

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia*

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique



Tasdawit n' Bgayet
Université de Béjaïa
جامعة بجاية

Mémoire

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

Spécialité : Electrotechnique

Option : Technique de Haute Tension

Thème :

***Etude de la Distribution du potentiel de surface de
films en PVC chargés par décharge
couronne négative***

Présenté par :

**Mr. OUNNOUGHI Tacfarinas
Mr. MEGHAR Abdelghani**

Encadré par :

Mr.Y. ZEBBOUDJ

Membres de jury :

**Président : Mr. R. BOUDISSA
Examineur : Melle. N. ROUHA**

**Professeur à l'université de Bejaia
Doctorante et enseignante à l'université de Bejaia**

Promotion juin 2014



Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Laboratoire de génie électrique à l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia, sous la direction du professeur ZEBBOUDJ Youcef, nous lui exprimons toute notre profonde reconnaissance d'avoir accordé toute sa confiance, l'aide et les conseils qu'il nous a apporté au cours de ce travail.

Nous tenons particulièrement à remercier Monsieur BOUDISSA Rabah, professeur à l'université de Bejaia, qui nous a fait l'honneur de présider le jury. Nous tenons aussi à remercier, Madame ROUHA Nacira, doctorante et enseignante à l'université de Bejaia, d'avoir acceptée d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants du département d'électrotechnique et particulièrement ceux en option technique de haute tension qui nous ont enseigné durant nos années d'études et qui ont donnés naissances à la nouvelle promotion de 2014.

Enfin notre profond remerciement est adressé à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui ont tant donné pour me voir réussir et surtout ma grand-mère.

Mes frères et mes sœurs et à toute la famille OUNNOUGHI.

Mes amis et camarades de route sans exception.

A Lyly qui a su me soutenir durant les pénibles moments que j'ai endurés.

Toute la promotion de technique de haute tension.

.....

«La question de savoir s'il y a lieu de reconnaître à la pensée humaine une vérité objective n'est pas une question théorique, mais une question pratique. C'est dans la pratique qu'il faut que l'homme prouve la vérité, c'est-à-dire la réalité, et la puissance de sa pensée, dans ce monde et pour notre temps »

Karl Marx, Thèses sur Feuerbach.

OUNNOUGHI Tacfarinas

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

- Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.
- Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Toute la famille, dont je témoigne toute ma reconnaissance pour m'avoir transmis des valeurs et l'idéologie selon laquelle il faut toujours mener à bien ce qu'on entreprend.

Tous mes amis et frères d'armes unis par le même combat que les initiés connaissent.

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Meghar Abdelghani

Liste des abréviations et des symboles

CC : courant continu.

COV : composé organique volatil.

CFC : Chlorofluorocarbure.

DBD : décharge à barrière diélectrique.

ESP : précipitateur électrostatique.

LPGP : laboratoire des physiques des gaz et des plasmas.

MEMS: micro electro-mechanic systems.

dV : élément de volume.

E : champ électrique.

C : capacité d'un condensateur.

e : charge d'un électron.

E_c : champ critique.

E_r : champ réduit.

E_s : champ électrique seuil.

E_g : énergie moyenne acquise par un électron.

F : force de séparation électrostatique.

H_r : humidité relative.

HT : haute tension.

i : courant électrique.

J : densité de courant.

k : mobilité d'une particule.

K_h : coefficient de correction pour les conditions normales.

l : Distance interélectrode.

l_c : distance critique.

m : coefficient d'état de surface.

N: densité moléculaire.

n_c : nombre critique d'électrons produits par avalanche.

$N_e(x)$: nombre d'électrons formés à une distance x de la cathode.

n_p : densité de particules chargées.

P : pression.

PE : polyéthylène.

PET : polyéthylène téréphtalate.

ppm : partie par million.

Q : débit gazeux.

q : charge électrique individuelle.

q_{\max} : charge électrique maximale d'une particule de poussière.

R : résistance électrique.

r_p : rayon d'une particule de poussière.

r_o : rayon du fil conducteur ou de l'électrode active.

S : surface.

T : température.

t : temps.

U : différence de potentiel.

U_d : tension entre les intervalles d'air.

U_{dn} : tension de claquage dans les conditions normales.

U_s : force électromotrice.

UV : ultraviolet.

V : tension électrique.

v : vitesse.

V_i : distribution spatial du potentiel d'amorçage.

V_m : potentiel de la sonde.

V_s : potentiel de surface.

α : Coefficient d'ionisation ou coefficient de Townsend.

$\bar{\alpha}$: Coefficient effectif d'ionisation.

ε : Permittivité de la particule de poussière.

ε_0 : Permittivité du vide.

δ : Densité de l'air.

δ_r : Densité relative de l'air.

\varnothing : Diamètre du fil.

γ : Deuxième coefficient de Townsend.

μ : Mobilité ionique.

λ : Le libre parcours moyen d'un électron dans la direction du champ électrique.

η Coefficient d'attachement.

θ : Angle de la distribution sur le plan (du potentiel ou du champ).

ρ : Densité de charge.

ω : Pulsation d'un signal sinusoïdale.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Paramètres caractéristiques des décharges dans les gaz.....6

Tableau I .2: Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique
en tension positive et négative.....21

Tableau III.1 : Quelques propriétés du polychlorure de vinyle (PVC).....47

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Tube à décharge8

Figure I.2 : Relation courant-tension9

Figure I.3 : Génération d'avalanches secondaires dans un processus de décharge positive... 13

Figure I.4 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression
atmosphérique (configuration pointe-plan, distance interélectrode : 13mm).....15

Figure I.5 : Entretien d'une décharge électrique couronne positive17

Figure I.6 : Entretien d'une décharge électrique couronne négative.....18

Figure I.7 :Différent type de géométrie d'électrodes19

Figure I.8 : Effet de la distance sur la caractéristique courant-tension.....20

Figure I.9 : Caractéristique courant-tension selon la nature
des électrodes ($d= 0.5\text{cm}$, $\varnothing = 125\mu\text{m}$).....21

Figure I.10 : Schéma d'évolution de la décharge observée
en fonction de la pression22

Figure I.11 : Représentation schématique d'une décharge couronne
continue en géométrie fil-plan.....24

Figure I.12 : Schéma du dispositif couronne en géométrie fil-plan.....26

Figure I.13 : La densité de courant normalisée sur la surface du plan
hauteur du conducteur : $l= 50\text{mm}$ 26

Figure I.14 : Le champ électrique normalisé sur la surface du plan,
hauteur du conducteur : $l= 50\text{mm}$ 2

Chapitre II

Figure II.1 : Représentation schématique des principales étapes de la destruction des oxydes
toxiques par décharge couronne.....29

Figure II.2 : Principe de production d’ozone par décharge couronne.....31

Figure II.3 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement
d’un filtre électrostatique.....32

Figure II.4 : Electret dipolaire.....34

Figure II.5 : Mécanisme de génération de charge électrique.....35

Figure II.6 : Principe de formation d’électret par décharge couronne.....36

Figure II.7 : Dispositifs de charge couronne de type triode.....37

Figure II.8 : Construction de base d’un scorotron et d’un corotron.....38

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma représentatif du dispositif de mesure.....41

Figure III.2 : Schéma du dispositif couronne en géométrie fil-plan.....41

Figure III.3 : Principe de modulation par variation de capacité.....43

Figure III.4 : Principe de mesure du potentiel de surface à l’aide
de la sonde à condensateur vibrant44

Figure III.5 : Schéma et image représentatifs de la grille45

Figure III.6 : Schéma représentatif de l’insertion de la grille.....46

Figure III.7 : Chlorure de vinyle.....46

Chapitre IV

Figure IV.1 : Caractéristique tension-courant $I=f(V)$, en polarité négative, Sans grille.....49

Figure IV.2 : Caractéristique tension-courant $I=f(V)$ En deux polarités négative et positive, sans grille.....50

Figure IV.3 : Caractéristique tension-courant $I=f(V)$ pour Les distances de la grille, $d=1$ cm, 2cm, 3cm en polarité négative, $t=1$ min.....50

Figure IV.4 : Evolution du potentiel de surface pour un échantillon de PVC, $t= 1$ min, $U=13$ kV, polarité positive, Sans grille.....51

Figure IV.5 : Evolution du potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité positive $l=5$ cm, $U=13$ kV, échantillon en PVC, $n=1.75$, $t=1$ min.....52

Figure IV.6 : Evolution du potentiel de surface pour un échantillon en PVC, $t= 1$ min, $U=13$ kV, polarité négative, Sans grille.....53

Figure IV.7 : Evolution du potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité négative, $l=5$ cm, $U=13$ kV, échantillon en PVC, $n=1.5$, $t=1$ min.....54

Figure IV.8 : Evolution du potentiel de surface pour un échantillon en PVC, $t= 1$ min, $U=14$ kV, polarité négative, Sans grille.....54

Figure IV.9 : Evolution du potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité négative $l=5$ cm, $U=14$ kV, échantillon en PVC, $n=1,75$, $t=1$ min.....55

Figure IV.10 : Comparaison entre la distribution du potentiel de surface en polarité positive et négative (PVC), sans grille, $U= 13$ kV.....55

Figure IV.11 : Evolution du potentiel de surface du PVC pour différentes position de la grille $d= 1, 2, 3$ cm, $U= 13$ kV, polarité négative, $t=1$ min.....57

Figure IV.12 : Evolution de potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité négative avec grille $d=2$ cm, $U=13$ kV, échantillon en PVC, $n=1$, $t=1$ min.....58

Figure IV.13 : Evolution du potentiel de surface pour différents temps de charge pour une position fixe de la grille $d=2$ cm, $t=10, 20, 30$ s..... 58

Figure IV.14 : Potentiel de surface pour différents temps de charge pour une configuration sans grille, $t=5, 15, 25, 35s$59

Figure IV.15 : Potentiel de surface pour différents temps de charge pour une configuration sans grille, $t=10, 20, 25, \dots, 90s$. Zoom de la caractéristique.....60

Sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : Généralités sur les décharges couronnes

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique.....	5
I.3 Généralités sur les décharges électriques.....	1
I.4 Décharge couronne	3
I.4.1 Mécanismes élémentaires de la décharge couronne.....	3
I.4.1.1 Phénomène d'initiation de la décharge.....	3
I.4.1.2 Croissance d'une Avalanche électronique.....	4
I.4.2 Critère de Townsend et ces limites	8
I.4.3 La Loi de Peek et le champ seuil de la décharge couronne.....	9
I.4.4 Théorie des streamers.....	10
I.4.5 Critère de Meek et critère de Reather.....	10
I.5 Propriétés spécifiques aux décharges couronnes	11
I.5.1 Caractéristique courant-tension et régime de la décharge.....	11
I.5.2 Champ électrique et topographie de la décharge	13
I.6 Les différents types de la décharge couronne	13
I.6.1 Décharge couronne à Polarité positive.....	14
I.6.2 Décharge couronne à polarité négative	15
I.7 Géométries des électrodes dans les décharges couronnes	16
I.8 Les facteurs influençant la décharge couronne	17
I.8.1 Facteurs géométriques.....	17
I.8.2 Facteurs physico-chimiques	19
I.8.3 Facteurs électriques	20
I.9 Phénomènes induits par la décharge couronne	21
I.9.1 Effet électromagnétiques.....	21
I.9.2 Effet chimique	21

I.10 La décharge couronne en géométrie fil-plan	22
I.11 La densité de courant et la distribution du champ électrique sur le plan pour les différentes géométries des électrodes couronnes	23
I.12 Conclusion :	25

Chapitre II : Domaine d'application de la décharge couronne

II.1 Introduction	28
II.2 Utilités et domaines d'application de la décharges couronne.....	28
II.2.1 Dépollution par décharge couronne	28
II.2.2 Les méthodes de Production de l'ozone	30
II.2.2.1 Production par Décharge couronne	30
II.2.3 Les precipitateurs électrostatiques	31
II.2.3.1 Principe de fonctionnement.....	32
II.2.4 Les électrets	33
II.2.4.1 Méthodes de formation d'électrets	34
II.2.4.2 Charge par décharge couronne	35
II.2.5 Le traitement de surface.....	38
II.6 Conclusion	39

Chapitre III : partie expérimentale

III.1 Introduction	41
III.2 Description du dispositif expérimental	41
III.2.1 Mode opératoire.....	42
III.3 Techniques de mesures des potentiels de surface	43
III.3.1 Sonde à condensateur vibrant	43
III.4 La grille métallique	45
III.5 Insertion de la grille.....	46
III.6 Matériaux chargé :.....	47
III.7 Conclusion :	48

Chapitre IV : Résultats et interprétations

IV.1 Introduction.....	49
IV.2Caractérisation de la décharge couronne	50
IV.2.1 Caractéristiques courant-tension en géométrie fil-plan.....	50
VI.2.2 Caractéristique courant-tension avec variation	52
de la distance de la grille	52
IV.3 Distribution de potentiel de surface sur des films en PVC	53
IV. 3.1 Distribution en polarité positive	53
IV.3.2 Distribution en polarité négative	55
VI.3.3 Comparaison entre les deux distributions polarités positive et négative.....	57
IV.4Caractérisations de la distribution du potentiel de surface pour un système avec et sans grille a des temps variables.	58
IV.4.1 Variation de la distance de la grille pour un temps de charge fixe	58
IV.4.2 Variation du temps de charge pour une position fil-grille fixe	60
IV.4.3 Variation du temps de charge pour un système sans grille	61
IV.5 Conclusion	62
Conclusion générale.....	61

Références bibliographiques

Introduction générale

Introduction générale

Certains matériaux isolants présentent un intérêt lorsqu'ils portent une charge électrique répartie en surface et en volume, entre autre les polymères, grâce à leurs excellentes propriétés électriques, mécaniques et leurs facilités de mise en œuvre, trouvant actuellement de nombreuses applications aux niveaux industriel. Cependant, la mise en œuvre des surfaces des polymères nécessite une activation préalable, différentes techniques sont utilisées, les décharges couronnes en est une. Le dépôt de charge électrique généré par une décharge couronne sur ces matériaux est l'un des sujets qui reste à exploiter vue la contribution de ces techniques dans les technologies prometteuses et durables, l'électro-photographie, les photocopieurs et les imprimantes laser aujourd'hui en est un exemple.

La complexité, mais surtout la distribution uniforme de la charge électrique sur ces matériaux reste difficile dans ces conditions, l'insertion d'une grille entre l'échantillon et l'électrode active pour former un système traditionnellement appelé système triode a changé cette notion, il a permis de mieux contrôler le niveau du potentiel de surface.

La décharge couronne a été particulièrement étudiée d'un point de vue fondamental comme procédé de charge des matériaux. Ce type de décharge survient à chaque fois que nous avons des champs électriques non homogènes dont l'intensité dépasse le seuil d'ionisation du milieu considéré, cela en appliquant une tension assez élevée (dizaines de kV) à une électrode de faible rayon de courbure (centaines de micromètres) situé à une certaine distance (plusieurs centimètres) par rapport à un plan de masse. L'électrode active peut être une pointe, plusieurs pointes disposées en forme de peigne, ou un fil très fin qui est notre cas. Le champ électrique dans l'espace interélectrode est non uniforme, son intensité au voisinage de l'électrode active est assez élevée pour que l'air soit ionisé.

Le but principal de ce travail est :

1. D'évaluer l'état de charge des échantillons par la mesure du potentiel de surface chargée avec une décharge couronne négative.
2. La comparaison entre les deux distributions dans les deux types de polarités.
3. Établir le rôle de la grille métallique et son influence sur la répartition du potentiel de surface.
4. L'étude de comportement du potentiel de surface lors de la variation de la distance fil-grille.

5. L'estimation de l'influence du temps de charge avec et sans barrière électrostatique sur le potentiel de surface.

A cet effet nous encadrons ce présent travail par un ensemble de questions fondamentales :

- ✓ La distribution du potentiel de surface en polarité négative sur les échantillons en PVC répond-elle à la loi de Warburg ?
- ✓ L'insertion d'une barrière flottante entre l'échantillon et l'électrode active homogénéise-t-elle la distribution du potentiel de surface ?
- ✓ Quel est l'apport du temps de charge sur les valeurs du potentiel de surface des échantillons ?

Le travail présenté dans ce mémoire est l'étude de la distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative. Pour cerner le sujet, on a envisagé une démarche sur quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les décharges couronnes, un tableau aussi exhaustif que possible a été traité en commençant par décrire les mécanismes élémentaires conduisant à une telle décharge. Les différents régimes de la décharge pour les interpréter selon le modèle de Townsend et le modèle des streamers. Les différents types de décharge. Les paramètres influençant la décharge couronne. La loi de Warburg dite loi en (\cos^n) qui étudie la densité de courant et la distribution du champ électrique sur le plan pour les différentes géométries des électrodes couronnes fera aussi l'objet de ce chapitre.

Dans le deuxième chapitre nous exposerons les domaines d'utilisations de la décharge couronne, allant de la dépollution des effluents gazeux au traitement de surface en passant par les ozoneurs, les filtres électrostatiques et les électrets, en mettant en évidence leurs procédés techniques avec leurs applications actuelles dans le secteur de l'industrie.

Dans le troisième chapitre nous présenterons le protocole expérimental tout en exposant le matériel utilisé à cet effet, le mode opératoire, le choix des grilles métalliques, ainsi que les précautions prises pour aboutir à des résultats fiables dans l'environnement du laboratoire.

En fin, dans le dernier chapitre nous détaillerons les résultats obtenus avec leurs interprétations, en avançant les différentes réponses apportées aux questions posées dans le cadre de cette étude.

Chapitre I

Généralités sur les décharges couronnes

I.1 Introduction

Toutes les décharges pré-disruptives apparaissant sous forme de lueurs diverses, qui prennent naissance au voisinage d'une électrode à faible rayon de courbure, ou dans un champ non uniforme se qualifiant de décharge couronne. Cette décharge se manifeste dans les conditions naturelles, elle apparaît lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation du gaz « air » et se manifeste sur toute la gamme de fréquence de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique. L'avantage de la décharge couronne est de pouvoir fonctionner avec tous les types d'alimentation électrique, par contre la difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc.

La complexité des phénomènes survenant dans ce type de décharge, nous amène dans ce chapitre à dresser un tableau sur les différents phénomènes physiques, théoriques liés à la décharge couronne.

I.2 Historique

Les décharges électriques ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [1,2]. Les premières études décrivant leurs évolutions et proposant des mécanismes datent du début de XX^{ème} siècle [3]. En effet, parmi les premières publications sur l'effet couronne datent de 1911[4]. Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne autour des lignes de transport [5]. C'est ainsi que les premières expériences sur les fils conducteurs minces, portés à des tensions suffisamment élevées, ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression universellement employée de « *décharge couronne* » ou « *corona effect* » [6]. Plusieurs études ont été menées depuis pour expliquer les différents mécanismes mis en jeu lors de la formation, du développement et de la propagation de cette décharge.

Townsend donna une théorie pour l'obtention d'une décharge auto-entretenu mais elle reste limitée pour les hautes pressions [7].

Le chercheur américain R.W. Peek est l'un des pionniers qui a étudié l'effet couronne, vers 1920, il établit une loi empirique exprimant le seuil d'apparition de la décharge couronne, en terme de champ électrique superficiel, cette célèbre loi est toujours d'usage aujourd'hui. Par la suite on trouve de nombreuses qui ont été élaborées pour expliquer la formation des pertes par effet couronne. On peut citer les travaux de Ryan et Henline (1924), de Hessenmeyer et Kostko (1925) de Holm (1927) [8]. Au cours du siècle passé avec les progrès effectués dans le domaine de l'électricité, ont donné les premiers essais au laboratoire qui date de 1932 [5]. Le développement des systèmes de haute tension a poussé à la recherche sur les décharges couronnes pour différents intervalles d'air. Vers les années 1940, Loeb, Meek et Reather, proposent un nouveau modèle de propagation de l'avalanche électronique lors de la décharge [7].

Vers 1950 de nombreux ouvrages traitent l'effet couronne, les très hautes tensions utilisées pour le transport d'énergie électrique ont amené les concepteurs à considérer un autre phénomène, en présence de la pluie et de brouillard ou de la neige mouillée on observe des vibrations mécaniques induite par effet couronne sur les conducteurs portés à la haute tension. Les phénomènes des décharges électriques font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques, on pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et les mécanismes qui le constituent.

Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens de diagnostic des premiers instants de la décharge et donc dans l'étude de mécanisme d'initiation. Cela a permis d'accroître les connaissances sur les phénomènes et d'avancer dans les applications qui ont connu de larges expansions [9]. Les travaux de Clements et al en 1987 font une analyse complète sur la physico-chimie de la décharge électrique de type « *pulsed streamer corona* » ou « *corona like* » avec deux électrodes immergées dans l'eau, avec et sans bulles d'air au travers de l'électrode de haute tension. Avec le type de décharge électrique de géométrie pointe-plan, la spectroscopie d'émission est employée pour monter la production de quantité significative des radicaux d'hydrogène dans la phase liquide [10]. Depuis le milieu des années 1990 [11], l'intérêt des constructeurs automobiles vis-à-vis des technologies liées aux plasmas froids produits par décharge couronne, pour la problématique NO_x -particules des moteurs diesel n'ont cessé de croître.

Cependant le coté utile de la décharge couronne ne doit pas éluder un autre coté nuisible de cette décharge [12], comme les pertes de puissance au niveau des lignes de transport d'énergie haute tension et la détérioration d'isolation dans le matériel électrique utilisant la haute tension.

Les propriétés physico-chimiques des décharges couronnes ont rapidement suscité un intérêt important dans différents domaines et les applications actuelles dans l'industrie sont nombreuses, allant des néons aux écrans plasmas en passant par les ozoneurs [3]. De nombreux travaux ont été dirigés dans la direction de l'analyse des différents paramètres caractérisant cette décharge. Tous ces travaux plus au moins récents sur cette dernière montrent que la théorie de la décharge couronne n'est pas établie de manière incontestable [12,13].

