

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira-Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

Thème

Etude de l'influence de la polarité sur la décharge couronne nappe de fils-plan

RÉALISÉ PAR :
OUARTI Ahmed
BENDRIS Imad

PROPOSÉ ET DIRIGÉ PAR :
RAHMANI Allaoua
CHIBANE Ouarda

2023 /2024

Remerciements

Nous remercions Dieu pour nous avoir donné le courage et la volonté de réaliser ce présent travail.

Nous remercions chaleureusement notre promoteur Mr Rahmani Allaoua et Mme Chibane Ouarda pour l'aide qu'ils nous ont apporté et pour tous leurs encouragements continuels, et disponibilité à réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation universitaire.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont soutenu et prêté main pour la réalisation de ce modeste travail de près ou de loin.

Dédicaces

A mes parents

Je remercie mon père pour tous les sacrifices qu'il a fait et les efforts qu'il fournit pour que je sois aujourd'hui ici.

Je le dédie spécialement à ma mère la plus chère du monde, à la femme dont je suis fière d'être son fils.

Je remercie mon seul frère et mes deux sœurs qui ont été à mes côtés.

Sans oublier tous mes amis sans citer les noms.

Ouarti Ahmed

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents qui m'ont toujours soutenu dans mon étude merci pour votre encouragement.

A mon frère et ma sœur qui ont été à mon cotés dans les moments les plus difficiles de ce parcours votre présence et votre soutien ont été essentiel.

À mes amis et tous ceux qui de près ou de loin ont rendu possible l'accomplissement de ce mémoire.

Bendris imad

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition décharge couronne.....	4
I. 2.1 Condition d'apparition :	4
I. 2.2 Phénomènes de multiplications électroniques :	4
I. 2.2.1 Choc élastique :.....	4
I. 2.2.2 Choc inélastique :.....	4
I.3 . Mécanismes de formation et processus physique	5
I. 3.1 Théorie de Townsend.....	6
I. 3.2 Théorie des Streamers	8
I.4 Domaine d'existence de la décharge couronne.....	9
I.5 Différents types de décharge couronnes	10
I. 5.1 Décharge couronne positive.....	10
I. 5.2 Décharge couronne négative.....	11
I.6 Seuil d'apparition de la décharge couronne :.....	12
I.7 Les facteurs influençant la décharge couronne	13
I. 7.1 Facteurs géométriques.....	13
I. 7.2 Facteurs physico-chimiques	14
I.8 Domaine d'application des décharges couronnes	15
I. 8.1 Traitement des effluents gazeux	15
I. 8.1.1 Les précipitateurs électrostatiques.....	15
I. 8.1.2 Destruction des polluants.....	15
I. 8.2 Traitement des surfaces	16
I. 8.2.1 Nettoyage et érosion de surface.....	16
I. 8.2.2 Modification de la chimie de surface.....	16
I. 8.3 Élimination de l'électricité statique.....	16
I.9 Effets indésirables de la décharge couronne....	16
I.10 Conclusion :.....	16
CHAPITRE II : Technique expérimentales	
II.1. Introduction	18
II.2 Description du dispositif expérimental	18
II.3. Système d'électrode trois à fils-plan	20
II.4. Source de haute tension continue :.....	20

II.5 Méthodes de mesure.....	23
II.5.1 Mesure des tensions :.....	23
II.5.1.1 Tension appliquée aux électrodes actives :.....	23
II.5.1.2 Mesure de la tension de claquage :.....	24
II.5.2. Mesure du courant de décharge	24
II 5.3 La mesure du courant collecté par la sonde :.....	26
II.5.4 les conditions atmosphériques :.....	26
II.6. Conclusion.....	28

Chapitre III : Présentation et interprétation des résultats

III.1.	
Introduction.....	30
III.2. Courant collecté par le plan	30
III.2.1. Influence du nombre de fils :.....	30
III.2.2. Influence de la distance inter-fils ' a '	33
III.2.3. Influence de la distance inter-électrodes h	35
III.2.4. Influence du rayon de courbure (diamètre des fils)	38
III.3. Courant collecté par la sonde.....	40
III.3.1. Influence de la distance inter-fils	40
III.3.2. Influence de la distance inter-électrodes h :.....	42
III.3.3. Influence du rayon de courbure (diamètre des fils) :.....	44
III.4. Conclusion.....	46

Chapitre I : Généralités sur la décharge couronne

Figure I.1: Effet couronne sur différents éléments.....	3
Figure I.2: Différent type de géométrie d'électrodes.....	6
Figure I.3: Réalisation d'une décharge de Townsend à courant continu.....	7
Figure I.4 : Transition entre une avalanche électronique et un streamer jusqu'à franchir la distance inter électrodes.....	9
Figure I.5 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air.....	9
Figure I.6 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive.....	11
Figure I.7 : Schématisation d'une décharge couronne continue négative.....	12
Figure I.8: Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne.....	13
Figure I.9 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes en géométrie fil-plan ($d=0.5\text{cm}$, $\varnothing = 125\mu\text{m}$).....	14
Figure I.10: Schéma d'évolution de la décharge observée En fonction de la pression.....	15

Chapitre II : technique expérimentales

Figure II.1 : Schéma du dispositif expérimental.....	19
Figure II.2 : Vue de profil du dispositif.....	19
Figure II.3 : une sonde linéaire.....	20
Figure II.4 : dispositif expérimentale du système trois fils-plan.....	20
Figure II.5: installation haute tension utilisée du laboratoire de Bejaia.....	21
Figure II.6 : Schéma en bloc de la source de haute tension utilisée.....	22
Figure II.7 : Equipements de l'installation haute tension utilisée.....	23
Figure II.8 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge.....	25
Figure II.9 : Pico-ampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de la sonde.....	26
Figure II.10: Le thermomètre à aiguille et l'hygromètre à cheveux disponibles au laboratoire haut tension.....	27
Figure II.11 : Photo du baromètre à mercure utilisé dans la mesure de pression.....	27

Chapitre III : Résultats et Interprétation

- Figure III.1 :** Caractéristiques Courant Tension pour différentes valeurs des nombres de fils. a) polarité positive et b) polarité négative ($h=3\text{cm}$; $20C^0 < T < 24C^0$, $P=100,88\text{ hPa}$, $54\% < H < 62\%$).....31
- Figure III.2 :** Influence de la polarité sur les caractéristiques Courant-Tension pour différentes valeurs du nombre des fils ($h=3\text{cm}$, $20C^0 < T < 24C^0$, $P=100,88\text{ hPa}$, $54\% < H < 62\%$).....31
- Figure III.3 :** Rapport des courant K en fonction de la tension appliquée pour différents valeurs du nombre de fils N, a) polarité positive et b) polarité négative.....31
- Figure III.4 :** Effet de la polarité sur le rapport K.....33
- Figure III.5 :** caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la distance inter-fils a) polarité positive et b) polarité négative. ($h=3\text{cm}$, $20C^0 < T < 24C^0$, $P=100,65\text{ hPa}$, $54\% < H < 60\%$, $D=0,5\text{ mm}$).....33
- Figure III.6 :** effet de la polarité sur la caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la distance inter-fils.....34
- Figure III.6 :** effet de la polarité sur les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la distance inter-fils. ($h=3\text{cm}$, $20C^0 < T < 24C^0$, $P=100,65\text{ hPa}$, $54\% < H < 60\%$, $D=0,3\text{ mm}$).....35
- Figure III.8 :** effet de la polarité sur le rapport k en fonction de la distance inter-fils35
- Figure III.9 :** Caractéristiques Courant-Tension pour différentes distances inter-électrodes a) polarité positive et b) polarité négative ($a=4\text{ cm}$, $20C^0 < T < 24C^0$, $P=100,85\text{ hPa}$, $53\% < H < 60\%$)36
- Figure III.10 :** Effet de la polarité sur les Caractéristiques I-V pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes ($a=4\text{cm}$, $20C^0 < T < 24C^0$, $P=101,3\text{ hPa}$, $53\% < H < 60\%$)36
- Figure III.11 :** Rapport K en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de la distance Inter-électrodes, a) polarité positive et b) polarité négative.....37
- Figure III.12 :** Effet de la polarité sur le rapport K pour diverses valeurs de la distance Inter-électrodes.....37
- Figure III.13 :** caractéristique courant-tension pour le système d'électrode trois fils-plan et pour différentes valeurs du diamètre des fils a) polarité positive et b) polarité négative ($h=3\text{cm}$, $a=4\text{cm}$, $P=100,85\text{ hPa}$, $53\% < H < 60\%$).....38
- Figure III.14 :** Effet de la polarité sur les caractéristique courant-tension pour le système d'électrode trois fils-plan et pour différents diamètres des fils . ($h_{fp}=3\text{cm}$, $a=4\text{cm}$, $P=100,85\text{ hPa}$, $53\% < H < 60\%$).....39
- Figure III.15 :** Rapport k en fonction de tension appliquée avec différents valeur de diamètre des fils39
- Figure III.16 :** Effet de la polarité sur le rapport K pour différent diamètre d (mm).....40

Figure III.17 : Caractéristiques courant -Tension du fil du centre pour différentes distances inter-fils, a) polarité positive et b) polarité négative. (hfp=3cm ,D=0.3mm, $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85hPa ,53%<H<60%).....	41
Figure III.18 : Caractéristiques courant -Tension du fil du bord pour différentes distances inter-fils, a) polarité positive et b) polarité négative (hfp=3cm, D=0.3mm, $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85, hPa, 53%<H<60%).....	41
Figure III.19 : Caractéristiques Courant -Tension des fils centre et bord pour la configuration trois-fils-plans et pour différentes distances inter-fils, a) polarité positive et b) polarité négative (h=3cm ,D=0.3mm, $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85, hPa, 53%<H<60%).....	42
Figure III.20 : Caractéristiques courant -Tension du fil du centre pour différentes distances inter-électrodes a) polarité positive et b) polarité négative, (d=0.3mm, a=4cm, $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85 hPa, 53%<H<60%).....	43
Figure III.21 : Caractéristiques courant -Tension du fil du bord pour différentes distances inter-électrodes a) polarité positive et b) polarité négative (d=0.3mm, a=4cm , $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85 hPa, 53%<H<60%).....	43
Figure III.22 Caractéristiques Courant -Tension des fils centre et bord pour la configuration trois-fils-plans et pour différentes distances inter-électrodes, a) polarité positive et b) polarité négative (d=0.3mm, a=4cm , $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85 hPa, 53%<H<60%).....	44
Figure III.23 : Caractéristiques courant -Tension du fil du centre pour différents diamètre des fils a) polarité positive et b) polarité négative, (hfp=3cm ,a=4cm, $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85 hPa, 53%<H<60%).....	45
Figure III.24 : Caractéristiques courant -Tension du fil du bord pour différents diamètre des fils a) polarité positive et b) polarité négative, (hfp=3cm ,a=4cm, $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85 hPa, 53%<H<60%).....	45
Figure III. 25 : Caractéristiques Courant -Tension des fils centre et bord pour la configuration trois-fils-plans et pour différentes valeurs du diamètre des fils, a) polarité positive et b) polarité négative (hfp=3cm, a=4cm, $20C^0 < T < 24C^0$,P=100,85 hPa, 53%<H<60%).....	4

Tableau I.1: Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative.....14

Symbole	Définition	Unité
E	Le champ électrique	(kV/m)
V	Tension de fil	(KV)
P	La pression de l'air	(hPa)
d	La distance inter- électrode	(cm)
W_e	Energie cinétique	(J)
W_i	Energie d'ionisation	(J)
n_0	La densité de particule chargée	
α	Coefficient d'ionisation primaire de Townsend	(m^{-1})
γ	Coefficient d'ionisation secondaire de Townsend	
δ	La densité de l'air	(Kg/m^3)
V_s	La tension seuil	(kV)
V_r	Tension applique	KV
E_s	Le champ seuil	(KV/cm)
N	Le nombre d'électrons produit par avalanche	

Introduction générale

Introduction générale

La décharge couronne est un phénomène électrique complexe qui présente de nombreuses applications pratiques dans divers domaines industriels et environnementaux. C'est un phénomène qui a suscité l'intérêt de la communauté scientifique depuis longtemps, mais il est encore largement sous-exploité en raison de sa complexité et de la nécessité d'une compréhension approfondie de ses mécanismes.

La décharge couronne est caractérisée par la formation d'une gaine lumineuse bleutée autour d'un conducteur porté à haute tension. Ce phénomène est lié à la formation de charges électriques libres qui se déplacent le long du conducteur et créent des champs électriques intenses. La compréhension de ces mécanismes est cruciale pour optimiser l'utilisation de la décharge couronne dans diverses applications, telles que la filtration et la séparation électrostatique, le traitement des surfaces, la production d'ozone, etc.

Ce travail vise à étudier l'effet de la polarité sur les caractéristiques Courant- Tension de la décharge couronne nappe fils-plan, dans l'air ambiant, en variant plusieurs paramètres géométriques à savoir le nombre de fils, la distance inter-fils,.....

Ce manuscrit est structuré en trois chapitres pour permettre une analyse approfondie et organisée du sujet étudié.

- Le premier chapitre sera consacré à l'étude théorique des décharges couronnes. Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail le mécanisme et processus de développement de la décharge couronne, le seuil d'apparition, les différents types de décharge couronne, les facteurs qui influent sur ce phénomène et les applications de cette décharge dans le domaine industriel.
- Dans le deuxième chapitre nous présenterons le dispositif expérimental utilisé lors des manipulations au laboratoire et les méthodes de mesure.
- Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations.

Chapitre I

Généralités sur la décharge couronne

I.1-introduction

En théorie, les gaz comme l'air sont considérés comme des isolants électriques parfaits. Cela s'explique par le fait qu'ils ne contiennent pas de particule chargée libres qui pourraient permettre le passage du courant. Cependant dans la réalité les gaz ne sont jamais complètement dénués de charge libre à cause de l'action de certains agents extérieurs permanents comme les radioactifs naturels. Lorsqu'on applique un champ électrique suffisamment intense a un gaz celui-ci devient alors plus ou moins conducteur et des phénomènes complexe appelés décharges électriques peuvent alors se produire comme la décharge couronne [1].

Ça fait déjà plus d'un siècle que les études sur les décharges électriques ont été entamées [2,3]. Les premières études sur l'évolution de ces phénomènes et les mécanismes sous-jacents datent des années 1911[4], avec les travaux de M. F. Peek, un précurseur dans ce domaine [5]. L'une des conséquences du transport de l'énergie électrique à haute tension est l'apparition de l'effet couronne autour des lignes de transport [6]. Des expériences réalisées sur des conducteurs minces à haute tension ont montré que se forme une gaine lumineuse bleu-violet qui s'épaissit avec la tension (Figure I.1). C'est cette lumière qui a donné naissance à l'expression universellement employée de "décharge couronne" ou "corona effect" [7]. Plusieurs études ont été menées depuis pour expliquer les mécanismes de la formation, développement et propagation de cette décharge.

En outre, l'utilisation de la décharge couronne offre des avantages dans divers domaines industriels tels que la filtration et la séparation électrostatique, le traitement des surfaces, la production d'ozone, etc. Nous allons aborder dans ce chapitre la définition de la décharge couronne, les étapes de sa formation et de son développement, ainsi que les divers régimes et types de cette décharge.

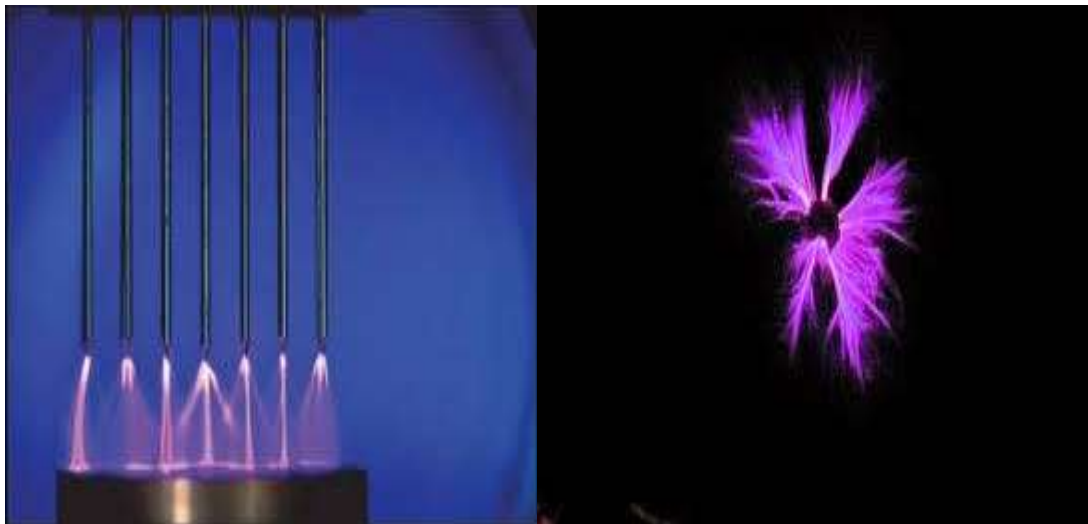


Figure I.1: Effet couronne sur différents éléments [8]

I.2. Définition de la décharge couronne

La décharge couronne est l'ensemble des phénomènes associés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans les environs d'un conducteur porté à une tension dont le champ électrique environnant est intense mais non disruptif. Cette conductivité est causée par le phénomène d'ionisation. Cette décharge n'a pas besoin d'une source externe d'ionisation pour se développer, elle est appelée décharge auto-entretenu (autonome). Il faut néanmoins un électron initial pour déclencher la décharge.

I.2.1 Condition d'apparition :

Dans un champ électrique intense, l'excitation de certaines particules du gaz ambiant peut devenir suffisamment élevée pour ioniser ce même gaz dans une région donnée, les électrons libres accélérés par le champ électrique intense sont à la base de ce processus.

Lorsque leur énergie dépasse l'énergie d'ionisation de ces dernières, de nouveaux électrons sont alors produits et soumis au même champ. Lors de l'ionisation, des photons hautement énergétiques sont aussi produits pouvant contribuer à une réaction en chaîne appelée avalanche de Townsend. Le développement d'avalanches successives produit la décharge couronne. Les ions et les électrons ainsi créés se déplacent selon leur polarité et influencent à leur tour le champ électrique entre les électrodes. On appelle ces groupes de charges en mouvement « charges d'espace ». [9]

I.2.2 Phénomènes de multiplications électroniques :

L'application d'un champ électrique suffisamment intense conduit à l'ionisation du gaz. Cette dernière se fait par le transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz par collisions, et dans ce cadre il existe deux types de collisions entre ces éléments.

I.2.2.1 Choc élastique :

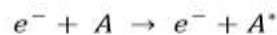
Dans ce cas les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. L'énergie du système reste inchangée.

I.2.2.2 Choc inélastique :

Dans ce cas l'énergie interne des particules change. Les chocs vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz [10].

a) Excitation atomique :

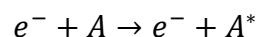
- Excitation par collision avec un électron



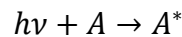
- Excitation par absorption d'un photon



- Excitation par collision avec un électron



- Excitation par absorption d'un photon



Avec :

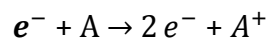
h : Constante de Planck « $h = 6,62 \times 10^{-34}$ J. s »,

ν : Fréquence du photon « Hz »,

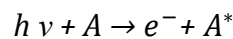
$h\nu$: Énergie du photon « J »,

Lorsque l'atome excité revient à son état initial, un photon est émis, et c'est ce processus qui interfère avec l'effet corona et conduit à l'effet de lueur.

b) Ionisation par choc :



c) Photo ionisations

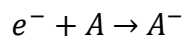


d) Recombinaison et attachement :

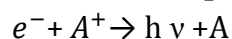
A tout processus d'excitation ou d'ionisation est associé un processus inverse tendant à ramener les particules à leur état fondamental ou à réduire la concentration des particules ionisées. Les processus conduisant à la diminution du nombre d'électrons libres dans un gaz ionisé peuvent être de deux types, attachement ou recombinaison [11].

- **L'attachement électronique :**

L'attachement d'un électron par un atome ou une molécule neutre conduit à la formation d'un ion négatif. Ce processus ne peut pas avoir lieu si les électrons sont trop énergétiques.



