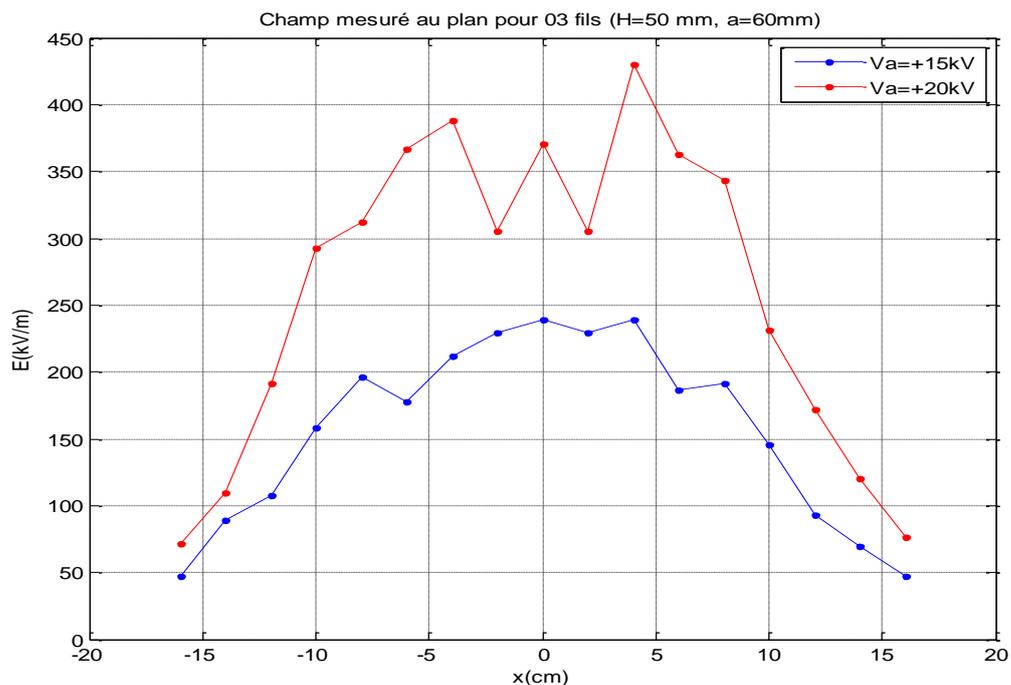


Figure III.28 : variation du champ électrique E pour la configuration 3fils-2plans.

($V_a < 0$, $H = 50$ mm ; $T = 25^\circ\text{C}$; $P = 1000$ HPa ; $hm = 62\%$).