I.3 Généralités sur les décharges électriques

Une décharge électrique désigne tout mécanisme de passage d'un courant dans un gaz [14]. On dit qu'un gaz est ionisé lorsqu'il contient une certaine proportion d'électrons et d'ions positifs, l'existence de ces particules chargées confère au gaz des propriétés spéciales (conductivité électrique, émission de lumière et onde radioélectrique...etc.). Si le gaz est complètement chargé, on dit que c'est un plasma [15]. Introduit pour la première fois en 1923 par les physiciens américains I.Langmuir et L.Tonks pour désigner dans les tubes à décharges certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre. Les plasmas sont désignés comme étant le quatrième état de la matière faisant suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz [16]. Selon les valeurs de température et/ou de degré d'ionisation ces plasmas peuvent être classés en deux grandes catégories : les plasmas thermiques (chauds) et les plasmas non thermiques (froids) hors équilibre [17]. Selon les techniques utilisées pour les générer, la pression appliquée et la géométrie des électrodes, les plasmas hors équilibre se présentent sous différentes formes telle que la décharge luminescente, couronne ou encore les décharges à barrière diélectrique(DBD) [18].

La décharge luminescente ou ce que on appelle aussi la décharges **glow** est une décharge obtenue le plus souvent à basse pression (moins de 10 mbar) entre deux électrodes planes, les électrons produits dans ce type de décharge sont fortement énergétiques ainsi les atomes excités

Et les molécules génèrent une luminescence typique (tubes fluorescents par exemple) [19], toutefois elles ne sont pas adaptées pour la synthèse chimique.

La décharge couronne est une décharge non homogène, générée à pression atmosphérique dans un système d'électrodes fortement dissymétriques (*i.e.* système pointe-plan), lors de la décharge, l'électrode de faible rayon de courbure soumise à une haute tension est le siège d'un fort champ électrique ainsi constituant le facteur essentiel dans l'ionisation des espèces neutres présent dans le gaz.

Les décharges à barrière diélectriques (DBD) sont connues depuis le milieu de XIX^{ème} siècle [20]. La première DBD à pression atmosphérique dans l'air a été obtenue par Von Engle et al [21]. Les premières expériences sur ce type de décharge ont été proposées par Siemens 1857 [22].

Ces DBD sont des plasmas froids hors équilibre où les électrons créés possèdent une énergie ou une température supérieure à celle des ions et des particules neutres de gaz qui restent majoritaires. Ainsi la présence d'une barrière diélectrique entre les électrodes permet de limiter le courant de décharge, homogénéiser la répartition des charges à la surface des électrodes pour objectif de contrecarrer la transition de la décharge luminescente ou filamentaire vers une décharge de type arc.

Tableau I.1 : paramètres caractéristiques des décharges dans les gaz

	Décharge glow	Décharge couronne	Décharge DBD
Pression	<10 mbar à 1	1 bar	1 bar
Champ électrique	10 kV/cm	0.5-10 kV/cm variable	0.1-100 kV/cm variable
Champ électrique réduit	50 Td	2-200 Td, variable	1-500 Td

Les mécanismes à l'origine de l'initiation et du maintien des décharges sont multiples. Particulièrement les décharges à pression atmosphériques dans les systèmes couronnes que nous allons plus détailler et utiliser plus tard dans le cadre de notre travail.

I.4 Décharge couronne

I.4.1 Mécanismes élémentaires de la décharge couronne

Les premières expériences sur l'effet couronne, étaient faites à l'aide de fil fin, de quelques millimètres de diamètre, porté à une tension assez élevée pour qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, maintenant universellement employée « l'effet couronne » [23]. Les recherches antérieures ont conduit à distinguer deux processus de développement de la décharge :

- ✓ Le premier est la décharge de Townsend qui fait intervenir tout l'intervalle interélectrode.
- ✓ le second correspond à l'apparition de lueurs dans l'intervalle prenant l'aspect de filament ce que en appel dard « **streamer** ».

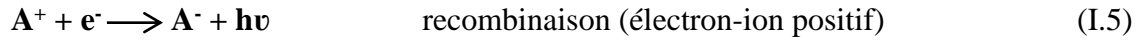
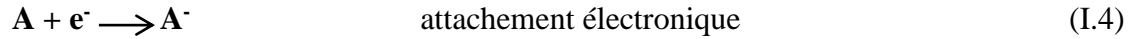
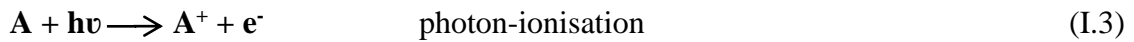
I.4.1.1 Phénomène d'initiation de la décharge

Il existe toujours dans l'air un certain nombre d'électrons libres, créés par rayonnement cosmiques ou dus à l'ionisation naturelle par les substances radioactives dans la terre. Un photon suffisamment énergétique, généralement libéré par un atome métastable retrouvant son état d'équilibre peut également ioniser des molécules d'air et crée un électron germe :



Les processus microscopiques présents dans la décharge couronne sont variés et très complexes. Ils conduisent à un étalage de régimes distincts du comportement de la décharge qui dépend des paramètres électriques, géométriques et des paramètres physiques du gaz [24,25-26]. L'existence d'une décharge électrique dépend de la possibilité de créer des particules chargées à partir des atomes ou molécules neutres. Un modèle de la décharge couronne est basé sur des processus élémentaires d'interaction clés entre électro-molécule ou photon-molécule [24].

Parmi les processus élémentaires d'interaction constituant ces gaz, on peut citer :



I.4.1.2 Croissance d'une Avalanche électronique

La croissance d'une avalanche électronique est basée sur le processus de multiplication électronique [23, 24, 25,27, 28-29]. Considérant un tube à décharge à basse pression, où les électrodes sont séparées par une distance l . figure (I.1).

En absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre de particules chargées peuvent exister dans le gaz ou l'air contenu dans l'intervalle interélectrode. Ces particules sont produites, soit par des mécanismes naturels, soit par des mécanismes artificiels. Dans ce cas un état d'équilibre entre la production et la disparition d'électrons existe, cet équilibre sera bouleversé par l'application d'un champ électrique suffisamment intense.

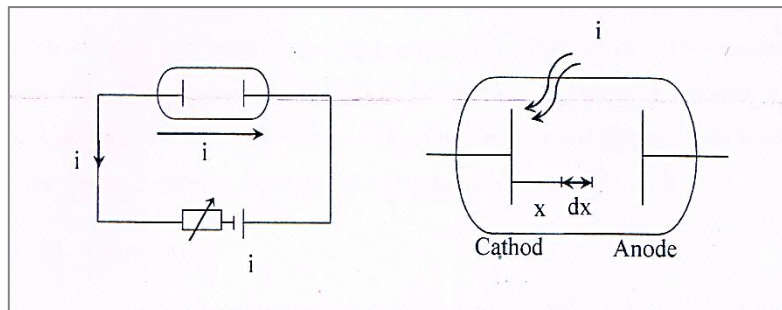


Figure I.1 : Tube à décharge

On applique aux électrodes une différence de potentiel U suffisamment faible pour éviter toute multiplication de charge. La cathode est irradiée avec un rayonnement ultra-violet de sorte que des électrons sont injectés dans le gaz, sans que de nouvelles charges soient créées. Le courant i peut être limité par la charge d'espace. En agissant sur la force électromotrice Us et la résistance de charge, on peut faire varier i . la courbe représentant la variation du courant de la décharge en fonction de la tension possédée une forme bien connue représentée sur la figure (I.2) [30].

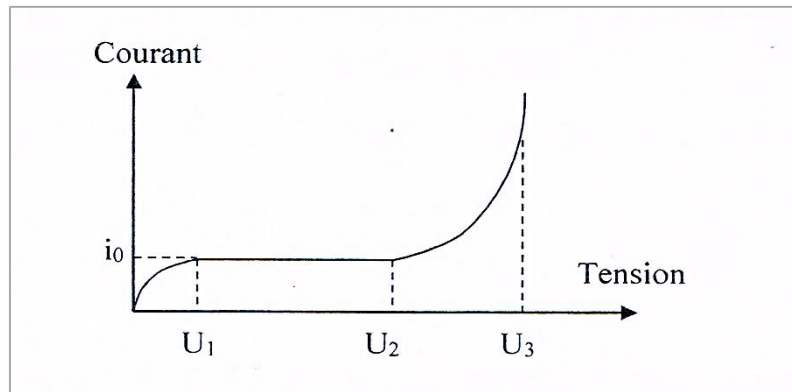


Figure I.2 : relation courant-tension

Au début, le courant croît quasi-linéairement avec la tension appliquée aux électrodes, avant de stabiliser à la valeur i_0 qui correspond au courant de saturation. Au-delà d'une tension U_2 de la tension appliquée, le courant croît rapidement.

Townsend attribue cette croissance à l'ionisation du gaz par collision d'électrons. En effet, sous un champ électrique suffisamment élevé, les électrons libres, quittant la cathode, sont accélérés et acquièrent une énergie cinétique supérieure à l'énergie d'ionisation, suffisante pour provoquer l'ionisation de molécules ou d'atomes neutres du gaz par choc.

De nouveaux électrons libres sont ainsi créés, lesquels soumis au même champ, vont également ioniser d'autres molécules et ainsi de suite. Le processus prend une allure d'avalanche, dite *avalanche électronique*. Si on supprime l'action de l'agent ionisant extérieure, le courant disparaît. La décharge ne s'entretient pas par elle-même, alors le courant est uniquement en fonction du nombre de charges créées à l'instant initial [31]. Pour expliquer la croissance du courant, Townsend a introduit le coefficient d'ionisation α .

Soit $N_e(x)$ le nombre d'électrons formés à une distance x de la cathode, alors ils vont produire $dN_e(x)$ électrons sur une distance dx :

$$dN_e(x) = N_e(x) \cdot \alpha \cdot dx \quad (\text{I.6})$$

Le coefficient d'ionisation α est appelé aussi premier coefficient de Townsend. Pour un gaz donné α dépend de la valeur du champ réduit. En intégrant l'équation (I.6) nous obtenons :

$$N_e(x) = N_{e0} \exp(\alpha \cdot x) \quad (\text{I.7})$$

Où N_{e0} est le nombre d'électrons initial à la cathode. Le nombre d'électrons atteignant l'anode est donné par la relation :

$$N_{e1} = N_{e0} \exp(\alpha \cdot l) \quad (\text{I.8})$$

Le terme $\exp(\alpha \cdot l)$ représente le nombre d'électrons engendrés par un électron en parcourant la distance interélectrode. La charge collectée à l'anode vaut :

$$e \cdot N_e(x) = e \cdot N_{e0} \exp(\alpha \cdot x) \quad (\text{I.9})$$

$$ET \quad i = i_0 \exp(\alpha \cdot x) \quad (\text{I.10})$$

Selon l'équation (I.10), la courbe de $\log(i)$ en fonction de la distance interélectrode est une droite de pente α , pour une pression P donnée et un champ électrique E constant. Townsend a observé que pour des tensions élevées le courant augmente plus rapidement que prévus par l'équation (I.10). Pour expliquer la déviation du courant, Townsend a introduit un mécanisme secondaire qui affecte la croissance de l'avalanche. Considérons le cas où les électrons secondaires sont produits à la cathode par bombardement des ions positifs.

Lorsqu'on augmente la différence de potentielle U au-delà de U_3 voir la figure (I.2), l'accroissement du courant est très important et la décharge se maintient même si l'ionisation externe disparaît, la décharge est devenue autonome.

L'explication de ce phénomène réside dans la mise en œuvre de nouveaux mécanismes d'entretien. Tout électron qui disparaît à l'anode est compensé par un électron apparaissant à la cathode. Ce nouvel électron est créé par ce qu'on appelle des *effets secondaires*.

En effet, des ions positifs dérivent vers la cathode sous l'effet du champ électrique, ils peuvent ainsi acquérir une énergie cinétique suffisante pour arracher des électrons par bombardement de la surface cathodique. Ce phénomène est caractérisé par le deuxième coefficient de Townsend γ , qui dépend de la nature du gaz interélectrode et particulièrement du matériau constituant la cathode.

Le nombre total d'électrons atteignant l'anode est donné par :

$$N_{el} = N_{e0} \frac{\exp(\alpha \cdot l)}{1 - \gamma(\exp(\alpha \cdot l) - 1)} \quad (I.11)$$

Et le courant collecté à l'anode s'obtient par la relation suivante :

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha \cdot l)}{1 - \gamma(\exp(\alpha \cdot l) - 1)} \quad (I.12)$$

En présence du phénomène d'attachement, caractérisé par le coefficient d'attachement η , où le champ est faible, on introduit le coefficient effectif d'ionisation $\bar{\alpha}$, ($\bar{\alpha} = \alpha - \eta$).

De même, les photons émis lors des recombinaisons électrons-ions et par les atomes portés à un niveau métastable à la suite d'un choc, peuvent extraire des électrons secondaires de la cathode (photo émission) ou ioniser les molécules et les atomes neutres du gaz (photo ionisation). Ces différents processus interviennent d'une façon plus ou moins intense selon les conditions expérimentales. Le processus γ à lieu dans des gaz à basse et moyenne pression alors que les autres processus se manifestent dans des gaz à pression élevée. Ce type de décharge porte le nom de « *Townsend* ».

Cette théorie fait intervenir tout l'intervalle interélectrode. À des pressions élevées, les ions créés sont freinés et leur énergie cinétique n'est plus suffisante pour extraire des électrons supplémentaires de la surface cathodique, alors le processus secondaire γ est écarté [28]. Dans certains cas, il a été observé que la décharge se manifeste par la formation de filaments lumineux se propageant entre électrodes, c'est le streamer [26].

Les électrons accélérés par le champ électrique excitent par collision des molécules ou atomes neutre qui, en revenant à leur état fondamental émettent des photons, ces derniers sont absorbés par le gaz interélectrode. Dans l'air les molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons avec une énergie supérieure à 13 eV, capable d'ioniser les molécules d'oxygène dont le potentiel d'ionisation est de 12,2 eV. Alors des multiplications électroniques se produisent, en créant de nouvelles avalanches secondaires.

I.4.2 Critère de Townsend et ces limites

D'après l'étude expérimentale effectuée par Townsend, le courant i évolue en fonction du phénomène d'ionisation secondaire. Townsend a établi un critère de claquage, correspondant à l'annulation du dénominateur de la relation (I.13) pour une distance critique l_c [23, 25,39].

$$1 - \gamma(\exp(\alpha \cdot l) - 1) = 0 \quad (\text{I.13})$$

La quantité $\gamma(\exp(\alpha \cdot l))$ étant généralement très grande devant l'unité, la relation précédente peut s'écrire sous la forme :

$$\gamma(\exp(\alpha \cdot l) = 1 \quad (\text{I.14})$$

Lorsque le champ électrique dans l'intervalle interélectrode n'est plus uniforme, le coefficient α n'est plus constant et le critère de claquage de Townsend s'exprime alors par la relation :

$$1 - \gamma(\exp\left(\int_0^{l_c} \alpha \cdot l\right) - 1) = 0 \quad (\text{I.15})$$

Lorsque la condition de claquage est vérifiée, le courant de décharge n'est limité que par le circuit extérieur du dispositif. La valeur du potentiel appliqué à l'électrode active, correspondant à la distance critique l_c est appelé *tension critique* ou *disruptive*. Le potentiel appliqué à l'électrode active influe sur la décharge implicitement, à travers les coefficients de Townsend qui dépend du champ électrique. La théorie de Townsend fait intervenir tout l'intervalle interélectrode, elle prévoit à des pressions élevées de l'ordre de la pression atmosphérique, des temps de transition des charges beaucoup plus grands que le temps de formation de la décharge. Ceci permet d'écarter le processus secondaire γ car les ions positifs sont freinés et leur énergie n'est pas suffisante pour extraire des électrons supplémentaires de la cathode [32].

Dans le système d'électrodes pointe-plan, la théorie de Townsend s'applique aux valeurs de faible produit $P \cdot l$ et de basse pression. Quand $P \cdot l$ est trop grand ou trop petit, le

Mécanisme de décharge change et cette théorie n'est plus valable. Dès que $P.l > 200$ cm.mmHg, le mécanisme de décharge par formation de streamer remplace le mécanisme de Townsend [14].

I.4.3 La Loi de Peek et le champ seuil de la décharge couronne

Pour un intervalle de géométrie donné, il existe un champ minimal pour lequel la décharge couronne débute, connue sous le nom de champ seuil. L'étude de seuil d'apparition de l'effet couronne a donné lieu depuis fort bien longtemps à de nombreux travaux.

Peek a proposé pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air en tension alternative :

$$E_s = 31. m. \delta. \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta.R_0}}\right) \text{ Kv/cm} \quad (\text{I.16})$$

R_0 : rayon de courbure de l'électrode active.

m : facteur d'irrégularité géométrique de l'électrode centrale dépend de l'état de surface et vaut 1 pour une électrode bien polie.

$$\delta = \frac{P}{760} \cdot \frac{293}{273+T} \quad \text{Est la densité de l'air.} \quad (\text{I.17})$$

P : pression atmosphérique en mmHg.

T : Température en °C

Sachant que la densité de l'air vaut 1 dans les conditions normales de température et de pression pour 20°C, 760 mmHg.

L'expression de Peek établie semble valable dans les conditions suivantes :

- Rayon d'électrode variable de 1 millimètre à quelques centimètres.
- Pression allant de quelques cm mmHg à quelques atmosphères.
- En tension continue ou alternative jusqu'à plusieurs KHz [33].

I.4.4 Théorie des streamers

Il a été observé dans certains cas que la décharge prend l'aspect de filaments se propageant entre les électrodes, c'est la formation du streamer. Ce phénomène peut être défini par une succession d'avalanches continues.

Dans ce cas, la photoionisation du gaz dans la charge d'espace générée par la première avalanche de type Townsend près de la cathode joue un rôle important. Ces photoélectrons amorcent des avalanches secondaires près de l'anode en créant une charge d'espace positive. Une étincelle se forme lorsqu'une avalanche d'électrons vient neutraliser cette charge d'espace positive. [34]

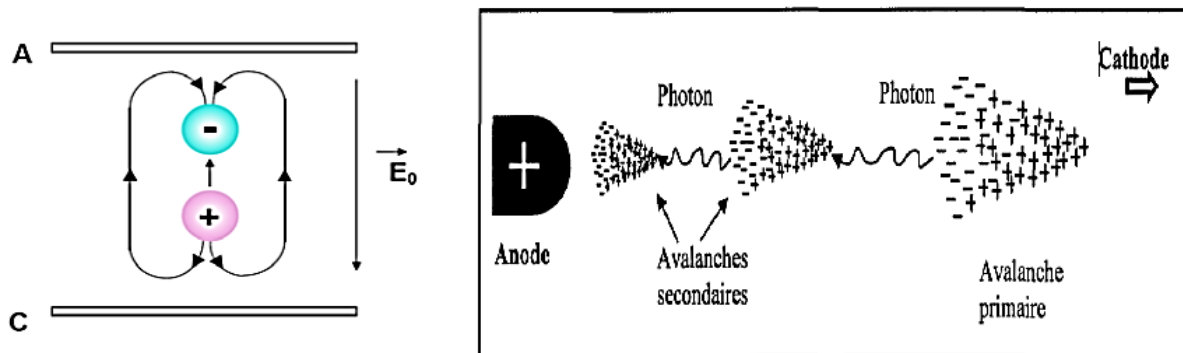


Figure I.3 : génération d'avalanches secondaires dans un processus de décharge positive

Cette théorie a été développée à la suite des travaux de Reather, Meek et de Loeb qui ont pu analyser ce phénomène sur des bases théoriques.

I.4.5 Critère de Meek et critère de Reather

La taille critique de l'avalanche qui donne naissance au streamer est définie par plusieurs critères.

- a) **Critère de Meek** : l'avalanche peut se transformer en streamer si le champ de charge d'espace « E_C » des ions positifs est sensiblement égal au champ appliqué « E_g ».

$$E_C = K E_g \quad (k \approx 1) \quad (I.18)$$

b) Critère de Reather : l'avalanche peut se transformer en streamer si le nombre des décharges de l'avalanche principale atteint 10^8 à 10^{10} électrons. Ce critère s'écrit simplement dans le cas du champ non uniforme :

$$\int (\alpha - \eta) dx = \log n_e \quad (\text{I.19})$$

Avec :

x : représente la distance critique.

n_e : le nombre critique d'électrons produits par l'avalanche en général, ce nombre est de l'ordre de 10^8 .

Le processus d'avalanche a été étudié par Townsend en 1914. Quand la tension atteint la valeur seuil, les électrons présents peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour ioniser le gaz. On est alors devant un processus d'avalanche qui entraîne une augmentation rapide du courant [35].

I.5 Propriétés spécifiques aux décharges couronnes

I.5.1 Caractéristique courant-tension et régime de la décharge

La caractéristique courant-tension de la décharge couronne est obtenue en faisant croître la tension appliquée à l'intervalle gazeux, la courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne.