- **La recombinaison (électron – ion positif) :**



I.3. Mécanismes de formation et processus physique

La décharge couronne, qui se produit généralement sous pression atmosphérique, est généralement accompagnée de deux électrodes asymétriques. Le potentiel de l'électrode active de faible rayon de courbure (une pointe ou un fil mince) est élevé. L'électrode passive de rayon de courbure important (une plaque plate ou un cylindre) est mise à terre. La décharge est positive ou négative en fonction de la polarité de la tension exercée sur l'électrode active. Parmi les configurations d'électrodes les plus utilisées, on trouve les systèmes point-plan, couteau-cylindre, fil-plan, fil-cylindre ou cylindre-cylindre (figure 1.2), La distance inter-électrode est habituellement de l'ordre du centimètre [12].

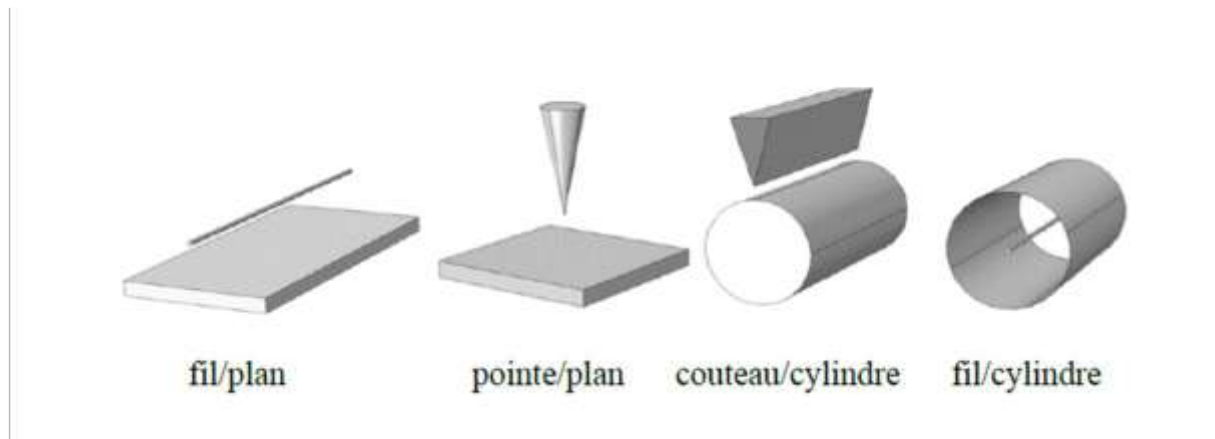


Figure I.2: Différent type de géométrie d'électrodes [13].

Pour expliquer le développement d'une décharge les recherches antérieures ont abouti à classer les phénomènes en deux catégories :

- Le premier est la décharge de Townsend qui fait intervenir tout l'intervalle inter-électrodes.
- Le second correspond à l'apparition de lueurs dans l'intervalle prenant de filament ce qu'on appelle streamer

I.3.1. Théorie de Townsend

Dans leur état normal, les gaz sont en général de bons isolants électriques mais, soumis à des contraintes extérieures (rayonnement lumineux, chaleurs, champs électrique,..), ils peuvent devenir conducteurs. La transition d'un gaz de son état isolant à un état conducteur sous l'action d'un champ électrique peut être décrite de manière simple par la théorie de Townsend. Pour cet effet, considérons deux électrodes planes, séparées par un intervalle d dans un gaz à la pression P et contenu dans une enceinte (figure I.3). Si l'on impose une différence de potentiel V entre ces électrodes, on fait apparaître dans l'intervalle un champ électrique uniforme d'intensité :

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{I.1})$$

Il existe dans le gaz un petit nombre d'électrons libres, dits électrons germes, provenant des effets d'agents ionisants naturels. Par souci de simplicité, supposons que, par unité de temps, n_0 électrons initiaux sont créés par effet photoélectrique à la cathode du système d'électrodes. Accélérés par le champ électrique, ces électrons pourront produire des réactions d'ionisation du gaz et induire ainsi un courant électrique, si au cours des chocs qu'ils subissent avec les molécules du gaz, ils peuvent acquérir une énergie w_e égale ou supérieure à l'énergie d'ionisation w_i de ces molécules.

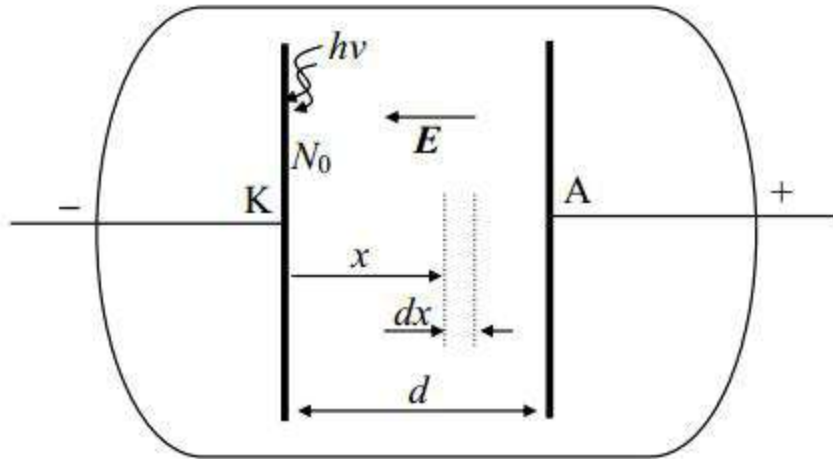


Figure I.3: Réalisation d'une décharge de Townsend à courant continu [14].

A : anode

K : cathode

d : distance anode-cathode

hv : source de rayonnement

Désignons par α , coefficient d'ionisation primaire de Townsend, le nombre moyen de paires électron-ion ainsi créés par un électron et par unité de longueur de parcours, dans la direction du champ électrique E . La valeur de α , pour un gaz donné, dépend de la valeur du champ réduit E/P . Dans le cas d'un champ homogène α reste constant

Supposons donc qu'il se soit formé $n(x)$ électrons à une distance x de la cathode, alors ils vont produire $dn(x)$ électrons sur une distance dx :

$$dn(x) = \alpha \cdot n(x) \cdot dx \quad (\text{I.2})$$

En intégrant cette équation, nous obtenons le nombre d'électrons atteignant l'anode :

$$n(d) = n_0 \times \exp(\alpha d) \quad (\text{I.3})$$

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

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

D'où le courant collecté est :

$$i = i_0 \times \exp(\alpha d) \quad (\text{I.5})$$

L'étude expérimentale du courant i , effectuée par Townsend en fonction de la distance d , a montré que ce courant augmente plus rapidement que ce qui est prévu par la relation (I.5). Ceci est dû au phénomène d'ionisation secondaire se produisant près de la cathode. En effet, si l'on considère les ions positifs créés lors des collisions ionisantes électrons-molécules, leur impact sur la cathode peut provoquer l'émission d'électrons secondaire. On caractérise cette émission par un facteur γ , dit coefficient d'ionisation secondaire de Townsend, qui représente le nombre d'électrons émis à la cathode par ion incident [15].

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. Donc pour n électrons primaires à la Cathode, le nombre d'électrons parvenant à l'anode devient :

$$n_d = \frac{n_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.6)$$

D'où le courant collecté à l'anode :

$$I = \frac{I_0 \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1.7)$$

A la suite des mesures de temps de décharge effectuées par Rogowski, le mécanisme proposé par Townsend est remis en cause par Raether, Meek et Loeb [16,17]. Lorsque les valeurs du produit de la pression par la distance ($p \cdot d$) sont supérieures à 250 kPa.mm. Cela a conduit à la formulation d'une nouvelle théorie appelée théorie des streamers.

I.3.2. Théorie de Streamer

Le streamer apparaît sur une photographie statique comme un étroit filament lumineux; l'émission lumineuse, qui en résulte, provient essentiellement des photons créés en tête du streamer. Dans ce cas, la photo-ionisation du gaz, au sein de la charge d'espace générée par la première avalanche de Townsend près de la cathode, joue un rôle important. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent, par collision, des molécules neutres qui, en revenant à leur état fondamental, émettent des photons. Ces derniers sont absorbés par le gaz inter-électrodes. Dans l'air, les molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons avec une énergie supérieure à 13 eV, capables d'ioniser les molécules d'oxygène dont le potentiel d'ionisation n'est que de 12.2 eV. Les électrons produits vont créer de nouvelles avalanches secondaires selon le même mécanisme de multiplication électronique décrit par Townsend. Ces avalanches secondaires vont se développer vers la charge d'espace positive en formant un canal d'étincelles (figure I.4). Ce phénomène de streamer est caractérisé par un temps de développement d'environ 10^{-8} secondes.

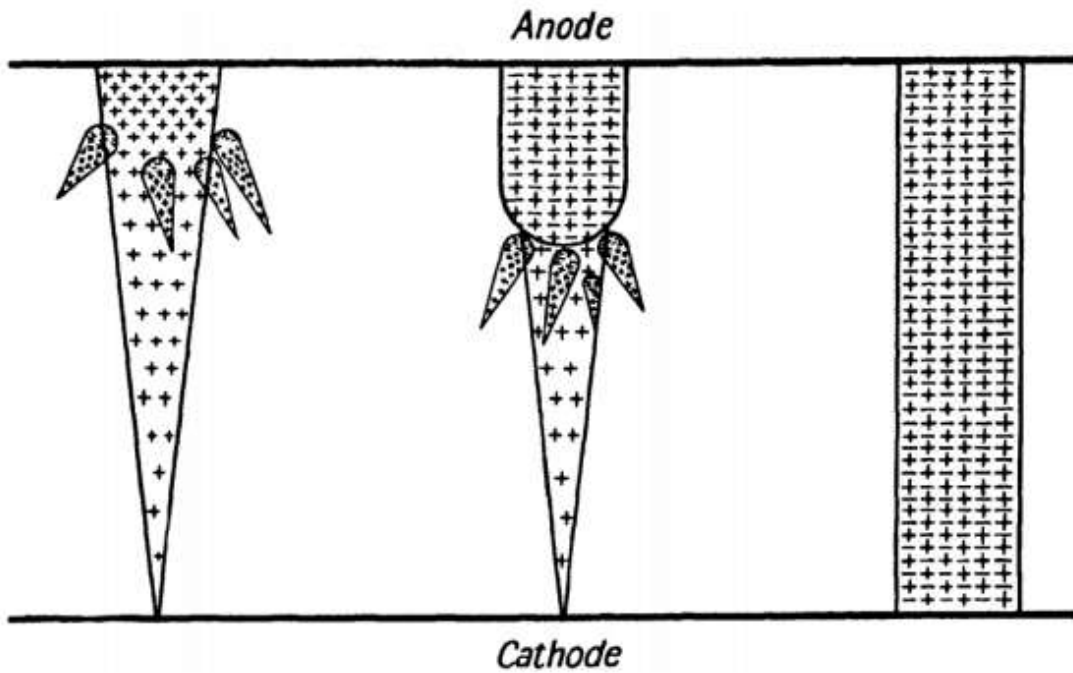


Figure I.5 : Transition entre une avalanche électronique et un streamer jusqu'à franchir la distance inter électrodes [17].

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

Sous l'effet du champ électrique appliqué, on augmente la tension de 0 à la tension de claquage, les particules ainsi créées vont se déplacer dans l'espace inter-électrodes et générer un courant électrique, appelé également courant de décharge. La Figure I.6 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée [18].

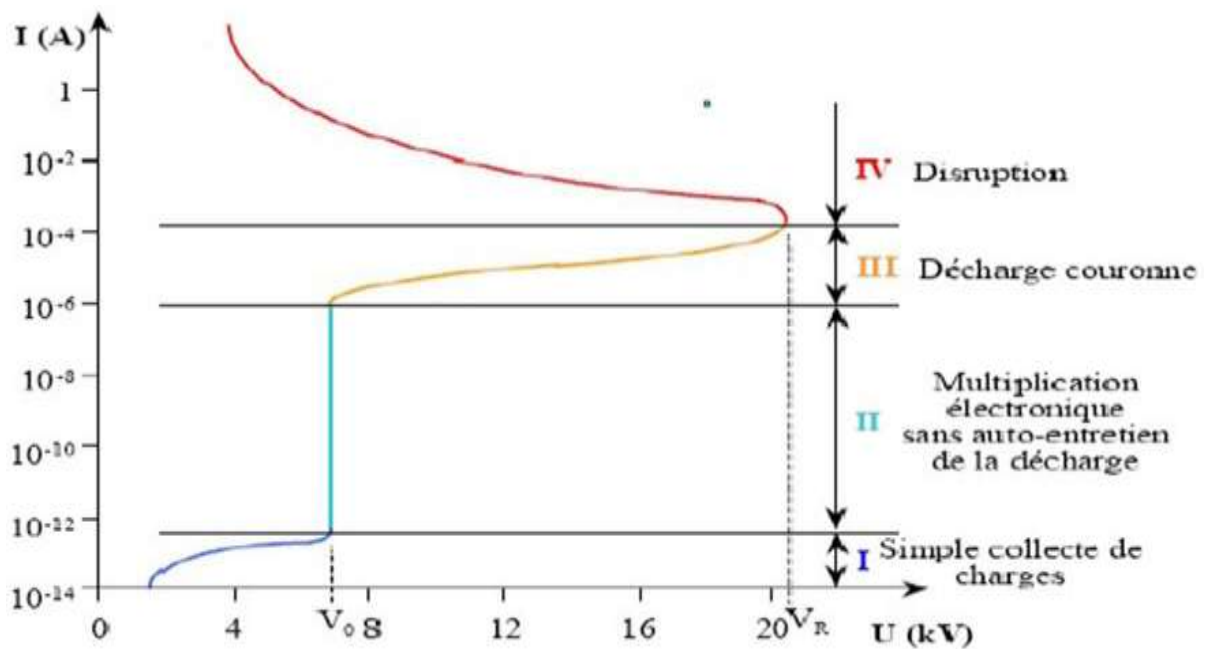


Figure I.6 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air [20].

La courbe permet de distinguer quatre zones :

- Zone I : le courant est très faible, de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-14} Ampères. Cela est dû à la collecte des ions naturellement présents dans le milieu gazeux, produits par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle).

Dans cette zone, le champ électrique appliqué est trop faible pour permettre l'avalanche électronique, c'est-à-dire la multiplication des électrons par ionisation successive des molécules du gaz. Par conséquent, le courant reste à une valeur de saturation, notée I_s , sans augmentation significative avec la tension. [14].

- Zone II : quand la tension atteint une valeur seuil V_s le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule qui l'entoure le processus d'avalanche débute, sans que le critère d'auto-entretien soient satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire : on parle de régime de Townsend non entretenu. Le courant reste faible [15].
- Zone III : ici la décharge ne s'éteint plus car la condition d'auto-entretien est atteinte. La composante continue (représentative de la charge d'espace) augmente avec la tension.
- Zone IV : au-delà d'une tension appliquée « V_r », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit « E/N » est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. On observe la transition du régime couronne au régime d'arc, le milieu passe à l'état de plasma thermique [20].

I.5. Différents types de décharge couronnes

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée l'électrode de faible rayon de courbure (électrode active).

I.5.1. Décharge couronne positive

La décharge couronne positive se produit lorsque l'électrode à haute tension est portée à un potentiel positif et que la plaque (le plan) se trouve à terre. Ainsi, dans le champ intense autour de l'électrode active, des électrons sont générés par photo-ionisation et accélérés vers l'anode. Une zone de forte ionisation se développe alors autour de celle-ci ; zone en pointillée de la figure I.7. Les ions positifs produits sont alors repoussés par l'anode, par les forces de Coulomb, jusqu'à une distance de l'électrode active (moins d'un millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ne permet plus la formation d'ions positifs. Les ions positifs se déplacent ainsi vers le plan mis à la terre. La région unipolaire (car il n'y a que des ions positifs) est appelée zone de dérive.

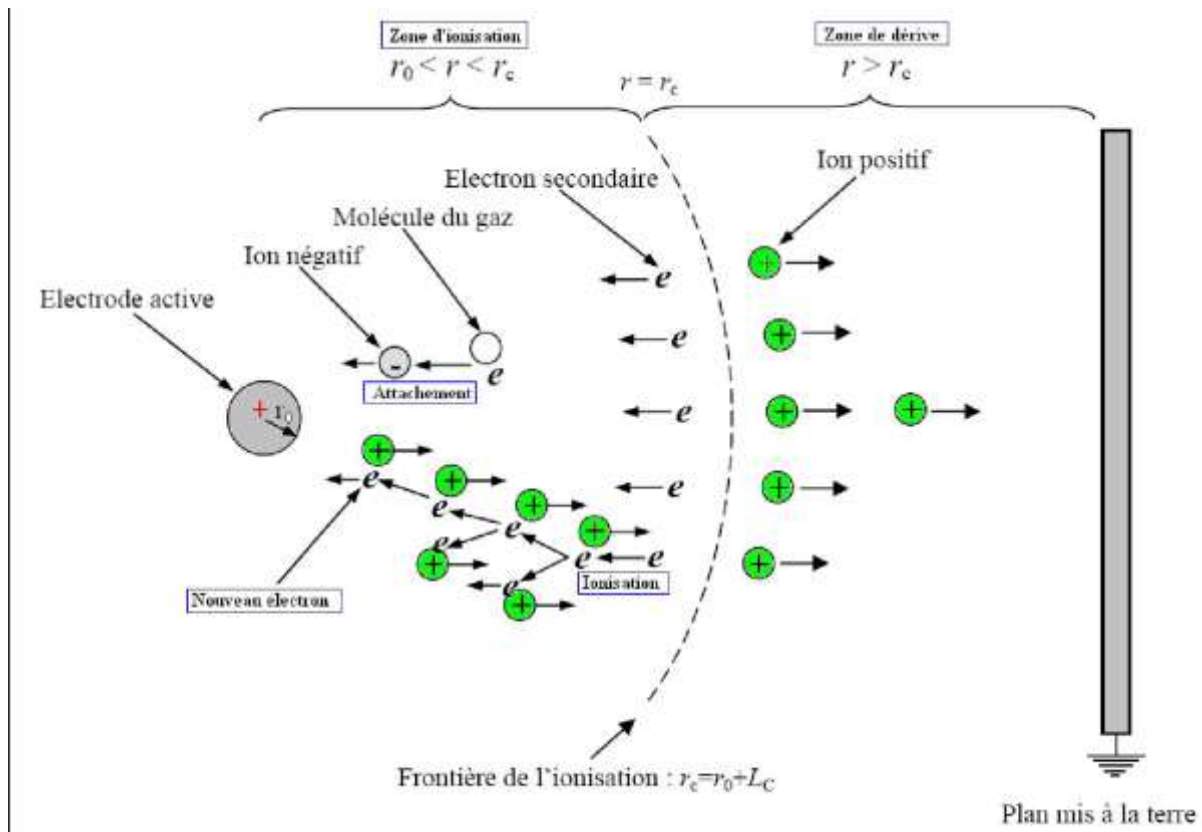


Figure I.7 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive [21]

Pour cette décharge, l'avancé des streamers se propagent comme une extension de l'anode selon les modélisations de Loiseau et al. La décharge se compose d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à une vitesse de 2.105 m/s) et d'une phase de restauration où les ions dérivent. Les deux phases constituent un cycle de 10 kHz de fréquence. Il n'y a donc pas de continuité dans le courant de décharge, mais une succession de phénomènes transitoires. Goldman et al indiquent qu'un courant positif de 50 μA se décomposerait en un courant unipolaire continu de 20 μA , distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à 30 μA percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz [15].

I.5.2. Décharge couronne négative

Dans le cas où l'électrode active est portée à un potentiel négatif et la plaque est mise à la terre, la décharge couronne est dite négative, Figure I.8. Il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de l'électrode HT. Goldman et Sigmond [22], expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode. Les ions négatifs créés par attachement dans la zone où le champ est plus faible peuvent se diriger vers l'électrode plane mise à terre. De plus, lorsque la tension dépasse un seuil, l'arc se produit.

Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel, à une fréquence, qui est fonction de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et dues au champ électrique affaibli près de la cathode. Les ions négatifs empêchent la multiplication des avalanches d'électrons. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode.

