

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2021



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par : AHMERLAINE Selma
BENDJAKHNOUNE Hassina

Thème

Etude de la décharge couronne en configurations multipointes-plan et Fil-Cylindre

Soutenu publiquement, le 14/07/2021, devant le jury composé de :

Mr. REMADNIA Mokdad	MCA	Université Guelma	Président / Examineur
Mr. BOUCHELKHA Abdelhafid	MAA	Université Guelma	Encadreur
Mr. GOUAIDIA Said	MAA	Université Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Au terme de ce travail, je tenu à exprimer votre profonde gratitude, avant tout à dieu le tout puissant qui nous a aidé et ma donné le courage pour mener à terme ce modeste travail.

Nous souhaitons adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leurs aides et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenons à remercier sinisèrent **Monsieur BOUCHELKHA ABDELHAFID**, qui en tant que directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout en long delà réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps, qu'il a bien voulu nous consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à nous recherches en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif du département : Génie Electrotechnique et Automatique, pour la richesse et la qualité de leur enseignements et pour les grands efforts qu'ils ont déployé de pour assurer à leur étudiants une formation actualisée.

Enfin, nous adressons plus sincères remerciements à tout nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes

Dédicace

À ma mère et mon père, qui étaient courageux, et m'ont soutenu tout au long de mes années scolaires

À mes Frères : Sofiane, Lokman

À mes amis : Radja

À tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

AHMERLAINE SELMA

Dédicace

Je dédie cette note à ma grande mère Fatima

À mes enfants

RAZANE , ISLEM , YUCEF, ZAKARIA

BENDJAKHNOUNE HASSINA

Sommaire

Sommaire

Introduction générale

Chapitre I : Etude théorique des décharges électriques

I.1. Introduction	1
I.2. Historique	1
I.3 Différents régimes de décharges électriques	3
I.4. La décharge couronne	5
I.4.1. Mécanismes de formation et processus physique	5
I.4.1.1 Théorie de Townsend	5
I.4.1.2 Théorie de Streamer	7
I.4.2. Différentes types de configuration des électrodes	8
I.4.3 Différents types de décharge couronnes	9
I.4.3.1. Configuration fil-plan	9
I.4.3.1.1 Décharge couronne positive	9
I.4.3.1.2 Décharge couronne négative	10
I.4.3.2 Configuration pointe-plan	11
I.4.4 Caractéristiques électriques macroscopique	12
I.4.4.1. Champ électrique géométrique	12
I.4.4.1.1. Configuration fil-cylindre	12
I.4.4.1.2 Configuration pointe -plan	12
I.4.4.2. Régime critique ou seuil d'apparition de la décharge couronne	13
I.4.4.3. Régime auto-entretenu ou critère de Townsend	15
I.4.4.4. Régime de claquage	16
I.4.5. Les facteurs influençant la décharge couronne	17
I.4.5.1. Facteurs géométriques	17
I.4.5.2. Facteurs physico-chimiques	19
I.4.5.3. Facteurs électriques	20
I.4.6. Domaines d'application de la décharge couronne	20
I.4.6.1. Dépollution par décharge couronne	20
I.4.6.2. Production de l'ozone	22
I.4.6.3. Les précipitateurs électrostatiques	23
I.4.6.4. Fabrication des électrets	25
I.4.6.5. Filtrage électrostatique	28
I.4.6.6. Séparation électrostatique	29
I.4.6.7. Neutralisation et charge des matériaux	30
I.4.6.8 Paratonnerre	30
I.4.6.9. Générateur d'ozone	30
I.5. Conclusion	30

Chapitre II : Dispositif expérimental et outils de simulation

II.1. Introduction	31
II.2. Description des installations expérimentales	31
II.2.1. Les alimentations électriques	31
II.2.2. Les systèmes d'électrodes de décharge couronne	32
II.2.2.1 système de décharge couronne en configuration multipointes/plan	32
II.2.2.2 Système de la décharge couronne en configuration fil-cylindre	32
II.2.3. Les appareils de mesures électriques et visualisations	33
II.2.3.1 mesure du courant moyen	33
II.2.3.2 Mesure de la charge	33
II.2.3.3. Mesure de la masse du matériau	34
II.2.3.4. Appareils d'affichage et d'acquisition	34
II.2.4. Matériau utilisé dans l'étude	35
II.3 Caractérisation électrique de la décharge couronne	35
II.3.1 Système de décharge couronne en configuration fil/cylindre	35
II.3.2 Système de décharge couronne en configuration multipointes/Pan	36
II.4. Neutralisation des charges électriques par décharge couronne	37
II.4.1. Installation expérimentale	37
II.4.2. Description de la démarche expérimentale	38
II.5 Outils de simulation	38
II.6 Conclusion	39

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1 Introduction	40
III.2 Résultats expérimentaux	40
III.2.1. Caractéristiques I-V	40
III.2.2. Formes d'onde de courants de décharge couronne	43
III.2.2.1 Influence de la tension	43
III.2.2.2. Influence du signe de tension	45
III.2.2.3. Influence de la présence d'une couche de granule sur la décharge	46
III.2.2.4. Influence de types de configuration des électrodes	46
III.2.2.5. Neutralisation par un système de décharge couronne en configuration fil-cylindre	47
III.3 Résultats de simulation	48
III.3.1. Système de décharge couronne en configuration multipointes-plan	48
III.3.2. Système de la décharge couronne configuration fil-cylindre	50
III.3.3. Système de la décharge couronne configuration Fil-cylindre avec granule	52
III.4 Conclusion	54
Conclusion générale	
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I : Etude théorique des décharges électriques

Figure I.1 : Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphérique	3
Figure I.2: différent type de géométrie d'électrodes	8
Figure I.3 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive	9
Figure I.4 : Schématisation d'une décharge couronne continue négative	10
Figure I.5 : Représentation schématique d'une décharge couronne en configuration pointe-plaque	11
Figure I.6: système en configuration fil-cylindre	12
Figure I.7: système en configuration pointe-plan	13
Figure I.8: Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit p.d	15
Figure I.9: Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne	17
Figure I.10: Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes en géométrie fil-plan	18
Figure I.11: Schéma d'évolution de la décharge observée En fonction de la pression	19
Figure I.12 : Représentation schématique des principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne	21
Figure I.13: principe de production d'ozone par décharge couronne	23
Figure I.14 : principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique	24
Figure I.15 : Electret dipolaire	26
Figure I.16: mécanisme de génération de charge électrique	26
Figure I.17 : principe de formation d'électret par décharge couronne	27
Figure I.18 : Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes	28
Figure I.19 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour	29

Chapitre II : Dispositif expérimental et outils de simulation

Figure II.1: alimentations électriques	31
Figure II.2 : système de décharge couronne en configuration multipointes/plan	32
Figure II.3: système de la décharge couronne en configuration fil-cylindre	32
Figure II.4 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge	33
Figure II.5 : mesure de la charge	33
Figure II.6 : Photographie de la balance.	34
Figure II.7 : oscilloscope	34
Figure II.8 : installation expérimentale pour la caractérisation du système fil-cylindre	36
Figure II.9 : installation expérimentale pour la caractérisation du système multipointes-plan	36
Figure II.10 : installation expérimentale de neutralisation	37
Figure II.11 : logiciel gratuit FEMM	38
Figure II.12 : logiciel Octave	39

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 : caractéristique courant – tension d’une décharge couronne négative en configuration multipointes-plan avec et sans granule	40
Figure III.2 : caractéristique courant – tension des décharges couronnes négative et positive pour une configuration multipointes-plan	41
Figure III.3 : caractéristique courant – tension des décharges couronnes négative et positive pour une configuration fil-cylindre	41
Figure III.4: caractéristique courant – tension des décharges couronnes négative et positive pour une les configurations fil-cylindre et multipointes-plan	42
Figure III.5 : Enregistrement du courant instantané pour une décharge couronne négative en configuration multipointes-plan	43
Figure III.6 : Impulsions du courant de décharge couronne négative pour une configuration multipointes-plan	44

Figure III.7 : Variation de la fréquence en fonction la tension lors des décharges couronnes négatives en configurations multipointes-plan et fil-cylindre	45
Figure III.8 : Impulsions du courant de décharge couronne pour une configuration multipointes-plan	45
Figure III.9 : Courant de décharge pour une configuration multipointes-plan avec et sans une couche de granule pour une tension de -10 KV	46
Figure III.10 : Courant de décharge couronne pour les configurations fil-cylindre et multipointes pour une tension négative de -8,5 KV DC	47
Figure III.11 : Modèle FEMM de la géométrie multipointes/plan	48
Figure III.12 : Distribution spatial du potentiel électrique	48
Figure III.13 : Distribution spatial du champ électrique	49
Figure III.14 : Distribution du potentiel électrique le long du système multipointes	49
Figure III.15 : La distribution du champ électrique dans un système multipointes	49
Figure III.16 : Modèle FEMM de la géométrie fil-cylindre sans granule	50
Figure III.17 : Distribution spatial du potentiel électrique pour la géométrie Fil-Cylindre sans granule	50
Figure III.18: Distribution spatial du champ électrique pour la géométrie Fil-Cylindre sans granule	51
Figure III.19 : La distribution du potentiel électrique dans un système Fil-cylindre	51
Figure III.20 : La distribution du champ électrique au tour de l'électrode dans un système fil-cylindre	51
Figure III.21: système de la décharge couronne Fil-cylindre avec granule	52
Figure III.22: système de voltage de la décharge couronne Fil-cylindre avec granule	52
Figure III.23: système de champ de la décharge couronne Fil-cylindre avec granule	53
Figure III.24: la distribution de voltage de la décharge couronne Fil-cylindre avec granule	53
Figure III.25: La distribution du champ dans la décharge couronne Fil-cylindre avec granule	53

Liste tableaux

Chapitre I : Etude théorique des décharges électriques

Tableau I.1 : facteur de surface m	14
Tableau I.2 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative (HR=5%, $\varnothing_{\text{fil}}=125\mu\text{m}$)	18

Chapitre II : Dispositif expérimental et outils de simulation

Tableau II.1 principales caractéristiques des granulaires PE utilisés dans les expériences	35
---	----

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableaux III.1 : neutralisation de la décharge couronne Fil-cylindre	47
---	----

Introduction générale

Introduction générale

Les phénomènes de décharge électrique, étudiés pourtant depuis près de deux siècles, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques, cela n'est dû en fait qu'à la très grande complexité du phénomène et des 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 des mécanismes d'initiation. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène global et plus particulièrement sur le curieux phénomène désigné par « **Effet couronne** » ou « **Corona** », qui est utilisé dans de nombreuses applications (Dépollution, séparation électrostatique, Neutralisations, etc.), sous de nombreuses configurations (multipointes/Plan, Fil-Cylindre, point/plan, fil-plan).