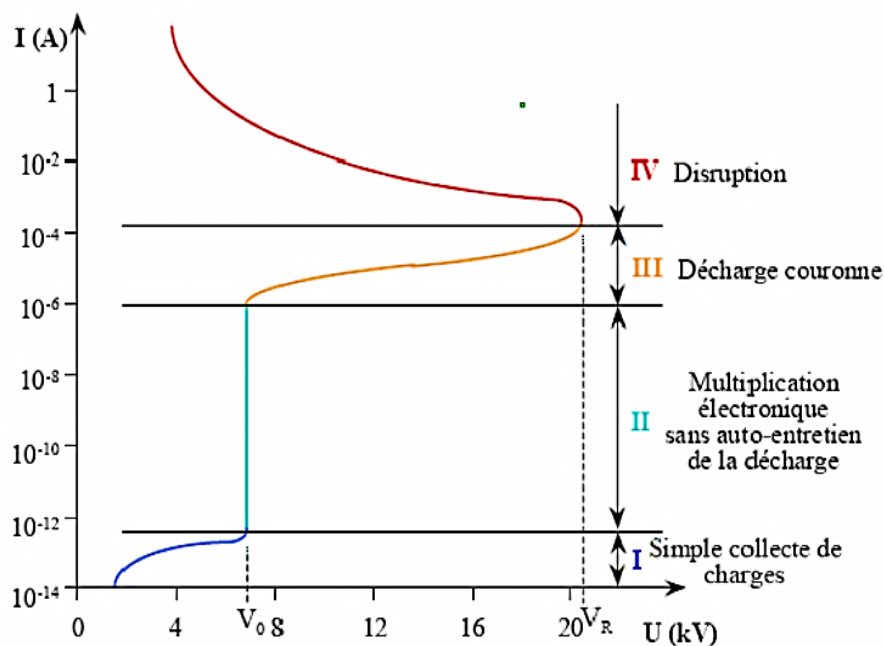


Figure I.4 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance interélectrode : 13mm)

- ✓ **Premier régime :** consiste à la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu, ces espèces sont produites par l'impact des rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace interélectrode.
- ✓ **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 du processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très variation de la tension appliquée.
- ✓ **Troisième régime :** l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomène d'ionisation extérieure, la décharge est auto-entretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards (streamers) responsables de la composante impulsionnelle du courant.
- ✓ **Quatrième régime :** 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'ionisations deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électrique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe de l'état de plasma hors équilibre à l'état de plasma thermique.

I.5.2 Champ électrique et topographie de la décharge

Le champ électrique sur la surface de l'électrode pour lequel la décharge électrique couronne est amorcée a été étudié intensivement [34-36], ce champ électrique dépend du potentiel d'ionisation du gaz, la densité du gaz et l'état de surface de l'électrode pour laquelle on applique la haute tension, Peek a établi une expression semi-empirique qui donne le champ électrique d'amorçage dans le cas de l'air sec :

$$E(r_0) = 3 \cdot 10^4 \cdot m \cdot \eta \cdot \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta_r r_0}} \right) \quad \text{Vcm}^{-1} \quad (\text{I.20})$$

- ✓ **m** est un nombre sans dimension lié à l'état de lissage de la surface du fil.
- ✓ **m=1** pour les surfaces lisses et **m < 1** pour les surfaces rugueuses.
- ✓ **δ_r** est la densité relative de l'air $\delta_r = \frac{T_0 P}{T P_0}$ où **T** et **P** sont respectivement la température et la pression du gaz (**T₀ = 293 °k** , **P = 101325 Pa**).

La distribution spatiale du potentiel électrique d'amorçage **V_i** est donnée par les deux relations suivantes :

1. En géométrie coaxiale :

$$V_i = 3 \cdot 10^6 \cdot m \cdot r_0 \cdot \left(\delta + 0.03 \sqrt{\frac{\delta}{r_0}} \right) \ln \left(\frac{R_c}{r_0} \right) \quad \text{volt} \quad (\text{I.21})$$

2. En géométrie fil-plan :

$$V_i = 3 \cdot 10^6 \cdot m \cdot r_0 \cdot \left(\delta + 0.03 \sqrt{\frac{\delta}{r_0}} \right) \ln \left(\frac{4l}{\pi r_0} \right) \quad \text{volt} \quad (\text{I.22})$$

Avec **R_c** rayon du cylindre externe et **r₀** le rayon du fil.

I.6 Les différents types de la décharge couronne

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente.

I.6.1 Décharge couronne à Polarité positive

La figure (I.5) illustre le processus de génération d'électrons dans le cas d'une décharge couronne positive à courant continu, pour une géométrie fil-cylindre (une tension positive est appliquée au fil et le cylindre est relié à la masse).

Les électrons libres formés naturellement dans l'espace interélectrode sont accélérés vers le fil. Dans la région d'ionisation, très près du fil, où le champ électrique réduit est plus grand que 120 Td ($1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ V.m}^2$), les collisions non-élastiques entre les électrons et les molécules neutres du gaz produisent des paires électron-ion positif. (Par exemple dans l'air sec, O^+_2 et N^+_2 sont les plus dominants). Les nouveaux électrons libérés sont à leur tour accélérés par le champ électrique et produisent plus d'ionisations (avalanche électronique).

La décharge électrique couronne positive est entretenue par les électrons secondaires qui sont produits par la photoionisation du gaz dans la région du plasma. La région d'ionisation est uniforme le long du fil. Les streamers ne se forment pas dans le cas de la décharge couronne considérée à cause du coefficient d'ionisation qui est faible. La région couronne du plasma est définie comme étant la région où les réactions d'impact électronique sont significatives.

Dans la décharge couronne positive, la région couronne du plasma coïncide avec la région d'ionisation ce qui n'est pas le cas d'une décharge couronne négative. Evans et Inclulet ont mesuré la largeur de la région visible et ils ont constaté qu'elle est, dans le cas d'une décharge couronne négative, plus épaisse que celle d'une décharge couronne positive.

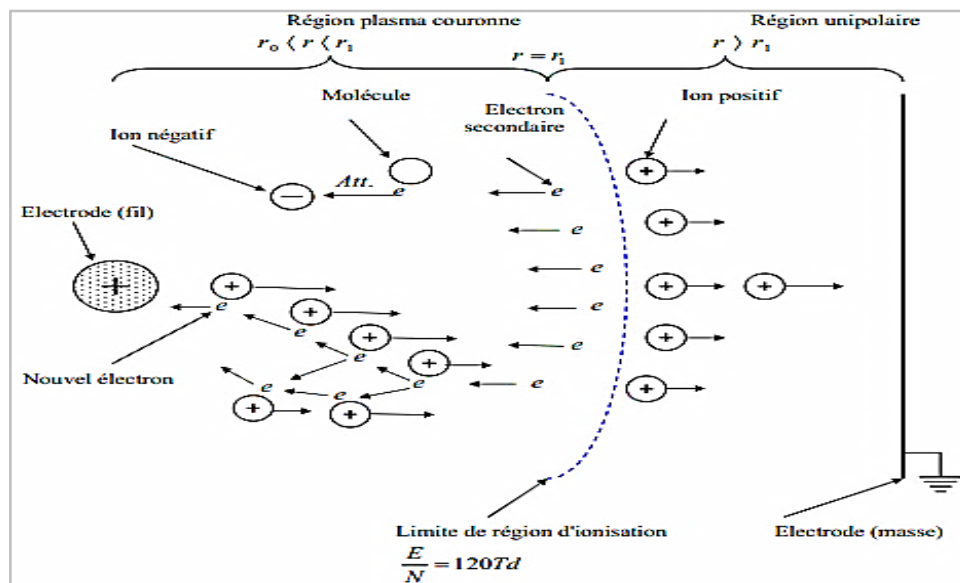


Figure I.5 : Entretien d'une décharge électrique couronne positive

Les électrons libres peuvent aussi s'attacher aux molécules électronégatives du gaz (par exemple O₂) pour former des ions négatifs ou se recombinaison avec les ions positifs. La Recombinaison est d'habitude négligeable, parce que les coefficients de recombinaison sont Petits et la densité de charge est relativement basse.

Près du fil de haute tension, L'ionisation prédomine l'attachement et de nouveaux électrons sont produits. A la frontière de la région du plasma, le taux d'ionisation est égal au taux d'attachement. Les nouveaux électrons produits s'attachent aux molécules pour former des ions négatifs. Au-delà de la région du plasma, le champ électrique est insuffisant pour produire des électrons. Les ions unipolaires de même signe de charge que le fil, dérivent vers la cathode et les ions négatifs se déplacent vers l'anode. Les ions n'ont pas assez d'énergie pour provoquer l'ionisation [34].

I.6.2 Décharge couronne à polarité négative

Les mécanismes de génération d'électrons et d'ions dans la décharge couronne négative différents de ceux de la décharge couronne positive, dans les décharges couronnes négatives, les électrons sont présents à l'extérieur de la région d'ionisation et les électrons secondaires sont produits par la photoémission sur la surface de la cathode.

La figure (I.6) montre les processus qui se produisent dans une décharge couronne négative à courant continu pour une géométrie fil- cylindre (tension négative appliquée au fil - cylindre relié à la masse). Contrairement à la décharge couronne positive qui est uniforme, la décharge couronne négative fait apparaître des points séparés (*trichels*) le long du fil. Lorsque la tension appliquée est au voisinage de la tension d'amorçage, seuls quelques *trichels* apparaissent. Ils sont irrégulièrement distribués le long du fil. Si on augmente la tension appliquée, le nombre des *trichels* augmente et la distribution de ces *trichels* devient plus uniforme [34].

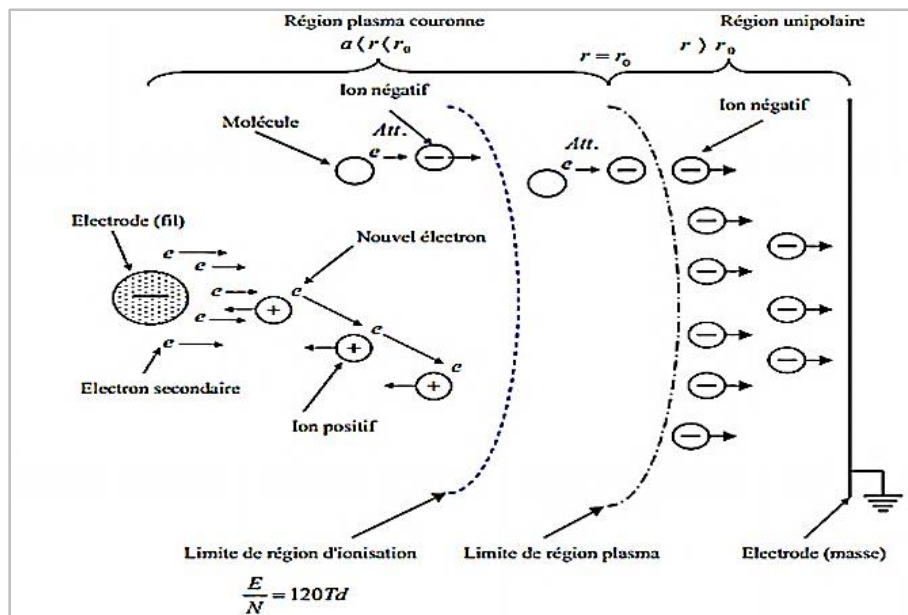


Figure I.6 : Entretien d'une décharge électrique couronne négative

I.7 Géométries des électrodes dans les décharges couronnes

Les décharges couronnes sont des décharges électriques près-disruptives qui se développent dans l'intervalle gazeux. Parmi les configurations d'électrodes les plus utilisées, on trouve les systèmes point-plan, couteau-cylindre, fil-plan, fil-cylindre ou cylindre-cylindre,

La distance interélectrode est habituellement de l'ordre du centimètre

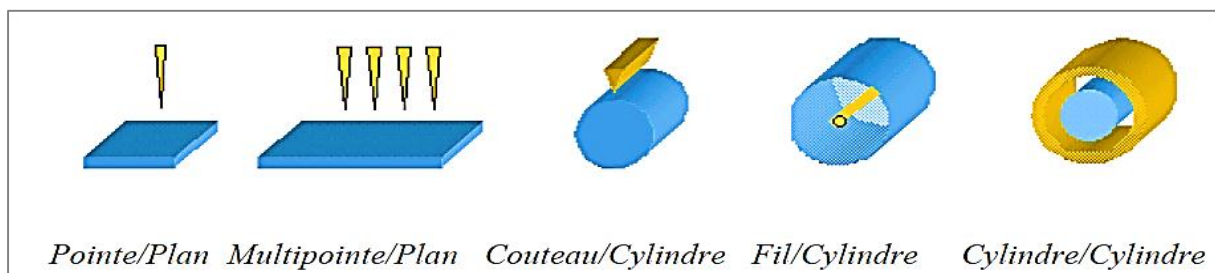


Figure I.7 :différent type de géométrie d'électrodes

Du fait de cette dissymétrie, le champ entre les deux électrodes est hétérogène. Les décharges couronne peuvent s'appliquer à des milieux variés à des pressions allant de quelques centaines de pascals à quelques atmosphères.

En revanche, à ces mêmes pressions, les plasmas de gaz rare exempts d'impuretés évolueront pratiquement instantanément en arc. En outre, les décharges couronnes ont pour avantage d'être faciles à produire dans de bonnes conditions de stabilité et de reproductibilité. Suivant les applications envisagées, la haute tension, qui est généralement appliquée à l'électrode active, peut être pulsée, alternative ou continue de polarité positive ou négative.

L'utilisation d'une alimentation pulsée permet de générer de fort courant pendant des temps très court (typiquement 500A pendant 100 ns) et donc d'obtenir sans passage à l'arc des électrons de haute énergie, adaptés au traitement de certains polluants. Les tensions de travail habituellement utilisées varient de quelques kilovolts à une trentaine de kilovolts environ tandis que les puissances dépassent rarement quelques kilowatts.

Le système d'électrode « fil-cylindre » est très utilisé pour la dépollution des gaz d'échappement. Il a l'avantage de permettre la dépollution des gaz au sein même de la conduite d'échappement du gaz. La répartition aléatoire des charges produites entre le fil et le cylindre permet une dépollution du gaz en volume [37].

I.8 Les facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [35], on distingue trois facteurs essentiels :

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

I.8.1 Facteurs géométriques

a) Rayon de courbure

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

b) distance interélectrode

L'influence de la distance interélectrode sur les paramètres de la décharge est montrée sur la figure (I.8). Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances interélectrode. De plus, le seuil de la décharge couronne apparaît pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances interélectrode petites [35].

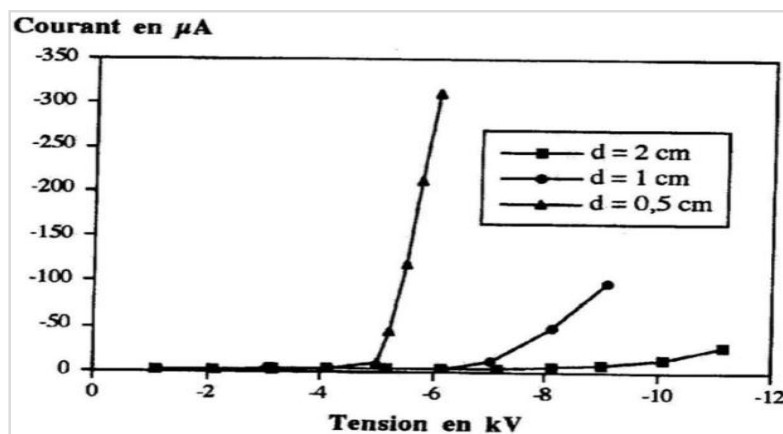


Figure I.8 : effet de la distance sur la caractéristique courant-tension en géométrie fil-plan [35]

c) La nature des électrodes

La caractéristique courant-tension est représentée selon des électrodes (cuivre, aluminium et acier) sur la figure (I.9) :

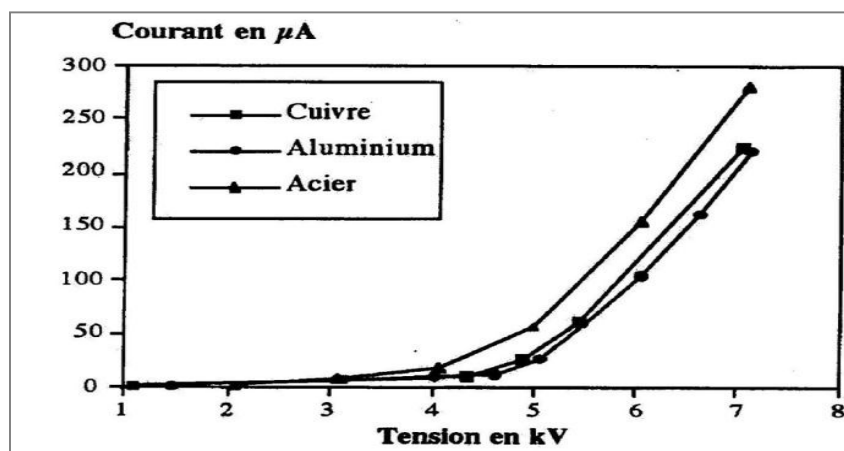


Figure I.9 : Caractéristique courant-tension selon la nature des Électrodes en géométrie fil-plan ($d = 0.5\text{cm}$, $\varnothing = 125\mu\text{m}$) [35]

La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique comme le montre la figure du tableau (I.2) :

Tableau I.2 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique
En tension positive et négative.

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

On observe une grande mobilité ionique avec des électrodes en acier qu'avec des électrodes en aluminium quelle que soit la polarité de la tension appliquée.

I.8.2 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 [13]. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit «*P.I*» [38].

b) 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. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photoionisation [39].

Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [32]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

c) Pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure (I.10) montre l'effet de la pression sur la décharge.

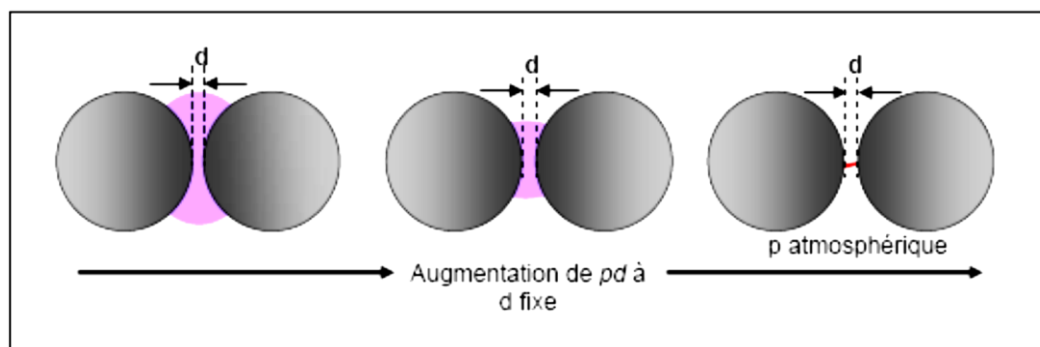


Figure I.10 : Schéma d'évolution de la décharge observée
En fonction de la pression

d) La densité de l'air :

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

La tension « U_d » est proportionnelle à la densité de l'air :

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (I.23)$$

Avec :

U_{dn} : Tension de claquage dans les conditions normales.

$\frac{K_h}{\delta}$: Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

I.8.3 Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon l'application de la tension, continue ou alternative à un système d'électrodes.

Les différents modes d'émissions de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique la concentration des émissions de charges qui correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente.

I.9 Phénomènes induits par la décharge couronne

De nombreuses réactions autres que des réactions d'ionisation ont lieu au sein du gaz : dissociation, recombinaison, excitation moléculaire, excitation électronique...etc. les différentes espèces ainsi produites vont se distinguer par leur charge, leur masse, leur vitesse et leur énergie, mais aussi par leur nature et leur état d'énergie interne.

I.9.1 Effet électromagnétiques

Ces effets se traduisent par les perturbations radiophoniques et les pertes d'énergie dans les lignes de transport d'énergie électrique, l'effet perturbateur du phénomène couronne se manifeste par la formation d'un champ électromagnétique à large spectre autour des conducteurs, celui-ci est lié aux courants à haute fréquence circulant dans les conducteurs. Les perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension au-dessus de «**1kv**» peuvent être produites sur une très large bande de fréquence par :

- ✓ Les décharges par effet couronne dans l'air à la surface des conducteurs.
- ✓ décharges et claquages dans les régions à fort contraintes des isolateurs.
- ✓ Les claquages au niveau de contacts défectueux.

Les parasites les plus gênants sont ceux qui produisent les champs intenses captés par les antennes des postes récepteurs au même temps que le champ utiles

I.9.2 Effet chimique

Suivant la polarité de la décharge nous assistons à la naissance de certaines espèces chimiques dérivées du gaz chimique, par exemple dans le cas de l'air, la naissance des oxydes d'azotes (NO , NO_2), des radicaux (HO) et (H_2O) ainsi que l'ozone (O_3) qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières.

I.10 La décharge couronne en géométrie fil-plan

Un système d'électrode fil-plan est constitué d'une électrode cylindrique de faible rayon de courbure tendue parallèlement à une hauteur l d'un plan mis à la terre, figure (I.11). L'espace interélectrode est reparti en deux zones délimitées par une frontière distante de l_c de la surface de l'électrode active, sur cette frontière le champ électrique est égal au champ critique E_c du minimum d'ionisation correspondant à $\alpha - \eta = 0$. La zone d'ionisation (I) est caractérisée par une charge d'espace nulle, par contre la zone de dérive (II) est caractérisée par une charge d'espace monopolaire positive selon la tension appliquée à l'électrode active.

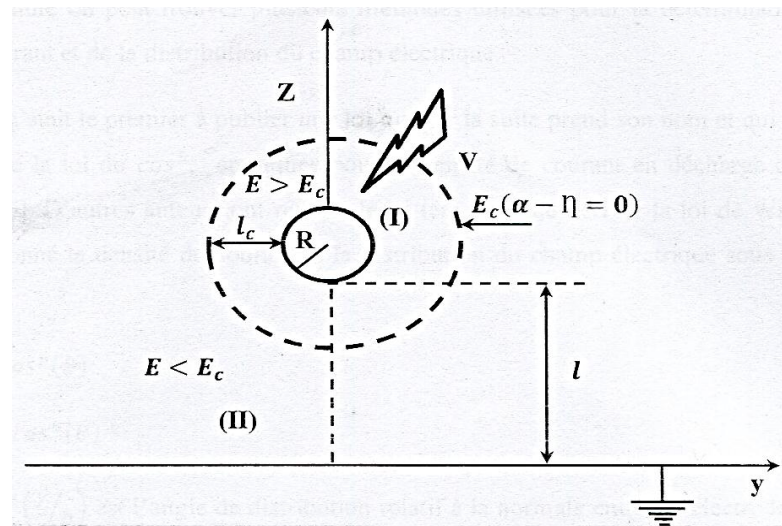


Figure I.11 : Représentation schématique d'une décharge couronne continue en géométrie fil-plan

Lorsqu'une tension V de polarité positive suffisante pour créer la décharge couronne est appliquée à l'électrode active celle-ci attire les électrons. Ces derniers ne peuvent ioniser le gaz interélectrode qu'une fois qu'ils auront acquis une énergie cinétique suffisante due au champ existant au voisinage de cette électrode, dans ce cas, le développement de l'ionisation du gaz par collision électronique commence à partir de la limite l_c en progressant vers l'électrode active.