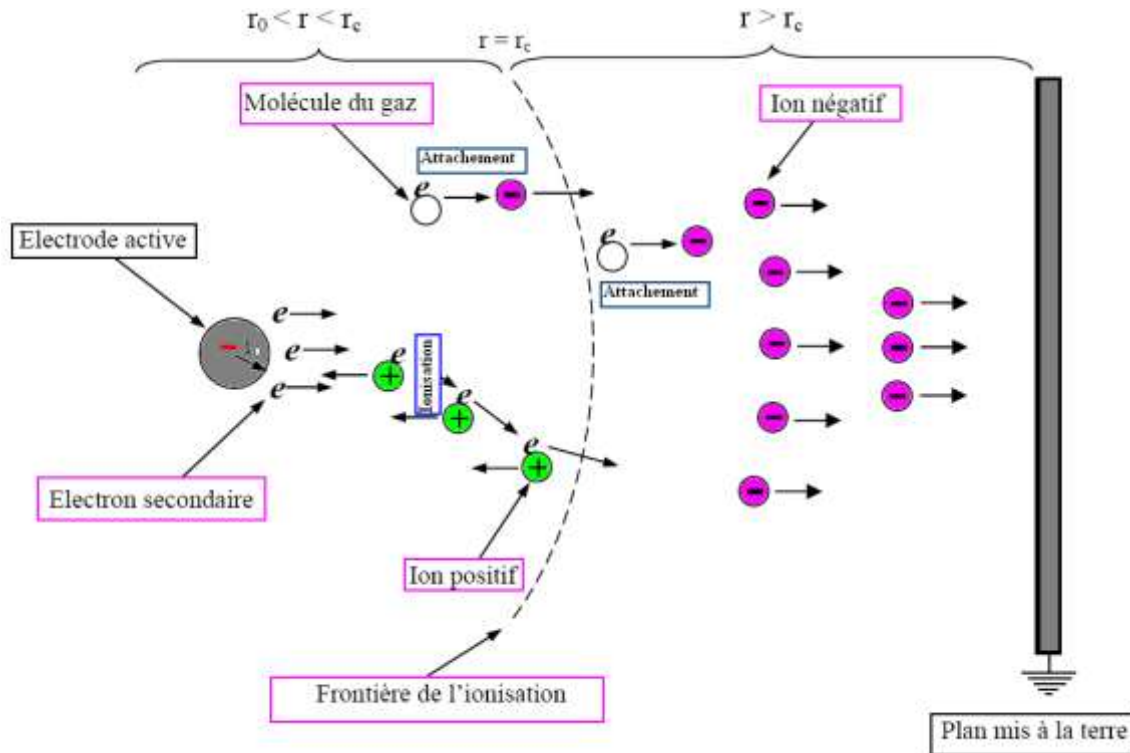


Figure I.8 : Schématisation d'une décharge couronne continue négative [21]

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

On entend par seuil d'effet couronne, la valeur du champ pour laquelle il y a apparition brusque d'une conductivité de l'air au voisinage immédiat d'un conducteur soumis à une tension croissante. Pendant longtemps, la loi de Peek qui date de 1929 a été généralement employée pour l'évolution du champ seuil E_s d'effet couronne. Peek observa que l'apparition de la couronne était une fonction du champ superficiel du rayon de courbure et de la densité de l'air. [12] Il donna la loi suivante :

$$E_s = 31 \cdot m \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (\text{kV/cm}) \quad (\text{I.8})$$

Avec m est un facteur dépendant de l'état de la surface de l'électrode active. En particulier $m=1$ pour une électrode bien polie ;

r est le rayon de courbure de l'électrode active en μm ;

$$\delta = \frac{P}{760} \cdot \frac{298}{273+T} \quad \text{est la densité de l'air.}$$

P : pression de l'air en hPa ;

T : la température de l'air ambiant en $^{\circ}\text{C}$.

I.7. Les facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne, on distingue :

- Facteurs géométriques.
- Facteurs physico-chimiques.

I.7.1. Facteurs géométriques

a) Rayon de courbure :

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne. [8]

b) distance inter-électrode :

Les paramètres de la décharge sont influencés par la distance inter-électrode. Il est évident sur la figure I.9 que le courant est plus important et croît plus vite avec la tension appliquée pour des distances inter-électrodes faibles. Et l'augmentation de la distance inter-électrodes augmente la tension seuil à laquelle l'effet corona se produit

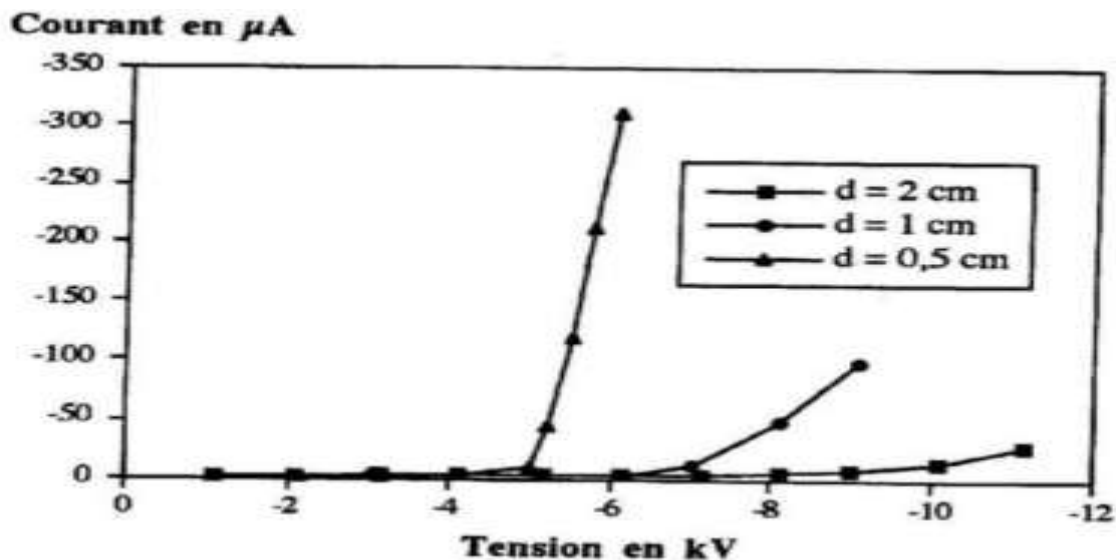


Figure I.9: Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [23]

c) La nature des électrodes :

Les caractéristiques courant-tension de la figure I.10 montrent l'effet de la nature des électrodes (cuivre, aluminium et acier) sur le courant de décharge couronne [12].

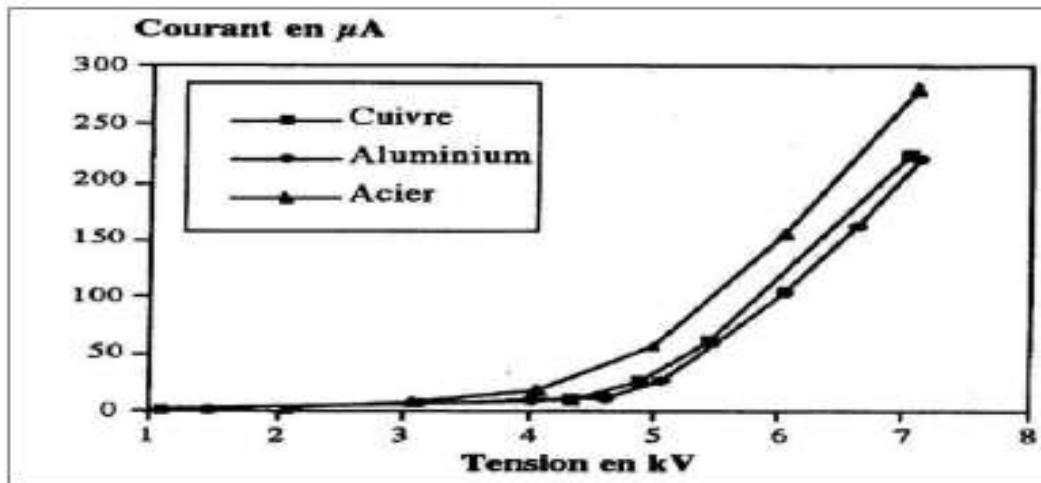


Figure I.10 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes en géométrie fil-plan ($d=0.5\text{cm}$, $\varnothing=125\mu\text{m}$) [12] [24].

La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique comme le montre le tableau I.2. Nous observerons une grande mobilité ionique avec des électrodes en acier qu'avec des électrodes en aluminium quelle que soit la polarité de la tension appliquée

Tableau I.1: Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative (HR=5%, $\varnothing_{\text{fil}}=125\mu\text{m}$) [23]

Nature des électrodes	Mobilité μ : en $[\text{m}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}]$ à $d=0.5\text{cm}$	
	Tension positive	Tension négative
Electrode en cuivre	8.10^{-5}	4.10^{-4}
Electrode en aluminium	$7,4.10^{-5}$	$2,9.10^{-4}$
Electrode en acier	12.10^{-5}	$4,5.10^{-4}$

I.7.2. Facteurs physico-chimiques

a) 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. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente. Lorsque la température augmente, les électrons gagnent plus d'énergie pour former l'avalanche. Ainsi, le seuil de la décharge couronne diminue à une température élevée des gaz

b) L'humidité

L'humidité joue un rôle important dans la rigidité diélectrique de l'air, en particulier lorsque le champ électrique n'est pas homogène. Ce phénomène serait dû d'une part à l'augmentation de l'attachement des électrons libres, en raison de la vapeur d'eau présente dans

l'air (grande électroactivité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la zone où se déroulent les avalanches secondaires par photo-ionisation.

La décharge couronne apparaît à des tensions toujours inférieures pour 90% à 5% d'humidité relative. La conductivité de l'air augmentant avec l'humidité relative de la cellule de décharge expliquerait cette différence. [12]

c) Pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure (I.11) montre l'effet de la pression sur la décharge. [8]

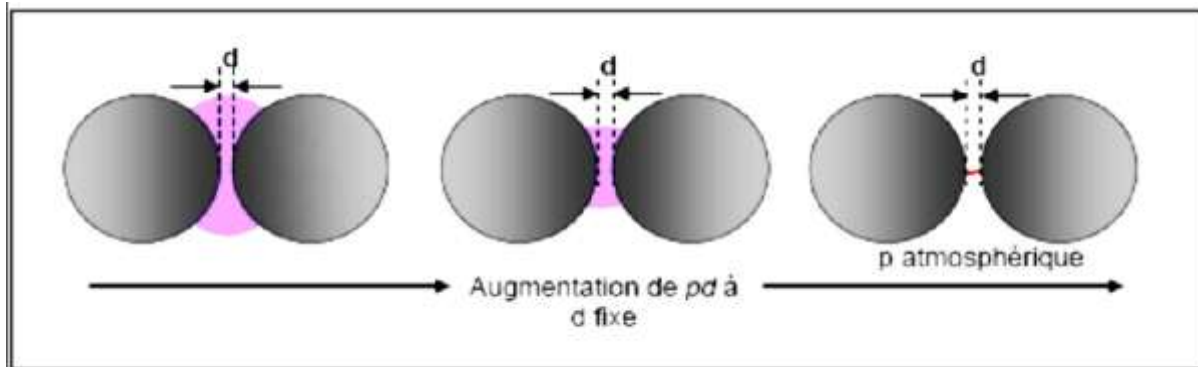


Figure I.11: Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [20]

I.8. Domaines d'applications des décharges couronnes

I.8.1. Traitement des effluents gazeux

I.8.1.1. Les précipitateurs électrostatiques

Les précipitateurs électrostatiques, qui utilisent des décharges couronnes pour traiter les effluents gazeux contenant des poussières, ont été les premières applications des plasmas froids. Les centrales thermoélectriques, les cimenteries, etc. sont disponibles à la sortie des gaz. On les utilise également pour améliorer l'air à l'intérieur d'une pièce (ioniseur d'air)

L'ioniseur libère des électrons qui vont se fixer sur les gros ions positifs (pollution) pour constituer des particules neutres. Elles vont développer des charges négatives en quantités suffisantes pour devenir de gros ions négatifs. Les sols et les murs seront ensuite contaminés par ces gros ions négatifs qui se repousseront mutuellement pour atteindre la surface conductrice.

I.8.1.2. Destruction des polluants

Depuis une dizaine d'années, les scientifiques et industriels s'intéressent à l'utilisation des plasmas froids pour détruire les polluants et non pas pour les piéger, grâce à la réactivité chimique des radicaux et espèces libérés dans le plasma, pour transformer les molécules polluantes en molécules inoffensives, les résidus obtenus étant parfois exploitables. Actuellement, les polluants visés sont principalement des oxydes de soufre et d'azote.

I.8.2. Traitement des surfaces

Le micro-électronique est le premier secteur à avoir utilisé les plasmas froids produits par décharge couronne pour la fabrication des circuits intégrés et des circuits imprimés, grâce

à leurs caractéristiques et leurs qualités intrinsèques, les plasmas froids se diffusent dans d'autres secteurs comme la métallurgie et la mécanique (durcissement superficiel et protection anticorrosion des pièces et outillages).

I.8.2.1. Nettoyage et érosion de surface

Cela comprend les opérations de nettoyage, décapage, de préparation de surface avant dépôt et de gravure. Pour nettoyer une pièce couverte d'huile et de particules, on commence par chasser le plus gros mécaniquement avec l'air comprimé ou de l'eau, puis éliminer la fine couche d'huile résiduelle à l'aide d'un plasma froid à l'oxygène, qui va volatiliser les polluants organiques de surface par un effet de combustion froide contrôlée qui est plus économique et plus protecteur pour l'environnement.

I.8.2.2. Modification de la chimie de surface

La modification de la chimie de surface peut être la fonctionnalisation, le greffage, le dopage par implantation et diffusion ou stérilisation ; c'est à l'aide de plasmas froids que sont réalisées un grand nombre de membranes polymères.

I.8.3. Élimination de l'électricité statique

Dans l'industrie, l'électricité statique est la source de dysfonctionnements gênants, car elle provoque des décharges néfastes aux dispositifs électroniques ou des collages de poussière sur des produits souhaités purs. C'est pourquoi Valitec a développé un système utilisant l'injection supersonique d'ions pour éliminer l'électricité statique dans les débits de production importants [25]

I.9. Effets indésirables de la décharge couronne :

Lorsque les lignes de transmission à haute tension sont prises en considération pour le transport de l'énergie électrique, les effets de la décharge couronne jouent un rôle très important, et peuvent apparaître de façon indésirable où il représente une source des pertes électriques, d'interférences radio-télévision, de bruits audibles (crépitements et de sifflements), dégagement d'odeur due à la formation de l'ozone, et de la détérioration de l'état de surface des composants et de vibrations mécaniques des conducteurs [26, 27].

I.10. Conclusion :

En conclusion dans ce premier chapitre consacré aux généralités sur la décharge couronne, nous avons exploré les principaux aspects de ce phénomène électrique fascinant. Nous avons étudié les caractéristiques de la décharge couronne, ses différentes formes et manifestations, ainsi que les facteurs qui influencent son apparition.

Nous avons également abordé l'importance de la décharge couronne dans divers domaines et avons donné quelque application dans le domaine industriel.

Chapitre II

Techniques expérimentales

II.1. Introduction

Le but de ce chapitre est d'exposer l'ensemble du matériel expérimental utilisé dans le laboratoire de haute tension de l'université A. Mira de Bejaia. Nous allons présenter les appareils et les techniques de mesure utilisés lors de nos expérimentations. Afin de quantifier les propriétés du courant et de la tension, ainsi que la tension de seuil et la tension de claquage, obtenues dans les configurations un fil-plan, trois fils-plan, etc.

II.2 Description du dispositif expérimental

Notre travail a pour but d'étudier l'influence de la polarité sur la décharge couronne continue en configuration nappe de fils-plan. L'électrode active; composé d'un ou plusieurs fils, est reliée à une source de haute tension continue de polarités négative ou positive. L'électrode passive qui est le plan de mesure est mise à la terre. Les mesures consistent à relever le courant collecté au plan de mesure en fonction de la tension appliquée.

La figure II.1 présente le dispositif expérimental utilisé dans le cadre de notre étude, il est composé des éléments suivants :

- L'électrode active (Figures II.1 et II.2) est composée d'un ou plusieurs fils conducteurs (1) (électrode active) mesurant 60 cm de long avec un diamètre variable ($d = 0,2$ mm, 0,3 mm et 0,5 mm). Les fils sont tendus par deux plaques isolantes (2) à une hauteur variable h (2 cm, 3 cm et 5 cm) du plan de masse (B). La distance inter-fils a est également variable (2 cm, 4 cm, 6 cm et 8 cm).

En face de l'électrode active, se trouve une autre électrode appelée passive, fabriquée à partir de trois plans rectangulaires en acier inoxydable d'une épaisseur de 1,5 mm et d'une longueur de 600 mm. Le plan de mesure (B) de 300 mm de largeur est positionné entre les deux plans de garde (C) de 150 mm de largeur chacun. Afin de faciliter la variation de la hauteur inter-électrodes (h), les trois plans sont fixés sur la planche mobile en bois (4). Cette dernière avec les trois plans (B et C) peut être déplacée en horizontal en respectant le parallélisme avec l'électrode active.

La sonde linéaire (A), en acier inoxydable massif de surface $300 \times 1,75$ mm² (Fig II.3), est insérée au centre et au même niveau entre les deux parties du plan collecteur (B).

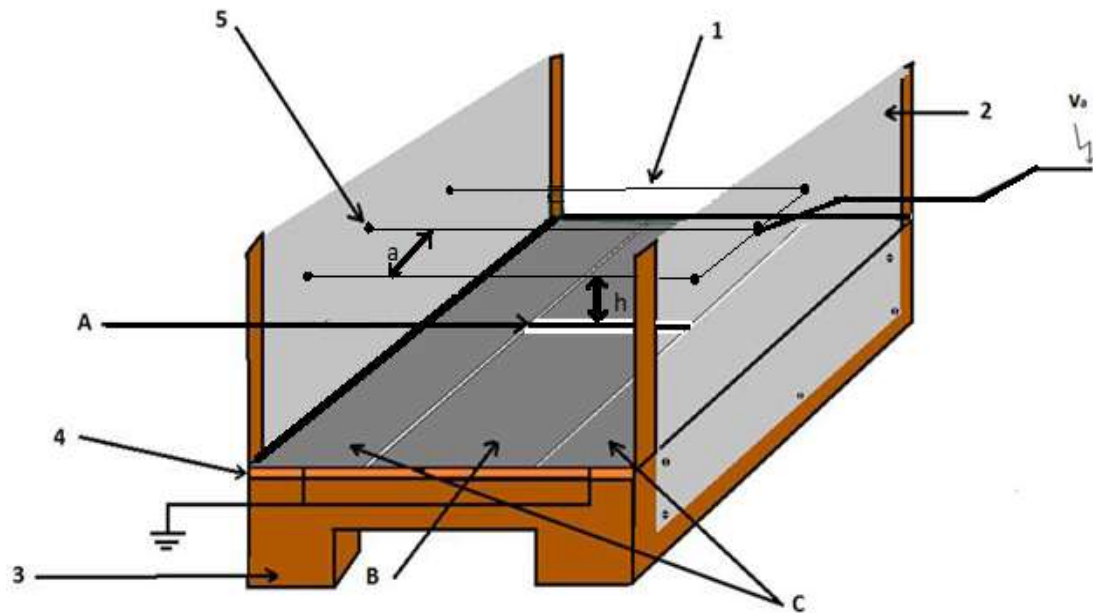


Figure II.1 : Schéma du dispositif expérimental

1. Electrode active (fil)

2. Plaque en plexiglass

3. Support en bois

4. Plaque en bois

5. Trous alignés

a : distance inter-fils

h : hauteur fil-plan.

B : Plan de A et B

C : Plan de garde



Figure II.2 : Vue de profil du dispositif



Figure II.3 : Sonde linéaire.

II.3. Système d'électrode trois fils-plan

Le dispositif d'essai est représenté sur la figure (II.4). Afin de pouvoir étudier les différents paramètres de la décharge couronne (Le courant collecté par le plan et la sonde en fonction de la tension appliquée), plusieurs essais ont été réalisés, on faisant varier la distance inter fils a , la hauteur fil-plan h , diamètre du fil d et la tension appliquée V_{app} .

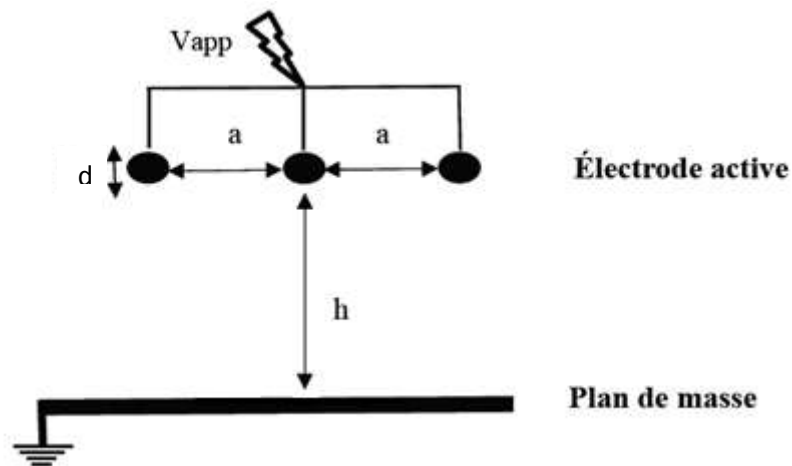


Figure II.4 : dispositif expérimentale de la configuration trois fils-plan.