Le but de ce travail intitulé '**Étude de la décharge couronne en configurations multipointes-plan et Fil-Cylindre**' est d'étudier les caractéristiques électriques des décharges couronne, afin de mieux comprendre leurs propriétés en fonction des divers paramètres opératoires. A cet effet une étude numérique et expérimentale de la décharge couronne en polarité positive et négative pour les géométries multipointes-plan et fil-cylindre est réalisée.

Ce travail est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude théorique des décharges couronnes. Nous parlerons des mécanismes de formation des décharges couronnes, de l'influence des différents paramètres sur cette dernière et des applications de cette décharge dans le domaine industriel.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons le dispositif expérimental et les méthodes de mesure utilisée lors des manipulations au laboratoire. On parlera aussi des différents outils de simulation utilisés.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats expérimentaux et ceux de simulation obtenus et leurs interprétations.

CHAPITRE I

Etude théorique des décharges électriques

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, après un aperçu historique sur les décharges électriques et une étude bibliographique sur les phénomènes qui leurs sont associés, nous avons présenté la décharge couronne : ces mécanismes de formation, ces modes positive et négative, les différents types de configuration des électrodes, les caractéristiques électriques macroscopique, les facteurs d'influence et les domaines d'application.

I.2. Historique

Les décharges électriques ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle. Les premières études décrivant leurs évolutions et proposant des mécanismes datent du début de XXème siècle. En effet, parmi les premières publications sur l'effet couronne datent de 1911. Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à des hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne autour des lignes de transport. 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 ». 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.

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 lois 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). 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. 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.

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. 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. Depuis le milieu des années 1990, l'intérêt des constructeurs automobiles vis-à-vis des technologies liées aux plasmas froids produits par décharge couronne, pour la problématique NOx-particules des moteurs diesel n'ont cessé de croître.

Cependant le côté utile de la décharge couronne ne doit pas éluder un autre côté nuisible de cette décharge, 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. 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. [1]

I.3. Différents régimes de décharges électriques

L'augmentation de la tension appliquée est accompagnée d'une augmentation du courant de décharge. Une succession de régimes de décharge est alors observée, caractérisés par leurs tensions seuils et par la nature du courant (distinction des composantes continues et impulsionnelles du courant) qui leur correspond. La connaissance du fonctionnement d'une décharge passe nécessairement par sa caractérisation électrique : la quantification des composantes de courant continue et impulsionnelle est nécessaire pour identifier le régime de décharge. A la tension croissante, le courant moyen collecté sur l'anode augmente et différents régimes de décharges se succèdent. Ils sont définis par leurs plages de tensions respectives et par la nature (continu ou impulsionnelle) du courant de décharge. La caractéristique I-V est donnée par la Figure I.1.

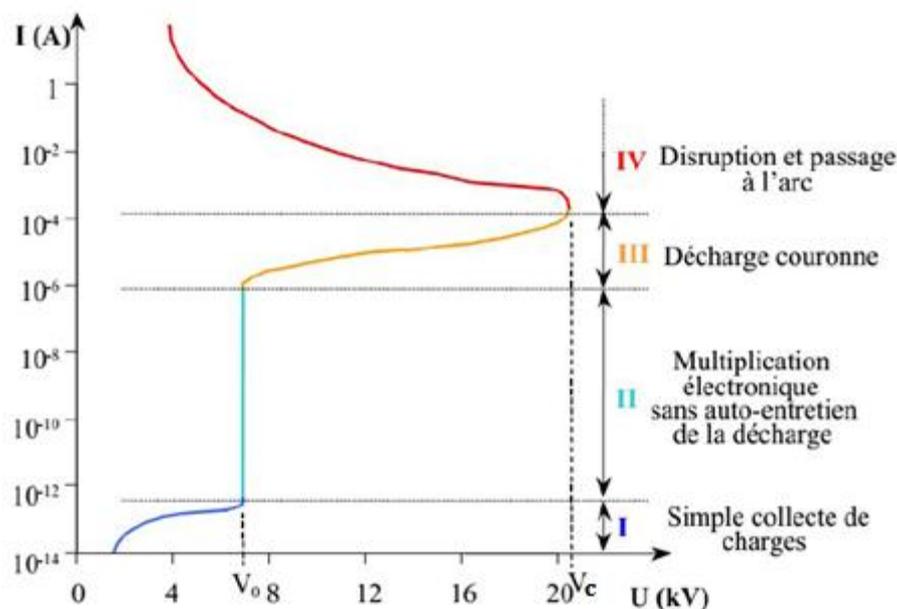


Figure I.1 : Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphérique [8]

La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne :

- **Régime I- Collecte de charge**

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 inter-électrode. [1]

Le courant est très faible et il est dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou rayonnement cosmique. Dans ce cas le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique. [2]

- **Régime II: Régime impulsionnel ou de décharge de Trichel non auto-entretenu.**

Lorsque la tension atteint une valeur seuil V_0 , le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule environnante. Le processus d'avalanche électronique de Townsend se déclenche, alors sans que le critère d'auto-entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire, on parle de régime de Townsend non entretenu. Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très petite variation de la tension appliquée.[1]

- **Régime III : Régime de décharge couronne**

Au-dessus de la tension seuil d'auto-entretien, des impulsions de Trichel deviennent régulières, la création d'électrons germes par une source extérieure n'est plus nécessaire.

La décharge ne s'éteint plus car la condition d'auto-entretien est atteinte. La composante continue (représentative de la charge d'espace) augmente avec la tension.

Si la tension est plus élevée, la fréquence des impulsions devient de plus en plus élevée, le temps entre deux impulsions successives devient plus petit que la durée d'une impulsion : ce régime est donc caractérisé par l'absence d'impulsions. Cependant, physiquement il n'est que la continuité du régime de Trichel. [1]

- **Régime IV- Régime disruptif ou Régime d'arc**

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 [1].

Les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. C'est le régime des décharges disruptives tel que les arcs électriques [2]

I.4. La décharge couronne

I.4.1. Mécanismes de formation et processus physique

La décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz au voisinage d'un conducteur porté à une tension dont le champ électrique environnant est intense mais non disruptif. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation. Ce type de décharge ne nécessite aucune source externe d'ionisation pour se développer, on dit que c'est une décharge auto-entretenu (autonome). Cependant, la présence d'un électron initial pour annoncer la décharge est nécessaire.

La décharge couronne qui, habituellement, a lieu à pression atmosphérique est souvent associée à deux électrodes asymétriques. L'électrode active de faible rayon de courbure (une pointe ou un fil mince) est portée à un potentiel élevé. L'électrode passive de rayon de courbure important (une plaque plate ou un cylindre), est mise à la terre. La décharge peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode active. On rencontre une difficulté principale avec ce type de décharge qui est la transition à l'arc électrique. 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 inter-électrodes.
- Le second correspond à l'apparition de lueurs dans l'intervalle prenant de filament ce qu'on appelle streamer. [2]

I.4.1.1. Théorie de Townsend

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

D'où le courant collecté est :

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

L'étude expérimentale du courant i , effectuée par Townsend en fonction de la distance d , a montré que ce courant augmente plus rapidement que ce qui est prévu par la relation (I.5). Ceci est dû au phénomène d'ionisation secondaire se produisant près de la cathode. En effet, si l'on considère les ions positifs créés lors des collisions ionisantes électrons-molécules, leur impact sur la cathode peut provoquer l'émission d'électrons secondaire. On caractérise cette émission par un facteur γ , dit coefficient d'ionisation secondaire de Townsend, qui représente le nombre d'électrons émis à la cathode par ion incident [2].

I.4.1.2. Théorie de Streamer

Le streamer apparaît sur une photographie statique comme un étroit filament lumineux; l'émission lumineuse, qui en résulte, provient essentiellement des photons créés en tête du streamer. Dans ce cas, la photo-ionisation du gaz, au sein de la charge d'espace générée par la première avalanche de Townsend près de la cathode, joue un rôle important. Les électrons accélérés par le champ électrique excitent, par collision, des molécules neutres qui, en revenant à leur état fondamental, émettent des photons. Ces derniers sont absorbés par le gaz inter-électrodes. Dans l'air, les molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons avec une énergie supérieure à 13 eV, capables d'ioniser les molécules d'oxygène dont le potentiel d'ionisation n'est que de 12.2 eV. Les électrons produits vont créer de nouvelles avalanches secondaires selon le même mécanisme de multiplication électronique décrit par Townsend. Ces avalanches secondaires vont se développer vers la charge d'espace positive en formant un canal d'étincelles. Ce phénomène de streamer est caractérisé par un temps de développement d'environ 10⁻⁸ secondes. Des critères ont été proposés par Meek et Raether pour estimer le champ électrique permettant la transformation d'une avalanche en streamer. Raether a établi un critère simple qui exprime que l'avalanche doit atteindre une taille critique l_c pour que le streamer puisse se développer. Dans le cas d'un champ non uniforme, si l'on désigne par E_s le champ à la surface de l'anode et E_c le champ critique du minimum d'ionisation correspondant à $(\alpha - \eta = 0)$, distance ce critère s'écrit :

$$\int_0^{L_c} (\alpha - \eta) dx = 1,5 \cdot 10^8 \quad \text{Electrons} \quad (\text{I.6})$$

L'expression ci-dessus est obtenue du critère de claquage de Townsend et du critère de Meek. Ce dernier critère exprime que le champ de la charge d'espace E_p est du même ordre de grandeur que le champ E_s à la surface de l'anode. [2]

I.4.2. Différents types de configuration des électrodes

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 inter-électrode est habituellement de l'ordre du centimètre [1].



Pointe/Plan Multipointe/Plan Couteau/Cylindre Fil/Cylindre Cylindre/Cylindre

Figure I.2: 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 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.

I.4.3. Différents types de décharge couronnes

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure. Ces deux types sont exposés au paragraphe suivant pour deux configurations d'électrodes: fil-plan et pointe-plan

I.4.3.1. Configuration fil-plan

I.4.3.1.1. Décharge couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand l'électrode haute tension est portée à un potentiel positif et la plaque (le plan) à la terre. Dans ce cas, dans la zone du champ intense autour de l'électrode active, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode. Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation ; zone pointillée de la figure I.3. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de l'électrode active (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers le plan mis à la terre. Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs, est appelée région de « dérive », Figure I.3. Pour cette décharge, il y a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode.