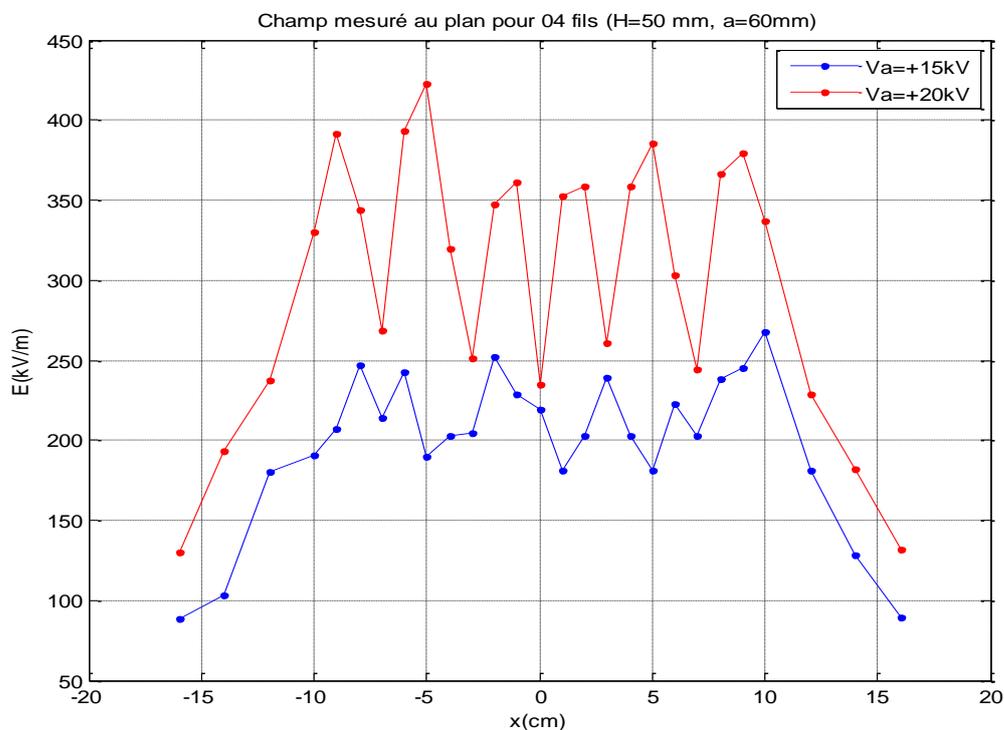


Figure III.29 : variation du champ électrique E pour la configuration 4fils-2plans.

($V_a < 0$, $H = 50$ mm ; $T = 25^\circ\text{C}$; $P = 1000$ HPa ; $hm = 62\%$).

III.6) Conclusion:

Ce chapitre a été consacré à la description du dispositif expérimental que nous avons utilisé pour obtenir les résultats. L'objectif de cette étude paramétrique est d'analyser l'influence de tous ces paramètres sur la décharge couronne, (les caractéristique courant-tension, les densités de courants et le champ électrique). On remarque 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. Les deux paramètres sont influencés par le nombre de fils utilisés et l'espacement inter-fils.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons réalisé est consacré à l'étude de la décharge couronne dans l'air en géométrie multi fils - deux plans sous pression et température atmosphériques.

Ce travail est constitué principalement de trois chapitres :

Le premier chapitre est constitué d'une étude théorique de la décharge couronne est de rappelle des grandeurs caractéristique à ce phénomène. Ainsi que les différences physiques qui existent entre les décharges couronnes positives et négatives, les décharges de type Townsend et les streamers.

Dans le deuxième chapitre, on a mis en évidence deux approches pour l'étude théorique de la sonde polarisée circulaire de Tassicker, le champ électrique (E) et la densité de courant(J) aux plans de mesure.

Le chapitre trois a été consacré à l'étude expérimentale qui a été réalisée afin de mesurer les paramètres électrique de cette décharge sur l'électrode plane mise à la terre, dans le but d'avoir des données de comparaison de la décharge couronne négative et la décharge couronne positive et de déterminer les caractéristiques courants-tensions, les densités de courant ainsi que le champ électrique.

L'étude expérimentale a été menée au laboratoire de la haute tension de l'université de Bejaia, en utilisant un dispositif multi fils - deux plans. Pour les mesures nous avons utilisé la sonde polarisée circulaire de Tassicker qui a été mise en place sur la configuration 2fils – 2 plan. Les mesures que nous avons effectuées sont les courants récoltés par la sonde polarisée pour différentes tensions de polarisation du plan de mesure. Les résultats obtenus sont présentés sous formes des graphes grâce à un programme mise en œuvre dans le code de calcul Matlab.

Notre étude expérimentale comporte deux parties. La première partie a consisté à déterminer la tension au seuil d'apparition pour les deux décharges couronnes positive et négative en nappe de fils-deux plans afin de nous permettre de fixer les niveaux de tension appliquer aux électrodes actives, cela passe par le relevé de la caractéristique courant-tension. Cette première étude est basée sur la variation de différent paramétrés (le nombre de fils utilisée, la distance inter-fils (a), la polarité de la tension appliquée, la hauteur des fils). Nous remarquons que :

- Le courant mesuré croit à chaque fois que le nombre de fils augmente.
- Le courant mesuré augmente avec la distance inter-fils (a).
- Le courant mesuré (I_m) est proportionnel à la tension appliquée (V_a).