II.4. Source de haute tension continue

Afin de mesurer les paramètres de la décharge couronne, nous avons besoin d'une source de haute tension continue. Pour cela, nous avons utilisés une installation présente au laboratoire de haute tension de l'Université de Bejaia, celle-ci délivre des tensions variant de 0 à $\pm 140\text{kV}$ et un courant de 0.08A , Continue et Alternative, de polarité positive et négative, figure (II.4). Cette installation est composée :

- ◆ D'une source basse tension SG1.
- ◆ D'un transformateur de haute tension T100, alimenté par la source SG1.
- ◆ D'une diode à haute tension G270.
- ◆ D'un condensateur de lissage C10.



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).

Figure II.5: Installation haute tension utilisée du laboratoire HT de Béjaia.

L'enroulement primaire du transformateur élévateur T100 (20) utilisé dans cette installation (ayant un faible pas de variation de 100 V environ) est alimenté par une source basse tension variable (SG1) via un câble. On a associé à ce transformateur un redresseurs mono-alternance pour avoir une haute tension continue. Le redresseur est constitué d'une diode haute tension (21) à base de silicium et d'un condensateur de lissage C10 de capacité de 10nF. Une résistance R de 106 k Ω qui relie le condensateur au système d'électrodes. Son rôle est d'amortir le courant, protégeant ainsi la diode des surintensités. Pour la mesure de la haute tension continue V_a , nous disposons d'un diviseur de tension résistif composé d'une résistance haute tension R_0 (24) de 248,5 M Ω et d'une résistance basse tension R_u de 501 k Ω incorporée dans le voltmètre de crête MU11. Ces deux résistances sont reliées par un câble coaxial (16) blindé.

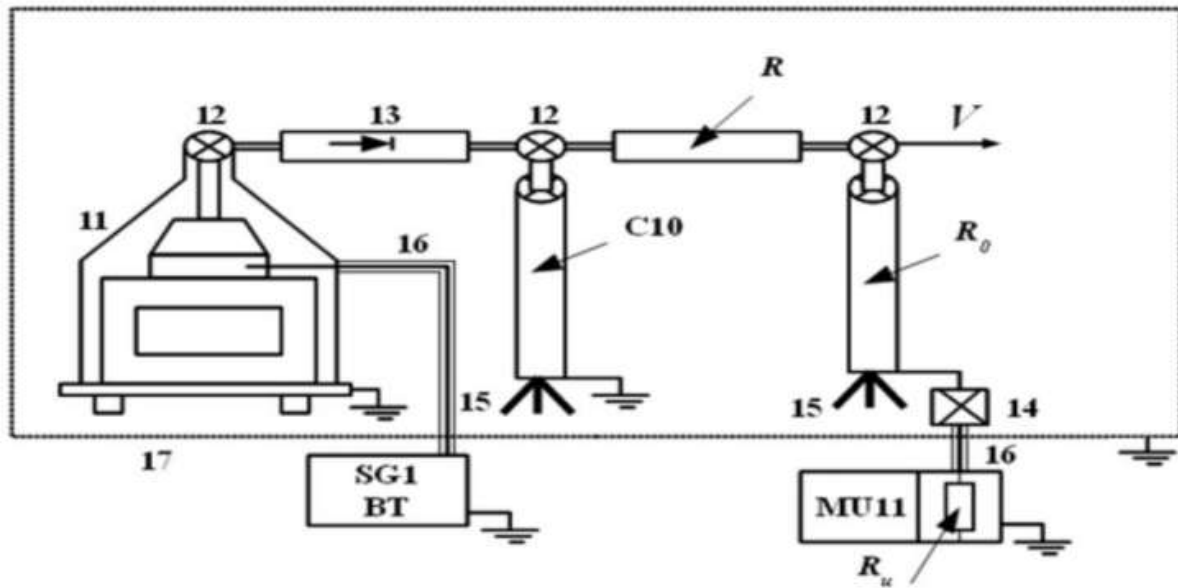


Figure II.6 : Schéma bloc de la source de haute tension utilisée

11- Transformateur haute tension (T100).

12- Nœuds de liaison.

13- Diode haute tension (G270).

14- Boîte de connexion.

15- Support d'éléments.

16- Câble coaxial.

17- Grille de protection.

SG1- Alimentation basse tension

MU11- Voltmètre de crête.

C10- Condensateur de lissage.

R - Résistance d'amortissement.

R_0 - Résistance haute tension.

R_u - Résistance basse tension.

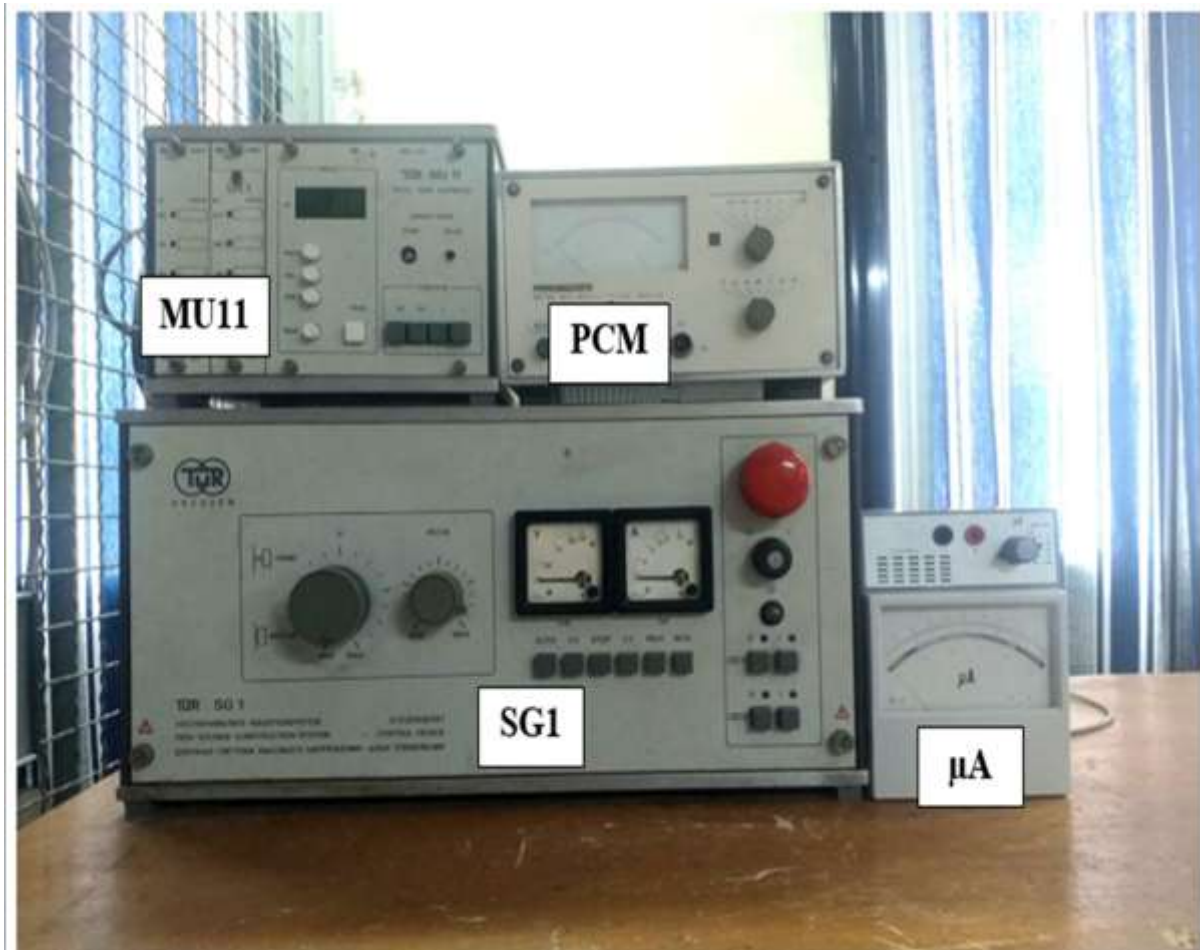


Figure II.7 : Equipements de l'installation haute tension utilisée.

SG1 : Générateur de basse tension. MU11 : Voltmètre de crête. μA : Micro-ampèremètre.

PCM : pico ampèremètre.

II.5 Méthodes de mesure

II.5.1 Mesure des tensions

II.5.1.1 Tension appliquée aux électrodes actives

La mesure de la tension V_{app} aux électrodes actives s'effectue à l'aide du diviseur résistif décrit précédemment et du voltmètre de crête MU11. Ce dernier mesure la tension U aux bornes de la résistance basse tension R_u et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée $V_{app} = K.U$ où K est le rapport du diviseur. De plus, le voltmètre présente une résistance d'entrée R_e de $4,24 \text{ M}\Omega$ dont nous tenons compte dans l'évaluation du rapport K [6].

$$K = \frac{R_0 R_e + R_0 R_u + R_u R_e}{R_u R_e}$$

La valeur théorique de K est de 666 et elle change avec le vieillissement de l'installation. Par conséquent, un étalonnage de l'installation doit se faire pratiquement chaque année. Pour réajuster la valeur du coefficient K sur le voltmètre de crête, un voltmètre électrostatique est utilisé.

II.5.1.2 Mesure de la tension de claquage

Chaque fois que nous varions un paramètre (hauteur fil-plan h , distance inter-électrodes a et le diamètre du fil), nous déterminons la tension de claquage pour éviter d'endommager le matériel. Pour se faire, les plans de garde (A), le plan de mesure (B) et la sonde sont mis à la terre, tandis que l'électrode active est reliée à la source de haute tension. Nous augmentons la tension en mode progression automatique jusqu'à atteindre la valeur de la tension de claquage affichée par le voltmètre de crête (MU11).

II.5.2. Mesure du courant de décharge

Les valeurs des courants de charges par la décharge couronne sont très faibles. Pour les mesurer nous avons utilisé un microampèremètre à aiguille (figure II.7). Cet appareil est connecté au plan de mesure par un câble coaxial en respectant la polarité de la tension appliquée. La masse du câble coaxial est branchée à la terre.



Figure II.8 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge

II 5.3 La mesure du courant collecté par la sonde

Le courant collecté par la sonde est généralement faible (d'ordre microampère à nano Ampère). D'où, on utilise le pico-ampèremètre à aiguille (figure II.9).



Figure II.9 : Pico-ampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de la sonde.

II.3.4 les conditions atmosphériques

Le courant de décharge est lié aux conditions atmosphériques à savoir : la température ambiante, à la pression et l'humidité de l'air environnant. Pour que nos travaux soient comparables, et pour avoir les mêmes conditions pour tous les graphes, les valeurs obtenues dans n'importe quelles conditions doivent être ramenées aux conditions normales de température T_0 , de pression P_0 et d'humidité H_0 [28]. Comme la décharge couronne est sensible aux paramètres physiques de l'air qui l'entoure (Pression, Température et Humidité), nous relevons systématiquement ces paramètres avant chaque essai en utilisant les appareils de mesures suivant :

- Un thermomètre à aiguille dans la gamme de mesure ($-30^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$) pour mesurer la température ambiante du laboratoire (Voir Figure II.10).
- Un hygromètre à cheveux dans la gamme ($0 \% \leq H_r \leq 100 \%$) pour mesurer l'humidité de l'aire (Voir Figure II.10).
- Un baromètre à mercure (Figure II.11) pour mesurer la pression de l'air ambiant, les valeurs relevées en hectopascal.



Figure II.10: Le thermomètre à aiguille et l'hygromètre à cheveux disponibles au laboratoire haute tension.



Figure II.11 : Photo du baromètre à mercure utilisé dans la mesure de pression.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le dispositif expérimental en exposant ses différents composants et leurs principes de fonctionnement. Nous avons aussi exposé les méthodes utilisées pour mesurer les paramètres caractérisant la décharge couronne, tels que : la tension seuil de l'effet couronne, le courant de décharge et courant de la sonde (milieu fil de bord).

Dans le prochain chapitre, nous procéderons à la présentation et l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus et étudier l'influence de la polarité sur la décharge couronne nappe de fils-plan.

Chapitre III

Présentation et interprétation des résultats

III.1. Introduction

Ce chapitre représente l'analyse des résultats expérimentaux obtenus. Le but de nos expériences est d'étudier l'influence de la polarité de la tension appliquée sur la décharge couronne nappe de fils-plan en mesurant le courant collecté par le plan puis par la sonde linéaire en fonction de la tension appliquée (caractéristiques Courant-Tension). L'influence des paramètres géométriques (nombre de fils, distance inter-fils, diamètre des fils et la distance inter-électrodes) a été prise en considération.

III.2. Courant collecté par le plan

Dans cette série d'expériences, on a enregistré le courant de décharge, engendré par l'ensemble des fils constituant l'électrode active, collecté par le plan en fonction de la tension appliquée pour les deux polarités positive et négative. Les caractéristiques courant-tension $I(V)$ ont été étudiés en variant les paramètres suivants :

- Nombre de fils de l'électrode active (N).
- Hauteur fil-plan (h).
- Diamètre des fils (d).
- Distance inter-fils (a).

III.2.1. Influence du nombre de fils :

Pour étudier l'influence du nombre de fils sur la décharge couronne pour les deux polarités (positive et négative), nous avons utilisé des fils de diamètre $d = 0.3 \text{ mm}$, on a fixé la distance entre les fils à $a = 4 \text{ cm}$ et la distance inter-électrode à $h = 3 \text{ cm}$. Les figures III.1 et III.2 représentent l'influence de nombre de fils sur la caractéristique I-V pour les deux polarités.

Les caractéristiques courant-tension obtenue pour les différents systèmes d'électrodes utilisés suivent la loi quadratique de Townsend, le courant augmente graduellement avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse une certaine valeur et ce jusqu'au claquage du milieu gazeux à la tension de rupture (figure III.1). De même, nous remarquons que le courant de décharge augmente avec le nombre de fils pour les deux polarités. et cela est dû à l'augmentation du nombre de régions ionisées autour de chaque fils. La tension seuil d'apparition de l'effet couronne augmente avec l'augmentation de nombre de fils car le champ électrique devient plus homogène.

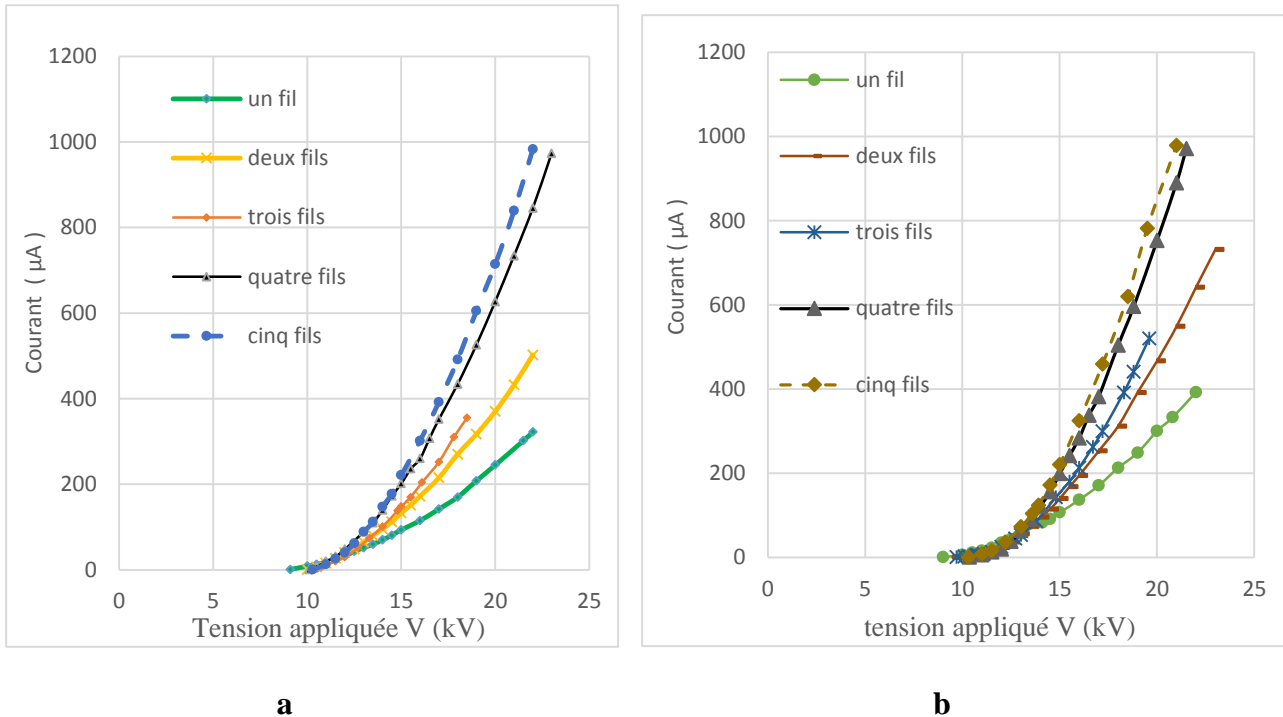


Figure III.1 : Caractéristiques Courant Tension pour différentes valeurs du nombre de fils. a) polarité positive et b) polarité négative ($h=3\text{cm}$; $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.8\text{ hPa}$, $54\%<H<62\%$).

Les courbes de la figure III.3 montrent que quel que soit le nombre de fils utilisé, le courant de décharge est plus important lors de la polarité négative, cela est dû à la différence de mobilité apparente des porteurs de charge positive et négative.

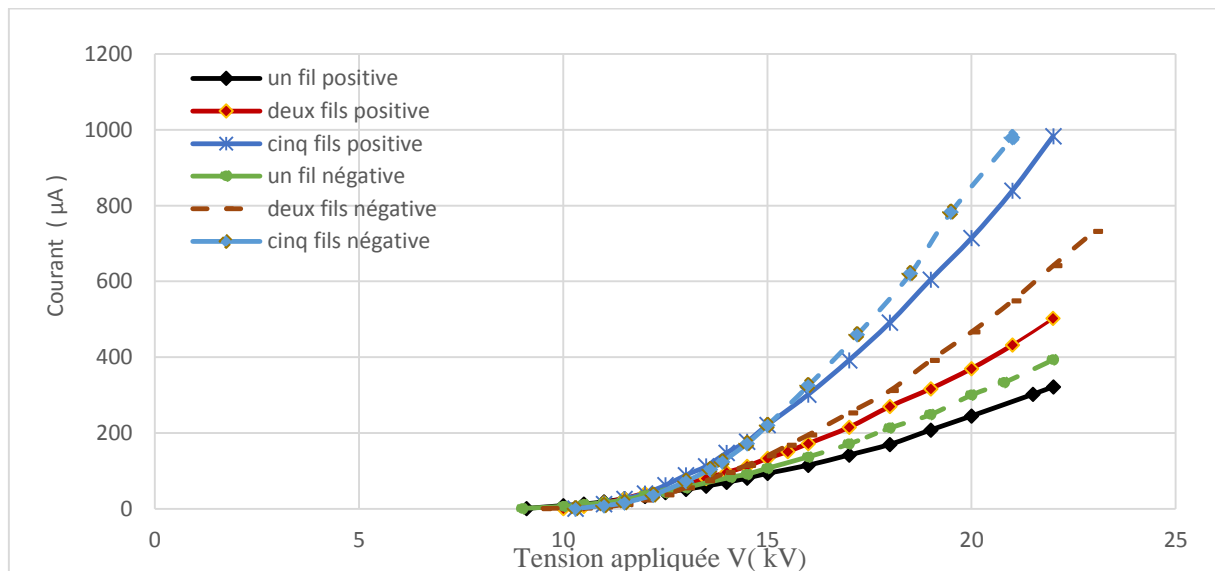


Figure III.2 : Influence de la polarité sur les caractéristiques Courant-Tension pour différentes valeurs du nombre des fils ($h=3\text{cm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008,8\text{ hPa}$, $54\%<H<62\%$).