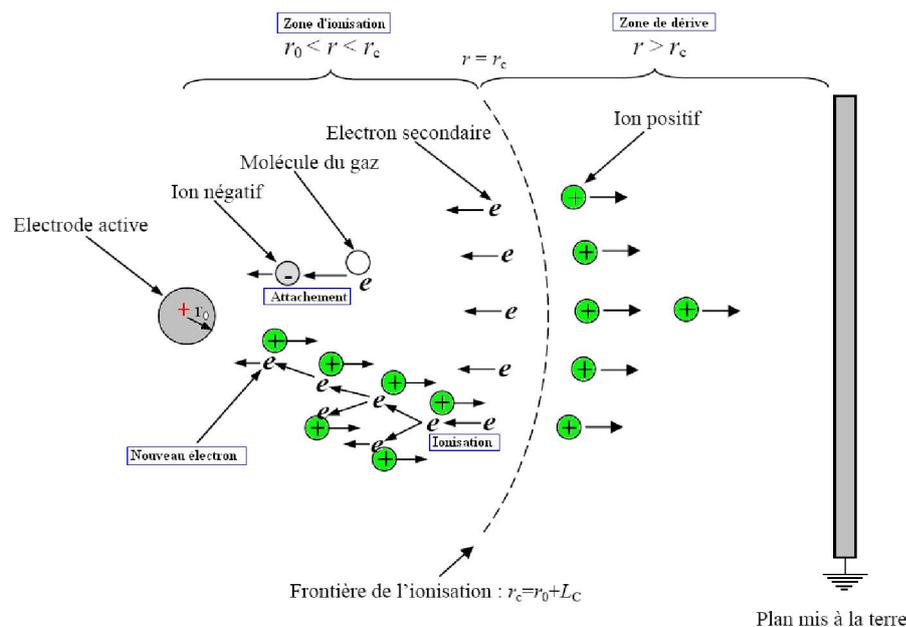


Figure I.3 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive

D'après les modélisations de Loiseau et al, la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de 2.105 m/s) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires. Goldman et al. Indique qu'un courant positif de 50 μA se décomposerait en un courant unipolaire continu de 20 μA , distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à 30 μA percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz. Une succession d'avalanches se forment dans une certaine zone. Mais il est quand même difficile d'obtenir un phénomène stable. [2]

I.4.3.1.2. Décharge couronne négative

Dans le cas où l'électrode active est portée à un potentiel négatif, Figure I.4, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de l'électrode HT. Goldman et Sigmond, expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode.

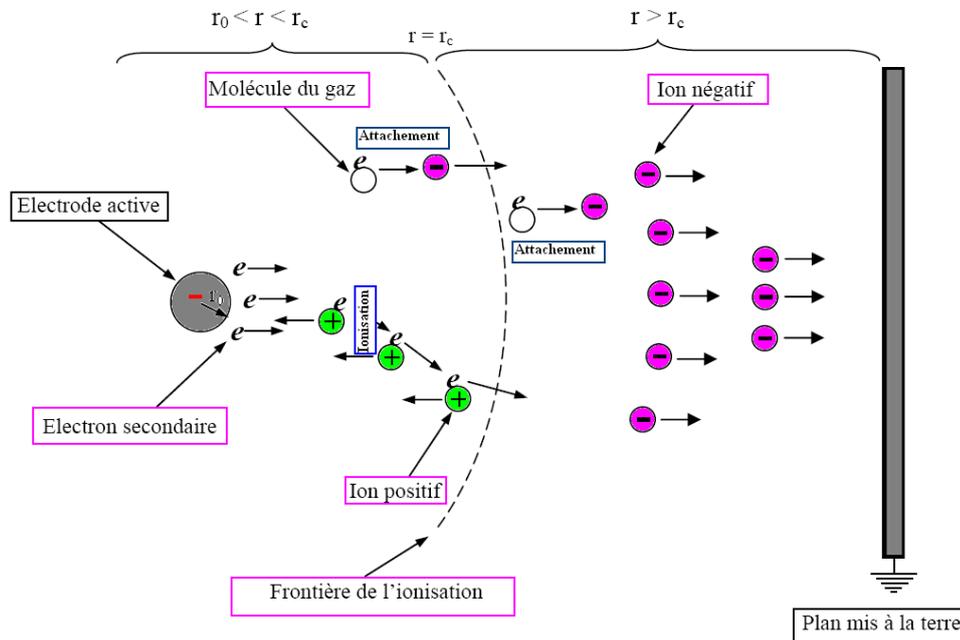


Figure I.4 : Schématisation d'une décharge couronne continue négative

Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers l'électrode plane mise à la terre. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc. Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée [2].

- **Apparence lumineuse**

Un courant de particules négatives part de l'électrode active (HT) vers l'électrode passive (Mise à la terre), il atteint 1 à 100 μ A. On obtient (avec une pointe) une zone lumineuse en forme de champignon qui a la couleur bleue violacée dans l'air. Cette couleur est due au spectre de l'azote et des composés oxygénés. Dans le cas d'un fil, celui-ci est bordé de petits champignons. Une gaine sera formée autour du fil quand on augmente la tension. [2]

- **Stabilités du phénomène**

Ce phénomène d'effluve négatif ne s'étend qu'à une faible distance de l'électrode HT, donc pas question de formation d'un canal entre électrodes; on peut réduire leur distance sans qu'il se produise d'étincelle. L'effluve négatif ne tourne pas de lui-même à l'étincelle. C'est un phénomène stable qui se confine au voisinage de l'électrode HT [2].

I.4.3.2. Configuration pointe-plan

La configuration pointe-plaque est constituée de plusieurs aiguilles métalliques et d'une électrode plane. Les mécanismes sont identiques à ceux décrits en configuration fil-cylindre mais dans ce cas la décharge couronne apparaît comme une lueur lumineuse localisée dans un volume autour de la pointe des aiguilles : c'est la zone d'ionisation. Au-delà, le champ électrique est faible, les électrons rentrent en collision avec les espèces neutres pour former des ions qui dérivent sous l'effet du champ : c'est la zone de dérive.

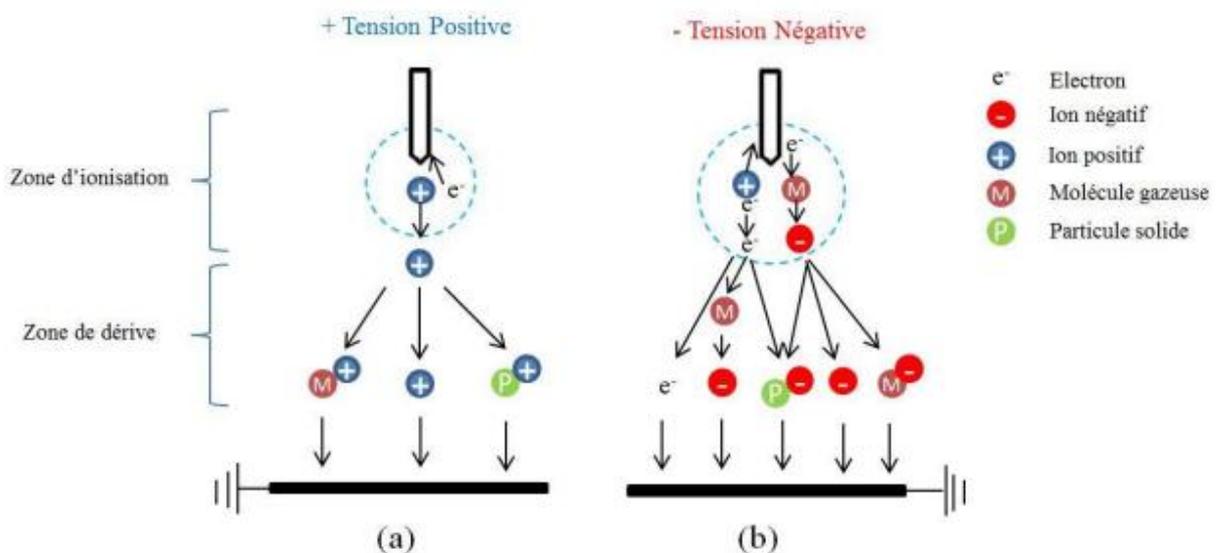


Figure I.5 : Représentation schématique d'une décharge couronne en configuration pointe-plaque : (a) tension positive et (b) tension négative.[3]

Comme pour la configuration fil-cylindre, le mécanisme de formation de la décharge couronne dépend de la polarité de la décharge (Figure I.5). Dans les mêmes conditions, la zone de plasma pour la décharge en tension positive apparaît également inférieure à celle en tension négative, en raison du nombre plus faible d'électrons libres, comme présenté dans la description de la configuration fil-cylindre.[3]

I.4.4. Caractéristiques électriques macroscopique

I.4.4.1. Champ électrique géométrique

I.4.4.1.1. Configuration fil-cylindre

Le champ électrique géométrique créé par une décharge fil-cylindre (cf. Figure I.6) qui est dû à l'application d'une différence de potentiel et en l'absence d'ions gazeux dans l'espace inter-électrodes à une distance r (en mètre) de l'axe du fil est donné par :

$$\mathbf{E}(r) = \frac{V}{r \ln(R_2/R_1)} \mathbf{V. m}^{-1} \quad (\text{I.7})$$

Où V est le potentiel appliqué au fil (V), R_1 le rayon du fil (m) et R_2 le rayon du cylindre (m).

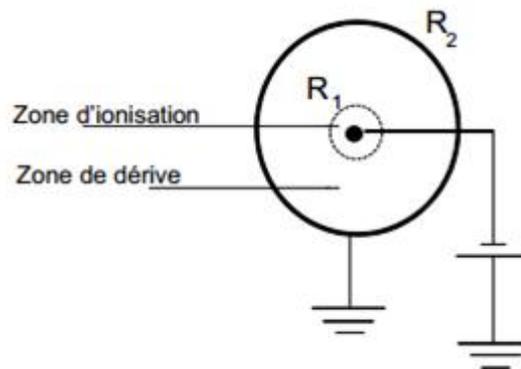


Figure I.6: Système en configuration fil-cylindre [10]

I.4.4.1.2. Configuration pointe -plan

Le profil du champ électrique géométrique entre une pointe parabolôïde et un plan, en l'absence de charge d'espace, dépend des caractéristiques électriques et géométriques de la pointe métallique. Il est décrit en fonction du potentiel imposé à l'électrode active le long de l'axe de symétrie du système, en configuration pointe-plan par la formule de Hartmann :

$$E(r) = \frac{2V}{\left(r + \frac{R_c}{2}\right) \ln\left(\frac{2d + R_c}{R_c}\right)} \quad (I.8)$$

Avec V le potentiel appliqué à la pointe, R_c le rayon de courbure de la pointe, d la distance inter-électrodes, et r l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine.