Quant aux ions positifs engendrés dans la zone d'ionisation, ils dérivent vers l'électrode mise à la terre. Lors de la décharge couronne de polarité négative, les avalanches électroniques se développent à partir de l'électrode active vers le plan.

En dépassant la frontière lc les électrons ne peuvent plus ioniser le gaz en raison du champ électrique qui se trouve inférieur au champ du minimum d'ionisation Ec . Certains électrons vont s'attacher à des atomes ou molécules neutres. Quant aux ions positifs créés dans la zone d'ionisation, ils sont accélérés dans le fort champ vers l'électrode active et peuvent ainsi accélérer l'effet γ [40].

I.11 La densité de courant et la distribution du champ électrique sur le plan pour les différentes géométries des électrodes couronnes [41]

Les différentes configurations d'électrodes : point-plan et fil-cylindre permettent une variation spatiale du courant et du champ électrique sur l'électrode passive. Dans la littérature on peut trouver plusieurs méthodes utilisées pour la détermination de la densité de courant et de la distribution électrique. Warburg était le premier à publier une loi qui par la suite prend son nom et qui se réfère à nous comme la loi du (\cos^n), appliquée pour la densité de courant en décharge couronne pointe-plan, d'autres auteurs ont reporté leurs tentatives de dériver la loi de Warburg et ils ont tous donné la densité de courant et la distribution du champ électrique sous la forme qui suit :

$$J(\theta) = J(0) \cos^p(\theta) \quad (\text{I.33})$$

$$E(\theta) = E(0) \cos^q(\theta) \quad (\text{I.34})$$

Où $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{h}\right)$ est l'angle de distribution relatif à la normale entre les électrodes, figure (I.12). Les puissances p et q varient selon la configuration et les dimensions des électrodes.

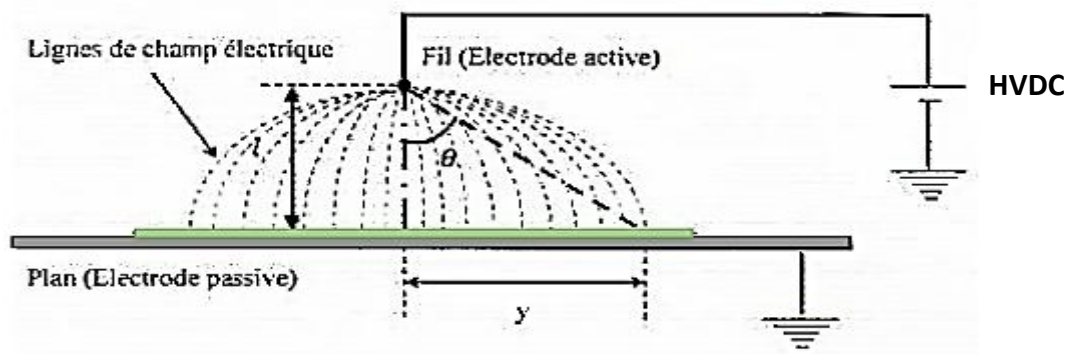


Figure I.12 : schéma du dispositif couronne en géométrie fil-plan

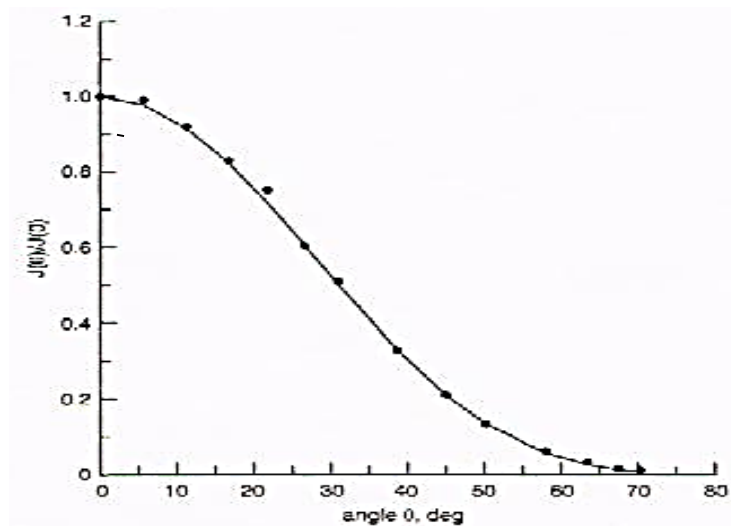


Figure I.13 : la densité de courant normalisée sur la surface du plan, hauteur du conducteur : $l=50$ mm

- Mesure
- Loi empirique

Les allures par unité de la densité de courant $J(\theta)/J(0)$ et du champ électrique $E(\theta)/E(0)$ établissent que ces deux grandeurs sont indépendantes de l'amplitude du champ appliqué, comme indiqué sur les figures (I.13) et (I.14) respectivement. On peut voir que la densité de courant et la distribution du champ électrique sont identiques pour les diamètres des fils de 0.22, 0.310, 0.400 et 0.800 mm, la loi les régissant est :

$$J(\theta) = J(0) \cos^{4.5}(\theta) \tag{I.35}$$

$$E(\theta) = E(0) \cos^{1.75}(\theta) \tag{I.36}$$

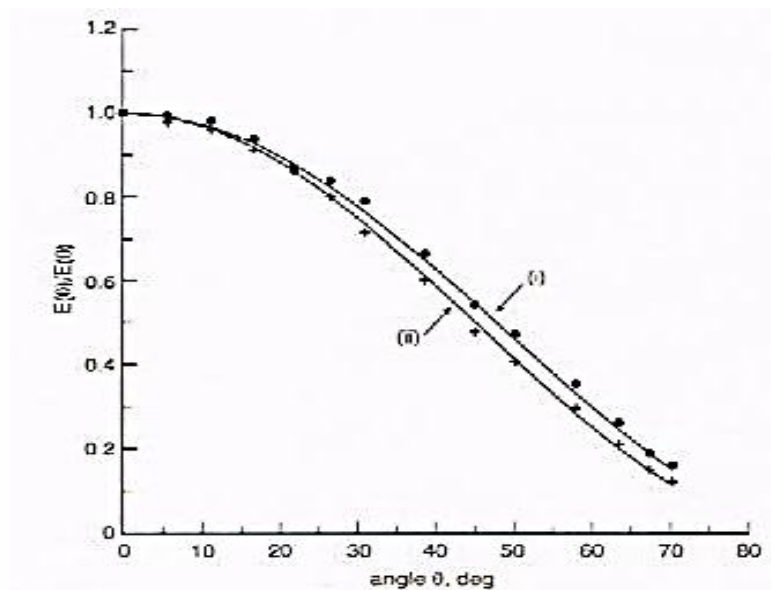


Figure I.14 : Le champ électrique normalisé sur la surface du plan, hauteur du conducteur : $l = 50$ mm

- Mesure (champ poissonien)
- x Mesure (champ laplacien)
- Loi empirique

I.12 Conclusion :

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur les décharges électriques et particulièrement les décharges couronnes, ainsi, nous avons décrit les différents mécanismes à l'origine de la formation et de la propagation de ce type de décharge, nous avons aussi évoqué les propriétés spécifiques, les différents types de déchargés, de géométries et les facteurs influençant, les décharges couronnes, pour enfin donner la loi empirique de Warburg qui régit la distribution du champ électrique et la densité de courant, en passant par la décharge couronne en géométrie fil-plan.

Dans le chapitre qui suit, on abordera les différents domaines d'applications et l'usage de la décharge couronne au niveau industriel.

Chapitre II

Domaine d'application de la décharge couronne

II.1 Introduction

Les décharges couronnes sont utilisées dans de nombreux domaines où elles remplacent des techniques souvent plus polluantes (utilisation de solvant). Les décharges couronnes offrent de nombreuses possibilités pour le traitement des gaz et plus particulièrement les processus électrostatiques. Les applications dites électrostatiques utilisent exclusivement les ions de la décharge, tantôt comme source de charges, tantôt comme source de transport de particules pour des procédés :

- ✓ De dépôt de charges (photocopie)
- ✓ De neutralisation de charges (prévention d'incendies d'explosion)
- ✓ D'entraînement de particules (dépoussiérage, peinture, tri de particules).

Les recherches effectuées sur le sujet tendent à accroître leurs intégrations dans le milieu industriel et ouvrent de nouvelles possibilités. Pour cela nous avons jugé utile de jeter un regard sur leurs domaines d'applications dont nous les avons étalés, d'une manière assez exhaustive dans ce chapitre.

II.2 Utilités et domaines d'application de la décharges couronne

II.2.1 Dépollution par décharge couronne

La dépollution des effluents gazeux par plasmas froids ou non thermiques s'effectue par l'intermédiaire de décharges électriques. L'une des décharges la plus adaptée est la décharge couronne, elle permet de traiter les gaz à pression atmosphérique au sein même de leur conduit d'évacuation. 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 du type NO_x et SO_x ou des Composés Organiques Volatiles (COV). Des recherches sont également en cours pour estimer le potentiel de traitement des suies par des dispositifs hybrides couplant les décharges couronnes avec des catalyseurs. Dans certains cas, le réacteur Corona peut également servir de précipitateur électrostatique pour piéger les poussières ou les particules lourdes. Dans son principe, la décharge couronne permet de créer des radicaux (espèces chimiques très réactives) qui vont réagir avec les espèces toxiques. A titre d'exemple, les (COV) sont fractionnés en espèces plus petites et moins nocives. Les oxydes seront transformés plutôt en acides puis neutralisés sous forme de sels solides.

- Pour les COV : $C_x H_y O_z + \text{radicaux} \rightarrow n \text{CO}_2 + m \text{H}_2\text{O}$
- Pour oxydes : oxyde + radicaux \rightarrow acide
acide + base \rightarrow sel

Au bilan, le traitement d'un gaz d'échappement par réacteur corona s'effectue en trois principales étapes correspondant à des échelles de temps bien distinctes. Ces étapes sont schématisées sur la figure (II.1) [38].

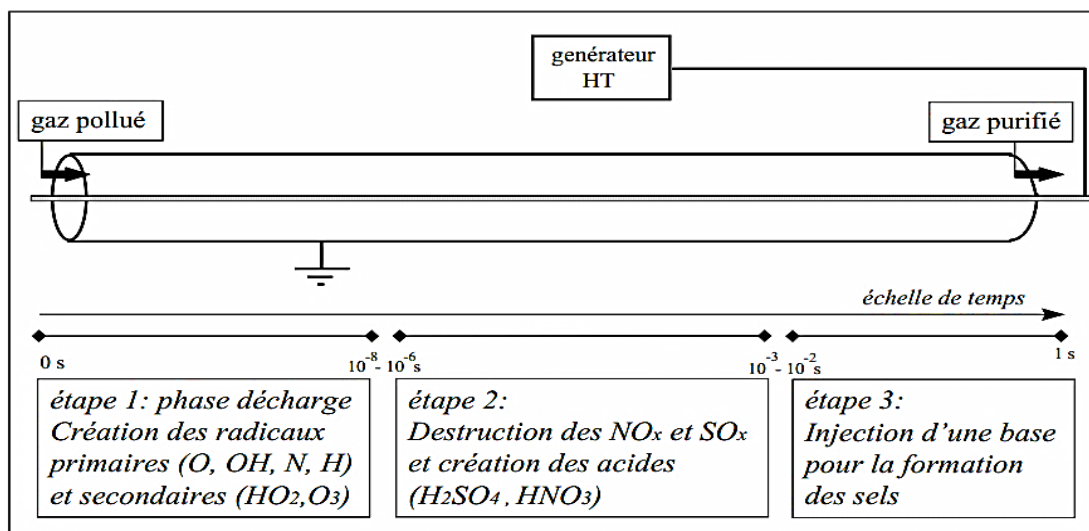


Figure II.1 : Représentation schématique des principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne

La première étape : est la phase de décharge en elle-même qui dure moins d'une microseconde. Pendant cette phase de décharge, il y a création de radicaux du type *OH, H, N, O, HO₂*, etc. Ces radicaux sont formés par des réactions primaires telles que les collisions entre les électrons et les particules majoritaires du gaz (collisions électron-neutre) puis par des réactions secondaires telles que les collisions entre les ions et les molécules majoritaires du gaz. On peut noter que les collisions électron-polluant ou ion-polluant sont totalement inefficaces dans la réduction directe des polluants à cause de la très faible concentration de ces derniers (1000 à 10000 fois plus faible que les molécules majoritaires) et donc à une très faible probabilité d'interaction.

La seconde étape : est une phase de post décharge. Elle est décalée spatialement et/ou temporellement par rapport à la première étape et dure de quelques microsecondes à quelques millisecondes. Durant cette phase, les radicaux qui ont été formés lors de la première étape réagissent avec les espèces polluantes pour former de nouvelles espèces stables. Les oxydes NO_x et SO_x sont transformés en acides tels que l'acide nitrique (HNO_3) et sulfurique (H_2SO_4).

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

II.2.2 Les méthodes de Production de l'ozone

L'ozone peut être généré par trois méthodes essentielles : la méthode de décharge électrique (la méthode la plus usitée), la méthode photochimique et la méthode électrochimique [42]. Toute fois nous nous intéressons particulièrement à la méthode de décharge couronne, étant donné que notre travail s'inscrit dans le cadre de celle-ci.

II.2.2.1 Production par Décharge couronne

Le système de décharge couronne à courant continu a été étudié comme une méthode alternative à la décharge silencieuse pour la génération de l'ozone. Dans cette décharge il n'y a pas de barrière diélectrique entre les électrodes métallique [43]. Avec cette méthode on peut obtenir un grand rendement et une grande concentration d'ozone dans un espace interélectrode large comparé à celui d'un ozoniseur de décharge silencieuse, cette méthode a quelques avantages par rapport à la production et à la maintenance d'un ozoniseur, cependant, une plus haute tension que celle d'une décharge silencieuse est nécessaire.

Il est difficile d'obtenir une décharge stable. Facilement, il peut y'avoir un développement d'un arc ou *spark*. La génération d'ozone dépend de la tension appliquée :

1. dans le cas d'une tension positive, la décharge apparaît entièrement dans l'espace interélectrode.
2. dans le cas d'une tension négative, la décharge n'apparaît que près de la région d'électrode active.

Notons que la polarité positive, représentée par le grand volume de décharge est plus effective pour la génération de l'ozone que la polarité négative.

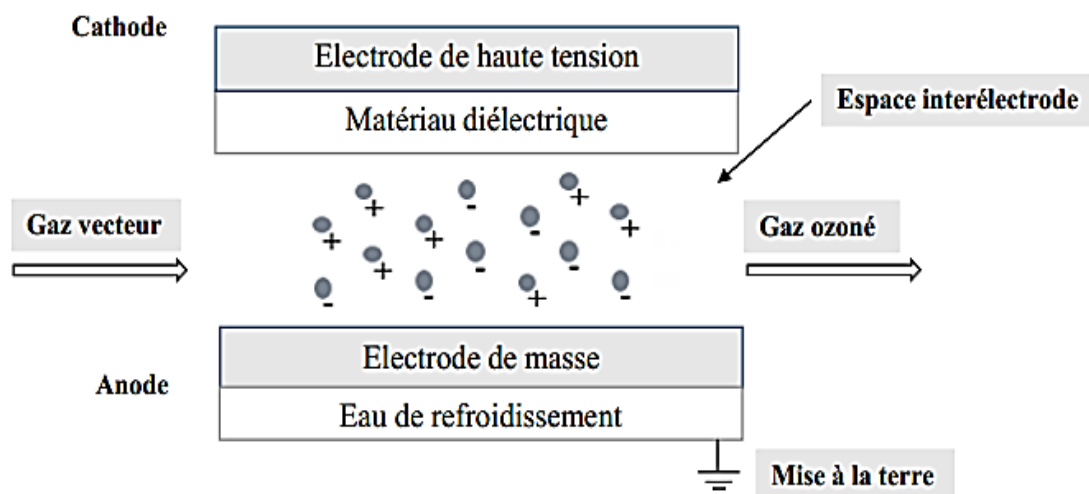


Figure II.2 : principe de production d'ozone par décharge couronne

On ne peut faire une liste complète des applications que l'ozone présente, car jour après jour on trouve de nouveaux domaines où l'utilisation de l'ozone résout les problèmes rencontrés dans l'industrie. Citons à titre d'exemples : La stérilisation et l'épuration de l'eau. Les traitements thérapeutiques. La décoloration des pigments, Déchets industriels, Désodorisation en général ...etc.

II.2.3 Les précipitateurs électrostatiques

Les précipitateurs électrostatiques (ESP) sont des installations qui enlèvent de fines particules en suspension dans le gaz, en les chargeant puis en les séparant du gaz à l'aide d'un champ électrique. Ils sont généralement utilisés pour les traitements des fumées industrielles constituées par des suspensions à forte concentration de poussières (de quelques centaines de milligramme à plusieurs dizaines de gramme par mètre cube de gaz) [44].

Les précipitateurs électrostatiques présentent un intérêt substantiel, parmi les différents domaines d'application des précipitateurs électrostatiques, on peut citer : Les cimenteries, les centrales thermiques et les installations de combustion. Actuellement ce dispositif est utilisé pour améliorer la visibilité dans un tunnel [45].

II.2.3.1 Principe de fonctionnement

La précipitation électrostatique met en œuvre la haute tension, en utilisant les forces d'un champ électrique comme forces séparatrices des particules du gaz chargées électriquement. Le principe c'est qu'une haute tension négative, suffisante pour produire la décharge couronne, est appliquée à l'électrode active du précipitateur électrostatique. Alors des charges négatives sont créées et les particules ciblées seront chargées négativement. Ces particules chargées sont attirées vers le collecteur (électrode mise à la terre) par la force électrostatique. Ainsi, ce procédé est utilisé dans la précipitation électrostatique des fumées dans le but de les assainir en les débarrassant des poussières qu'elles contiennent [46-47]. Bien que ces poussières sont porteuses de charges électriques sous l'action de frottement ou de l'ionisation du gaz porteur, soit par effet thermique, soit par effet des rayonnements naturels (rayons cosmiques, radioactivité terrestre), ces charges restent très faibles pour qu'un champ électrique puisse exercer sur les poussières une force utilisable. Une action efficace du champ exige que les poussières reçoivent, d'abord, une charge de signe unique aussi élevée que possible, celle-ci ne peut leur être communiquée que par une ionisation intense du gaz porteur [44].

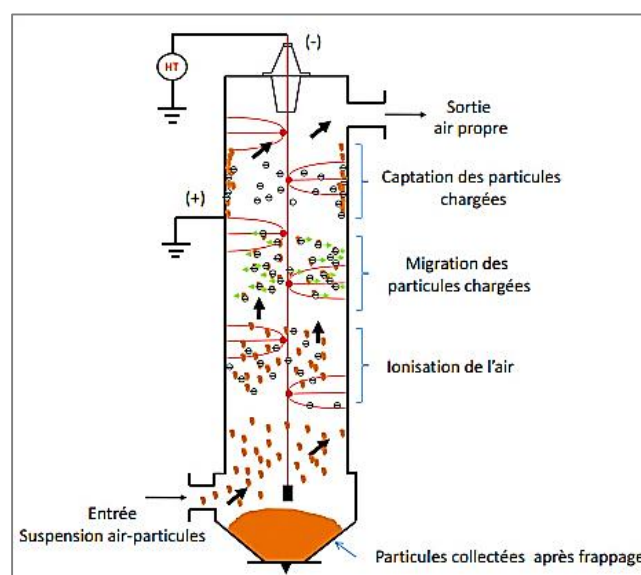


Figure II.3 : principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique

On distingue deux étapes durant le fonctionnement des précipitateurs électrostatique.

- ✓ La première est caractérisée par l'électrisation des particules en suspension dans le gaz (fumée) qui est basée sur la décharge couronne.
- ✓ La deuxième est caractérisée par la dérive de ces particules, sous l'action du champ électrique, vers l'électrode collectrice (mise à la terre).

Les poussières constituent à la surface du collecteur un dépôt, plus ou moins cohérent et adhérent, dû à l'attraction combinée de la force électrique, tant que les poussières conservent une charge électrique et la force mécanique due à l'état de surface ainsi qu'à la force d'attraction moléculaire [44].

La continuité du processus d'assainissement des fumées exige que les surfaces de dépôt soient libérées à des intervalles de temps réguliers. On a recours à des percussions ou à des vibrations pour récupérer des agrégats de poussières qui sont déposés sur la surface du collecteur [44-46].