Les courbes des figures III.3 et III.4 représentent le rapport K entre l'intensité du courant de décharge généré par l'électrode nappe de fils -plan (I_{Nfils}) et l'intensité du courant généré par

l'électrode fil-plan multipliée par le nombre de fils de la nappe N ($N \cdot I_{1fil}$) en fonction de la tension appliquée pour les deux polarités positive et négative.

$$K = \frac{I_{Nfil}}{N \cdot I_{1fil}}$$

Les résultats montrent que l'intensité du courant avec N fils est inférieure à N fois l'intensité du courant avec un seul fil. Les valeurs du rapport k diminuent avec l'augmentation du nombre de fils N (figure III.3). En comparant les valeurs de ce rapport par rapport à la polarité appliquée on constate qu'il est plus faible dans le cas de la polarité négative ce qui traduit que l'effet mutuel qui s'exercent entre les fils est plus intense dans le cas de la polarité négative que positive.

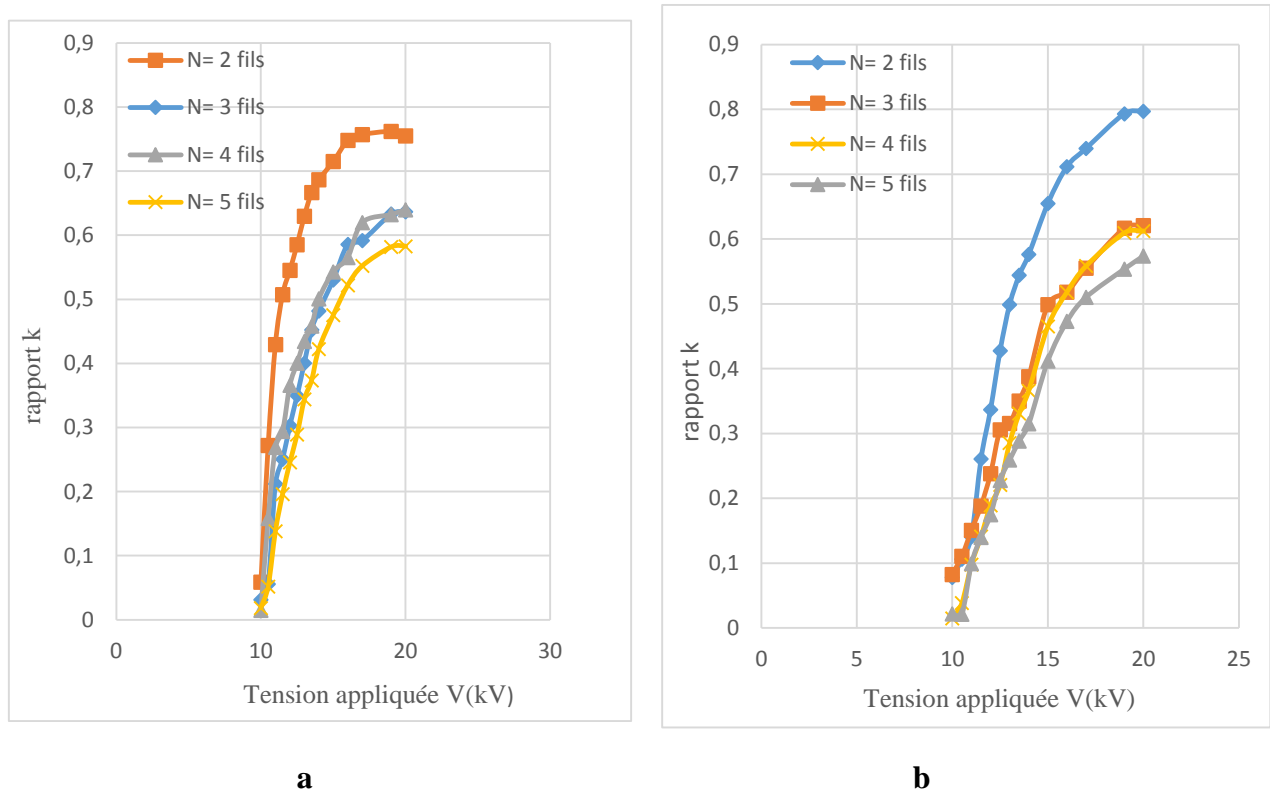


Figure III.3 : Rapport des courant K en fonction de la tension appliquée pour différents valeurs du nombre de fils N, a) polarité positive et b) polarité négative.

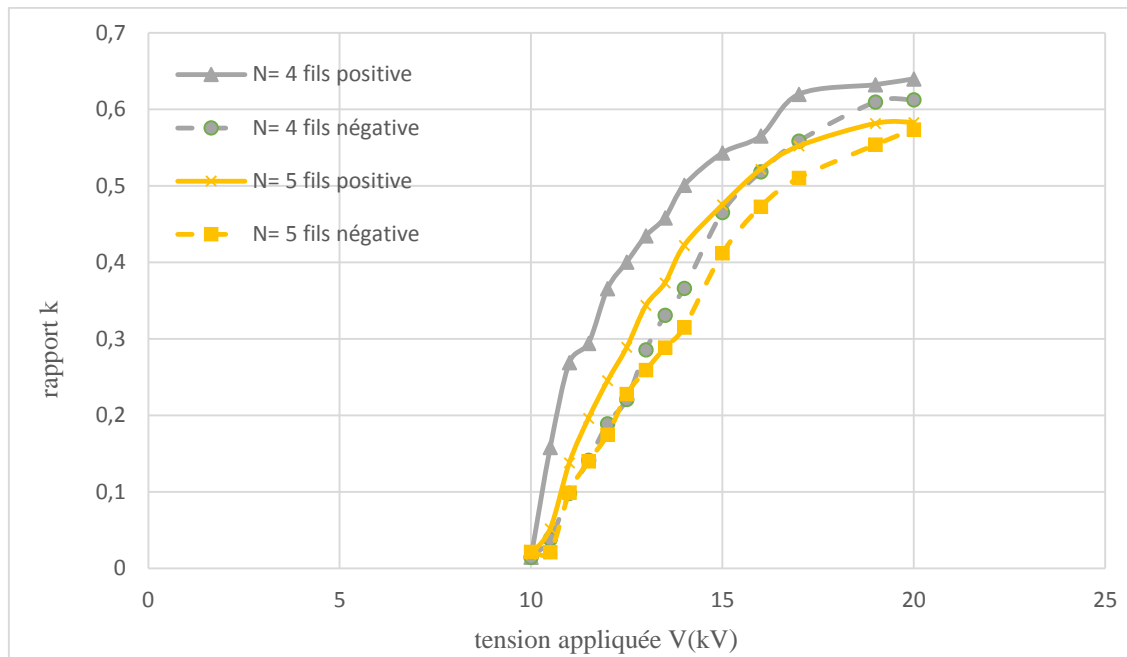


Figure III.4 : Effet de la polarité sur le rapport K.

III.2.2. Influence de la distance inter-fils 'a'

Les caractéristiques courant-tension ($I-V$) de la décharge couronne pour les deux polarités en géométrie trois fils-plan sont représentées sur les figures III.5, III.6.

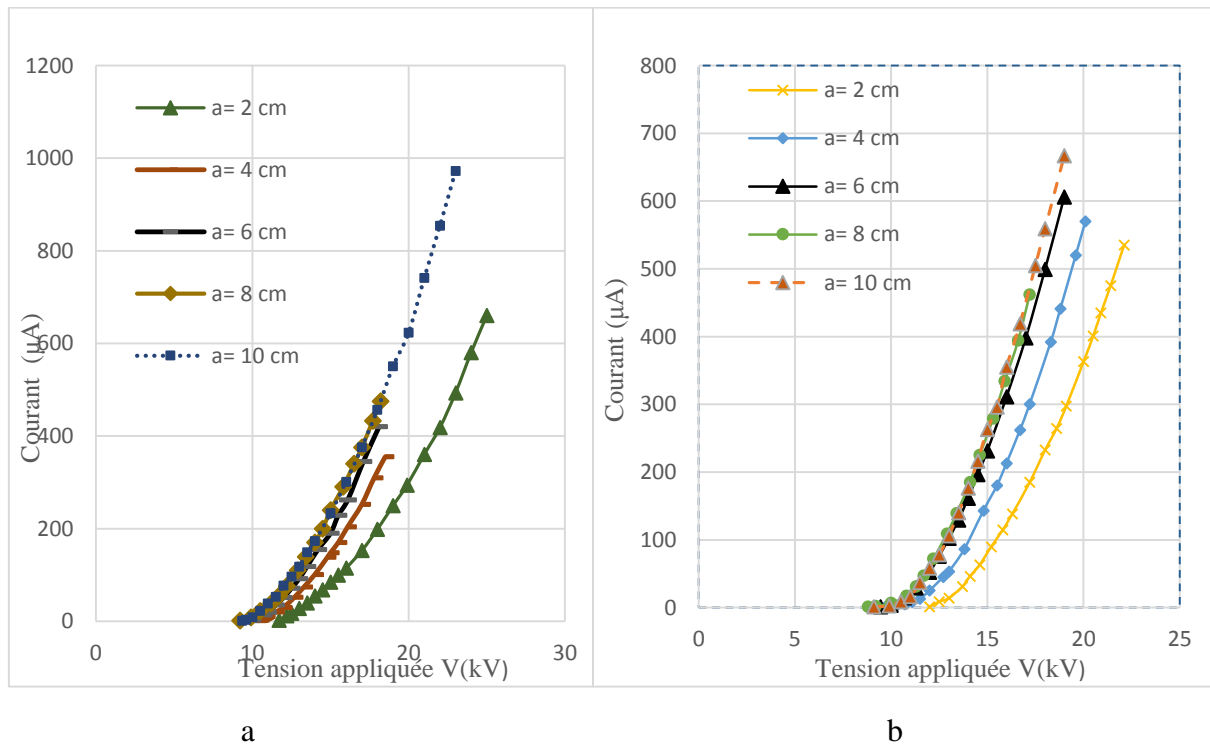


Figure III.5 : caractéristique courant-tension pour différentes valeurs de la distance inter-fils a) polarité positive et b) polarité négative. ($h = 3\text{ cm}$, $20\text{ C}^0 < T < 24\text{ C}^0$, $P = 1006.5\text{ hPa}$, $54\% < H < 60\%$, $d = 0,5\text{ mm}$).

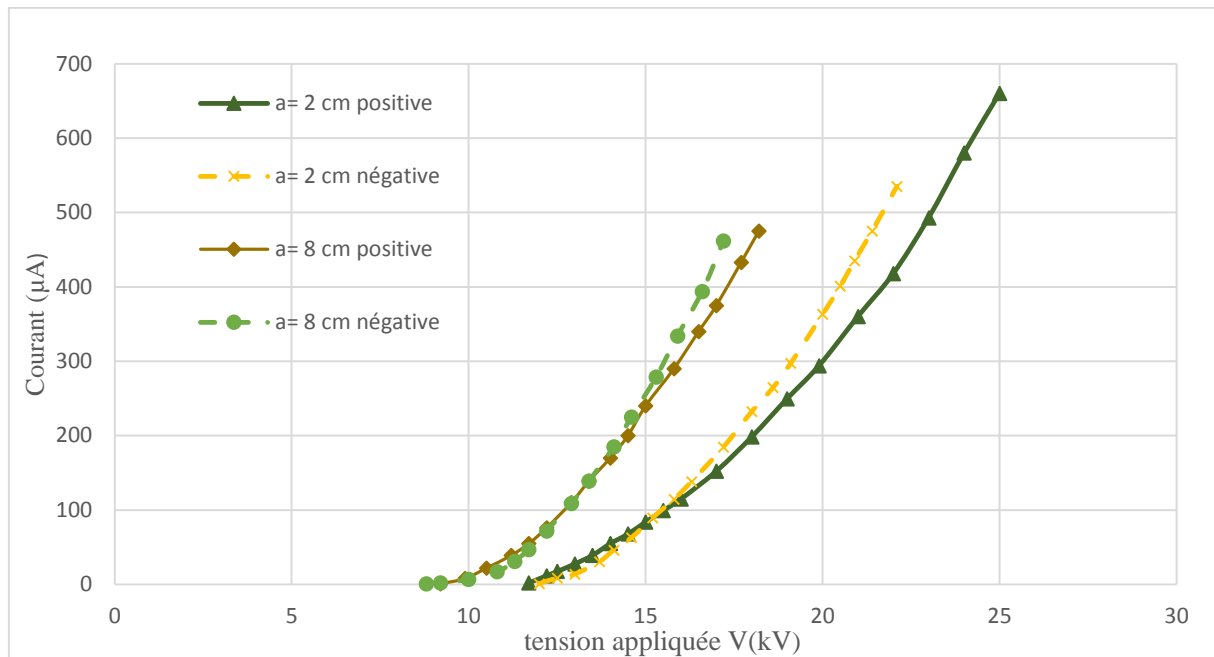


Figure III.6 : Effet de la polarité sur les caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la distance inter-fils. ($h=3\text{ cm}$, $20^{\circ}\text{C}<T<24^{\circ}\text{C}$, $P=1006,5\text{ hPa}$, $54\%<H<60\%$, $d=0,3\text{ mm}$).

D'après les courbes de la figure III.5, le courant de décharge augmente avec l'augmentation de la distance inter-fils avec une diminution de la tension seuil pour les deux polarités. Cela est dû à la diminution de l'effet shielding qui s'exerce entre les fils avec l'augmentation de a . Néanmoins, les courbes montrent qu'après une certaine distance limites, l'augmentation de a n'est pas accompagnée d'une croissance de courant de décharge car les décharges sont devenues indépendantes. D'après la figure III. 6, Nous constatons que le courant mesuré est plus grand quand la polarité de la tension appliquée est négative.

Les figures III.7 et III.8 représentent les valeurs du rapport K en fonction de la distances inter-fils a et pour différentes valeurs de la tension appliquée, d'après les résultats on remarque que l'effet shielding diminue avec l'augmentation de la distance a ainsi que de la tension appliquée. Et cet effet est plus important en polarité négative comme c'est déjà remarqué au paragraphe précédent.

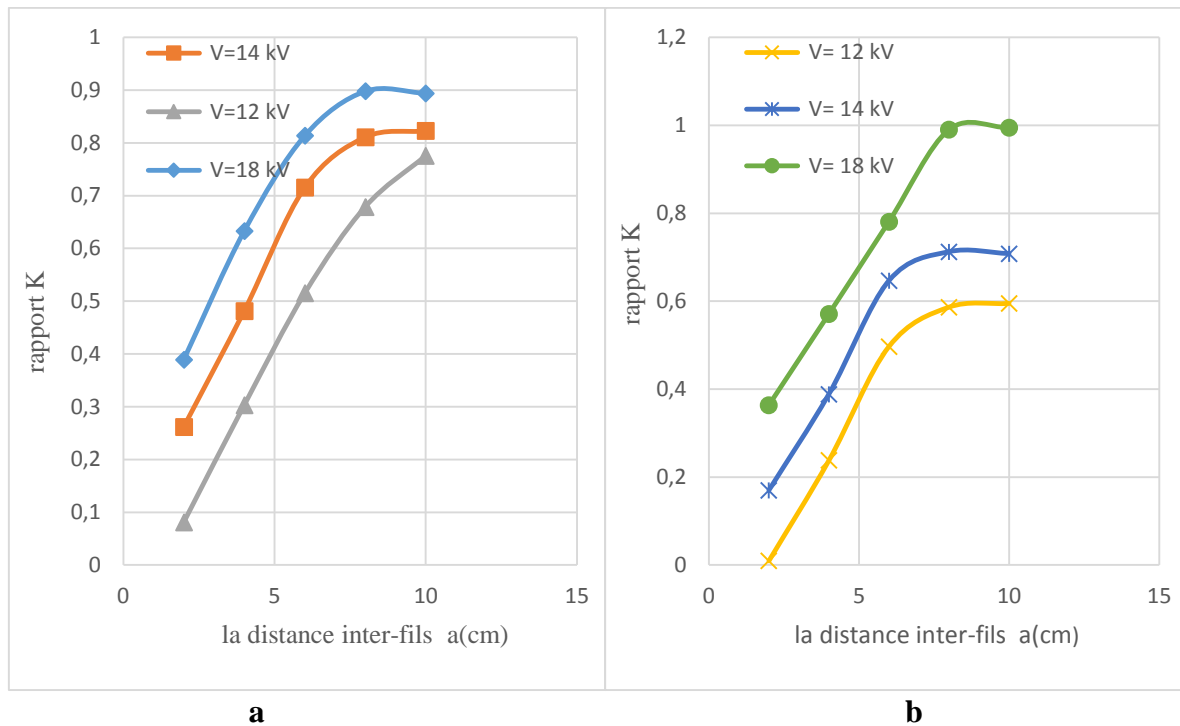


Figure III.7 : Rapport K en fonction de la distance inter-fils pour différentes valeurs de la tension appliquée, a) polarité positive et b) polarité négative

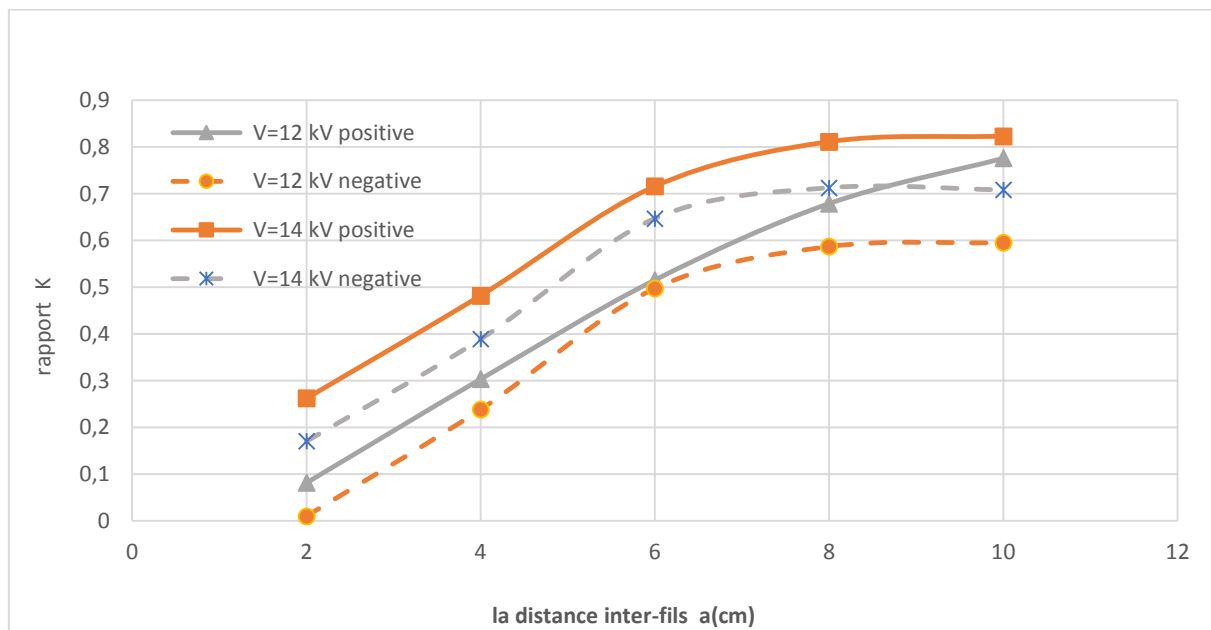


Figure III.8 : effet de la polarité sur le rapport K en fonction de la distance inter-fils.

III.2.3. Influence de la distance inter-électrodes h

Pour étudier l'influence de la hauteur des fils (électrodes actives) par rapport aux plans mis à la terre pour les deux polarités, nous avons effectué nos essais expérimentaux dans le cas de la configuration trois fils-plan ou on a varié la hauteur h (h = 2,3 et 5cm). Les résultats obtenus sont donnés sur les figures III.9, III.10.