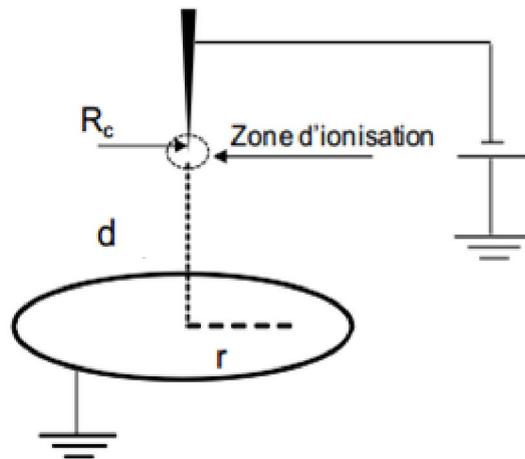


Figure I.7: Système en configuration pointe-plan [10]

I.4.4.2. Régime critique ou seuil d'apparition de la décharge couronne

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

$$E_c = E_p \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \quad (1.9)$$

- où: E_c est le champ critique, en kV/cm,
 E_p est le champ superficiel, $E_p = 31$ kV/cm,
 K est le coefficient, $K = 0.308$,
 r est le rayon du conducteur, en cm,

La densité de l'air δ est donnée par :

$$\delta = \frac{3,92}{273 + T} P \quad (\text{I.10})$$

T est la température, en °C,

P est la pression de l'air, en cm Hg.

Il est à noter que l'état de surface du conducteur est très important dans la détermination du champ électrique. La relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies. La rugosité superficielle diminue le champ critique.

La rugosité superficielle diminue le champ critique, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental $m < 1$, appelé coefficient de surface dans les valeurs sont données au tableau I.1.

Le champ critique E_o d'un conducteur imparfaitement poli s'exprime alors sous la forme :

$$E_o = m E_c \quad (\text{I.11})$$

Tableau I.1 : Facteur de surface m

Conducteur	facteur de surface m
lisse et neuf	1
lisse, oxydé	0,93 - 0,98
toronné	0,72 - 0,9 par défaut : 0,85

La différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes correspondant au champ de disruptive est appelée tension d'amorçage V_o . Elle peut être calculée de la manière suivante :

$$V_o = E_o r \ln \frac{r_c}{r} \quad (\text{I.12})$$

Où r_c est la distance entre le fil et le cylindre périphérique en cm.

Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension de seuil à la pression du gaz et de la distance inter-électrode: la loi de Paschen. Cette loi est habituellement représentée par la

courbe caractéristique $V_c = f(p.d)$, de la figure I.8 où p est la pression et d la distance inter-électrode, et dépend de la nature du gaz introduit.

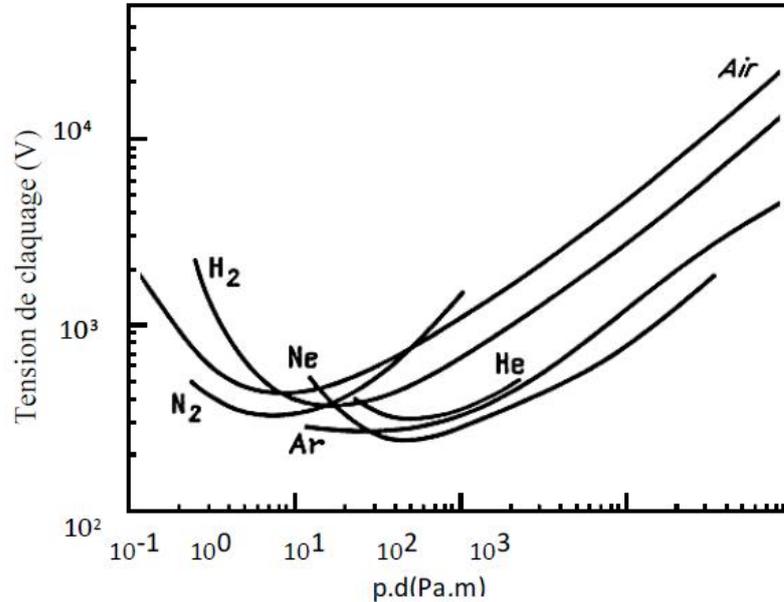


Figure I.8 : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit $p.d$. [8]

L'effet visuel :

L'effet visuel apparaît à une tension (simple) légèrement supérieure, qui peut être calculée avec la formule semi-empirique de Peek :

$$V_{\text{visu}} = \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{k \times r}}\right) V_0 \quad (\text{I.13})$$

I.4.4.3. Régime auto-entretenu ou critère de Townsend

Le critère d'auto-entretien de la décharge (nombre adimensionnel) ou critère de Townsend s'écrit alors :

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1 \Rightarrow d = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma}\right) \quad (\text{I.14})$$

d : distance inter-électrode (m)

α : premier coefficient de Townsend (m^{-1})

γ : second coefficient de Townsend.

I.4.4.4. Régime de claquage

Lorsque la tension appliquée augmente et atteint une certaine valeur, il apparaît des arcs électriques entre le fil et le cylindre périphérique. Cette valeur correspond à la tension de claquage V_c . Généralement, la tension de claquage ne peut pas être calculée de manière théorique ; il s'agit plutôt d'une probabilité d'apparition. Néanmoins, Peek a proposé une relation permettant de calculer un ordre de grandeur du champ de claquage E_c en fonction du rayon de la zone d'ionisation r_i :

$$E_{cr} = m \cdot E_p \delta \left(1 + \frac{r_i K}{2,718 r_i \sqrt{\delta \cdot r_i}} \right) \quad (\text{I.15})$$

Avec : $r_i = r + 0.03\sqrt{r}$

Et ce qui nous donne la tension de claquage équivalente:

$$V_{cr} = E_{cr} r \ln \frac{r_c}{r} \quad (\text{I.16})$$

La relation entre la tension appliquée et le courant généré est une caractéristique fondamentale d'un électro-filtre. Lorsque la tension appliquée dépasse la tension d'amorçage, le courant augmente progressivement et ce jusqu'à la tension de claquage. Même si la décharge couronne recouvre des phénomènes complexes et le courant généré est une fonction non linéaire de la tension appliquée, il est possible d'obtenir une modélisation approximative du comportement courant-tension de l'électro-filtre en appliquant les équations de Maxwell aux conditions de géométrie choisie. Une relation empirique simple entre le courant généré et la tension appliquée proposée par Townsend est généralement utilisée, qui s'exprime par :

$$I = C^{st} V (V - V_0) \quad (\text{I.17})$$

Où C^{st} est une constante qui dépend de la configuration de l'électro-filtre, de la température, de la pression atmosphérique et de la composition du gaz. D'après Townsend, la constante C^{st} est donnée par la relation suivante :

$$C^{st} = \frac{8\pi\mu_{ion}\epsilon_0}{r_c^2 \ln \frac{r_c}{r}} \quad (\text{I.18})$$

Où μ_{ion} : est la mobilité des ions dans l'air ($m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)

ϵ_0 est la permittivité du vide ($8,85 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$).

I.4.5. Les facteurs influençant la décharge couronne

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

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

I.4.5.1. Facteurs géométriques

a) Rayon de courbure

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne. [1]

b) distance inter-électrode

La distance inter-électrode a une influence sur les paramètres de la décharge. En effet, il apparait clairement sur la figure I.9 que le courant est plus important et croit plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrode. De plus, le seuil de la décharge couronne apparait pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrode petites [1].

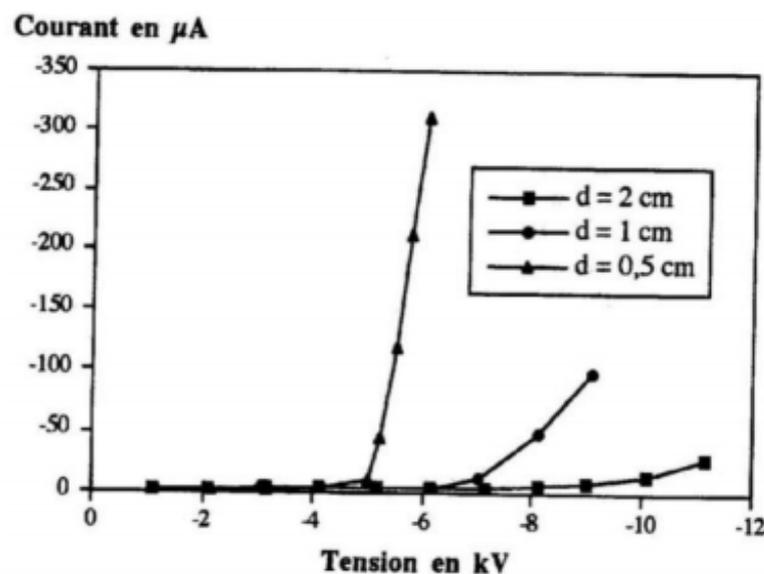


Figure I.9: Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne[5]

c) La nature des électrodes

Les caractéristiques courant-tension de la figure I.10 montrent l'effet de la nature des électrodes (cuivre, aluminium et acier) sur le courant de décharge couronne [1].

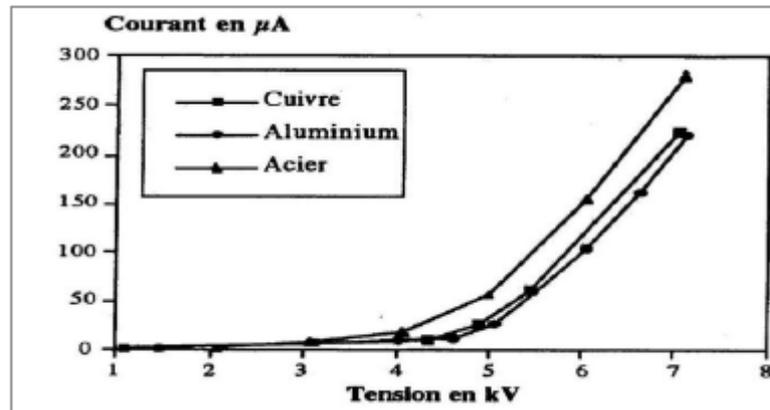


Figure I.10 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes en géométrie fil-plan ($d=0.5\text{cm}$, $\phi = 125\mu\text{m}$)[1][8].