Dans la deuxième partie, nous avons mesuré la densité de courant et le champ électrique lors de la décharge couronne. Les distributions du champ électrique et de la densité de courant sur l'électrode plane présentent la même allure et les valeurs les plus élevées sont relevées sous les conducteurs actifs où la charge d'espace est concentrée. Ces valeurs sont fortement influencées par la tension appliquée, l'espacement inter-électrodes ainsi que nombre de fils.

A partir de ces graphes, nous avons constaté que pour la densité de courant, les fils à l'extrémité présentent des valeurs plus élevées par rapport à ceux du milieu, elles sont influencées par le nombre de fils utilisés. La tension appliquée (V_a) est maintenue fixe, on observe une croissance significative du courant issu de la décharge couronne avec l'augmentation de l'espace inter - fils (a). On remarque que :

Conclusion générale

- Le champ électrique et la densité de courant sont influencés par les mêmes paramètres (nombre de fils utilisés, l'espacement inter-fils, la polarité, la distance inter-fils).
- Pour la densité de courant, les fils à l'extrémité présentent les valeurs les plus élevées par rapport à ceux du milieu.
- Le champ électrique et la densité de courant sont proportionnels à la tension appliquée (va).
- Les valeurs de la densité de courant et celles du champ électrique relevées sur le plan aux positions situées aux pieds des fils présentent des valeurs élevées, puis diminuent progressivement dans la zone inter-fils, formant ainsi des ondulations uniformes.
- la mesure d'une même valeur du champ aux pieds des fils.

Cependant le nombre d'électrodes actives est en relation avec le courant de décharge sur le plan de mesure, si le nombre de fil augmente le courant de décharge augmente.

En perspectives, il serait intéressant d'améliorer l'étude de ce phénomène en prospectant l'influence de la variation d'autres paramètres ainsi que d'étudier d'autres applications de la décharge couronne dans le domaine industriel.

Bibliographie

- [1] E. Badareu, I. Popescu, 1984, *Gaz ionisés : décharges électriques dans les gaz*, Edition Dunod, Paris.
- [2] R. Farhi, C. Morel, G. Chéron <<Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité >>.INRS, ED638, Octobre 2006.
- [3] M. Handala. Mohand-Amokrane <<Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air /solide>> Thèse de doctorat d'Etat, UMM T.O, décembre 2007.
- [4] G. Berger, 1988, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE PARIS-Sud, Centre d'Orsay.
- [5] C. GARY, *Effet couronne sur les réseaux électriques aériens*, Technique de l'ingénieur, D4440, pp. 1-25.
- [6] Saad Djedjiga <<Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques>>. Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, Avril 2011.
- [7] Alexandre LABERGUE, " *Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements* ", Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, (2005).
- [8] B. KHADDOUR, " *Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée*", Thèse de doctorat de l'INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble), (2006).
- [9] J. Chang, Phil A. Lawless, and T. Yamamoto " *Corona Discharge Processes*", IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 19, n° 6, p. 1152-1166, (1991)
- [10] J. JOLIBOIS << Etude et développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique-Application au contrôle d'écoulement sur profil d'aile>>. Thèse de doctorat de l'université de Poitier, décembre 2008.
- [11] M. Aguet et M. Lanoz << Traité d'électricité : Haute Tension>>, vol XXII 2^{ème} édition 2004.
- [12] Daill. Guillaume. FOURNAUD. Benoit <<Décharge couronne application et modélisation>>. Energétique industrielle ESIP 2004/2005.
- [13] Bourek Yacine <<Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue>>. Thèse de magister, université de Batna, 2005.
- [14] Hamoumeche K. «Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan». Thèse de magister, UMMTO, décembre 2009.
- [15] Zibin. LU «Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharges électriques de type filamentaire». Thèse de doctorat de l'université PARIS VI, décembre 1991.
- [16] K. Allégraud «Décharge à Barrière Diélectrique de surface : physique et procédé». Thèse de doctorat, école polytechnique, 2009.
- [17] J. M. Townsend, 1914, *Electricity in gases*, Oxford university press.
- [18] J. M. Townsend, 1948, *Electron in gases*, Hutchinson, London.