II.2.4 Les électrets

Par analogie avec les aimants permanents (Magnets), le terme électret a été introduit en 1892 par Olivier Heaviside pour désigner les diélectriques à polarisation permanente. Ainsi l'électret produit un champ électrique sans aucune source externe. Ce n'est pas qu'en 1919 que Mototaro Eguchi a pu donner la première confirmation expérimentale, ou il réussit à fabriquer un électret par application d'un champ électrique à un échantillon de cire de Carnauba en cours de refroidissement depuis sa température de fusion. Les molécules polaires de cette cire, libres de s'orienter sous champs électrique au voisinage de fusion, restaient figées avec l'orientation imposée au retour à l'état solide, bien que le champ appliqué ait été supprimé. La polarisation rémanente était comprise typiquement entre 10^{-4} et 10^{-5} C.m⁻², et pouvait persister plusieurs années [48-49]. Un électret est défini comme un diélectrique qui porte une polarisation induite artificiellement. Cette polarisation est quasi permanente. C'est-à-dire que le temps de déclin est plus long que la durée d'utilisation de filtre. Elle est due à des charges électriques réelles sur la surface ou/est dans le volume du matériaux ou bien au dipôle orientes et figés dans le volume. Les électrets sont essentiellement des matériaux désordonnés tel que les polymères et les minéraux morphes [49].

Ils occupent une place de choix dans les nouvelles technologies. Les techniques de formation et caractérisation de ces matériaux se sont perfectionnées, leur utilisation est élargie aux systèmes micro-électromécanique (MEMS) et aux applications dans le domaine biomédical. Les électrets sont utilisés soit sous forme de films minces, soit sous forme de structure fibreuse et poreuse [46,49, 50-51].

II.2.4.1 Méthodes de formation d'électrets

Selon les modes de formation des électrets, ces derniers sont classés en deux familles : les électrets dipolaires et les électrets à charge d'espace. En effet, les charges électriques qui peuvent être créées et piégées dans un diélectrique pour former un électret sont deux catégories majeures. Elles sont les mono-charges appelées charge réelles, et les dipôles orientés appelés charges liées.

Un électret dipolaire est généralement un thermo-électret qui résulte de l'orientation de dipôles par application d'un champ électrique à une température élevée qui correspond à la température de fusion de ramollissement. Puis l'obtention de l'état orienté figé par trempe à température ambiante [52, 53, 54]. La figure illustre l'orientation des pôles avant et après la formation de l'électret.

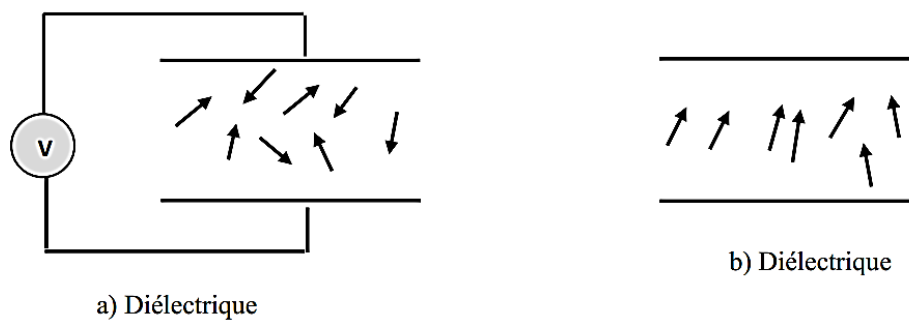


Figure II.4 : Electret dipolaire

Il existe plusieurs méthodes de formation des électrets à charge d'espace. La polarisation provient de charges de deux signes. Ces charges peuvent être obtenues par séparation d'hétérocarpes des électrodes et piégées dans le matériau et /ou injection d'homo-charges au niveau des électrodes lors de l'opération de polarisation. La polarisation peut également provenir d'un excès de charges apportées par d'autres processus tel que la décharge couronne, l'implantation électronique (canon d'électron), ou la triboélectricité (contact +frottement) [55].

La figure (II.5) résume les mécanismes physiques de base pouvant expliquer la présence de charge électrique dans un diélectrique situé entre deux électrodes opposées. Par suite nous allons charger des matériaux isolants par décharge couronne. Cette technique est utilisée pour charger les diélectriques en vue de la caractérisation de leur aptitude à garder l'état d'électrisation.

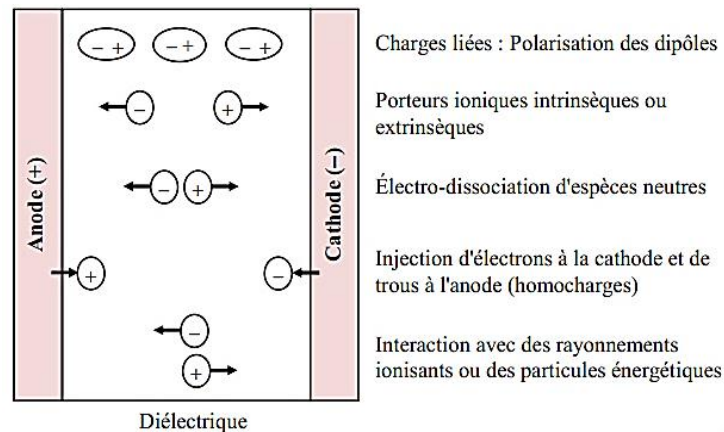


Figure II.5 : mécanisme de génération de charge électrique

II.2.4.2 Charge par décharge couronne

La charge par décharge couronne est adéquate pour la formation des électrets, qu'ils soient des films ou des matériaux fibreux. Cette méthode de charge est largement utilisée dans l'industrie où la formation des électrets est réalisée à la chaîne. Le procédé industriel est assez performant, il permet d'asservir le potentiel de surface des électrets afin de contrôler le niveau et la qualité du dépôt des charges électriques [46, 49, 53, 56-57]. Ce procédé de formation est basé sur la génération de décharge couronne en appliquant une tension assez élevée (dizaines de KV) à une électrode de faible rayon de courbure (centaines de micromètres) situé à une certaine distance (plusieurs centimètres) par rapport à un plan de masse. L'électrode active peut être une pointe, plusieurs pointes disposées en forme de peigne, ou un fil très fin.

Le champ électrique dans l'espace interélectrode est non uniforme, son intensité au voisinage de l'électrode active est assez élevée pour que l'air soit ionisé. Le diélectrique est posé sur le plan de masse. Sous l'action du champ électrique, il reçoit des charges de même polarité que l'électrode couronne. La figure (II.6) illustre de formation d'électret par décharge couronne négative.

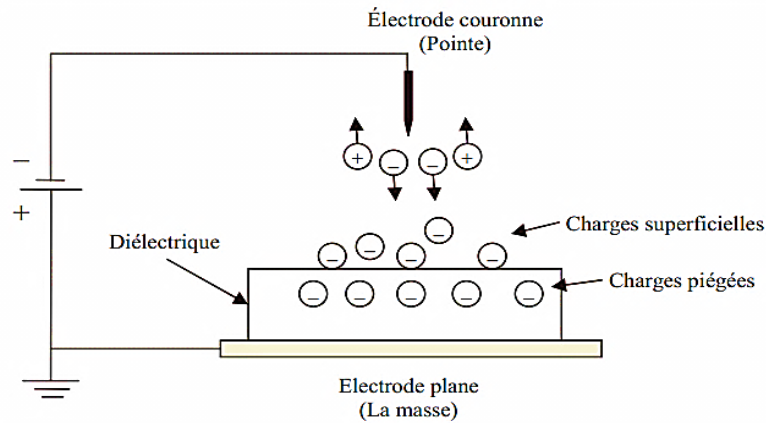


Figure II.6 : principe de formation d'électret par décharge couronne

Si la décharge couronne se produit à partir d'une électrode de polarité négative, dans l'air à pression atmosphérique et à une humidité relative comprise entre 40% à 60%, des ions négatifs seront formés tel que CO_3^- et O_2^- .

Une fois ces ions atteignent la surface libre du diélectrique, ils seront neutralisés en cédant leurs électrons et une couche d'électrons piégés en formée juste au-dessous de la surface libre du diélectrique.

Par contre, des ions positifs seront formés tel que $(H_2O)_nH^+$, NO^+ et NO_3^+ lorsque la polarité des électrodes couronne est positive. Ces ions seront neutralisés en acceptant des électrons lorsqu'ils atteignent le diélectrique, laissant ainsi une couche de trous piégés au-dessous de la surface libre du matériau [49,58].

Le contrôle du dépôt de charges par le dispositif primaire de la figure (II.7) est extrêmement difficile, voire impossible. L'insertion, entre le diélectrique et l'électrode couronne, d'une grille conductrice portée à un potentiel plus faible et de même polarité que le potentiel appliqué à l'électrode active permettra le contrôle du niveau du potentiel de surface et l'obtention d'un dépôt uniforme. Dans cette configuration d'électrode, appelé système *triode*, les charges, issues de l'ionisation de l'air sont accélérées de l'air sous l'action du champ électrique, passent à travers la grille, qui viennent se déposer sur la surface libre du diélectrique.

Le potentiel de surface du diélectrique croit jusqu'au niveau du potentiel de la grille. A partir de ce moment-là, le champ entre la grille et la surface du diélectrique est nul.

Les ions ne traversent plus la grille. Ainsi le potentiel de surface est limité par le potentiel de la grille. Il existe plusieurs dispositifs à triode pour la formation contrôlée d'électrets. La figure (II.7) résume ces dispositifs à triode de charge par décharge couronne.

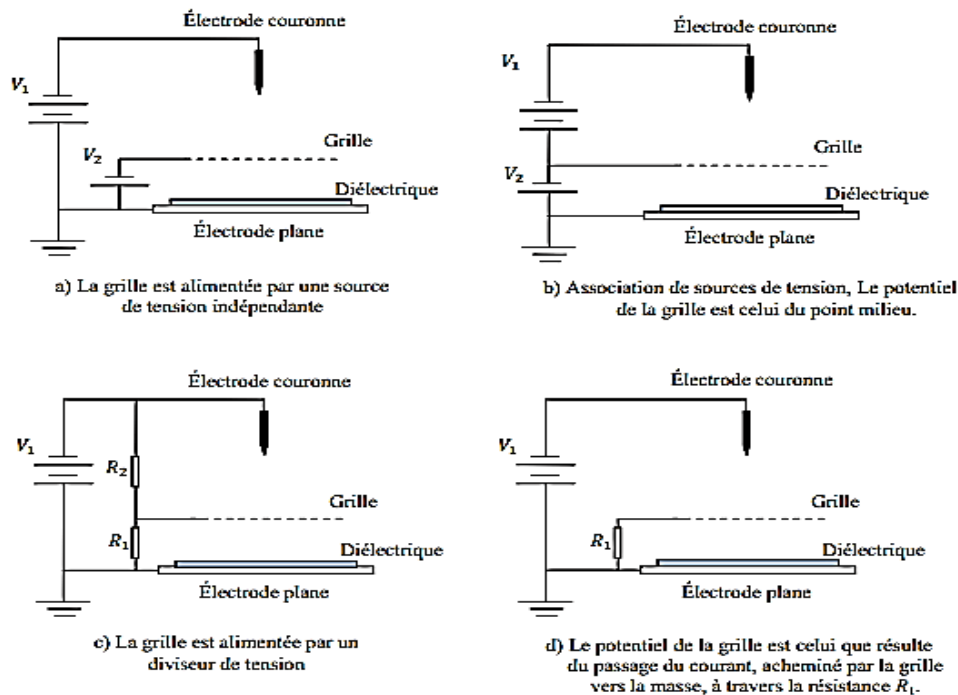


Figure II.7 : Dispositifs de charge couronne de type triode [59]

Ces ions (positifs ou négatifs selon la polarité de la pointe) peuvent se déposer sur une surface isolante placée à proximité. Il en résulte une densité superficielle de charge sur cette surface. Cette méthode de charge d'une surface est plus facile à contrôler et plus uniforme [52]. D'autres dispositifs de charge par effet couronne sont utilisés à la fois pour étudier le comportement des électrets dans des applications industrielles, à savoir le scorotron et le corotron. La figure (II.8) présente les configurations de ces deux dispositifs.

Dans le dispositif à scorotron, la décharge est plus stable par la présence du cylindre et les ions se diffusent d'avantage à travers la grille. Le niveau du potentiel de surface du diélectrique est limité par le potentiel de la grille et la surface de charge dépend des dimensions du cylindre. Dans le cas du dispositif à corotron, la grille est omise et le cylindre mis à la terre présente une fente, à travers laquelle les ions atteignent la surface du diélectrique.

Le contrôle du dépôt des charges et par l'ajustement du temps d'exposition du matériau à la décharge couronne. Ce dernier facteur est essentiel dans les applications industrielles où le diélectrique est souvent en mouvement.

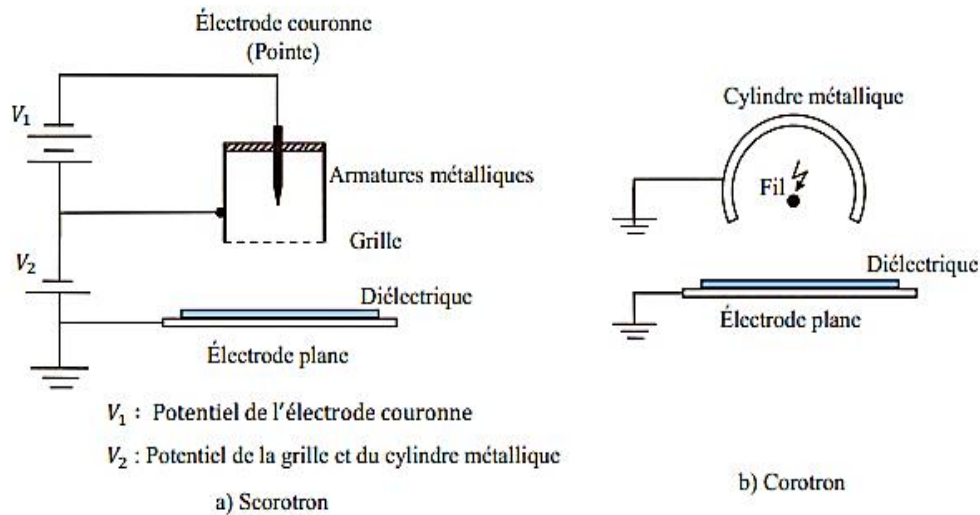


Figure II.8 : construction de base d'un scorotron et d'un corotron [59]

II.2.5 Le traitement de surface

Les polymères isolants synthétiques sont largement utilisés dans l'industrie électrique et ceci pour leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques. Dans beaucoup de cas ces polymères travaillent dans des environnements hostiles. Alors, leurs propriétés sont sujettes à des détériorations et un vieillissement prématuré.

Les décharges couronnes occupent une large place dans la recherche sur les applications industrielles de ces polymères. Aussi bien la charge des couches photosensibles et des particules du toner dans les photocopieurs, les imprimantes laser, la modification de l'hydrophobie des films en plastique et le conditionnement des filtres à air, entre autres, ont fait l'objet de divers travaux de recherche. Il est à signaler que le traitement des décharges couronne s'applique aussi bien aux surfaces polymériques qu'à celle en métal. Nous ne présentons dans ce qui suit que quelques résultats des travaux sur les polymères tant fibreux que sous forme de couches minces. Une étude de facteurs influents sur le déclin du potentiel de surface de films minces de polyéthylène téréphtalate (PET) a été initiée par Lazhar Herous et al.

Un champ raisonnablement uniforme peut être généré dans l'intervalle d'air entre la grille et la surface de parties : une partie pour la charge du film par décharge couronne continue, négative et une autre pour la mesure du potentiel. Les échantillons étaient chargés par exposition de leur surface libre à une décharge couronne. Celle-ci est générée par une électrode pointue située au-dessus d'un plan métallique mis à la terre. L'électrode active est connectée à une source de haute tension continue négative. Les décharges couronnes à pression atmosphérique sont exploitées pour traiter les films plastiques. Elle modifie leurs propriétés d'adhésion ou leur mouillabilité par l'intermédiaire des radicaux libres créés en surface, sous l'action des ions et des espèces actives engendrées dans les streamers de la décharge couronne. Les réacteurs sont donc les systèmes à enrouleurs très rapides et en grande largeurs (typiquement 3m) où le film à traiter passe devant une rangée de pointes [60].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les différentes applications de la décharge couronne et son utilisation dans l'industrie en général, ainsi nous avons parlé sur son rôle en expliquant le principe de fonctionnement et technique de chaque procédé.

Chapitre III
Partie expérimentale

III.1 Introduction

Cette partie du mémoire sera réservée à la démarche expérimentale en décrivant le matériel utilisé en passant par la description du poste de charge où l'ensemble des mesures électrostatiques ont été réalisées, le mode opératoire, la technique de mesure par une sonde à condensateur vibrant. Enfin, les grilles employées dans le but d'établir leurs influences sur la distribution du potentiel de surface des échantillons.

Les précautions sont prises afin de manipuler dans des conditions favorables pour éviter d'entacher les résultats d'erreurs systématiques.

III.2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental sur lequel l'ensemble des mesures électrostatiques sont réalisées est représenté sur la figure (III.1) où l'électrode active qui est un fil mince en Nickel de diamètre de 0.2 mm, utilisé pour tous les essais est tendu par des supports isolants en plexiglas. Ce fil est relié à la source de haute tension continue variable, délivrant une tension allant de ± 0 à ± 20 kV pour deux types de polarités. La source de haute tension, quant à elle, est reliée directement au réseau alternatif de (230 V, 50 Hz) et à la masse de l'installation du laboratoire.

La décharge générée étant de type couronne, le dispositif sur la figure (III.1), est constitué du fil placé à une distance de 5 cm du plan en acier inoxydable relié à la terre. Le voltmètre électrostatique (Trek 341 B) muni d'une sonde à condensateur vibrant pour prélever le potentiel de surface, avec une étendue de mesure de 3 kV précisément 3150 V.

La sonde est fixée avec un support en bois, placée à une distance d'un à deux millimètres de l'échantillon polymère en film. Cette position de la sonde permet d'avoir une bonne précision lors du balayage. Le plan en acier inoxydable peut glisser sur des plaques en plexiglas isolant, il est gradué en cm. La position de l'électrode active est fixe par rapport au positionnement de l'échantillon en film en mode de charge, ainsi le fil est centré au milieu de l'échantillon et cela dans l'objectif de vérifier la symétrie de la distribution du potentiel de surface des films chargés.

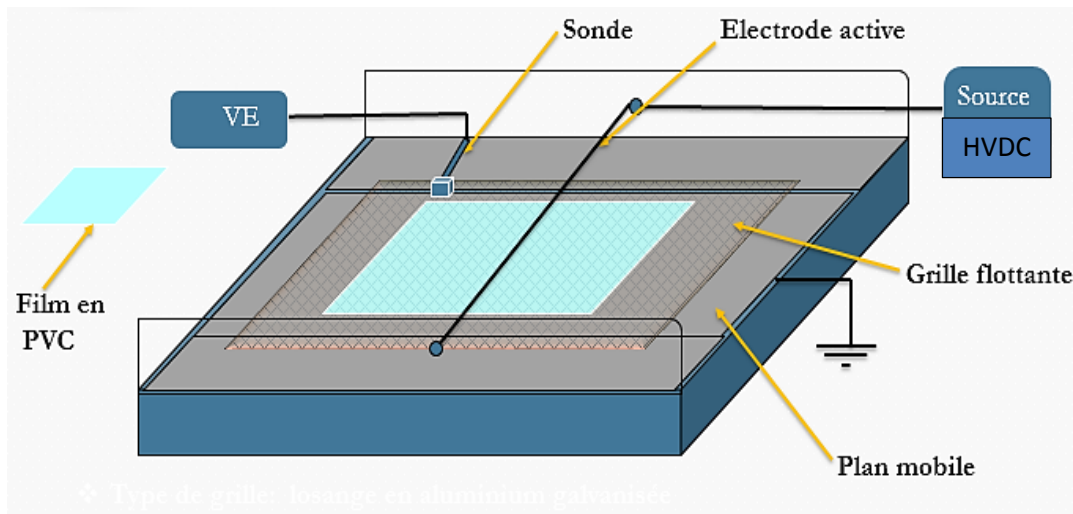


Figure III.1 : Schéma représentatif du dispositif de mesure

Afin de déterminer la distribution du potentiel de surface sur les échantillons, le fil (électrode de haute tension) est fixé à une distance de 5 cm du plan (électrode de masse).

III.2.1 Mode opératoire

A l'aide d'une sonde à condensateur vibrant qui permet par balayage sur toute la longueur du film, suivant un pas de 0.5cm dans la région du champ fort au voisinage de l'échantillon, en-dessous du fil de 0 à 6 cm. Et avec un pas de 1 dans les régions du champ faible, aux extrémités de l'échantillon cela de 6 à 14 cm.

Pour l'angle de distribution, $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{14}{5}\right) = 70.38^\circ$. Ainsi nous avons noté le potentiel à la surface du film (posé sur le plan), affiché à l'écran du voltmètre électrostatique sur une feuille de mesure.

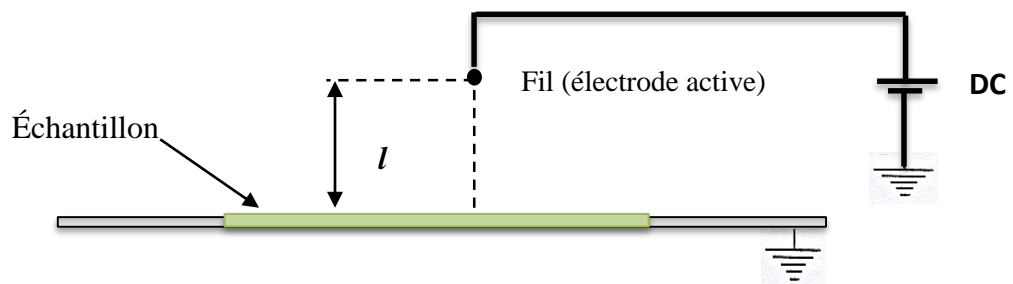


Figure III.2 : schéma du dispositif couronne en géométrie fil-plan

La charge des films par la décharge couronne se fait selon un temps prédéterminé et la mesure du potentiel est répétée plusieurs fois pour chaque essai et nous avons pris les résultats là où le dépôt de charge sur les échantillons est reproductible. Les résultats sont exposés dans le chapitre IV.