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

Tableau I.2: Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative ($HR=5\%$, $\phi_{fil}=125\mu\text{m}$)[5]

Nature des électrodes	Mobilité μ : en $[\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$ à $d=0.5\text{cm}$	
	Tension positive	Tension négative
Electrode en cuivre	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Electrode en aluminium	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
Electrode en acier	$12 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$

I.4.5.2. 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. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit «P.I». [1]

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 photo-ionisation.

Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente. [1]

c) Pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure (I.11) montre l'effet de la pression sur la décharge. [1]

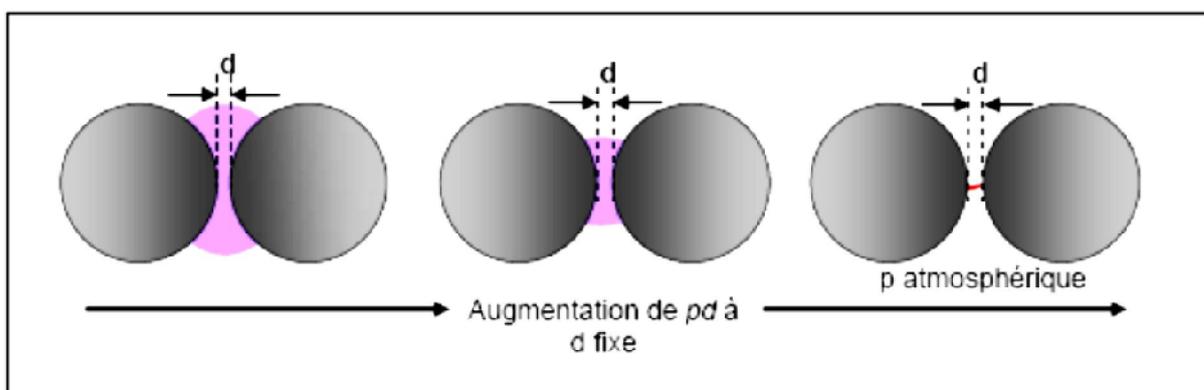


Figure I.11: Schéma d'évolution de la décharge observée En fonction de la pression[5]

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. [1]

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

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (\text{I.19})$$

Avec :

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

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

I.4.5.3. Facteurs électriques

La décharge couronne est influencée par les paramètres électriques de la tension appliquée au système d'électrodes à savoir :

- La forme d'onde (continue /sinusoïdale / triangulaire / rectangulaire),
- L'amplitude
- La fréquence
- la largeur d'impulsion

I.4.6. Domaines d'application de la décharge couronne**I.4.6.1. 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 NOx et SOx ou des Composés Organiques Volatiles (COV). Dans certains cas,

le réacteur Corona peut également servir de précipitateurs 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 : $\text{oxyde} + \text{radicaux} \rightarrow \text{acide}$

$\text{acide} + \text{base} \rightarrow \text{sel}$

Au bilan, le traitement d'un gaz d'échappement par réacteur corona s'effectue en trois principales étapes correspondantes à des échelles de temps bien distinctes. Ces étapes sont schématisées sur la figure I.12. [1]

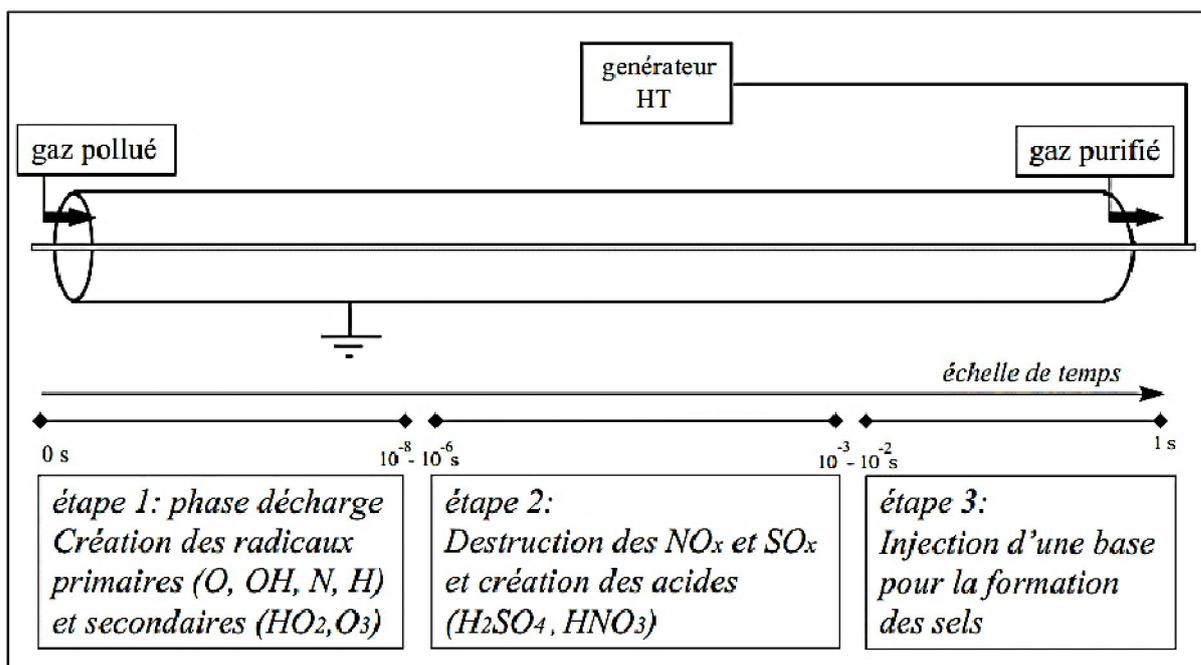


Figure I.12 : Représentation schématique des principales étapes de la destruction des oxydes toxiques par décharge couronne[9]

- **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, HO_2 , 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. [1]

- **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 (HNO₃) et sulfurique (H₂SO₄). [1]
- **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. [1]

I.4.6.2. Production de l'ozone

L'ozone peut être généré par trois méthodes essentielles : la méthode photochimique, la méthode électrochimique et la méthode de décharge électrique qui est la plus usitée .

Le système de décharge couronne à courant continu est 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. Avec cette méthode on peut obtenir un grand rendement et une grande concentration d'ozone dans un espace inter-électrode 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. Il peut y'avoir facilement un développement d'arc ou spark.

La génération d'ozone dépend de la tension appliquée :

- dans le cas d'une tension positive, la décharge apparaît entièrement dans l'espace inter-électrode.
- 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.

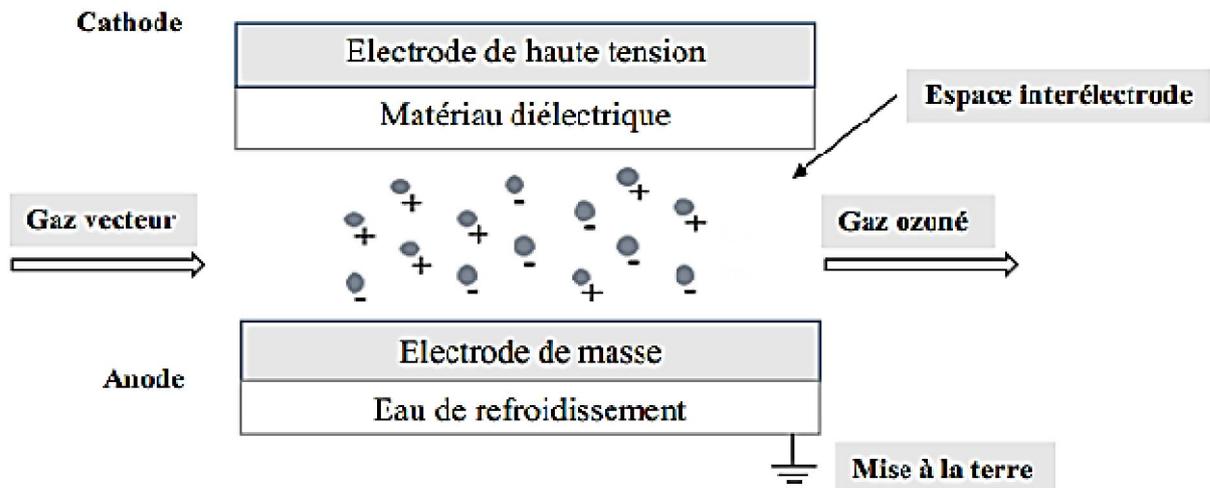


Figure I.13: principe de production d'ozone par décharge couronne

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. [1]

I.4.6.3. 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).

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. [1]

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. 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. [1]

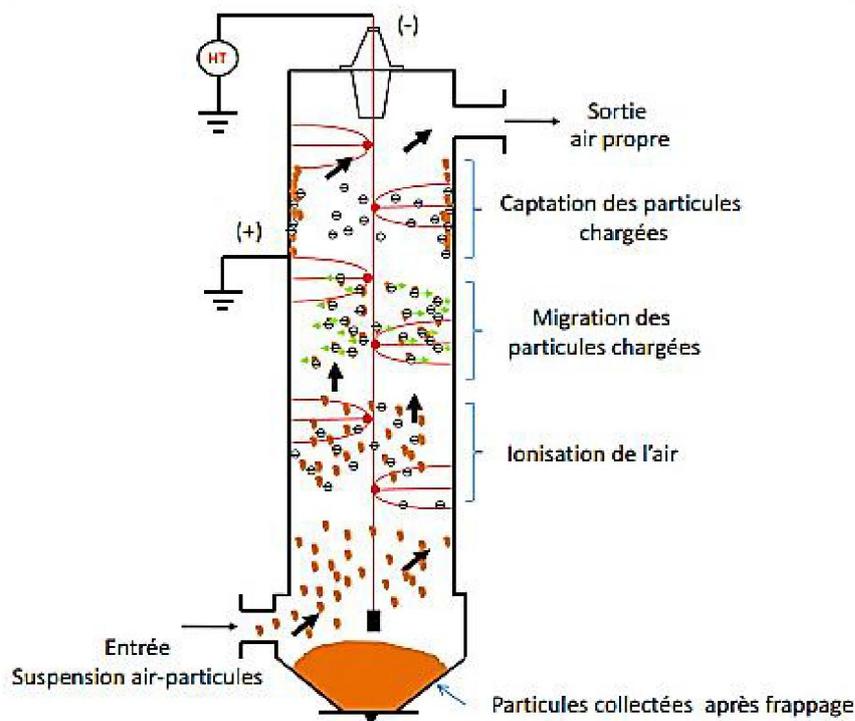


Figure I.14 : principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique[9]

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).