- [19] M. Aissou, 2013, Thèse de Doctorat, Univ. A. Mira de Bejaia, Algérie.
- [20] M. S. Bhalla and J. D. Craggs, "Measurement of Ionization and Attachment Coefficients in Carbon Monoxide in Uniform Fields," *Proc. Phys. Soc.*, vol. 78, no. 3, p. 438, Sep. 1961.
- [21] R. Papoular, "*Phénomènes Electriques dans les Gaz*" Dunod, Paris, (1963)
- [22] J.M. Meek et J. D Craggs "*Electrical Breakdown of gases*" A wiley Interscience publication, (1977)
- [23] J. Jarrige «Étude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, février 2008.
- [24] F. Koliatene «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.
- [25] L. Martin «Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Marquage isotopique et simulation du procédé». Thèse de doctorat université PARIS VI, 4 juillet 2005
- [26] A. VINCENT «Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope». Thèse de doctorat de l'université PARIS VI, Pierre et Marie CURIE, décembre 2002.
- [27] N. DUBUS «Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, novembre 2009.
- [28] H. Raether, *Electron avalanches and breakdown in gases (Advanced physics serie Monographs on ionization and electrical discharges in gases)*. Butterworths, 1964. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/B0000CM6B9/>
- [29] F. L. Jones, *Ionization & Breakdown in Gases*. Methuen & Co Ltd (England), 1957. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/B000YBLST2/>
- [30] L. B. Loeb, *Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases*, 1st ed. John Wiley and Sons, 1939. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/B000AU86AG/>
- [31] F. Buret and A. Beroual, "SF6 dielectric behaviour in a high voltage circuit breaker at low temperature under lightning impulses," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 267–273, 1996.
- [32] S. Sangksaad, "Corona inception and breakdown voltages in nonuniform field in SF6," *Proceedings 2nd International Symposium on High Voltage Engineering*, pp. 379–384, 1975.
- [33] A. Pedersen, "On the electrical breakdown of gaseous dielectrics-an engineering approach," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on]*, vol. 24, no. 5, pp. 721–739, Oct 1989.
- [34] N. H. Malik and A. H. Qureshi, "Breakdown mechanisms in sulphur-hexafluoride," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-13, no. 3, pp. 135–145, 1978.
- [35] C. Gary «Effet couronne sur les réseaux électriques aériens». *Technique de l'ingénieur*, D 4.