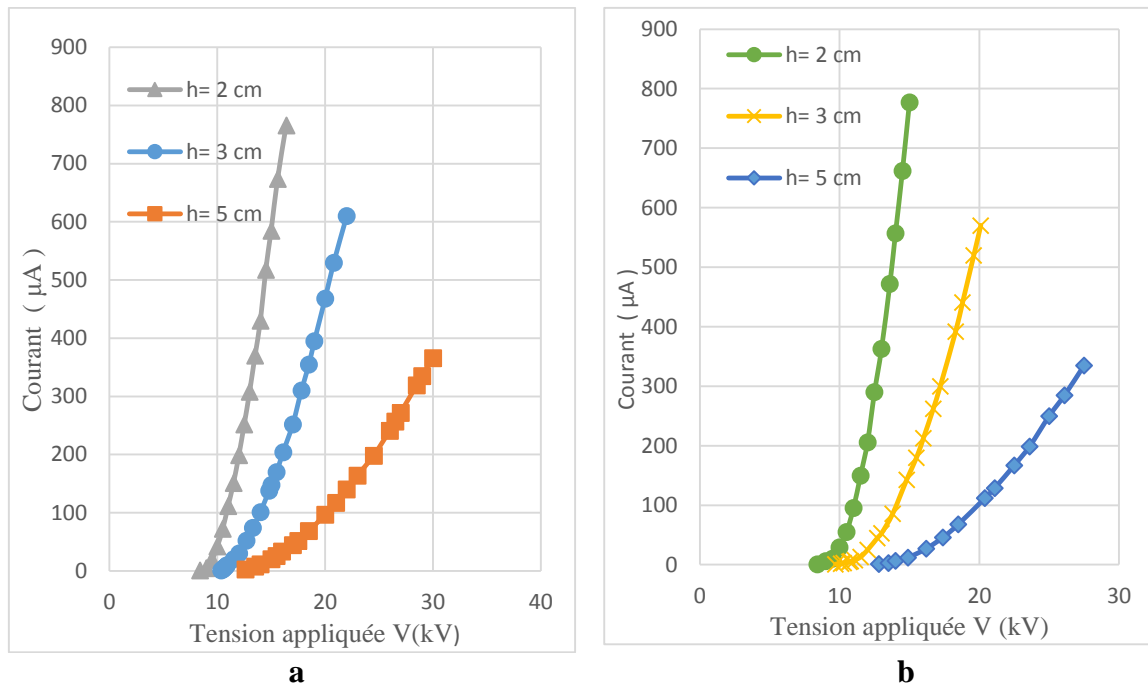


Figure III.9 : Caractéristiques Courant-Tension pour différentes distances inter-électrodes a) polarité positive et b) polarité négative ($a = 4 \text{ cm}$, $20^\circ\text{C} < T < 24^\circ\text{C}$, $P = 1008,5 \text{ hPa}$, $53\% < H < 60\%$).

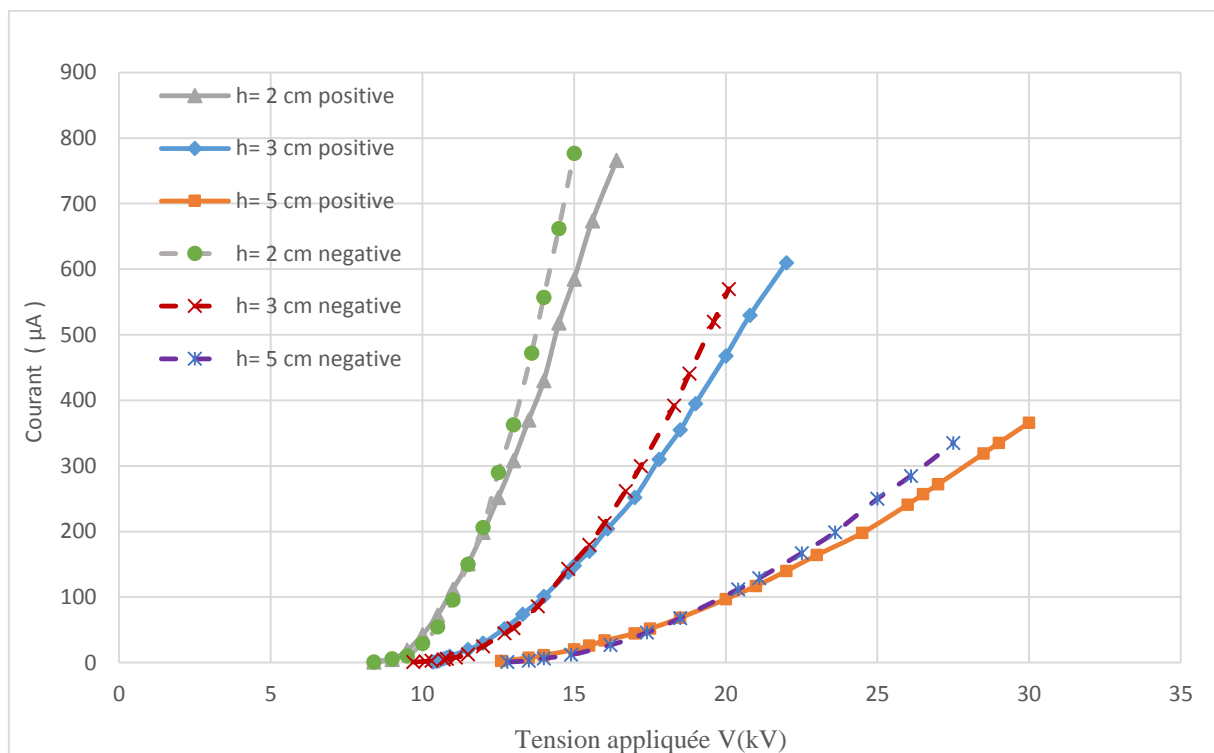


Figure III.10 : Effet de la polarité sur les Caractéristiques I-V pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes ($a = 4 \text{ cm}$, $20^\circ\text{C} < T < 24^\circ\text{C}$, $P = 1008.5 \text{ hPa}$, $53\% < H < 60\%$).

D'après les figures III.9, III.10, Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De

plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes et cela du que le champ électrique (E) est directement proportionnel à la tension (V) et inversement proportionnel à la distance (d) comme décrit par relation $E=V/h$. la figure III.10 montre que le courant de la décharge positive est inférieur à celui de la décharge négative pour les différentes distances inter-électrodes utilisés.

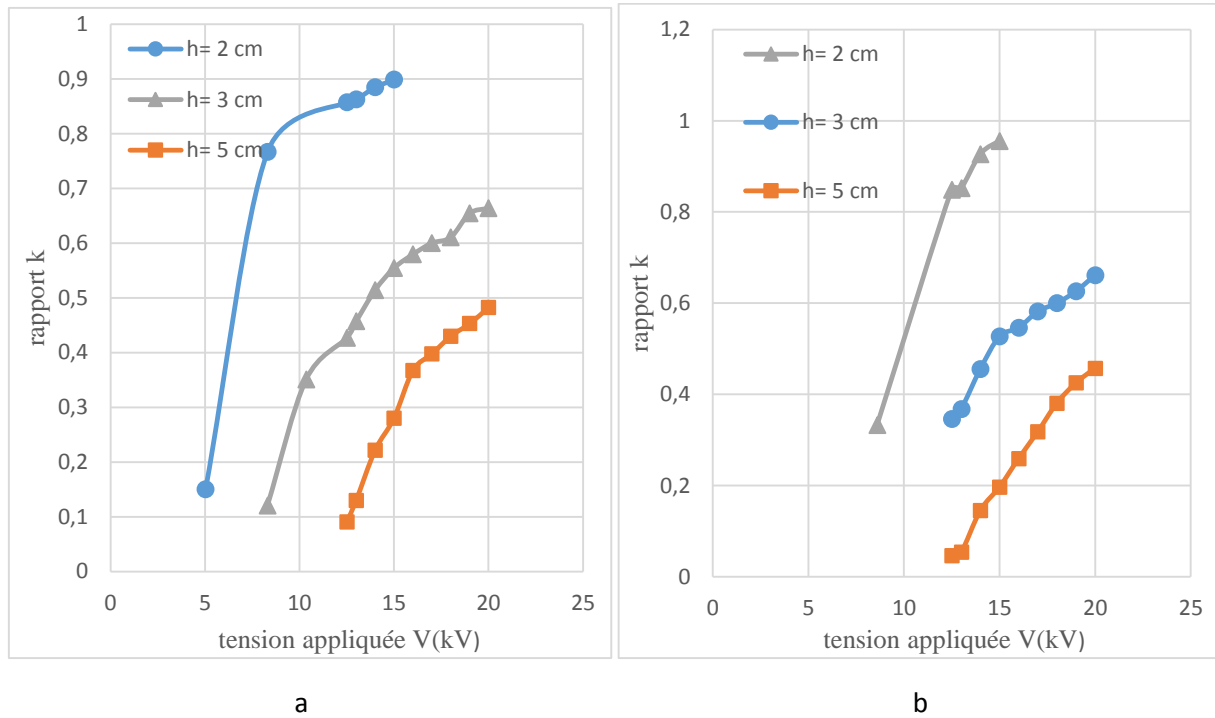


Figure III.11 : Rapport K en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de la distance Inter-électrodes, a) polarité positive et b) polarité négative

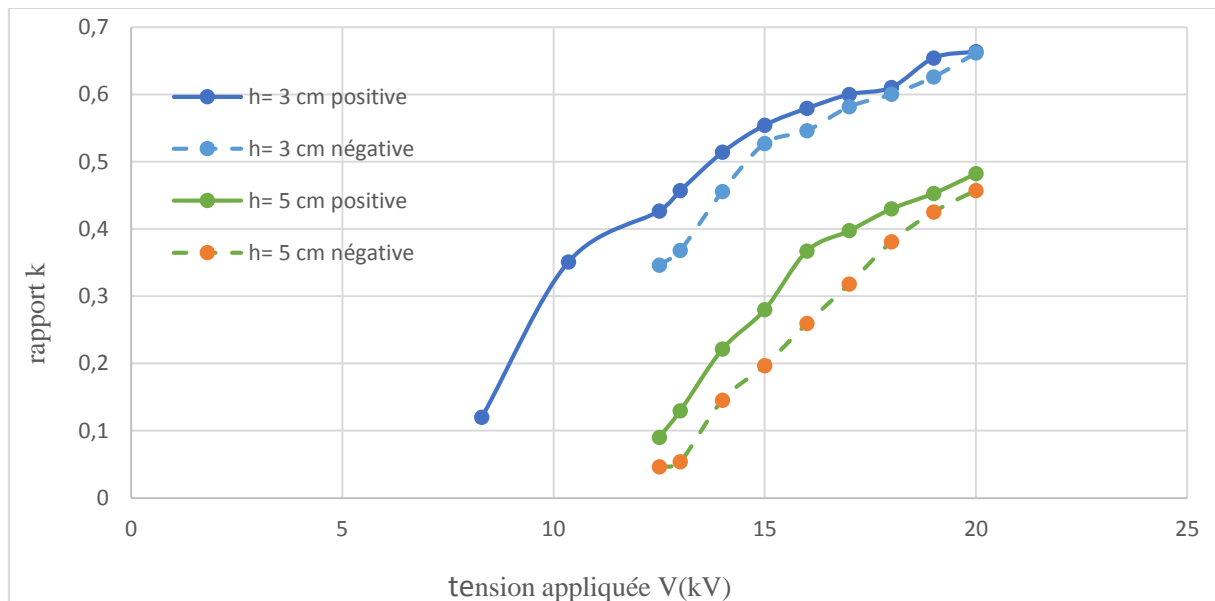


Figure III.12 : Effet de la polarité sur le rapport K pour diverses valeurs de la distance Inter-électrodes.

D'après les figures III.11 et III.12 représentant les valeurs du rapport K en fonction de la tension appliquée et pour différentes valeurs de la distance inter-électrode, on remarque que l'effet shielding augmente avec l'augmentation de la hauteur h et toujours il est plus important en polarité négative qu'en polarité positive

III.2.4. Influence du rayon de courbure (diamètre des fils) :

Dans le but de connaître l'influence du diamètre des fils sur la décharge couronne, on a fixé la hauteur $h=3\text{cm}$ et on a varié les diamètres des fils ($d=0.2, 0.3$ et 0.5mm). Avec une distance inter-fils $a=4\text{cm}$, les figures III.13 et III.14 représentent les résultats obtenus pour les deux polarités.

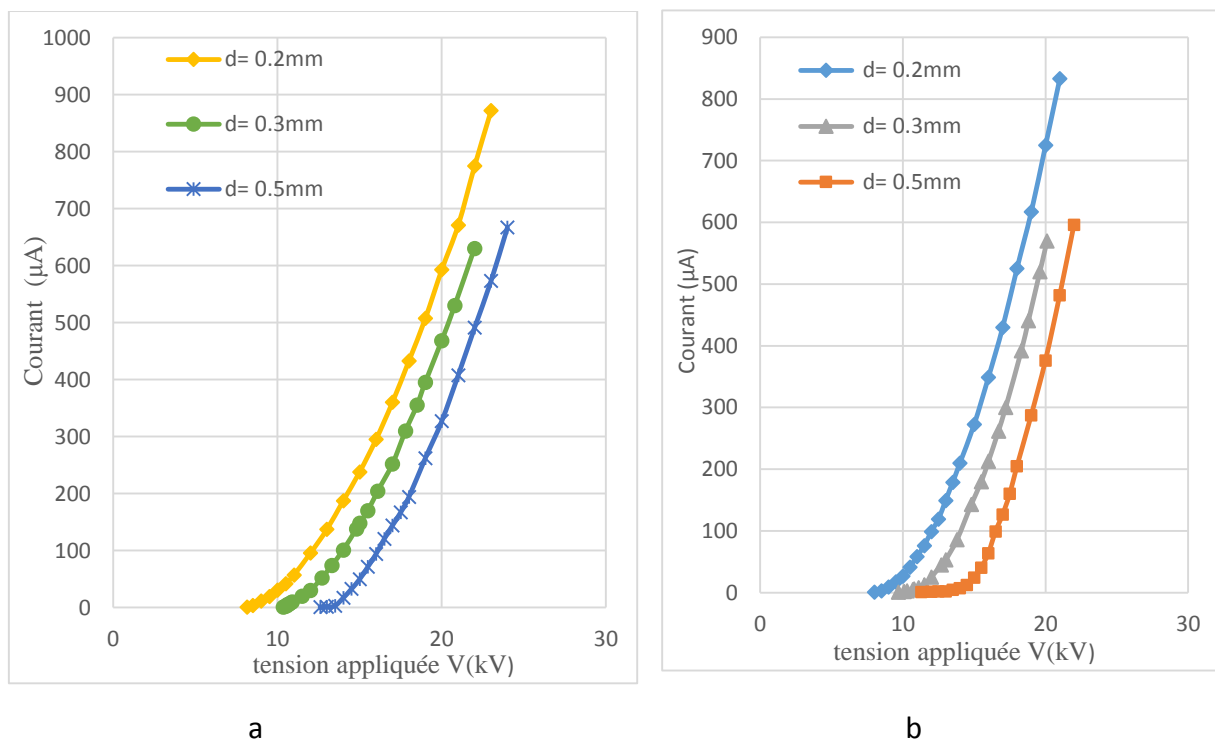


Figure III.13 : caractéristique courant-tension pour le système d'électrode trois fils-plan et pour différentes valeurs du diamètre des fils a) polarité positive et b) polarité négative ($h=3\text{cm}$, $a=4\text{cm}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\% < H < 60\%$).

On constate que pour les deux polarités positive et négative, le rayon de courbure est un facteur important. D'après la loi de Peek, lorsque le diamètre des fils diminue, le champ électrique à la surface des fils augmente, pour cela la tension seuil diminue avec la diminution des diamètres des fils, par conséquent pour la même tension appliquée le courant de décharge est plus important pour les petits diamètres des fils (figure III.13).

D'après la figure III.14, nous constatons que le courant mesuré est plus grand quand la polarité de la tension appliquée (V_a) est négative. L'explication qu'on peut apporter est que les électrons sont atterrés vers l'électrode active (fil) lorsqu'elle est positive réduisant ainsi le courant décharge, en revanche lorsque la polarité est négative les électrons sont repoussés de l'électrode active, ce qui favorise une plus grande ionisation du milieu gazeux et donc un courant plus important.

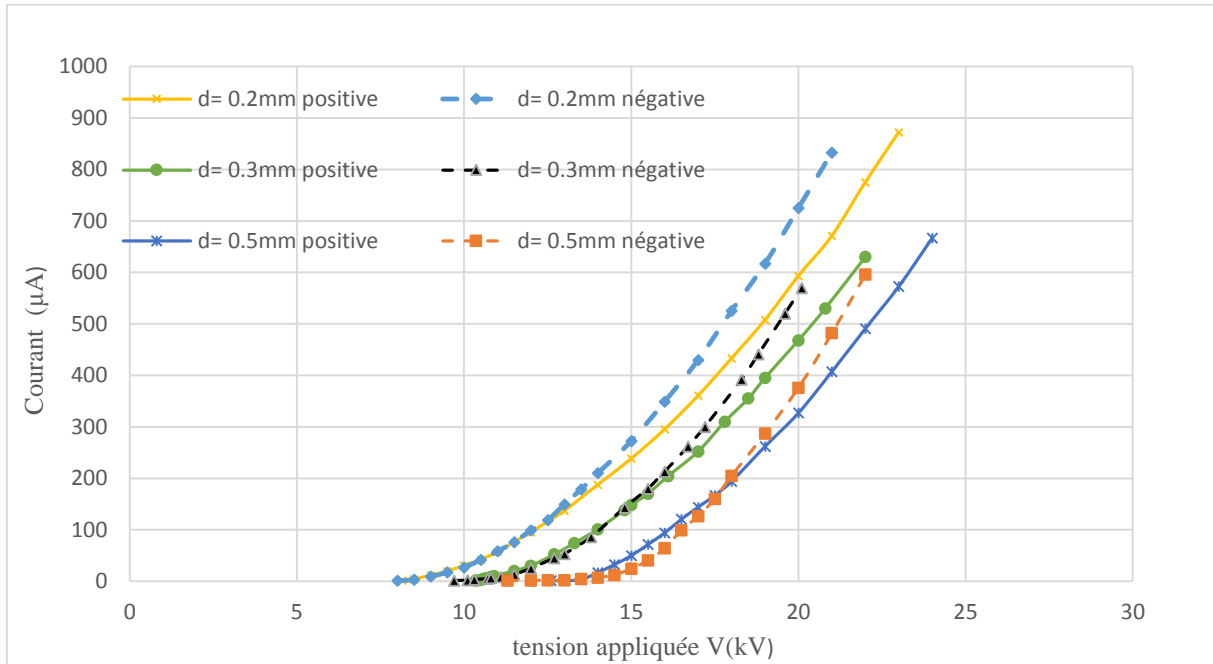


Figure III.14 : Effet de la polarité sur les caractéristiques courant-tension pour le système d'électrode trois fils-plan et pour différents diamètres des fils. (h_{fp}=3cm, a=4cm, P=1008.5 hPa, 53%<H<60%).

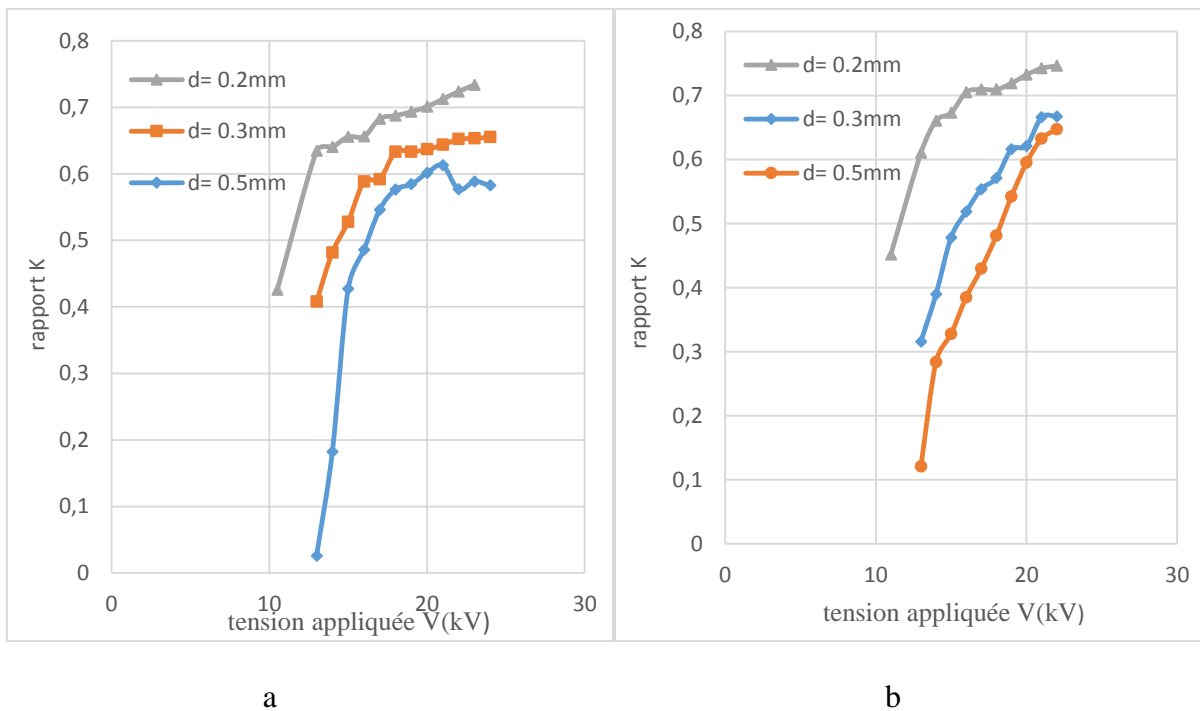


Figure III.15 : Rapport K en fonction de tension appliquée avec différents valeur de diamètre des fils.