I.4.6.4. Fabrication des 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 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. 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 orientés et figés dans le volume. Les électrets sont essentiellement des matériaux désordonnés tel que les polymères et les minéraux morphes. Ils occupent une place de choix dans les nouvelles technologies. Les techniques de formation et caractérisation de ces matériaux se sont perfectionnés, 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. [1]

Selon les modes de formation des électrets, ces derniers sont classes 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. La figure illustre l'orientation des pôles avant et après la formation de l'électret.

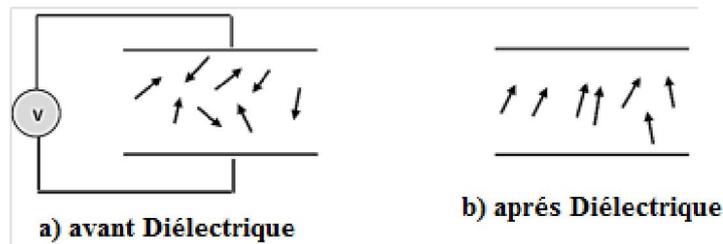


Figure I.15 : Electret dipolaire[9]

Il existe plusieurs méthodes de formation des électrets à charge d'espace. La polarisation provient de charge des deux signes. Ces charges peuvent être obtenue par séparation d'hétérocarpes des électrodes et piégé 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 l'implantation électronique (canon d'électron), la triboélectricité (contact +frottement) ou la décharge couronne. La figure I.16 résume les mécanismes physiques de base pouvant expliquer la présence de charge électrique dans un diélectrique situé entre deux électrodes opposées.

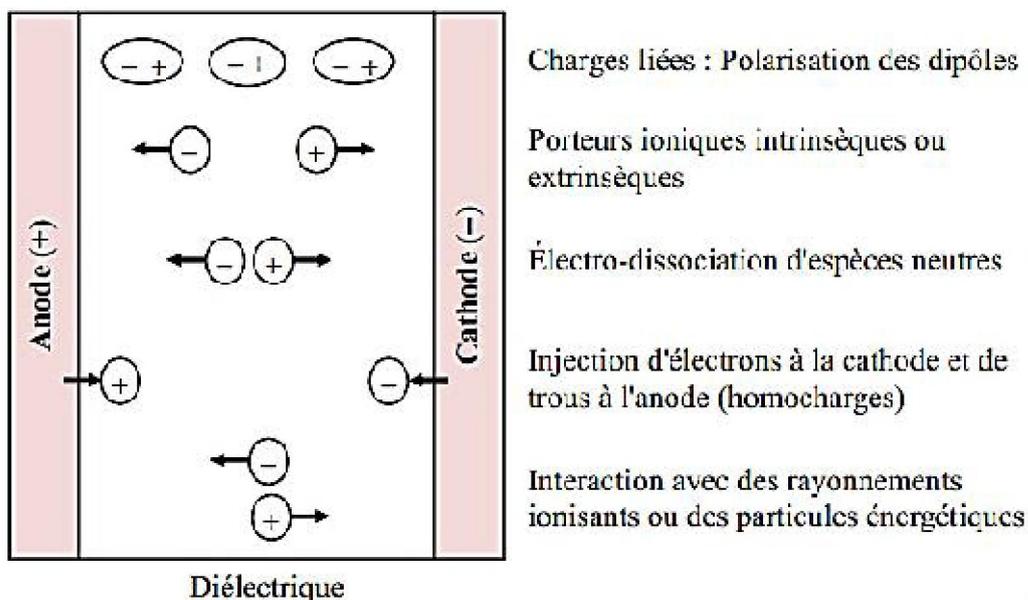


Figure I.16: mécanisme de génération de charge électrique[9]

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 électrique. 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 inter-électrode 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 I.17 illustre de formation d'électret par décharge couronne négative.

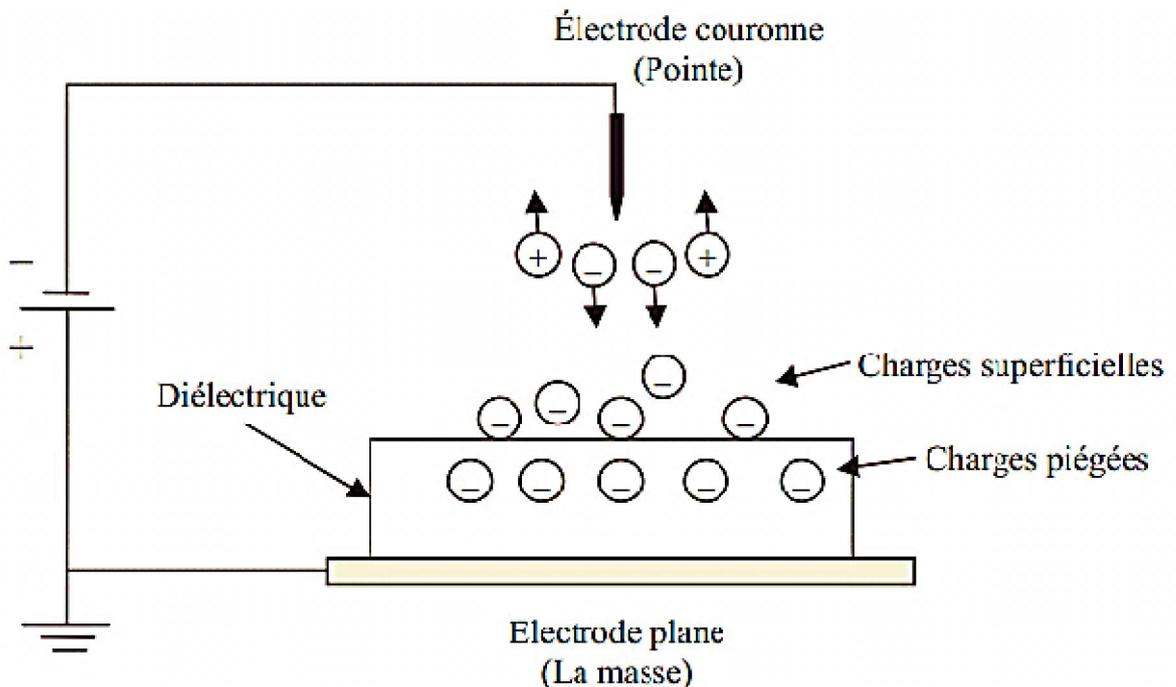


Figure I.17 : principe de formation d'électret par décharge couronne[9]

I.4.6.5. Filtrage électrostatique

Le principe de fonctionnement des précipitateurs électrostatiques (PES) est basé sur l'action du champ électrique sur les particules chargées. La force électrique agit directement sur les particules chargées à retenir; donc ces forces sont des forces séparatrices. Ce phénomène de précipitation électrostatique se retrouve largement dans les filtres électrostatiques (appelés également dépoussiéreurs électrostatiques). Les électro-filtres traitent des fumées de charbon, l'air pollué, des brouillards d'huile, des fumées de soudage, des gaz évacués par les moteurs diesel. Le dépoussiéreur montré à la figure I.18, se compose d'un ensemble de cylindres conducteurs sur lesquels il y a des électrodes pointues portées à un potentiel V , sont situées à mi-distance des deux électrodes planes parallèles qui sont au potentiel 0 (mise à la terre). Des décharges couronnes se forment au voisinage de l'extrémité des pointes et les ions qui ont la même polarité que la pointe sont repoussés vers le plan. Cela conduit à la formation d'une charge d'espace ionique ayant une densité très forte à proximité des pointes et qui décroît vers le plan collecteur. Certains de ces ions sont captés par les poussières en raison de la distorsion locale du champ électrique causée par la différence de la valeur entre la permittivité relative des particules et celle du gaz. Ainsi, les particules dans le gaz ou l'air seront chargées en captant les ions, jusqu'à atteindre une charge maximale. Ces particules sont soumises à la force électrique et se dirigent vers le plan où elles s'accumulent en formant une couche qui adhère à la paroi.[2]

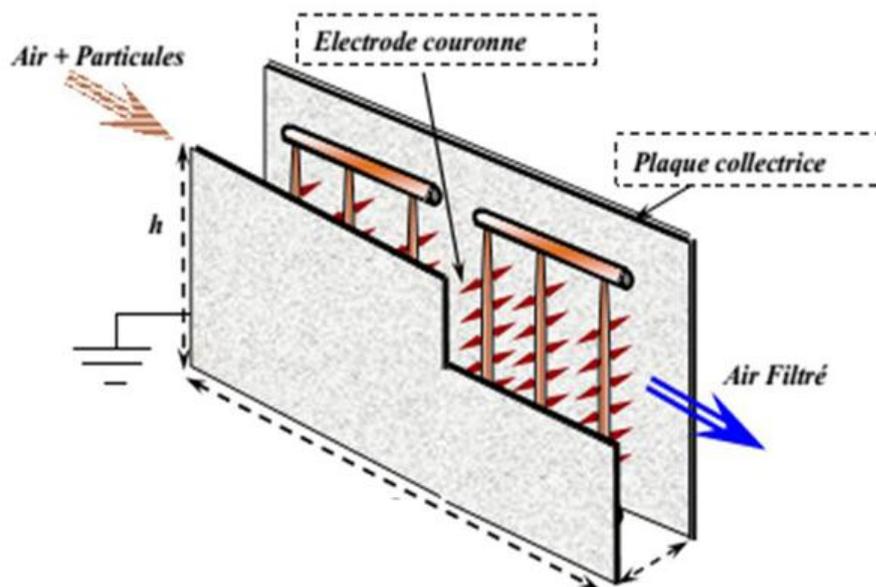


Figure I.18 : Vue schématique d'un filtre électrostatique avec un réseau de pointes