- [36] L. Niemeyer and F. Pinnekamp, "Leader discharges in SF₆" *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 16, no. 6, pp. 1031–1045, 1983. Disponible sur : <http://stacks.iop.org/0022-3727/16/1031>
- [37] I. Gallimberti and N. Wiegart, "Streamer and leader formation in SF₆ and SF₆ mixtures under positive impulse conditions. II. Streamer to leader transition," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 19, no. 12, pp. 2363–2379, 1986. Disponible sur : <http://stacks.iop.org/0022-3727/19/2363>
- [38] H. Yala «Calcul numérique du champ électrique en géométries fil-cylindre et fil-plan lors de la décharge couronne positive dans l'air». Thèse de magister, université, A. Mira de Bedjaia 2001.
- [39] E. Nasser, *J. Appl. Phys.* pp, 416-426.
- [40] Y.N. JAFFRE, "Maitrise des Décharges Couronne dans un Gaz en Ecoulement: Vers le Traitement des Gaz d'Echappement". ECL, AMPERE CNRS UMR 5005 –36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France. ICGE'08 Lyon 16-17 décembre (2008)
- [41] R.S. SIGMOND & M. GOLDMAN, "Corona Discharge Physics and Applications, Electrical Breakdown and Discharges in Gases", Part B, NATO ASI series B89-B, (1989)
- [42] S. ROBERT, F. GENET, E. FRANCKE & J. AMOUROUX, "Depollution Processes in Non-Equilibrium Plasmas", Proceedings of the 6th European Conference on Thermal Plasma processes, pp.811-818, Strasbourg, (2000)
- [43] M. POSPISIL, I. VIDEN, M. SIMEK & S. PEKAREK, "Application of Plasma Techniques for Exhaust after Treatment", 9th International Symposium "Transport and Air Pollution", pp.523-528 Avignon, (2000)
- [44] S.L. YAO, E. SUZUKI, N. MENG & A. Nakayama, "A High-Efficiency Reactor for the Pulsed Plasma Conversion of Methane", *Plasma Chem. Plasma Processing*, vol.22, n°2, pp.225-237, (2002)
- [45] C. LIU, A. MARAFEE, B. HILL, G. XU, R. MALLINSON, L. LOBBAN, "Oxidative Coupling of Methane with AC and DC Corona-Discharge Reactor", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol.35, pp.3295-3301, (1996)
- [46] N. SANO, T. NAGAMOTO, H. TAMON, T. SUZUKI & MORIO, "Removal of Acetaldehyde and Skatole in Gas by a Corona Discharge Reactor Okazaki", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol.36, pp.3783-3791, (1997)
- [47] S. ROBERT, "Conception d'un Réacteur Dynamique de Dépollution par Procédé Plasma Hors-Equilibre à Pression Atmosphérique à l'Aide d'une Molécule Modèle", Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), (2001)
- [48] N. SANO, H. TAMON, M. OKAZAKI, "Removal of the Chlorofluorocarbon 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroethane in Gas by Corona Discharge Reactor", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol.37, pp.1428-1434, (1998)
- [49] M.A. MALIK & X.Z. JIANG, "the CO₂ Reforming of Natural Gas in a Pulsed Corona Discharge Reactor", *Plasma Chem. Plasma Processing*, vol.19, n°4, pp.505-512, (1999)
- [50] M. KOGOMA, S. OKAZAKI, K. TANAKA et T. INOMATA, "Ozone, Ammonia and NO_x Destruction in Wire Type Corona Discharge Coated with Ozone Catalyst", Proceedings of ISPC 14, pp.2569-2574, Prague (1999)

- [51] Y. ZHU, R. WANG & Y. WU, "*the Mechanism of SO₂ Removal from Flue Gas by Pulsed Corona Discharge*", Proceedings of ISPC13, pp.1794-1799, Pékin (1997)
- [52] M. REZZOUGA, A. TILMATINE, R. GOURI, K. MEDLES, L. DASCALESCU, "*Experimental Modiling of High-Voltage Corona Discharge Using Design of Experiments*". Front. Electr.Electron. Eng, 2(2): 139-143. China, (2007)
- [53] D. DUBOIS, "*Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement*". Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III– Paul Sabatier, (2006).
- [54] C. GOTTSCHALK, J.A. LIBRA and A. SAUPE, "*Ozonation of Water and Waste Water*", a practical guide to understanding ozone and its applications, second completely revised and updated edition, (2010)
- [55] Jean-Charles Matéo-Vélez « Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharge couronnes et de son interaction avec l'aérodynamique ». Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure de l'aréronautique et de l'espace. ONERA. Décembre 2006.
- [56] J. Chen, 2002, PhD Thesis, University of Minnesota, USA.
- [57] K. CASTOR, 2001, Thèse de doctorat, Université du Maine, le man, France.
- [58] N. G. Trinh, 1995, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 11, n° 2, pp. 23-29.
- [59] Z. M. Al-Hamouz, 1994, Ph.D. Theses, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran- Saudi Arabia.
- [60] E. Kuffel, W. S. Zaengl, 1984, *High-Voltage Engineering: Fundamentals*, Pergamon Press, New York, pp. 366.
- [61] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot et C. Dubanton, 1984, *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*, Edition Eyrolles.
- [62] G. Claude, 10 février 1998 « Effet couronne sur les réseaux électriques aériens », article publié dans technique de l'ingénieur.
- [63] F. W. Peek, 1911, « Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering », MCGRAW-HILL.
- [64] Goldman M, Goldman A, Sigmond R, S, 1985, « the corona discharge, its properties and specific uses », Pure and Appl. Chem.57, n°9, pp. 1353-1362.
- [65] Goldman M, Sigmond R.S, 1982, « Corona insulation, IEEE Trans ». Elec.Ins, EI. 17/2, pp. 90-105.
- [66] A. Kasdi, 2007, « Etude théorique et expérimentale de la décharge couronne bipolaire », thèse de Doctorat, Uni. A. Mira de Bejaia, Algérie.
- [67] W.Janischewskyj, G. Gela, 1979, IEEE Trans. Power Appl. And Syst. Vol. 98,pp. 1000-1012.
- [68] M. M. C. Collins, J. M. Meek, 1965, ICIPG (Belgrade), pp. 581-585.