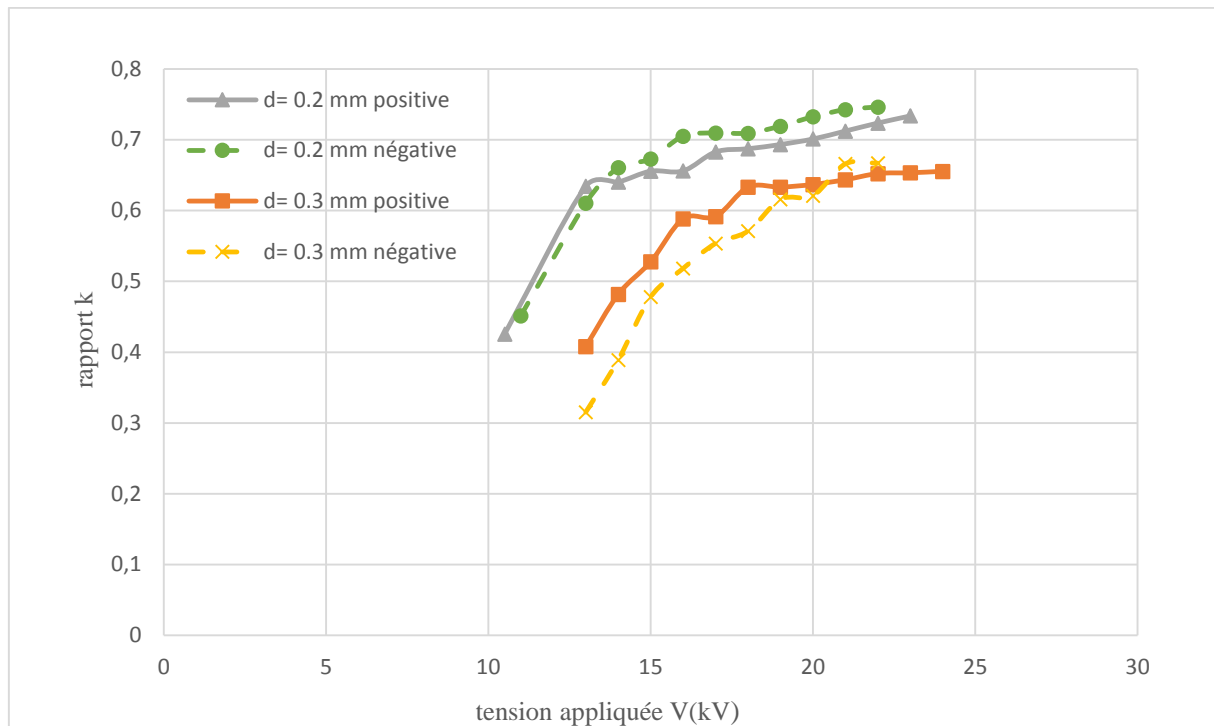


Figure III.16 : Effet de la polarité sur le rapport K pour différent diamètre d (mm).

III.3. Courant collecté par la sonde

Dans cette série d'expériences, on a enregistré le courant de décharge, collecté par la sonde linéaire placé sous le fil du centre ou le fil du bord de l'électrode active en fonction de la tension appliquée pour les deux polarités positive et négative. Supposant que le courant mesuré est le courant engendré par le fil qui se trouve au-dessus de la sonde en négligeant la contribution des fils voisins constituant l'électrode active.

Les caractéristiques Courant-Tension ont été enregistrés en variant la distance inter-électrodes, la distance inter-fils, le diamètre des fils et nombre de fils.

Toutes les mesures ont été réalisées dans des conditions normales pour les paramètres physiques.

III.3.1. Influence de la distance inter-fils

Les figures III.17, III.18 et III.19 représentent l'influence de la distance inter-fils sur les caractéristiques courant-tension des fils du centre et du bord enregistrés dans la configuration trois fils-plan en fixant $h = 3\text{cm}$ et $d = 0.3\text{mm}$.

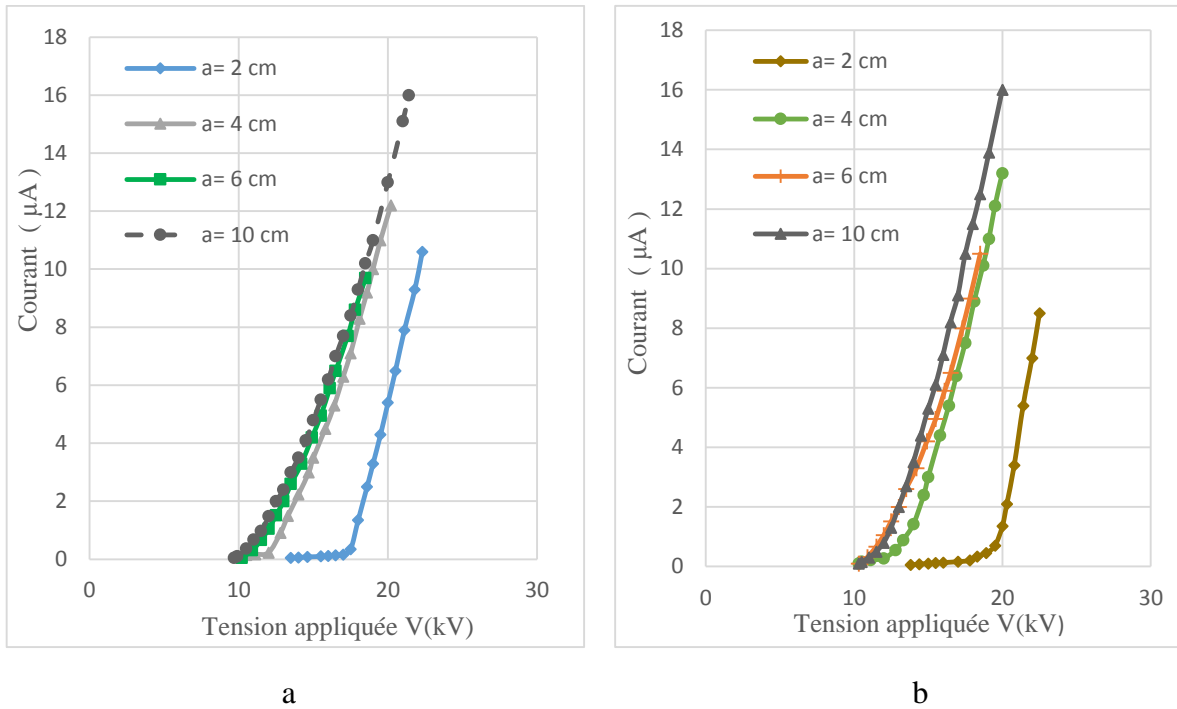


Figure III.17 : Caractéristiques courant -Tension du fil du centre pour différentes distances inter-fils, a) polarité positive et b) polarité négative. ($h=3\text{cm}$, $d=0.3\text{mm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\%<H<60\%$).

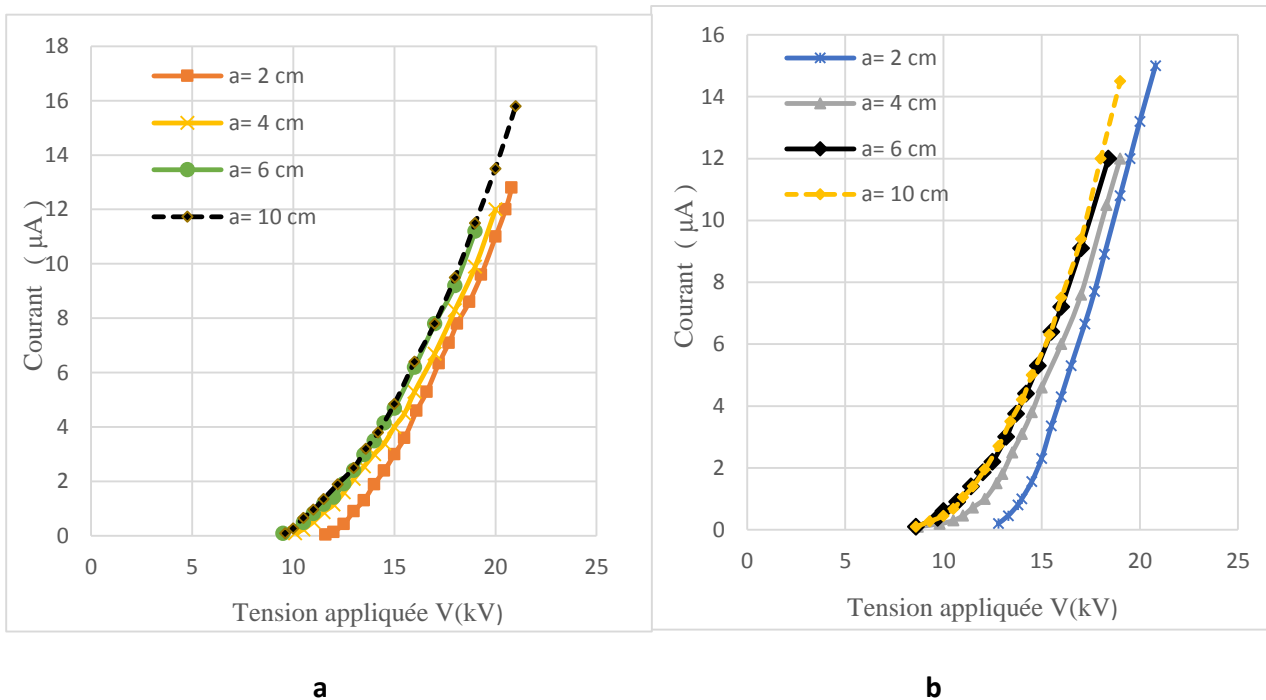


Figure III.18 : Caractéristiques courant -Tension du fil du bord pour différentes distances inter-fils, a) polarité positive et b) polarité négative. ($h=3\text{cm}$, $d=0.3\text{mm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\%<H<60\%$).

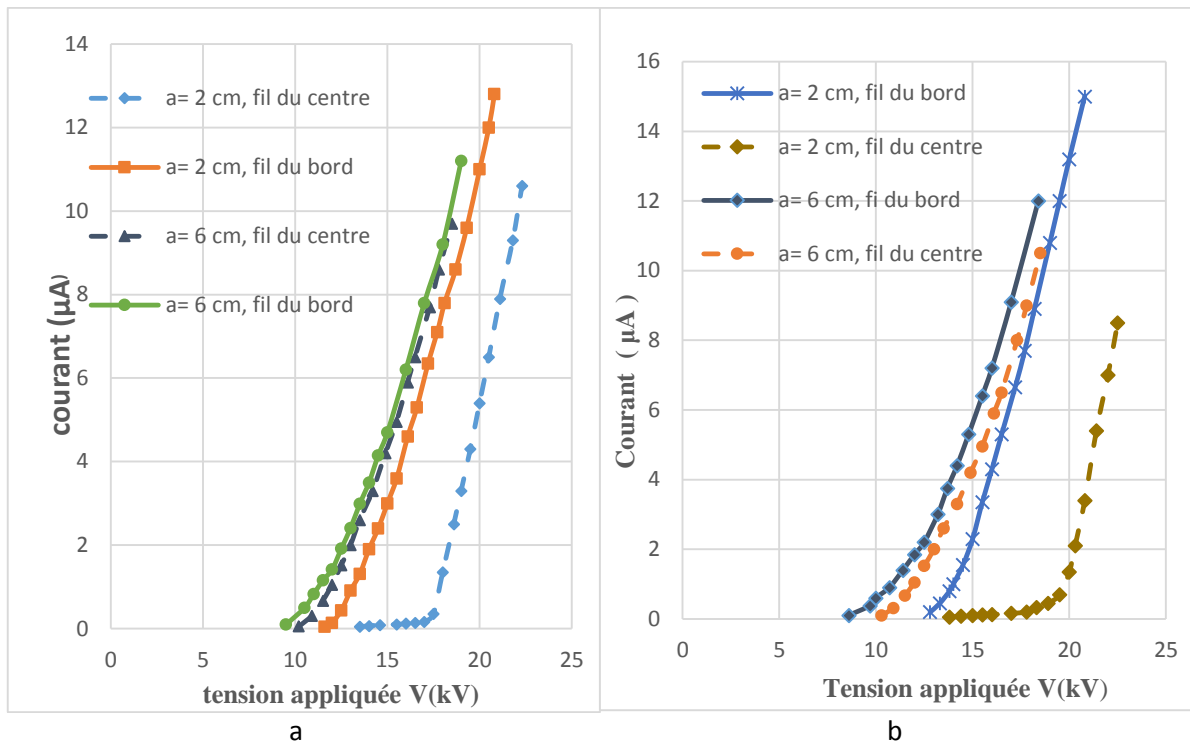


Figure III.19 : Caractéristiques Courant -Tension des fils centre et bord pour la configuration trois-fils-plans et pour différentes distances inter-fils, a) polarité positive et b) polarité négative ($h=3\text{cm}$, $d=0.3\text{mm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5$, hPa, $53\%<H<60\%$).

D'après les courbes précédentes, le courant de décharge augmente avec l'augmentation de la distance inter-fils pour les deux fils du milieu et du bord, avec une diminution de la tension seuil pour les deux polarités positive et négative. Il y a un phénomène de saturation qui se produit lorsque la distance inter-fils a dépasse la valeur de 6 cm qui est égale à deux fois la hauteur h ($2h$) ce qui conforme aux résultats trouvés par d'autres auteurs (figures III.17 et III.18).

Dans la figure III.19, on remarque que les fils à l'extrémité présentent des valeurs de courant plus élevées par rapport à ceux du milieu puisque les fils du centre sont étouffés par les deux cotés alors que les fils aux extrémités par un seul côté.

Le champ électrique est moins intense autour des fils centraux et ils agissent comme des conducteurs qui renvoient le champ électrique vers les fils aux extrémités. Cela favorise la concentration du champ et la décharge couronne aux extrémités.

III.3.2. Influence de la distance inter-électrodes h

Les figures III.20 et III.21 représentent l'influence de la distance inter-électrode sur la caractéristique I-V, la sonde est au milieu des 3 fils dans le cas d'une polarité négative et positive. Avec $a=4\text{cm}$ et $d=0.3\text{mm}$.

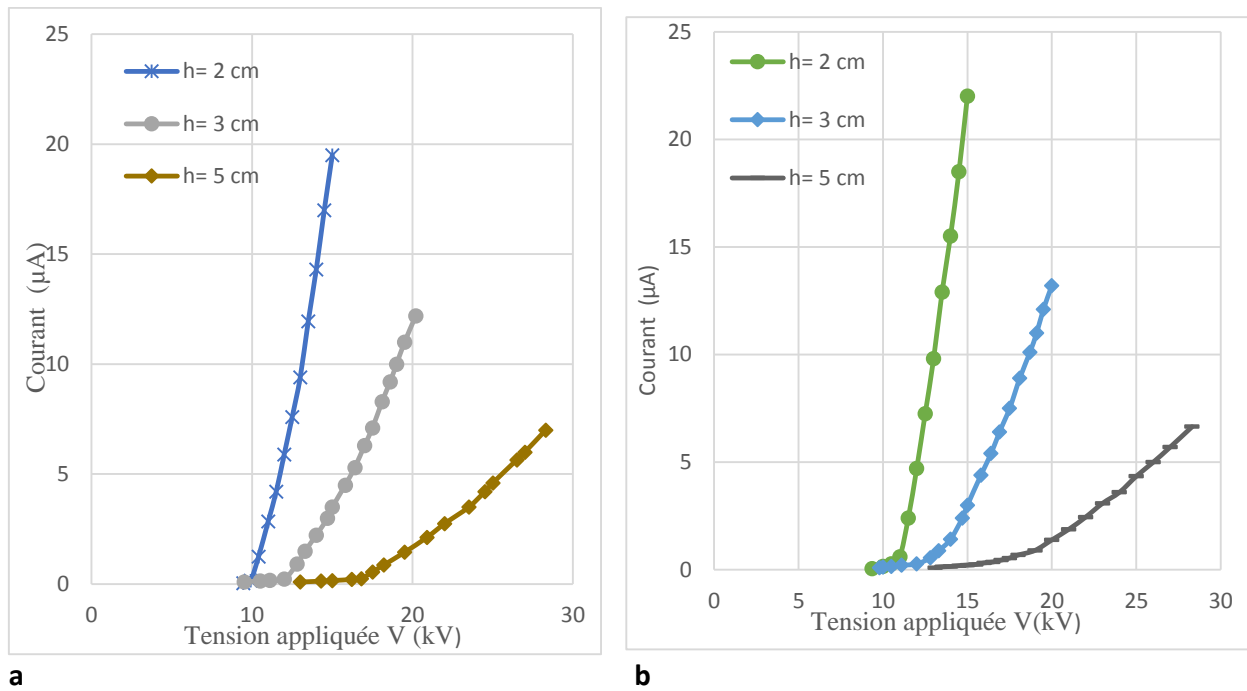


Figure III.20 : Caractéristiques courant -Tension du fil du centre pour différentes distances inter-électrodes a) polarité positive et b) polarité négative, ($d=0.3\text{mm}$, $a=4\text{cm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\%<H<60\%$).

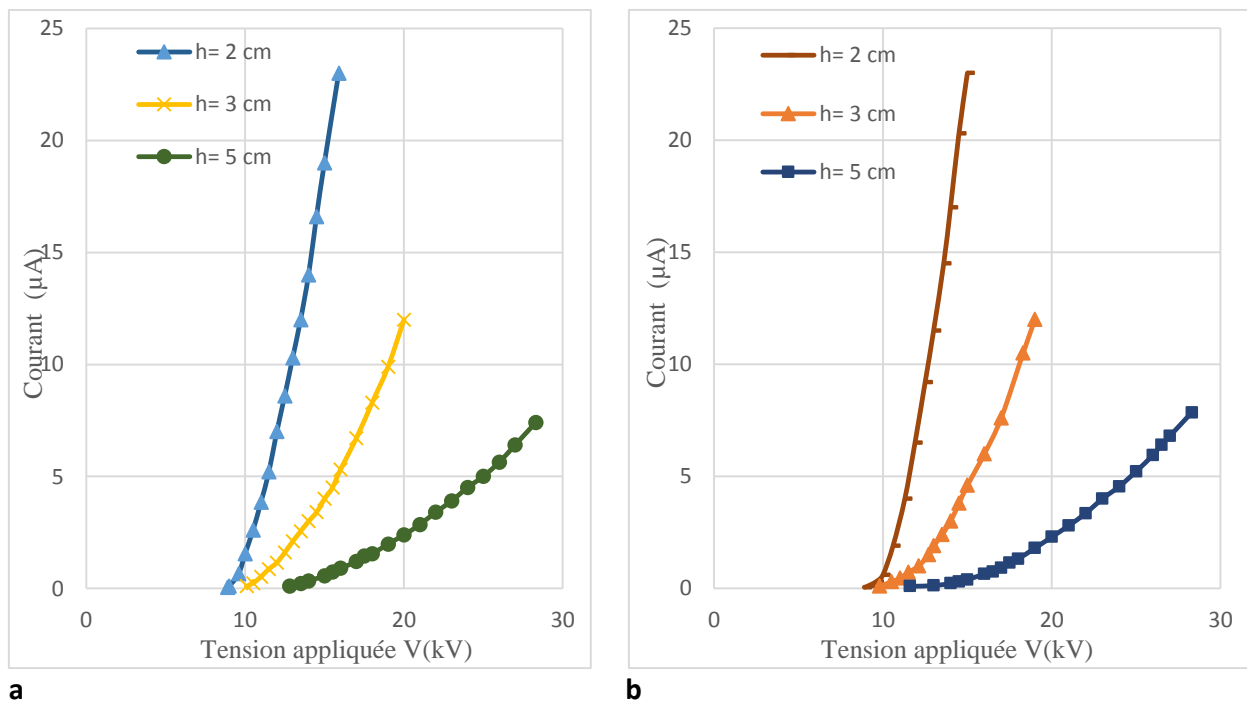


Figure III.21 : Caractéristiques courant -Tension du fil du bord pour différentes distances inter-électrodes a) polarité positive et b) polarité négative ($d=0.3\text{mm}$, $a=4\text{cm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\%<H<60\%$).