Le temps de charge varie selon l'objectif de l'essai et prend des valeurs de : 5s à 90s. Chaque échantillon est utilisé une seule fois, pour la charge et la mesure, dans les mêmes conditions. Dans chaque série d'essais, la température du laboratoire est prélevée. Le seuil de la décharge, étant dépendant des conditions atmosphérique (température, pression, humidité densité de l'air), est à chaque fois noté et précisé.

Pour travailler dans les mêmes conditions atmosphériques, les essais sont effectués dans la même journée, et le lancement d'une série d'essais ne s'arrête que lorsque la manipulation s'achève dans les mêmes conditions.

III.3 Techniques de mesures des potentiels de surface

III.3.1 Sonde à condensateur vibrant

La sonde à condensateur vibrant est aussi connue sous le nom de la sonde capacitive de Kelvin. Elle est très utilisée pour la caractérisation non destructive des électrets par la mesure sans contact du potentiel de surface à long terme. Cette sonde à courant porteur alternatif permet de contourner les dérives de la sonde à induction. En effet, il est possible de transformer au préalable les tensions ou courants continus que l'on veut mesurer en tensions alternatives de façon à pouvoir utiliser des amplificateurs ordinaires à couplage par capacité ou par induction qui sont exempts de dérive. Le condensateur de conversion peut en principe être du type tournant ou du type vibrant.

La sonde à condensateur vibrant offre une alternative attractive, malgré le rendement de conversion obtenu est faible, en raison de l'absence d'usure et d'entretien. Dans le condensateur vibrant, il n'y a plus besoin de contact glissant avec l'armature mobile. Une sonde métallique vibre à l'aide d'un oscillateur mécanique au-dessus de la surface chargée d'un échantillon, où les déplacements de la plaque métallique sont perpendiculaires au champ électrique incident de la surface chargée. La figure suivante illustre ce principe de modulation :

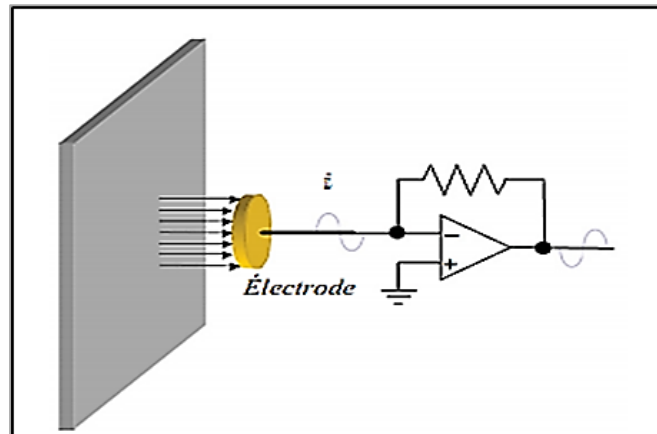


Figure III.3 : Principe de modulation par variation de capacité

Le signal détecté est l'intensité de courant électrique i induit par la vibration de la sonde dans le champ électrique créé par la différence du potentiel de surface V_s entre la sonde et l'échantillon.

$$i = C \frac{dV_s}{dt} + V_s \frac{dC}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Où C : est la capacité du condensateur formé par la sonde et l'échantillon. Pour une modulation sinusoïdale, cette capacité est exprimée par la relation(III.2), où C_0 est la capacité moyenne et C_1 est l'amplitude des variations.

$$C = C_0 + C_1 \sin(\omega t) \quad (\text{III.2})$$

Pour une différence du potentiel de surface V_s entre la sonde et l'échantillon constant, l'expression (III.1) du courant se réduit à :

$$i = V_s \frac{dC}{dt} \quad (\text{III.3})$$

La mesure automatique de la différence du potentiel de surface V_s , est obtenue par ajustement du courant i à zéro, à l'aide d'un servomécanisme électronique pour l'annulation du champ électrostatique.

Ceci nécessite que le potentiel de la sonde V_m soit au même potentiel de surface de l'échantillon car le courant n'est pas seulement fonction de l'amplitude et de la fréquence des vibrations, mais il dépend de la différence de potentiel ($V_s - V_m$).

$$i = (V_s - V_m) \frac{dC}{dt} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Considérons les deux situations de la figure ci-dessous, où une sonde à condensateur vibrant est utilisée. Dans la situation (a) l'électrode cible est reliée à un potentiel V_s , ainsi le signal généré par vibration de la sonde est désigné par V_1 dont le sens est choisi arbitrairement. Par contre, dans la situation (b) où la sonde qui est sous un potentiel V_m , le signal généré est de sens opposé que celui de la situation (a). Lorsque la mesure du potentiel de surface d'une cible est effectuée à l'aide de cette sonde, la contre réaction du servomécanisme électronique asservi le potentiel de la sonde V_m au potentiel de surface de la cible V_s , ainsi le signal de sortie est proche de zéro du fait que le champ électrique \vec{E} résultant est nul [59].

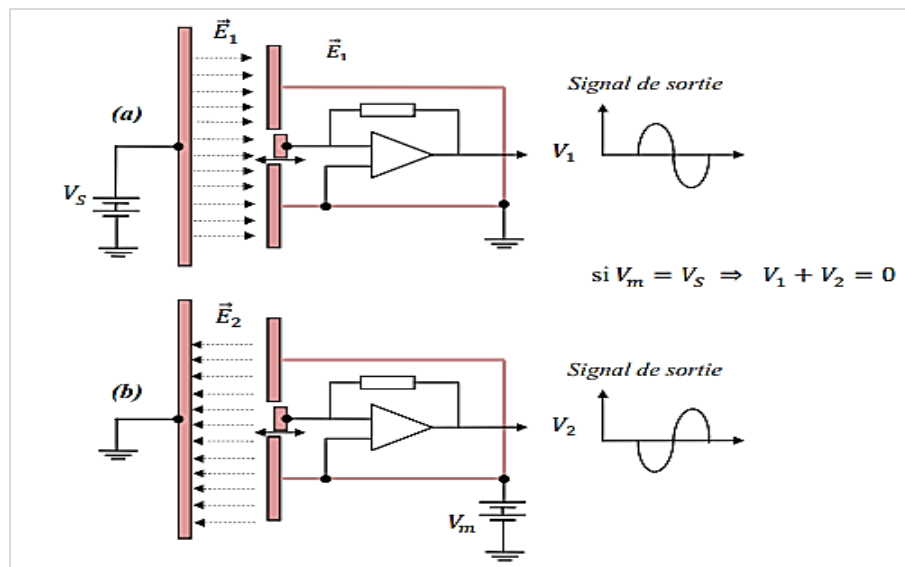


Figure III.4 : Principe de mesure du potentiel de surface à l'aide de la sonde à Condensateur vibrant [59]

III.4 La grille métallique

Dans notre étude expérimentale on a utilisé deux grilles de dimension différente. Ce sont des grilles en aluminium galvanisé l'une est de forme carré de $250 \times 250 \text{ mm}^2$ l'autre est de forme rectangulaire de $450 \times 320 \text{ mm}^2$ muni d'un fil de tresse de diamètre de 1.18 mm, les intersections sont des losanges dont la surface est de $6.4 \times 4 \text{ mm}^2$ figure (III.5).

La grille est insérée entre le fil et l'échantillon. Elle est mise parallèlement au plan, elle est en acier inoxydable, mise à la terre.

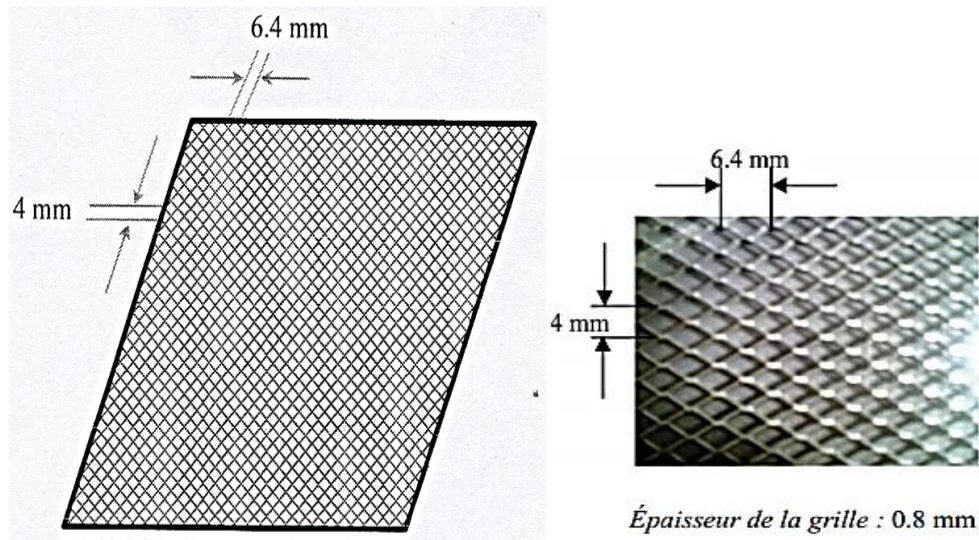


Figure III.5 : schéma et image représentatifs de la grille

III.5 Insertion de la grille

Dans le but d'établir l'influence de la grille isolée, sur la distribution du potentiel de surface des échantillons en Polychlorure de vinyle « *PVC* ». Nous avons opté pour insérer la grille à trois positions différentes de l'électrode active (fil). La distance fil-grille, notée « **d** », prend les valeurs : $d=1$, $d=2$, $d=3$ cm. La figure (III.6)

La grille est intercalée sans contact entre le fil et l'échantillon pour permettre de créer un potentiel flottant. La variation de la distance fil-grille se fait par l'intermédiaire de supports en PVC, pour isoler la grille du plan.

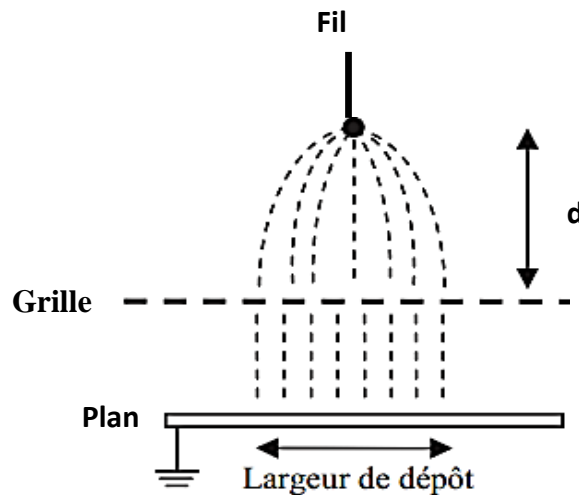


Figure III.6 : schéma représentatif de l'insertion de la grille

III.6 Matériaux chargé

Pour évaluer l'état de charge des matériaux chargés par décharge couronne négative en mesurant les potentiels de surface, les essais ont été réalisés sur des échantillons en polymères présentés sous forme de films [polychlorure de vinyle (PVC)], de taille A4 (210x297) mm² et une épaisseur de 0.3cm millimètre. Ils sont de structure amorphe, mais il arrive que, localement, sur de courts segments de chaînes le PVC s'organise en phase cristalline, mais le taux de cristallinité ne dépasse jamais 10 à 15 %. La masse volumique du PVC est de 1,38 g/cm³, transparent et relativement perméable à la vapeur d'eau, il offre une excellente rigidité jusqu'au voisinage de sa température de transition vitreuse. Ils offrent une excellente résistance à l'abrasion. Ils sont fragiles aux chocs à basses températures. L'addition de plastifiants diminue la température de transition vitreuse, ce qui permet de proposer un PVC souple à température ambiante. Leurs formule chimique est :

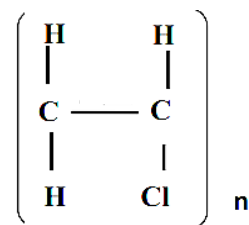


Figure III.7 : Chlorure de vinyle

Tableau III.1 : Quelques propriétés du polychlorure de vinyle (PVC).

Température d'emploi en régime continue (°C)	- 30 à + 80 °C
Température de ramollissement (°C)	120 °C
Permittivité relative à 50 HZ	5 à 9
Facteur de perte diélectrique à 1 MHZ	3.3 à 4.5
Rigidité diélectrique (kV/mm)	30 à 60
Résistance superficielle (Ω .cm)	10^{10}
Résistance transversale (Ω .cm)	10^{16}
Absorption d'eau (%)	1
Résistance aux radiations (rad)	$8 \cdot 10^7$
Résistance à l'attraction (MPa)	15

III.7 Conclusion

Cette partie du mémoire décrit la démarche expérimentale entreprise et le matériel que nous avons utilisé durant les essais. La fiabilité des résultats repose sur la maîtrise de chaque procédé et technique utilisés. Le prochain chapitre est partagé en deux parties distinctes l'une réservée à l'étude expérimentale et l'autre à la présentation des différents résultats obtenus.

Chapitre IV
Résultats et interprétations

IV.1 Introduction

Le but de notre travail est d'étudier la distribution du potentiel de surface sur des films en PVC dans une configuration fil-plan chargés avec décharge couronne négative. Pour se faire, nous avons effectué plusieurs essais en abordant le maximum d'aspects pouvant nous renseigner sur l'état de charge des films en PVC.

Nous avons ainsi, organisé ce travail expérimental en quatre parties. La première consiste en caractérisation du phénomène de décharge couronne en configuration d'électrode fil-plan par le relevé des caractéristiques courant-tension pour les deux types de polarités. Et pour différentes dispositions de la grille.

La deuxième partie concerne la distribution du potentiel de surface sur des films en PVC, avec les deux types de polarités et leurs approximation par la loi de Warburg dite loi en (\cos^n). Pour mieux analyser les résultats en comparaisant la loi de Warburg, nous avons changé le mode opératoire en mesurant cette fois-ci en amont du fil pour balayer une distance de 14cm.

La troisième partie du travail rassemble la distribution du potentiel de surface en fonction de la distance fil-grille pour un temps de charge fixe de 1 minute, nous avons choisie pour cela trois position de la grille pour les distances fil-grille : $d=1\text{cm}$, $d=2\text{cm}$, $d=3\text{cm}$. Dans le but de voir l'influence de la grille sur la répartition du potentiel de surface, nous avons comparé la distribution a $d=2\text{cm}$ avec la loi de Warburg.

La quatrième partie, le dernier volet du travail, est consacré à la caractérisation de la distribution du potentiel de surface dans un système avec une grille fixe et dans un système sans grille avec variation du temps de charge de la décharge couronne.

Les données de mesures sont traitées à l'aide du logiciel Origine.

IV.2 Caractérisation de la décharge couronne

IV.2.1 Caractéristiques courant-tension en géométrie fil-plan

Dans le but de caractériser notre dispositif expérimental et afin d'avoir une idée sur les tensions seuils de la décharge couronne dans les différentes configurations utilisées, avec et sans grille pour les trois positions fil-grille, nous présenterons dans ce qui suit l'aspect des caractéristiques courant-tension avec un graphe comparatif entre les quatre cas envisagés. Durant toutes les essaies, la distance entre le fil et le plan est fixée à $l=5\text{cm}$.

On prélève d'abord la caractéristique courant-tension du système en mesurant la tension récoltée aux bornes d'une résistance R de 138 k Ω reliant le plan à la masse.

Les mesures de tension ont été effectuées par un millivoltmètre de crête et les tensions appliquées à l'électrode active ne peuvent dépasser la capacité de la source (0 à 20 kV). Le pas de la tension appliquée est de 0.5 kV.

Nous avons d'abord prélevé la caractéristique courant-tension du système sans grille, figure (IV.1) et on a prélevé la caractéristique courant-tension avec un graphe comparatif entre les deux types de polarités, positive et négative, figure (IV.2), puis nous avons inséré la grille. À l'aide d'un support, nous avons pu ajouter la distance entre la grille et le fil à : d=1cm, 2cm, 3cm. La figure (IV.3) rassemble les quatre caractéristiques et résume ainsi les séries de mesures.

Cette manipulation nous a permis à la fois de prélever la caractéristique courant-tension de la décharge qui nous permettra d'évaluer la décharge couronne, à la fois dans une configuration fil-plan et dans une configuration en présence d'une grille métallique dans les trois hauteurs envisagés de l'électrode de haute tension.

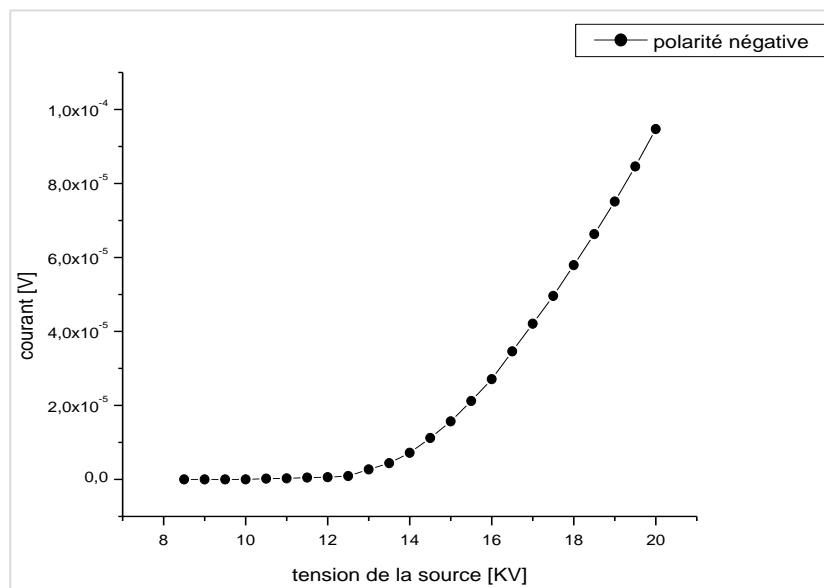


Figure IV.1 : Caractéristique courant-tension $I=f(V)$ en polarité négative, sans grille

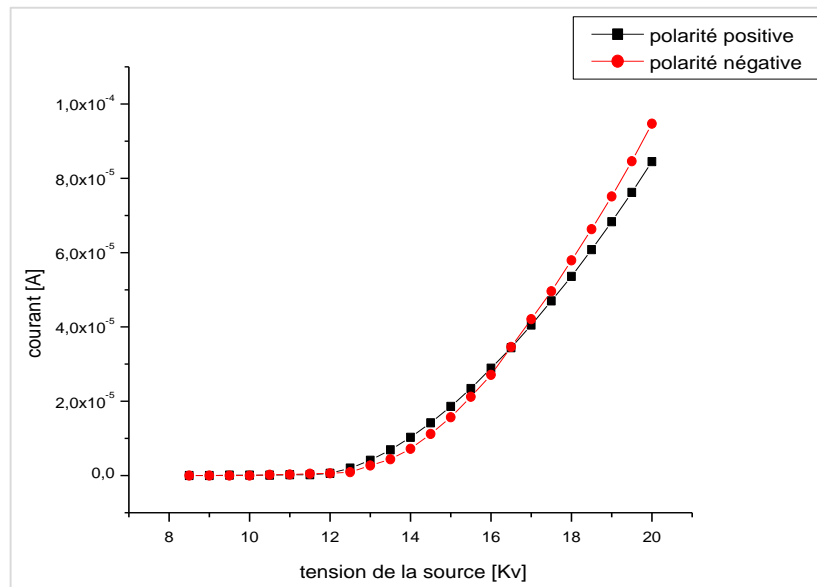


Figure IV.2 : Caractéristique courant-tension $I=f(V)$ sans grille

VI.2.2 Caractéristique courant-tension avec variation de la distance de la grille

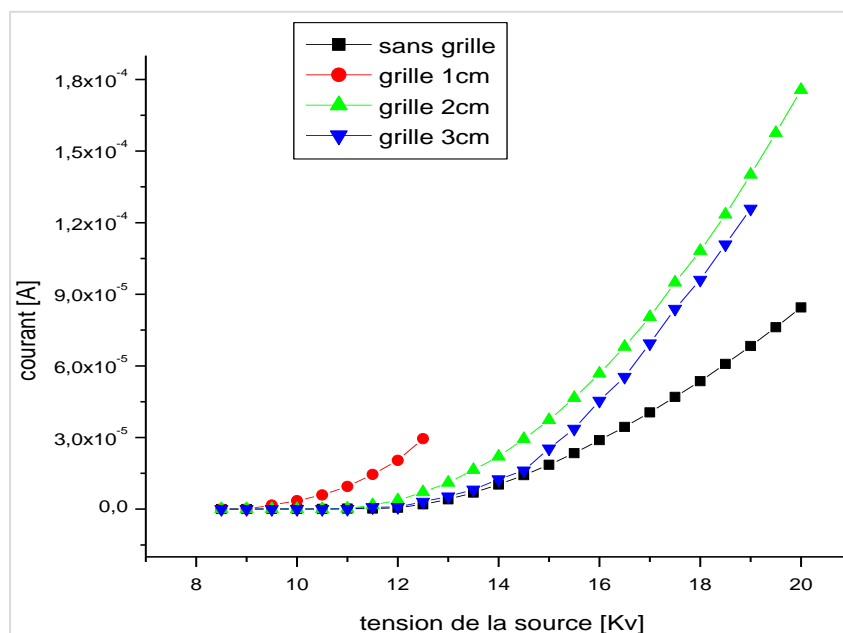


Figure IV.3 : Caractéristique courant-tension $I=f(V)$ pour les distances de la grille $d=1\text{cm}$, 2cm , 3cm en polarité négative, $t=1\text{min}$

L'évaluation des résultats obtenus voire l'apparition de la tension seuil de la décharge couronne dans les deux systèmes avec grille dans les trois distances $d=1\text{cm}$, 2cm , 3cm et sans grille, montrent que la variation de la distance de la grille impose un décalage de la tension seuil

À chaque fois qu'on se rapproche de l'électrode active (fil) la tension seuil diminue, avec une augmentation de 1 kV entre les trois distances de la grille et l'électrode de haute tension.