I.4.6.6.Séparation électrostatique

Le séparateur électrostatique à tambour est le modèle le plus utilisé dans l'industrie. Il permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal avec des puretés très proches de 100%. Dans ce type de séparateur, le champ électrique est créé entre deux électrodes (1 et 2) de la figure I.19 connectées à la source haute tension et l'électrode tournante (3) reliée à la terre. Deux mécanismes de charge sont simultanément employés « bombardement ionique » et « induction électrostatique ». Le premier est destiné aux particules isolantes ; le Deuxième implique seulement les particules conductrices. Chargées par bombardement ionique dans la zone de décharge couronne, les granules isolants adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique. Ils tombent dans la partie du collecteur (7) qui leur est réservée lorsque la résultante des forces de pesanteur et centrifuge l'emportent sur la force d'image électrique. Pour assurer la chute de ces particules, certains séparateurs électrostatiques industriels sont équipés par une autre électrode couronne, appelée l'électrode de neutralisation (5), pour éliminer la charge acquise. Les particules qui restent collées sont séparées de la surface du tambour par une brosse (6). [2]

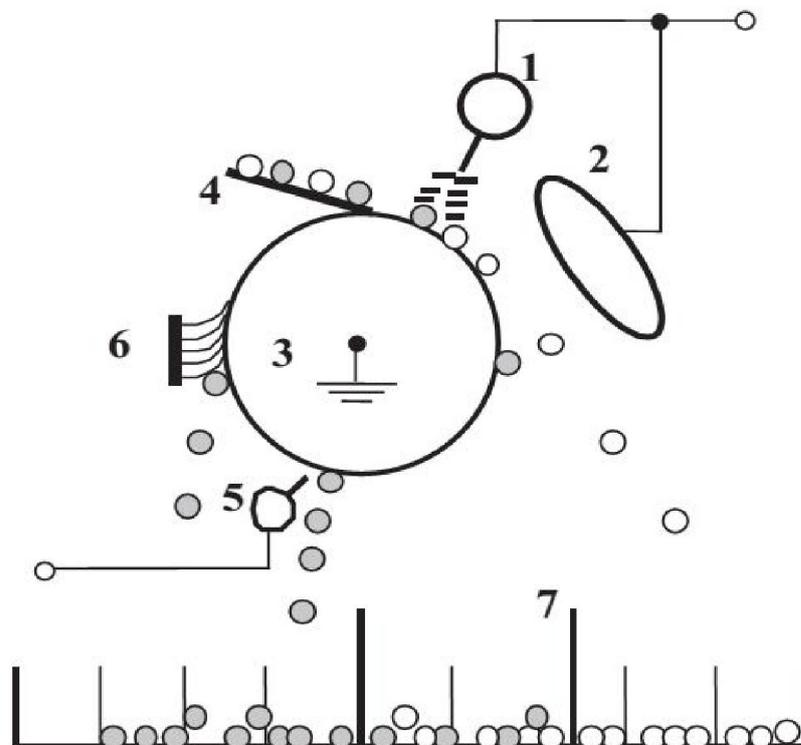


Figure I.19 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour

I.4.6.7. Neutralisation et charge des matériaux

La présence de charges électriques à la surface des matériaux isolants est accompagnée assez souvent de nuisances électrostatiques non négligeables. Dans de nombreuses applications, telles que la manipulation de matières textiles, des feuilles de papier ou des films polymères, les forces électriques associées à ces charges peuvent coller les matériaux les uns aux autres ou à des surfaces métalliques. Les décharges électriques à partir d'éléments chargés représentent une importante source de danger dans le processus de fabrication des dispositifs électroniques. La neutralisation de la charge électrique est couramment faite en utilisant la décharge couronne générée par de diverses configurations d'électrodes[2].

I.4.6.8 Paratonnerre

Le paratonnerre est un dispositif de protection extérieure contre les coups directs de la foudre. Il est conçu comme un appât à foudre. Il est composé d'une pointe métallique placée sur un toit et reliée à la terre par plusieurs conducteurs. La pointe des paratonnerres sert à attirer la foudre. Lorsque la foudre tombe, elle choisit en effet le chemin le plus facile pour réunir les charges électriques entre un nuage d'orage et la terre. Les conducteurs de descente servent à écouler le courant électrique qui se crée entre le nuage et la terre. [2]

I.4.6.9. Générateur d'ozone

Un des effets positifs de la décharge couronne et l'utilisation pour la production de l'ozone. L'ozone est produit à partir de l'oxygène en tant que résultat de la décharge couronne qui va rompre les molécules stables de l'oxygène ainsi forment deux radicaux d'oxygène. Ces radicaux peuvent se combiner avec les molécules d'oxygène pour former l'ozone, qu'est utilisé dans le traitement des eaux au désinfectant. [2]

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les décharges électriques, plus particulièrement la décharge couronne. Ensuite, nous avons décrit les différents mécanismes de la décharge et les différents types. Les paramètres influençant la décharge couronne ont été brièvement discutés. Enfin, nous avons donné quelque application de la décharge couronne dans le domaine industriel. Le chapitre qui suit fera objet, d'une description du dispositif expérimental et des méthodes de mesure.

CHAPITRE II

Dispositifs expérimentaux et outils de simulation

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on décrit les différents éléments des installations expérimentales, les méthodes expérimentales ainsi que les outils de simulation utilisées durant notre étude. Il est structuré en deux parties: La première est consacrée à l'étude de la caractérisation électrique de la décharge couronne en configuration fil-cylindre et en configuration multipointes/plan. La deuxième partie est réservée au contrôle de l'état de charge d'un matériau diélectrique par un système de décharge couronne en configuration fil-cylindre.

II.2. Description des installations expérimentales

Les éléments constitutifs des installations expérimentales peuvent être groupés en trois blocs:

- Les alimentations électriques;
- Les systèmes d'électrodes de décharge couronne;
- Les appareils de mesures électriques.

II.2.1. Les alimentations électriques

Pour l'alimentation des électrodes actives des systèmes de décharge couronne, on a utilisé deux sources haute tension continue l'une positive et l'autre négative. La source positive est un modèle **Fug Modèle HCP 140-12500, 0-12,5 kV, 0-10 mA**, alors que la source négative est un modèle **TECHNIX 0-10 kV, 0-30 mA**.



a) source négative



b) source positive

Figure II.1 : alimentations électriques

II.2.2. Les systèmes d'électrodes de décharge couronne

II.2.2.1. système de décharge couronne en configuration multipointes/plan

Ce système contient deux électrodes distante l'une de l'autre de 1,5cm. Une électrode active composée de 7 pointes de 0.1 cm de diamètre et 0,5 cm de hauteur, distante l'une de l'autre de 2cm, qui sont fixées à un cylindre en cuivre de 2 cm de diamètre. Une électrode passive composée d'un plan de masse supportée par un système convoyeur assurant le mouvement va et vient, pour permettre le balayage de toute la surface du matériau étudié.



Figure II.2 : Système de décharge couronne en configuration multipointes/plan

II.2.2.2. Système de la décharge couronne en configuration fil-cylindre

La simplicité de mise en œuvre, a fait de la configuration "fil – cylindre" une des configurations les plus utilisées dans les laboratoires de recherche pour produire une décharge couronne. Dans ce système de décharge l'électrode passive est un tube en PVC de 4 cm de diamètre et 10cm de longueur couvert d'aluminium et relié à la masse ; alors que l'électrode active est un fil de diamètre 0,2 mm placé au centre du cylindre.



Figure II.3: Système de la décharge couronne en configuration fil-cylindre

II.2.3. Les appareils de mesures électriques et visualisations

Les grandeurs électriques mesurées dans cette étude sont la valeur moyenne du courant de décharge couronne, la charge électrique du matériau et la visualisation de la forme d'onde du courant de décharge.

II.2.3.1. mesure du courant moyen

Pour mesurer le courant de décharge I , le plan de collecte est relié à la masse à travers un microampèremètre à aiguille Figure II.4.



Figure II.4 : Microampèremètre à aiguille utilisé dans la mesure du courant de décharge

II.2.3.2. Mesure de la charge

Pour la mesure de la charge des matériaux diélectrique granulaires on utilise électromètre **Keithly 6514**, doté d'un seau de faraday. Ces mesures de charge ont été réalisées avant et après neutralisation afin de pouvoir quantifier la qualité et le taux de neutralisation (figure II.5).



Figure II.5 : mesure de la charge

II.2.3.3. Mesure de la masse du matériau

La balance utilisée au cours de cette étude pour la mesure de la masse des granules dans chaque essai est une balance électronique digital-scale de Marque KERN, Modèle MIHEE



Figure II.6 : Photographie de la balance.

II.2.3.4. Appareils d'affichage et d'acquisition

Pour afficher et acquérir les résultats de mesures, on a utilisé l'oscilloscope GWINSTEK GDB-2204A de la Figure II.7. Les résultats de mesures peuvent être sauvegardés sous plusieurs formats (Image bitmap, fichier CSV Microsoft office Excel, Fichiers binaires d'extension mat) de différentes manières :

- soit directement dans un flash disque
- soit dans la mémoire de l'oscilloscope pour être ensuite transférer sur un flash disque.
- soit directement sur un PC si l'on utilise un programme de terminal comme "Realterm" pour établir une connexion à distance entre l'oscilloscope et le PC via le port USB.



Figure II.7 : oscilloscope

II.2.4. Matériau utilisé dans l'étude

Les expériences ont été effectuées sur un matériau diélectrique granulaire: le polyéthylène haute densité (HDPE). Les particules du polyéthylène (PE) ont une forme quasi-sphérique, avec une taille typique autour de 3 mm. Le Tableau II.1 représente les principales caractéristiques des granulaires PE utilisés dans tous les expériences.

Tableau II.1 principales caractéristiques des granulaires PE utilisés dans les expériences [4].

Densité [g/cm³]	0.93 – 0.97
Couleur	Blanche
Forme	quasi sphérique
Diamètre	2.5 à 3 mm
Permittivité relative ϵ_r à 50 Hz	2.3
Rigidité diélectrique	18
Résistivité transversale ρ ($\Omega.cm$)	10^{14} - 10^{18}
masse volumique moyenne kgm⁻³	946- 960
Résistance de rupture diélectrique (kV/mm)	200
Température de fusion (°C)	130
Température maximum d'utilisation Tmax (°C)	60

II.3. Caractérisation électrique de la décharge couronne

II.3.1. Système de décharge couronne en configuration fil-cylindre

Nous allons étudier la caractéristique courant–tension et la variation de la forme d'onde courant en fonction de la tension source V_s pour les deux polarités, positive et négative.