Tapez une équation ici.

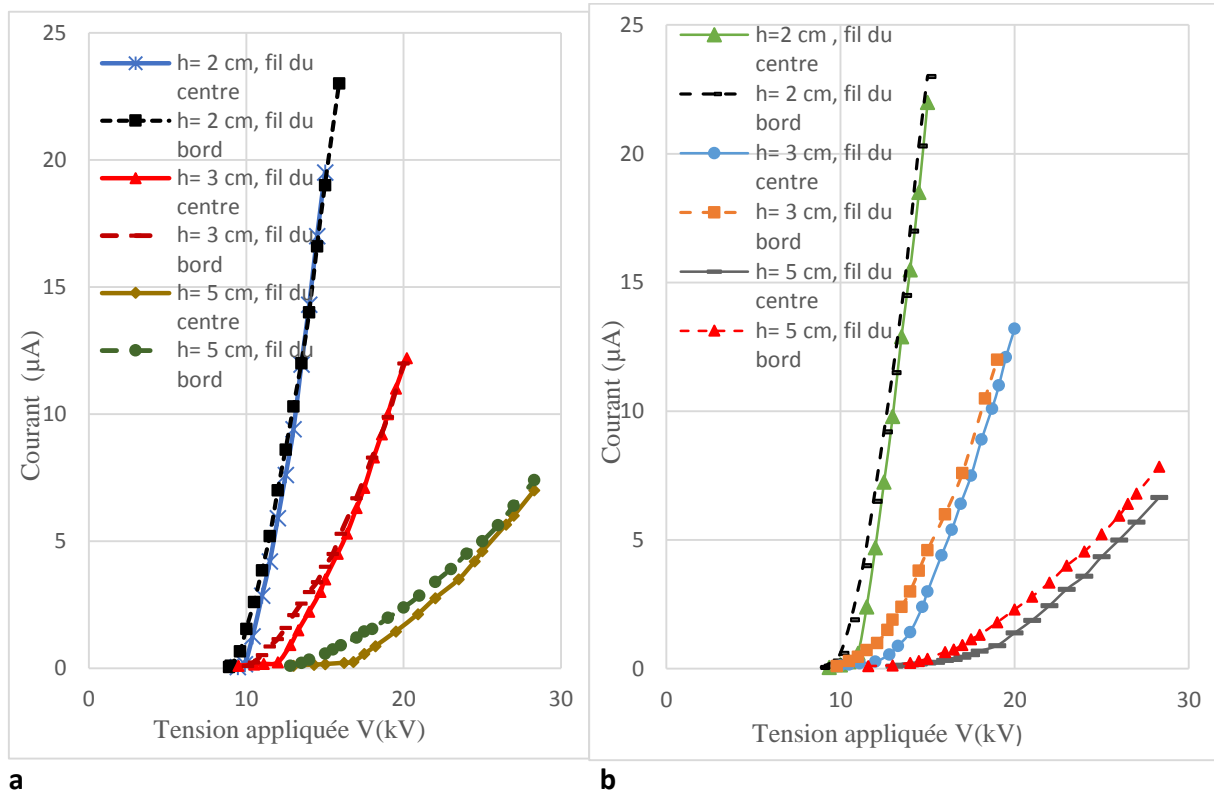
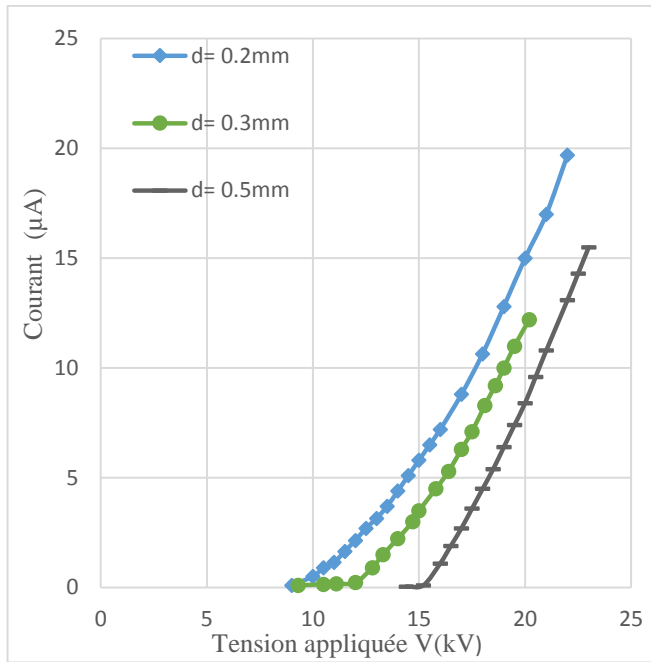


Figure III.22 Caractéristiques Courant -Tension des fils centre et bord pour la configuration trois-fils-plans et pour différentes distances inter-électrodes, a) polarité positive et b) polarité négative ($d=0.3\text{mm}$, $a=4\text{cm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5$ hPa, $53\%<H<60\%$).

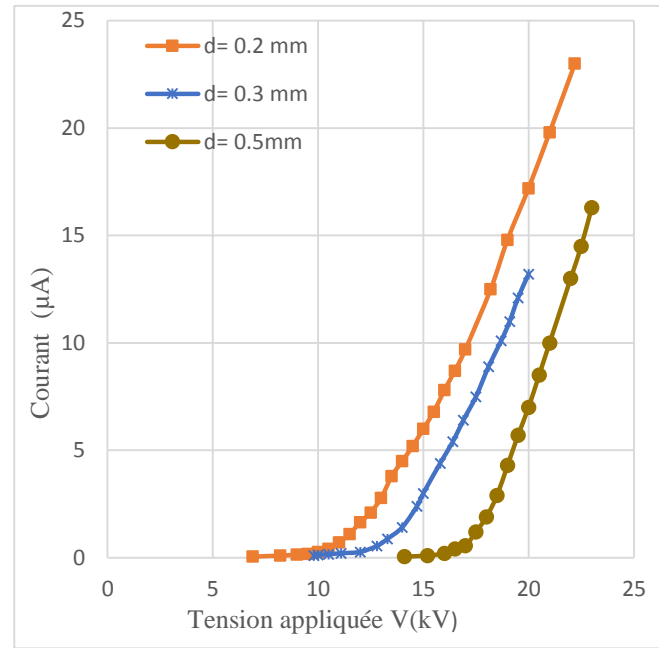
D'après les courbes des figures III.20 et III.21 on constate que la tension seuil d'apparition de l'effet corone augmente avec l'augmentation de la distance inter-electrode. Pour la même tension appliquée le courant de décharge diminue avec l'augmentation de h pour les deux fils du milieu et du bord ce qui est cohérent avec le fait que le champs électrique est plus intense pour les petites valeurs de h à la même tension appliquée. La figure III.22 montre que les fils situés aux extrémités affichent des valeurs de courant plus élevées par rapport à ceux situés au centre qui est dû à l'effet shielding.

III.3.3. Influence du rayon de courbure (diamètre des fils) :

Les figures III.23 et III.24 représentent l'influence du diamètre des fils sur les caractéristiques Courant-Tension des fils du centre et du bord pour les deux polarités négative et positive. On a utilisé l'électrode trois-fils-plan avec $h=3\text{cm}$, $a=4\text{cm}$ et on a varié le diamètre des fils d ($d=0.2$, 0.3 ou 0.5 mm).

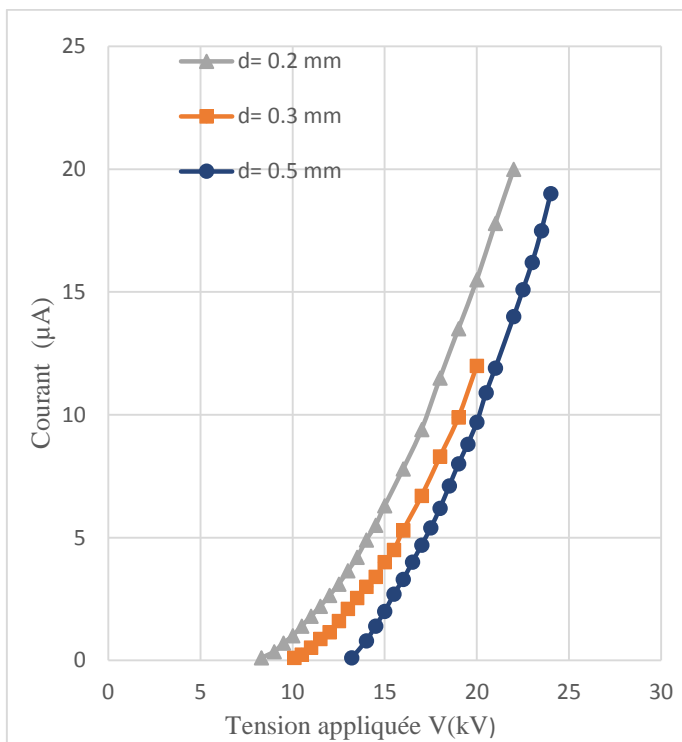


a

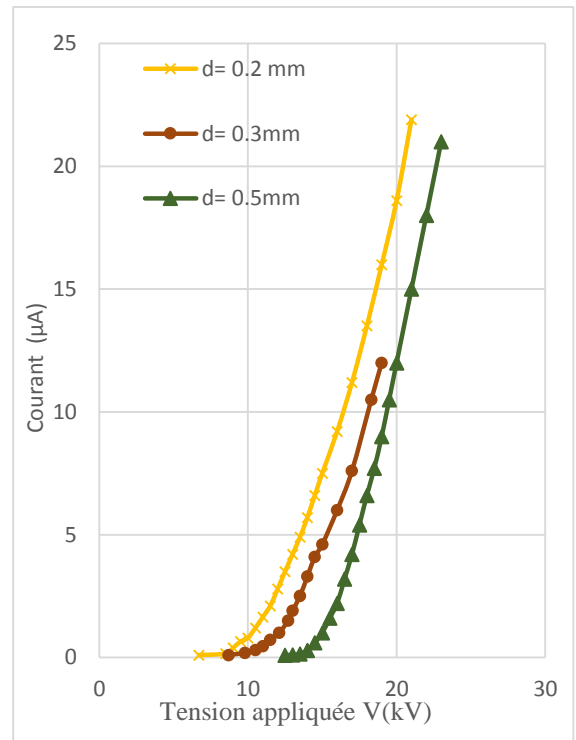


b

Figure III.23 : Caractéristiques courant -Tension du fil du centre pour différents diamètre des fils
a) polarité positive et b) polarité négative, ($h=3\text{cm}$, $a=4\text{cm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\%<H<60\%$).



a



b

Figure III.24 : Caractéristiques courant -Tension du fil du bord pour différents diamètre des fils
a) polarité positive et b) polarité négative, ($h=3\text{cm}$, $a=4\text{cm}$, $20^\circ\text{C}<T<24^\circ\text{C}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\%<H<60\%$).

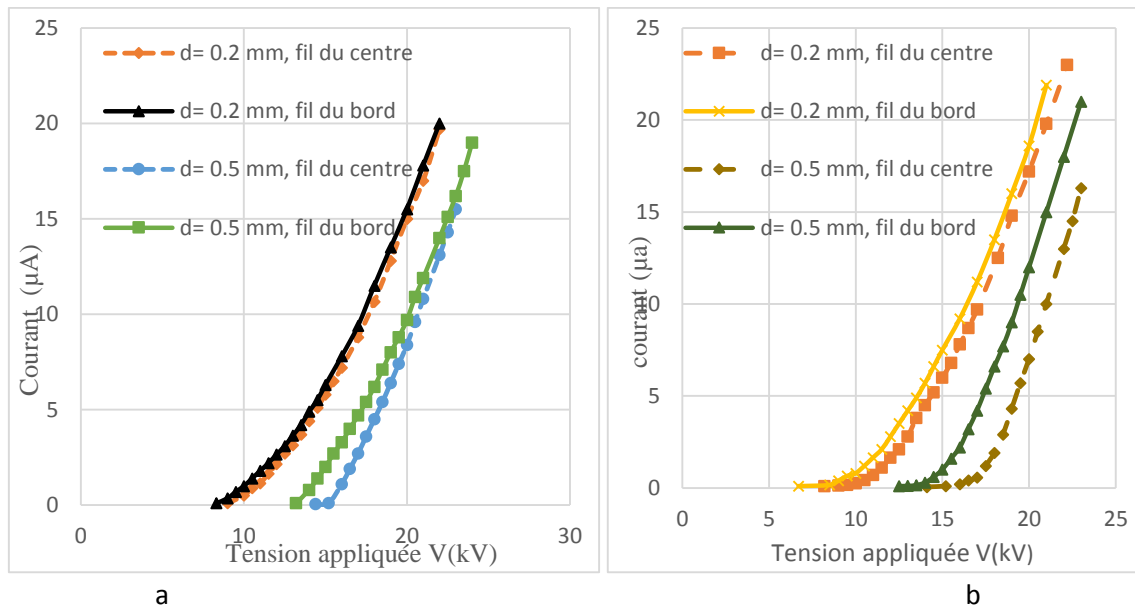


Figure III. 25 : Caractéristiques Courant -Tension des fils centre et bord pour la configuration trois-fils-plan et pour différentes valeurs du diamètre des fils, a) polarité positive et b) polarité ($h=3\text{cm}$, $a=4\text{cm}$, $20^{\circ}\text{C}<T<24^{\circ}\text{C}$, $P=1008.5\text{ hPa}$, $53\%<H<60\%$).

Lorsque le diamètre des fils du centre ou du bord diminue, le champ électrique à la surface des fils augmente, pour cela la tension seuil diminue avec la diminution des diamètres des fils, par conséquent pour la même tension appliquée le courant de décharge est plus important pour les petits diamètres des fils.

On voit sur la figure III.25 que le courant des fils à extrémité est plus grand que le courant des fils du centre cela peut signifier qu'à l'extrémité l'ionisation plus intense de l'air, favorisant ainsi un courant plus important à cet endroit

III.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations. Les caractéristiques Courant-Tension ont été étudiées pour les deux polarités avec la variation de plusieurs paramètres géométriques.

D'après les résultats obtenus, on a constaté que le nombre de fils, la hauteur fils-plan, le diamètre des fils et la polarité de la tension appliquée influencent considérablement sur le courant de décharge, et l'effet shielding qui s'exerce entre les fils.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à une étude expérimentale de la décharge couronne en géométrie nappe de fils-plan. Le but recherché est de voir l'effet de la polarité de la tension appliquée sur les caractéristiques Courant-Tension.

On a relevé dans un premier temps les caractéristiques courant-tension relatives à l'ensemble des fils constituant l'électrode active (courant collecté par le plan). Et dans un second temps ont relevé les caractéristiques courant-tension relatives aux fils du centre et aux fils du bord constituant l'électrode active (courant collecté par la sonde), pour les deux polarités positive et négative.

Les résultats expérimentaux obtenus nous ont permis d'évaluer l'influence de plusieurs paramètres sur le courant de décharge telle que la polarité de la tension appliquée, le nombre de fils, la hauteur fils-plan et les diamètres des fils. On a déduit que :

- Le courant de décharge et la tension seuil augmente avec l'augmentation du nombre de fils.
- L'effet mutuel qui s'exerce entre les fils (effet shielding), varie en fonction de la tension appliquée, la polarité de la tension appliquée, la distance inter-fils, la hauteur fils-plan et les diamètres des fils.
- Le courant de la décharge négative est plus intense que le courant de la décharge positive.
- Le courant mesuré augmente avec la distance inter-fils (a).
- L'intensité du courant est plus grande pour les faibles diamètres et distance inter-électrodes.
- Les fils de bord constituant la nappe de fils présentent des valeurs de courant plus élevées que celui du fil du centre et l'écart entre ces deux courants varie en fonction de la distance inter-électrode, la hauteur fil-plan et le diamètre des fils.

Références bibliographiques

- [1] R. P. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON, M. SANDS, « The Feynman Lectures on Physics », vol 2 Addison-Wesley, 1964.
- [2] R. Faehi, C. Morel, G. Cheron, « Matières plastique & adjuvant hygiène et sécurité », INRS, ED 638, 2006.
- [3] M. A. Handala « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air/solide », Thèse de doctorat d'état, UMMTO, 2007.
- [4] J. Jarrige « Etude expérimental des décharges électriques impulsionnelle. Application aux traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface », Thèse de doctorat de l'université de Rouen, 2008.
- [5] M. Hamel, B.S.C.A, « Influence de la variation de la température ambiante sur les variations induites par effet de couronne », Thèse de doctorat de l'université de Québec à Chicoutimi, 1991.
- [6] C. Potvin « Comportement et effet de la charge d'espace sur les mécanismes des vibrations induites par effet de couronne », Mémoire d'ingénieur de l'université de Québec, mars 2000.
- [7] B. Benamar, « la faisabilité de l'électrode-filtration d'une atmosphère chargée en poussière de bois étude expérimental et numérique », Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, 2008.
- [8] D. MEKKIOUI « Etude de l'évolution des espèces présentes dans un gaz pur O₂ par décharge couronne » Université Abou Baker Belkaid de Tlemcen Faculté des Sciences, Juin 2018
- [9] Raizer, Y.P. « Gas discharge physics (vol.1) ». Springer, 1991.
- [11] A. KASDI « Etude théorique et expérimentale de la décharge couronne bipolaire » Thèse de doctorat université Abderrahmane Mira de Bejaïa, octobre 2007.
- [12] A. MEGHAR, T. OUNNOUGHI « Etude de la distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, juin 2014.
- [13] M. S. BENDILMI « Etude expérimentale de la décharge couronne multipointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique » Thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'université de Poitiers, 2022
- [10] M. LARBA « Effets des décharges partielles sur les propriétés diélectriques des isolants dans la fabrication des câbles électriques » Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar d'Annaba 2017.
- [14] Y.P. Raizer, (1991). Gas discharge physics (Vol. 1). Springer
- [15] S. ABDALI, C. AIANE « L'effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira –Bejaïa, 2018
- [16] J. M. Meek, « A theory of spark discharge », Phys. Rev., Vol. 57, p. 722, 1940

- [17] L.B. Loeb and A.F. Kip, "Electrical discharge in air at atmospheric pressure", J. Appl. Phys., Vol. 10, p.142, 1939
- [18] Etienne ouss « Caractérisation des décharges partielles et identification des défauts dans les PSEM sous haute tension continue » Thèse de doctorat de l'université de Lyon, 2018.
- [19] M. Kaci « Etudes et caractérisation des électrets par la méthode de cartographie de surface ». Thèse de doctorat de l'université de Bejaïa, 2016
- [20] K. Hamouche « Etude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan ». Thèse de magister, UMM Tizi Ouzou, décembre 2009.
- [21] M. Goldman, R. S. Sigmond, Corona insulation, IEEE Trans. Elec. EI. 12/2, pp. 90-105, 1982
- [22]: M. Goldman, R. S. Sigmond « Corona insulation, *IEEE Trans* ». *Elec. Ins*, EI. 17/2, pp. 90-105, 1982.
- [23] S. MIHOUBI & H. KERDOUSSI " Décharge couronne en configuration coaxiale : Application à la neutralisation des charges ", Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945, Guelma, Octobre 2020
- [24] T. Djilali & A. LADJEL « Etude de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continu », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU, juin 2016
- [25] D. Guillaume et F. Benoît, « Décharge couronne, application et modélisation, Energie industrielle », Rapport de stage de l'école supérieure d'ingénieurs de Poitiers, 2005.
- [26] N. Ait Hamouda « Etude de la réduction des oxydes d'azote et de l'ozone par décharge couronne », Mémoire de Master, université des sciences et de technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf, mai 2012.
- [27] Z. Anane « Modèle dynamique de l'effet couronne pour l'étude de la propagation de la surtension le long des lignes de transmission HT en utilisant l'emtp » Thèse de doctorat université Ferhat Abbas – Sétif 1,
- [28] H. BOUSLIMANE « Caractérisation de certains isolants utilisés dans les équipements électriques », Mémoire de fin d'études, en Master Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2021.