À chaque fois que la grille se rapproche du fil ($d=1\text{cm}$) où elle s'éloigne ($d=3\text{cm}$) de l'électrode active pour se rapprocher du plan, le seuil de la décharge n'est pas atteint. En d'autre terme, pour une distance $d=2\text{cm}$ de l'électrode active à $d=3\text{cm}$ du plan de masse, nous avons observé que la caractéristique courant-tension est la même, que dans un système sans grille ou avec grille. Concernant les caractéristiques $I=f(V)$ pour les trois niveaux de la grille et pour le système sans grille dans les deux types de polarités, figure (IV.2), $I=f(V)$ suit la loi quadratique de Townsend $I=f(V^2)$. Comme il a été précité, la différence qu'impose la présence de la grille est le décalage de la tension seuil, ceci est dû au potentiel flottant que porte la grille, une fois que la tension est établie entre l'électrode active et le plan de masse, cette barrière électrostatique impose un autre régime à la décharge en modifiant implicitement la configuration fil-plan, cette ensemble peut être assimilé à une configuration d'électrode définie par deux plans. Ce qui traduit que, la grille joue le rôle d'une électrode active avec un potentiel repartie sur une plus grande surface.

IV.3 Distribution de potentiel de surface sur des films en PVC

IV. 3.1 Distribution en polarité positive

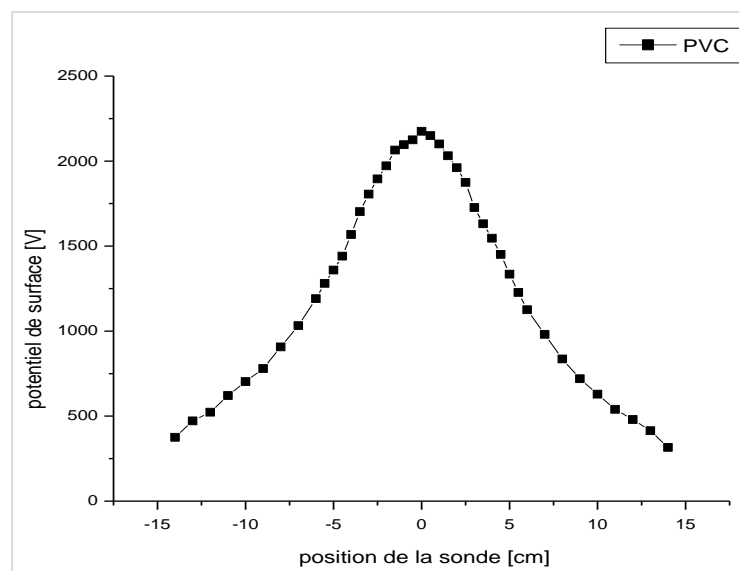


Figure IV.4 : Evolution du potentiel de surface pour un échantillon de PVC, $t= 1$ min, $U=13$ kV, polarité positive, sans grille

On constate que le potentiel de surface des films en PVC en polarité positive à une distribution symétrique par rapport à la position du fil (électrode active), placé au centre de l'échantillon.

Cette distribution évolue selon la loi de Warburg dite la loi en (\cos^n) , comme le montre la figure (IV.5). Les échantillons de PVC emmagasinent une quantité de charge considérable, ceci se manifeste à travers le potentiel de surface mesuré.

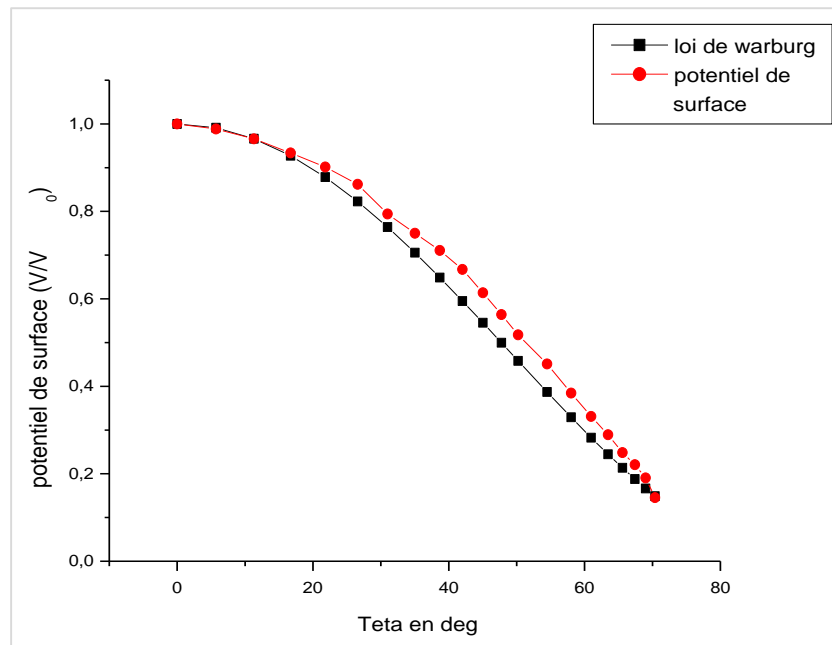


Figure IV.5 : Evolution du potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité positive $l=5\text{cm}$, $U=13\text{ kV}$, échantillon en PVC, $n=1.75$, $t=1\text{min}$

On remarque que pour un angle de distribution allant jusqu'à 70° le potentiel de surface présente une distribution homogène, elle s'accorde parfaitement avec la loi en (\cos^n) .

IV.3.2 Distribution en polarité négative

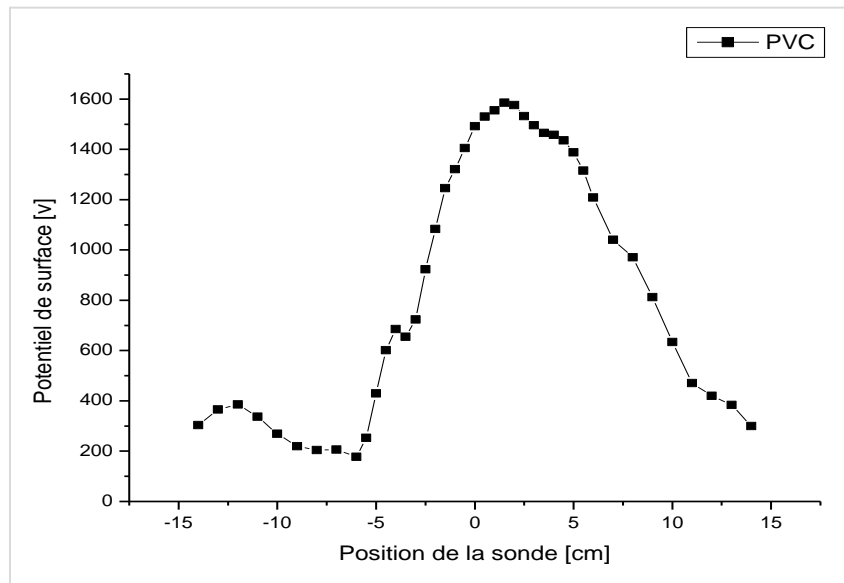


Figure IV.6 : Evolution du potentiel de surface pour un échantillon en PVC, $t = 1$ min, $U = 13$ kV, polarité négative, sans grille

En polarité négative comme le montre la figure (IV.6), on constate que la distribution du potentiel de surface est dissymétrique par rapport à la position de l'électrode active au centre de l'échantillon de films en PVC. Ceci illustre que cette distribution en polarité négative ne répond pas à l'évolution du potentiel de surface selon la loi de Warburg, figure (IV.7).

A travers la figure au-dessus on a remarqué que même si le champ est intense au centre de l'échantillon. La valeur crête du potentiel de surface la plus élevée obtenue lors du balayage sur les échantillons de PVC, se situe au-delà de zéros de la position de la sonde, ce qui nous renseigne sur le processus de dépôt de charge en polarité négative.

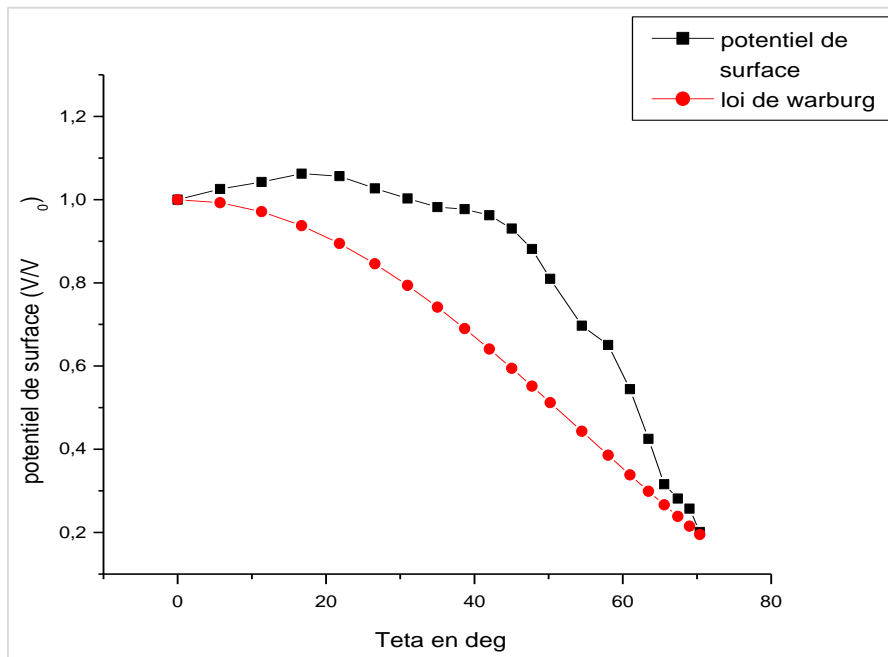


Figure IV.7 : Evolution du potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité négative $l=5\text{cm}$, $U=13\text{ Kv}$, échantillon en PVC, $n=1.5$, $t=1\text{min}$.

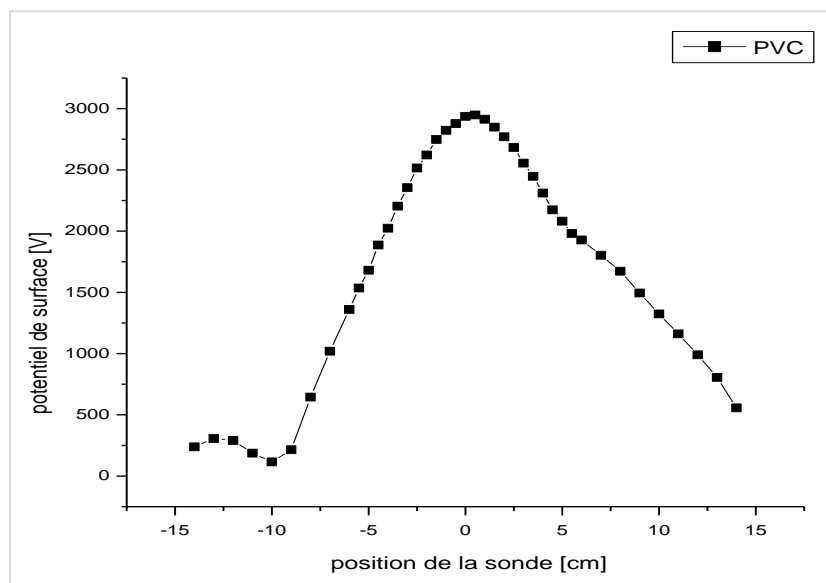


Figure IV.8 : Evolution du potentiel de surface pour un échantillon en PVC, $t= 1\text{ min}$, $U=14\text{ kV}$, polarité négative, sans grille

On a augmenté la tension de la source a 14 kV et on a maintenu le temps de charge à 1min de telle sorte qu'on ne dépasse pas l'étendu de mesure de la sonde à condensateur vibrant lors du balayage sur les échantillons de PVC, évaluée précisément à 3150V.

La figure (IV.8), montre que les potentiels de surface sont conséquents, cela démontre que, à chaque fois que la tension délivrée par la source est élevée, le dépôt de charge sur les échantillons est considérable, voir les potentiels de surface des films. Cependant, encore une fois la distribution est dissymétrique, elle ne suit pas la loi de Warburg. Figure (IV.9)

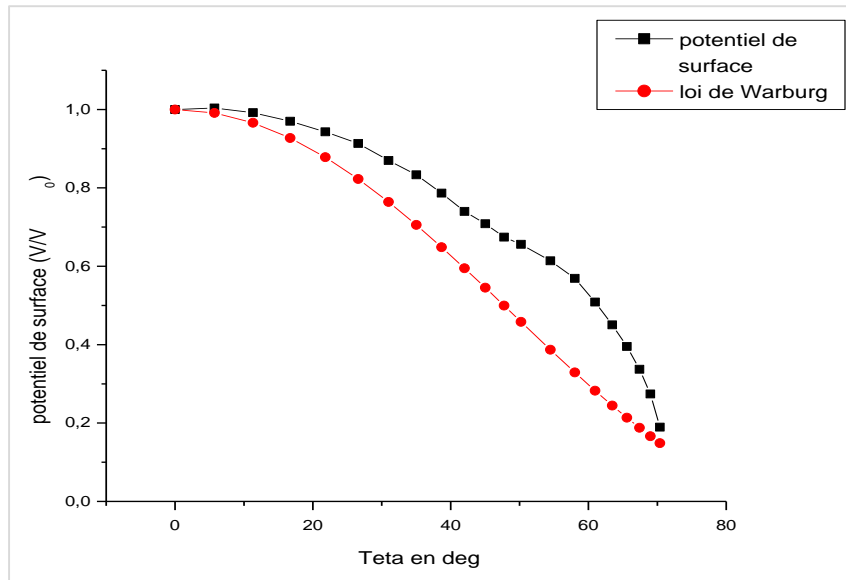


Figure IV.9 : Evolution du potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité négative $l=5\text{cm}$, $U=14\text{ kV}$, échantillon en PVC, $n=1,75$, $t=1\text{ min}$

VI.3.3 Comparaison entre les deux distributions polarités positive et négative

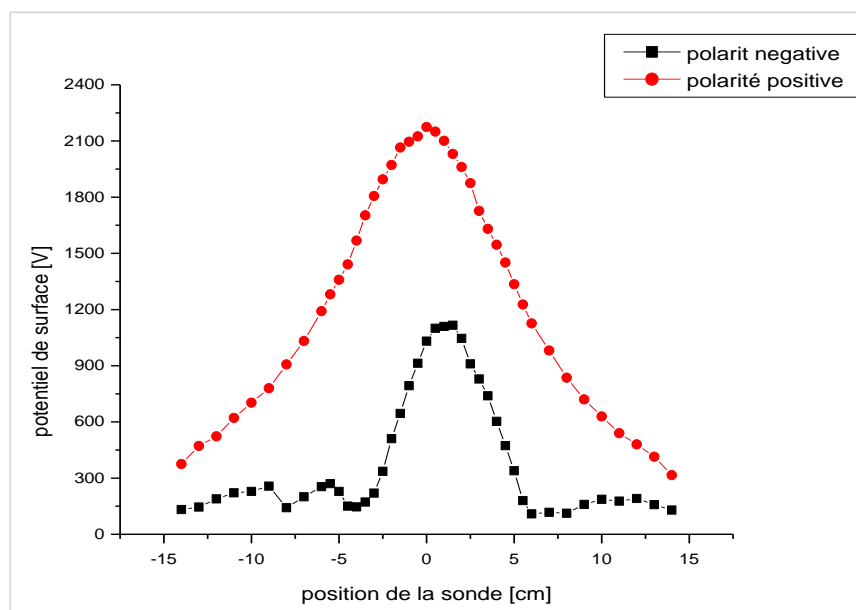


Figure IV.10 : Comparaison entre la distribution du potentiel de surface en polarité positive et négative (PVC), sans grille, $U= 13\text{ kV}$

A travers la figure (IV.10), qui rassemble les deux distributions à la fois dans les deux types de polarités, positive et négative, on remarque la symétrie de distribution de charge en polarité positive, ce qu'est le contraire en polarité négative.

Les processus de dépôt de charge en polarité positive et négative manifeste une différence accrue, la décharge en polarité positive est beaucoup plus sévère comme le montre la figure ci-dessus. Concernant la distribution du potentiel de surface, elle est dissymétrique dans le cas d'une décharge négative, comme il a été précité bien avant, il ne suit pas la loi de Warburg.

Cependant, la nature vitreuse, amorphe, ou cristalline est aussi importante dans la modélisation de la surface du matériau, car celui-ci présente avant même la charge par décharge couronne un potentiel de surface initial, ce dernier peut augmenter ou diminuer le potentiel de surface par la neutralisation des charge reçus par le courant de la décharge.

IV.4 Caractérisations de la distribution du potentiel de surface pour un système avec et sans grille a des temps variables.

IV.4.1 Variation de la distance de la grille pour un temps de charge fixe

En insérant la grille, pour des distances fil-grille $d=1\text{cm}$, 2cm , 3cm , entre le fil et l'échantillon, nous avons effectué une série de mesure du potentiel de surface après des temps de charge de 1min. Notons que pour une distance $d=3\text{cm}$ on a utilisé la grille de forme carré de 250×250 et que l'échantillon est déposé sur le plan gradué de -14 à 14 cm d'une manière à centrer le fil (position 0).

La sonde de mesure, retirée pendant la charge, est placée à la position -14 à une hauteur de 1mm du film en PVC. Le balayage spatial de la sonde de mesure sur le film se fait manuellement par le glissement du plan par rapport au centre de la sonde en faisant une course de 28 cm. La tension de la source est fixée à 13 kV, il est à noter que la tension de 13 kV est atteint après un temps de montée égale à 2s , en d'autre terme l'établissement de la tension ne se fait pas instantanément.

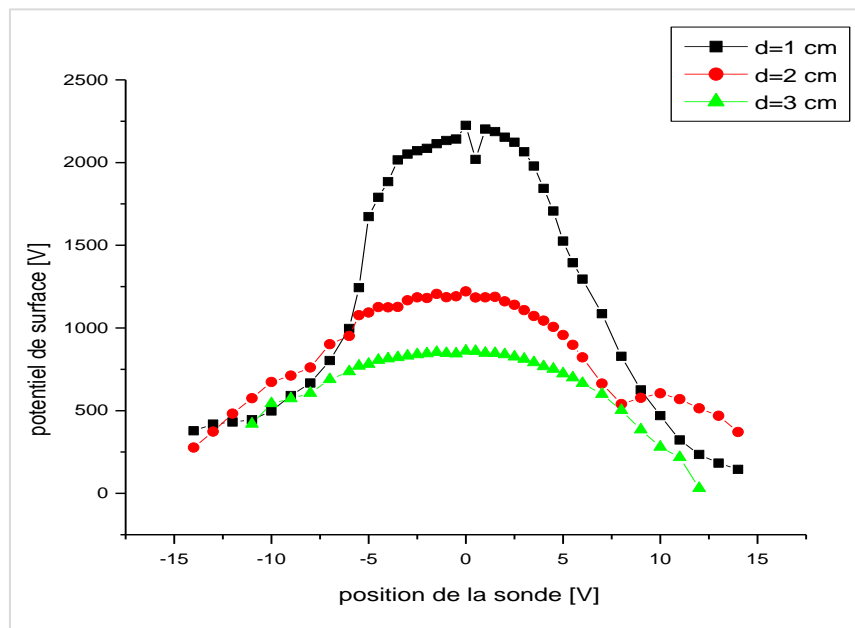


Figure IV.11 : Evolution du potentiel de surface du PVC pour différentes position de la grille $d= 1, 2, 3$ cm, $U= 13$ kV, polarité négative, $t=1$ min.

Pour une distance fil-grille de 3cm, on constate que le film se charge au fur et à mesure qu'on se rapproche la grille du fil c'est-à-dire (< 3 cm). Une charge maximale est constatée au maximum de la distance fil-grille soit au voisinage du plan qui s'établi à 1 cm.

A travers la figure (IV.11) on a remarqué que le maximum du potentiel correspond au centre de l'échantillon soit à la position sous le fil à ($x=0$), ceci peut être expliqué par le fait que les lignes de champ sont quasiment perpendiculaires sous le fil et ont tendance à se courber pour parcourir une plus grande distance loin du fil.

L'espace interélectrode est scindé en deux régions : une région de champ fort et une région de champ faible.

On constate que la distribution du potentiel avec la grille présente une certaine dissymétrie, donc l'insertion de la grille sert à augmenter le potentiel de surface des films.

Ce qui confirme que la distribution ne suit pas la loi établit par Warburg, comme le montre la figure (IV.12) qui suit.