- [69] T. Takuma, T. Ikeda, T. Kawamoto, 1981, IEEE Trans. Power App. Syst, vol. 100, pp. 4802-4810.
- [70] J. L. Davis, J. F. Hoburg, 1983, Wire-duct precipitator field and charge computation using finite element and characteristics method, J. Electrostat, Vol. 14, pp.187-199.
- [71] J. L. Davis, J. F. Hoburg, 1986, HVDC transmission line computations using finite element and characteristics method, J. Electrostat, Vol. 18, pp. 1-22.
- [72] M. Abdel-Salam, M. Foughali, S. Abdel-Sattan 1983, IEEE Trans Elect Ins, vol. 18, pp. 110-119.
- [73] M. Farzaneh, 1986, Contribution à l'étude des mécanismes de vibrations induites par effet de couronne, Thèse de Doctorat, l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [74] code de calcul EFCOR (Effet Corona).
- [75] L. Hoang, avril 2009, « Comparaison des rendements énergétiques de dégradation de trois composés organiques par plusieurs procédés d'oxydation avancés en milieu aqueux ». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers.
- [76] M. Abdel-Salam, Z. M. Al-Hamouz, 1993, J. phys. D, Appl. Phys, vol. 26, pp.2202-2211.
- [77] M. Abdel-Salam, Z. M. Al-Hamouz, 1995, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 31, pp. 484-493.
- [78] H. Yala, 2001, Mémoire de magister, Université A. Mira de Bejaia, Algérie.
- [79] N. Fujiojka, T. Shota, M. Ohkawa, Y. Tsunoda, 1983, Memories of the Faculty of Eng, Kode univ, n°30, pp. 149-162.
- [80] Xin- Min Shi, Motoshige Yumoto et Takao Sakai, 1999, IEEE trans, Ind. Appl, vol. 35, n°03, pp. 549-553.
- [81] H. Yala, A. Kasdi, Y. Zebboudj, 2003, Analysis of current and electric field distributions beneath a positive DC wire-to-plane corona, the European Physical Journal Applied Physics, vol 21, pp. 45-52.
- [82] K. Adamiak, P. Atten, 2004, Simulation of corona discharge in point-plane configuration Journal of Electrostatics, vol 61, pp. 85-98.
- [83] B. Khaddour, 2006, Thèse de doctorat, INP de Grenoble, France.
- [84] N. Oussalah, Y. Zebboudj, 2006. Negative corona computation in air, Engineering with Computers 21 : pp. 296-303.
- [85] K. Adamiak, 2013. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators. Journal of electrostatics. Vol 71, pp 673-680.
- [86] R. DJEKIDEL, D. MAHI, A. AMEUR, A. OUCHAR, 2014, Calcul et réduction du champ électrique au voisinage d'une ligne de transport d'énergie électrique HT, Acta Electrotehnica ,vol. 55; N. 1-2, pp. 26-31.
- [87] Eduard Potrymai, Ivan Perstnov, 2014, Time Dependent Modelling and Simulation of the Corona Discharge in Electrostatic Precipitators. Master Degree project. Linnaeus University. Suède.

- [88] A. Kasdi, Y. Zebboudj, H. Yala, 2015, Simulation of corona Discharge in DC Electrostatic Precipitator, Journal of Electrical Systems 11-4, pp. 384-396.
- [89] 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.
- [90] O. J. Tassicker, 1974, Proc. IEE, Vol. 121, pp. 213-220.
- [91] E. O. Selim, R. T. Waters, 1980, IEEE Trans, Vol. IA-16,n°3, pp. 458-463.
- [92] N.A. Kaptzov, 1947, OCIZ, pp. 587-630.