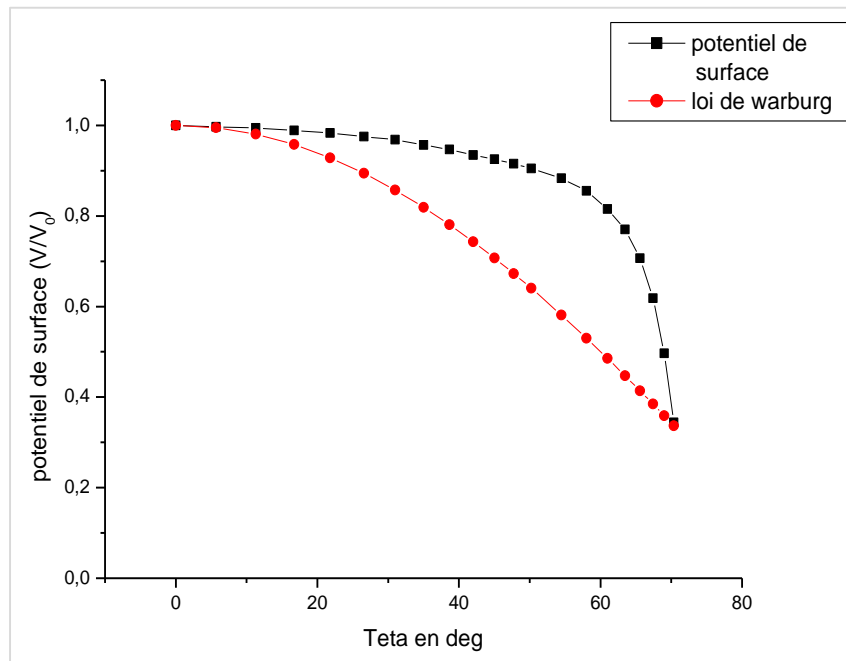


Figure IV.12 : Evolution de potentiel de surface comparé à la loi de Warburg pour une polarité négative avec grille d=2cm, U=13kV, échantillon en PVC, n=1, t=1min

IV.4.2 Variation du temps de charge pour une position fil-grille fixe

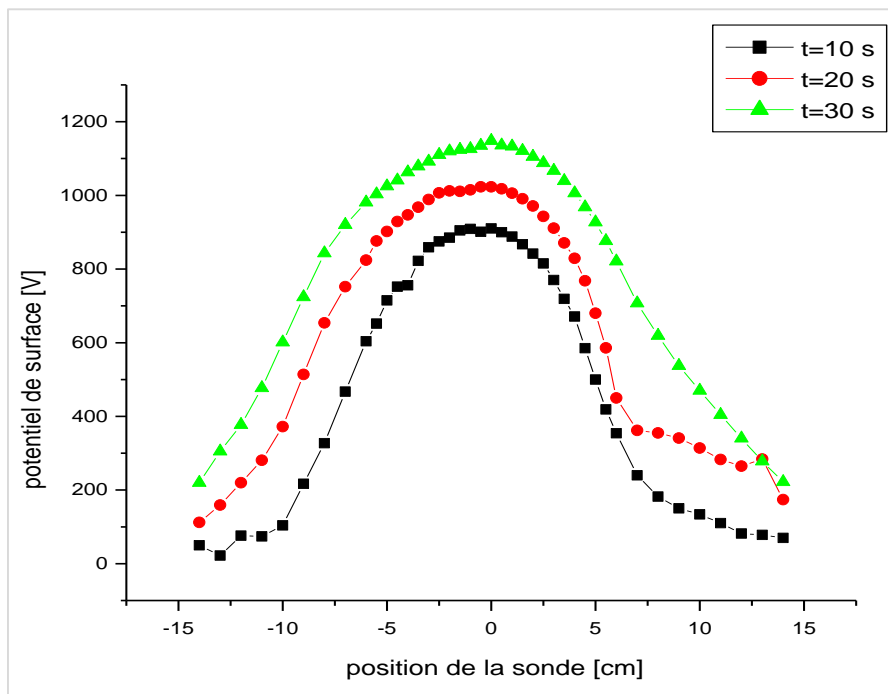


Figure IV.13 : Evolution du potentiel de surface pour différents temps de charge pour une position fixe de la grille d=2 cm, t=10, 20, 30s

La figure (IV.13) représente le potentiel de surface pour trois temps de charge qui sont : $t=10, 20, 30s$.

Il est apparent que le potentiel de surface des films augmente avec l'augmentation du temps de charge. Avec un pas de 10s, on a remarqué que la variation du temps de charge entraine un écart de 100 V environ.

IV.4.3 Variation du temps de charge pour un système sans grille

Nous présentons dans la figure qui suit l'évolution du potentiel de surface dans les mêmes conditions de charge, sans la présence de la grille. Contrairement au cas précédent dans la configuration sans grille, on a prolongé le temps de charge avec un pas de 10s en commençant de 5s à 35s

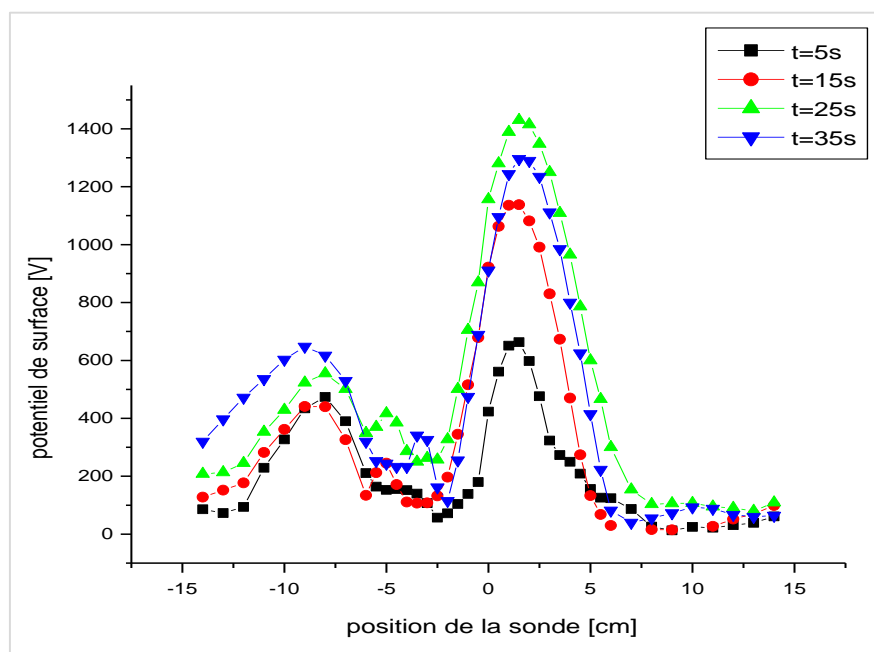


Figure IV.14 : Potentiel de surface pour différents temps de charge pour une configuration sans grille, $t=5, 15, 25, 35s$

D'après la caractéristique de la figure (IV.14), nous constatons que pour des temps de charge allant de 5s à 25s le potentiel de surface augmente en fonction du temps de charge, puis entre 25s et 35s on remarque la décroissance du potentiel de surface. La figure (IV.15) montre le phénomène d'une manière assez claire, seulement cette fois-ci on a augmenté le temps de charge jusqu'à 90s

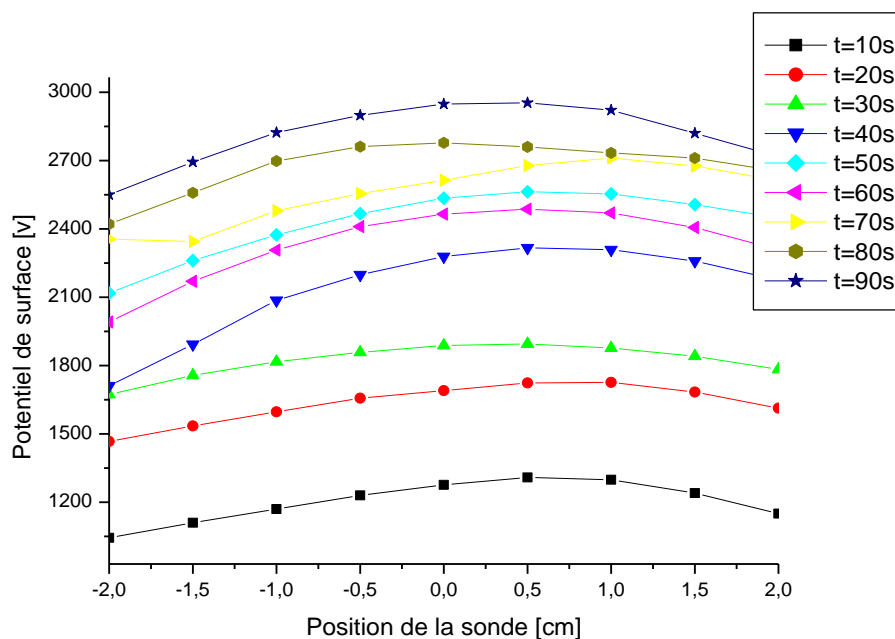


Figure IV.15 : Potentiel de surface pour différents temps de charge pour une configuration sans grille, $t=10, 20, 25, \dots, 90s$. Zoom de la caractéristique

IV.5 Conclusion

Les résultats obtenus montrent la distribution du potentiel de surface sur les films en PVC pour une polarité négative de l'électrode active en géométrie fil-plan.

L'étude s'est concentrée sur un échantillon en film de PVC. Elle englobe les différentes caractéristiques, pouvant nous conduire à la compréhension du phénomène de charge des matériaux avec une décharge couronne en polarité négative. Les résultats exposés démontrent la dissymétrie de distribution par rapport à la position du fil et ils manifestent une différence accrue en les comparant aux résultats obtenus en polarité positive, réalisés dans les travaux antérieurs. Ce qui confirme qu'en polarité négative les résultats ne suivent pas la distribution de Warburg.

L'insertion d'une grille isolée entre l'échantillon et le fil arrive au préférable à répartir les charges sur les films, toutefois cette distribution reste dissymétrique par rapport à la position du fil. Cependant la grille permet d'augmenter les potentiels de surface des échantillons.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a été initié dans le cadre d'une étude sur les potentiels de surfaces de film en PVC chargés par décharge couronne négative, ayant pour objectif l'évaluation de l'état de charge des échantillons par la mesure du potentiel de surface pour vérifier et valider certaines lois de la physique à l'égard de la loi de Warburg dite loi en (\cos^n) . Les mesures de potentiel de surface sont un outil efficace pour à la fois évaluer la réponse des matériaux à un dépôt de charge par décharge couronne et appréhender les différents mécanismes de charge en présence d'un système avec grille.

D'une manière générale, nous pouvons dresser un bilan des principales conclusions dégagées après l'analyse des résultats obtenus :

- Nous avons caractérisé la décharge couronne dans une géométrie fil-plan dans deux types de polarités, vérifié que le courant de la décharge suit la loi quadratique, par rapport à la tension appliquée, conformément à la loi de Townsend.
- Dans un système en présence d'une grille flottante, nous avons constaté que la variation de la distance fil-grille impose un autre régime à la décharge couronne, cela à chaque fois qu'on se rapproche de l'électrode active la tension seuil de la décharge diminue. Ce constat sur la grille a été observé dans des travaux antérieurs en déduisant que le potentiel flottant que porte la grille une fois que la tension est établie modifie implicitement la configuration fil-plan en formant un système d'électrode définie entre deux parallèles.
- Toute fois les caractéristiques courant-tension obtenue en présence de la grille sont similaires à celles obtenues sans grille voire à $d=2$ cm, 3cm du fil et elle vérifie la loi quadratique de Townsend.
- La distribution du potentiel de surface sur des films en PVC en polarité positive de la décharge est à l'image du champ électrostatique et suit la loi de Warburg pour une approximation à $n=1,75$ et que le dépôt de charges est uniformément reparti, symétrique par rapport au centre de l'échantillon.

- En polarité négative les résultats montrent la non validité de la loi de Warburg et que la distribution du potentiel de surface est dissymétrique même si le champ est intense au centre de l'échantillon, le maximum du potentiel de surface obtenu se situe au-delà de zéro de la position de la sonde. La sévérité de la décharge en polarité positive a été observée par rapport à la décharge en polarité négative.
- L'insertion d'une grille flottante, en polarité négative, augmente sensiblement le potentiel de surface des échantillons en PVC, cependant le constat qui a été fait pour des distances fil-grille nous a permis d'admettre, qu'à chaque fois la grille s'éloigne du plan pour se rapprocher du fil plus le potentiel des films est important. La présence de la grille arrive au préalable à répartir les charges sur les films, toutes fois, cette distribution reste dissymétrique par rapport à la position de l'électrode active.
- Nous avons constaté que plus le temps de charge est intense le potentiel des films est important, en absence de la grille, le potentiel de surface croît sur un intervalle du temps de charge pour atteindre un premier maximum avant de décroître par la suite est reprendre la pente, cela nous renseigne sur le caractère de la décharge qui se fait par tranche de croissance et de décroissance du potentiel de surface, ceci peut être dû au caractère pulsatif de la décharge couronne.

Il nous paraît important de développer les points suivants, comme perspectives à ce travail :

- Observer l'influence de la température et de l'humidité relative sur le comportement du dépôt de charges par décharge couronne.
- Approfondir les connaissances sur le contrôle du dépôt de charges électriques sur des matériaux polymères générées par décharge couronne en présence de grilles de différentes formes.
- Effectuer des essais sur une variété de films en polymères pour évaluer le comportement du potentiel de surface sous décharge couronne négative.

Références bibliographiques

- [1] : R. Farhi, C. Morel, G. Cheron « Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité ». INRS, ED638, Octobre 2006.
- [2] : 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'état, UMMTO, décembre 2007.
- [3] : Julien. Jarrige « étude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles. Application aux traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface ». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, février 2008.
- [4] : Myriam. Hamel, B.SC.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.
- [5] : Carl. Potvin « comportement et effet de la charge d'espace sur les mécanismes des vibrations induites par effet de couronne ». Mémoire d'ingénieur e l'université de Québec, mars 2000.
- [6] : Brahim. Benameur « la faisabilité de l'électro-filtration d'une atmosphère chargée en poussière de bois étude expérimentale et numérique ». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [7] : Alyen. Abahazem « études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz ». Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III-Paul Sabatier décembre 2009.
- [8] : Claude. Gary « effet couronne sur les réseaux électriques aériens ». Technique de l'ingénieur, D4.
- [9] : Ibrahima. Ndiaye « initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace ». Mémoire d'ingénieur, université de Québec, mai 2003.
- [10] : Lă Vinh HOANG « comparaison des rendements énergétiques de dégradation de trois composés organiques par plusieurs procédés d'oxydation avancés en milieux aqueux ». Thèse de doctorat de l'université de Poitier, avril 2009.
- [11] : Stéphan.Eymerie « étude expérimentale des décharges atmosphériques générées par impulsions nanosecondes : application aux traitements des particules de suie Diesel ». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, avril 2003.
- [12] : F. Bitam-Megherbi « étude d'une isolation combinée huile/papier isolant : approche non destructive ». Thèse de doctorat d'état en électrotechnique. UMM, T-O, décembre 2007.

- [13] : K. Hamoumeche « étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan ». Thèse de magister, UMMTO, décembre 2009.
- [14] : Anne-Marie Pointu « décharge électrique ». Technique de l'ingénieur, D322.1980
- [15] : Jean-Loup Delcroix « gaz ionisés et plasmas ». Technique de l'ingénieur, D320.1980
- [16] : A. Labergue « étude décharge électrique dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas. Application au control de décollement et d'écoulement ». Thèse de doctorat de l'université de Poitier, novembre 2005.
- [17] : J. Delacroix, A. bers « physique des plasmas ». Paris, inter édition/CNRS Edition1993.
- [18] : C. Tendero, C. Texier, P.Trissant, J. Desmaisou, P. Leprine « Atmospherie pressure plasmas : A.review ». Spectrochimica Acta, Part B, 2005.
- [19] : C. Marteau, M. Haidara, A. Denat « dispositif d'étude des décharges électriques ». Revue de physique appliquée.
- [20] : Cédric. Noel « plasma micro-onde d'argon à la pression atmosphérique : diagnostics et applications au nettoyage des surface ». Thèse doctorat d'I.N.P.L Nancy-université, mai 2009.
- [21] : Jérôme Jolibois « étude et développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique-application au control d'écoulement sur profil d'aile ». Thèse doctorat de l'université de Poitier, décembre 2008.
- [22] : Katia. Allegrand « Décharge à barrière diélectrique de surface : physique et procédé ». Thèse doctorat de l'école polytechnique, 2009.
- [23]: A. Freno, I.S. chronakis « polymer nanofibers assembled by electrospinning ».COCIS Elsevier science, vol.8, pp.64-75, 2003.
- [24]: I. M. Hutten « handbook of non-woven filter media». Elsevier science & technology books, oxford UK, 2007.
- [25]: T.Wu, R.Kinderman, S.Angadjivand «High efficiency synthetic filter medium». Brevet d'invention. US6123752, 26 September 2000.
- [26]: T.Oda, J. Ochiai «charging characteristics of a nanowomen sheet air ». IEEE 6th international symposium on electrets, ISE 6 proceedings. 1988, pp.515-519.
- [27]: A. Wiegmann, S. Rief, A.Latz «computer models of nonwoven geometry and filtration simulation ». International nonwoven technical conference, Houston, Texas, 2006.

- [28]: L. W.Barrett, A.D. Rousseau «Aerosol loading performance of electrets filter media». American industrial hygiene association journal, vol.59, 1998, pp.532-539.
- [29]: D. B. Purchas, K. Sutherland «Handbook of filter media». Elsevier science Ltd, 2nd Edition 2002.
- [30]: K.C. Hofacre, R.T. Hecker, A.Wang, M.C. Shell, S.J. Lawhon « Critical assessment of building air cleaner technologies». Environmental protection agency US, Rapport December 2008.
- [31] : C. Gary « les propriétés diélectrique de l'air dans les hautes et les très haute tensions». Edition Eyrolles, 1984.
- [32] : D. SAAD. « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques ». UMMTO, thèse magister, Décembre 2011
- [33] : Y. Zebboudj « phénomène de conduction dans les gaz ». Cours de Master, technique de haute tension, université de Bejaia septembre 2013.
- [34]: I. W. Mcallister, G.C grichton, and E. Bregnsbo «experimental study on the onset of positive corona ice atmospheric». J, Appl Physic 50 (11), 6791-6805, 1979.
- [35] : Flavien. 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.
- [36]: F.W. Peek « dielectric phenomena in light-voltage engineering». 3rd Mc Graw-Hill, New York, 1929.
- [37]: S. BENABDELMALEK, R. MESSAOUDI. « Simulation numérique de la cinétique chimique d'une mixture N₂/O₂/NO par décharge couronne ». Mémoire master, physique, le 22juin2011.
- [38] : 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, le 20 septembre 2006.
- [39] : M.P. Panaget « étude en laboratoire des effet physico-chimique induit par les pertes diélectriques des lignes de transport à haute tension ». Thèse de doctorat de l'université pierre marie curie 1997.
- [40] : H. Yala, A. Kasdi, Y. zebboudj, « measurement of current and electric field distributions beneath a positive DC wire-to-plane corona » European physic journal applied, vol21, pp 45-52, 2003.

- [41]: Y. zebboudj, « measurement of current and electric field distributions beneath a positive DC wire-to-plane corona using a linear based probe», IEEE Proc, Sci. Meas. Technol, vol 147, N°2, mars 2000.
- [42]: Rice, R.G, Ozone Reference Guide. Electric Power Research Institute, St. Louis, MO (1996).
- [43]: F. Hegeler, H. Akiyama, “Ozone Generation by Positive and Negative Wire-to-Plate Streamer Discharges”, J.J. Appl. Phys. Vol. 36, Part 1, No. 8, pp. 5335, August 1997
- [44]: M. Paaanen, J. Lekkala, K. Kirjavainen, «Electro Mechanical Film-EMFi- a New Multipurpose electret material », Sensors and Actuators, Vol.84, pp.95–102, 2000.
- [45] : N. Thallinger, « Emballage en non tissé », CNRT Emballage Conditionnement, fiche technique N° 27, 2005.
- [46]: M. Goel, « Electret sensors, filters and MEMS devices: New challenges in materials research », Current Science, Vol.85, N°. 4, pp. 443-453, 2003.
- [47] : F. Stauder, « La fabrication des non tissés », CRCI ARIST Champagne-Ardenne textiles techniques, 2004.
- [48] : F. Micheron, « Electrets », Techniques de l’ingénieur, E1893, pp.1-12.
- [49]: K. C. Kao, « Dielectric phenomena in solids », Elsevier Academic Press, ISBN: 0-12-396561-6, 2004.
- [50]: G. M. Sessler, « Electrets: recent developments », Journal of Electrostatics, Vol.51-52, pp. 137-145, 2001.
- [51]: A.R. Denman, C.J. Groves-Kirkby, P.S. Phillips, R.G.M. Crockett, A. Woolridge G.K. Gillmore, « The practical use of electrets in a public health radon remediation Campaign », Journal of Environmental Radioactivity, Vol.84, pp.375-391, 2005.
- [52] : C. Menguy, « Électricité statique : Principes. Problèmes. Applications », Techniques de l’Ingénieur, D1035, pp.1-25.
- [53]: R.E. Baier, J.M carter, S.E. Sorenson, A.E Mayer, B.D. McGowan, S.A Kaspark, «Radiofrequency gas plasma (glow discharges), disinfections of dental operative instruments, including hand pieces ». Journal of oral implantology, vol 118, pp.236-242,192.

- [54]: T.I.J Goodenough, P.W Goodenough, S.M Goodenough «the efficiency of corona wind drying and its applications to food industry», journal of food engineering, vol 80, pp, 1233-1238, 2007.
- [55]: R. Morar, I. Suarazan, S. Budu, I. Guhizdav, M. Porca, L. Descalescau «corona discharge effects on some parasitical insects of cultured plants », Journal of electrostatics, vol 40-41, pp. 669-673, 1997.
- [56]: M. Ignatova, T. Yovcheva, A. Viraneva, G. Mekishev, N. Manolova, I. Rashkov, «Study of charge storage in the nanofibrous (polyethylene terephthalate) electrets prepared by electrospinning or by corona discharge method », European Polymer Journal, Vol.44, pp.1962–1967, 2008.
- [57]: T.T Chau, K.C Kao, G.Blanc, F. Madrid «Microwave plasma for low temperature drysterilization». Biomaterials, vol 17, pp.1273-1277, 1996.
- [58]: J. A. Giacometti , G.F. Leal Ferreira , B. Gross, « Summary Of Corona Charging Methods », IEEE 6th International Symposium on Electrets (ISE 6), pp.87-91, 1988.
- [59] : B. Tabti « Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface », thèse de doctorat, université de Poitiers, décembre 2011.
- [60] : L. Herous, M. Nemamcha, M. Remadina, L. Descalescu « Factors that influence the surface potentiel decay on a thin film of polythelene terephthalate (PET), journal of electrostatics, vol 67, pp. 198-202,2009.