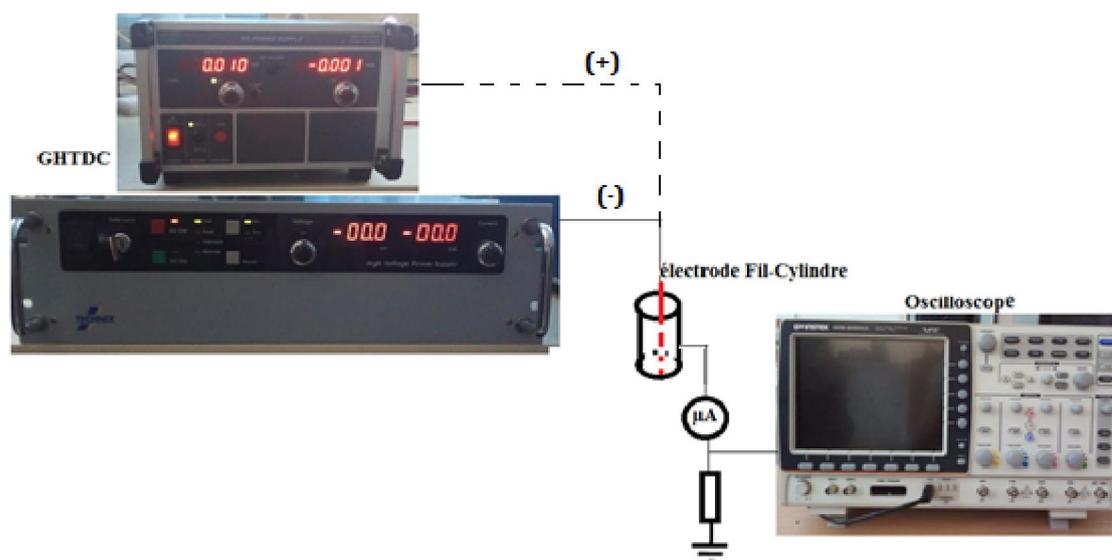


Figure II.8 : Installation expérimentale pour la caractérisation du système fil-cylindre

II.3.2. Système de décharge couronne en configuration multipointes-plan

Nous allons étudier la caractéristique courant-tension et la variation de la forme d'onde courant en fonction de la tension source V_s pour les deux polarités, positive et négative. Nous ferons une comparaison entre les résultats obtenus en présence et en absence d'une couche de granule de polyéthylène.

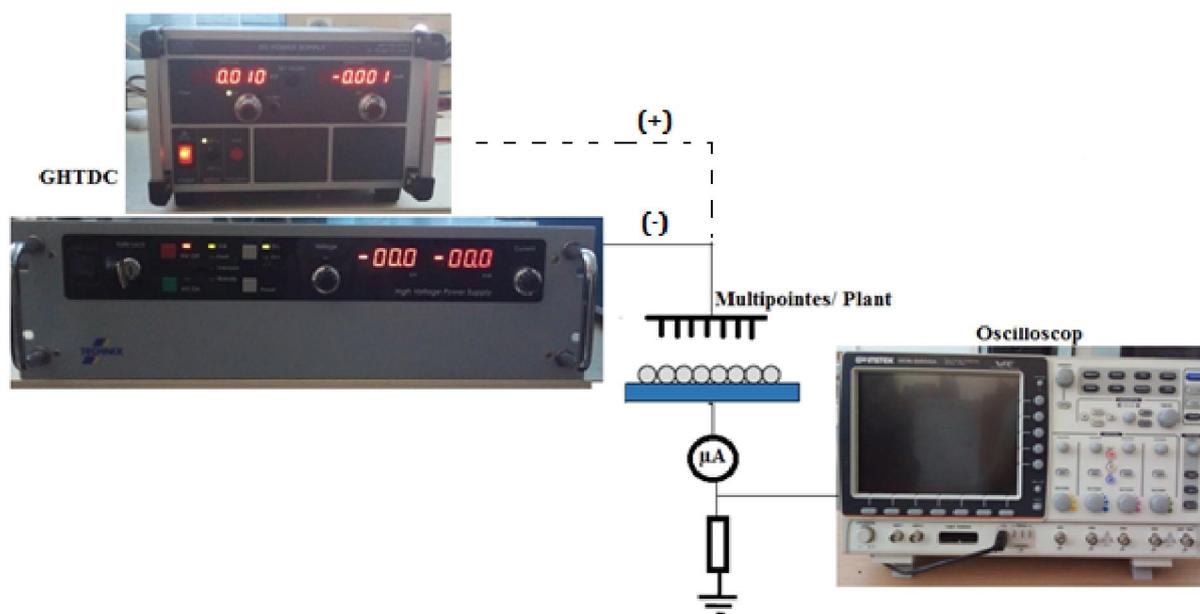


Figure II.9 : Installation expérimentale pour la caractérisation du système multipointes-plan

II.4. Neutralisation des charges électriques par décharge couronne

Dans cette section nous présentons la démarche expérimentale et le banc expérimental conçus pour l'étude de l'élimination des charges à la surface des granules de Polyéthylène au moyen d'une décharge couronne

II.4.1. Installation expérimentale

Le schéma de l'installation expérimentale est donné à la figure, elle est essentiellement formée de trois postes: un poste de chargement, un poste de mesure de la charge et un poste pour la neutralisation des charges.

✚ Le poste de chargement contient les éléments suivants :

- Le système d'électrodes de chargement en configuration multipointes;
- La source de tension négative **TECHNIX 0-10 kV, 0-30 mA**;

✚ Le poste de neutralisation des charges électriques est composé des éléments suivants :

- Le système de décharge couronne en configuration fil-cylindre;
- La source de tension négative **Fug Modèle HCP 140-12500, + 12,5 kV, 10 mA**;

✚ Le poste de mesure de charge est composé d'un électromètre **Keithly 6514**, doté d'unseau de faraday.

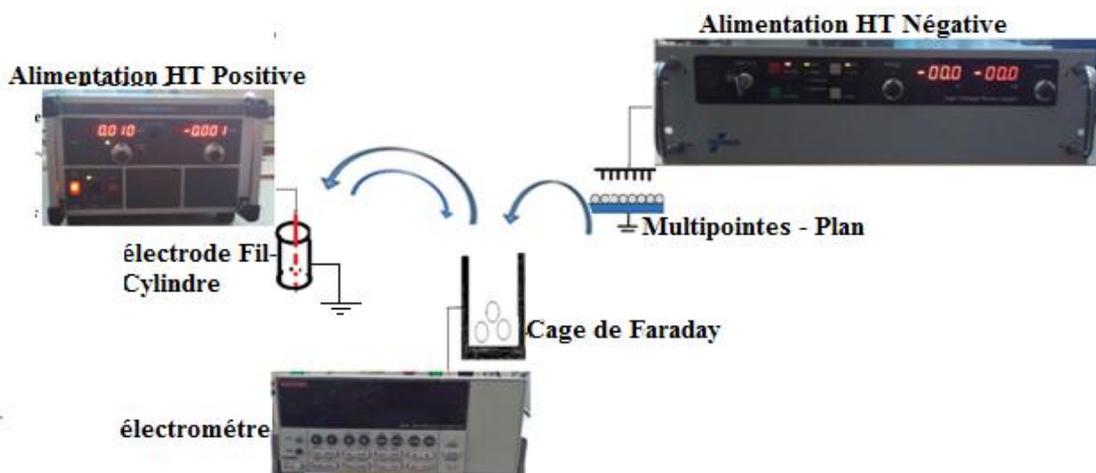


Figure II.10 : Installation expérimentale de neutralisation

II.4.2. Description de la démarche expérimentale

Les échantillons de PE de 6 g, sont mis en monocouche sur une plaque mise à la terre, supportée par un système de convoyeur assurant le mouvement va-et-vient, pour assurer une distribution de charge uniforme.

Après leurs chargement, les échantillons sont transférés au poste de mesure afin de mesurer leur charge, avant d'être transférés au poste de neutralisation. Après leur sortie du poste de neutralisation l'échantillon est envoyé de nouveau au poste de mesure afin de mesurer la charge après neutralisation.

II.5 .Outils de simulation

Pour l'étude de la distribution du champ électrique dans les systèmes de décharge étudiés, on a fait recours au calcul de champ par éléments finis. De nombreux outils sont disponibles, en tant que produit commercial ou en tant que freeware. Dans notre étude on a utilisé le logiciel gratuit FEMM. Figure III.11

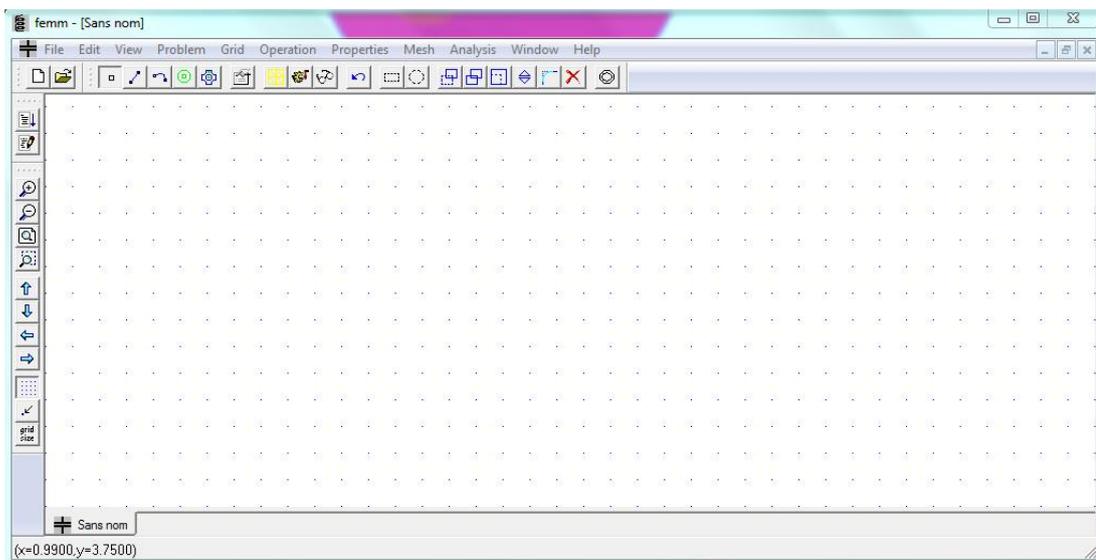


Figure II.11 : logiciel gratuit FEMM

FEMM est une suite de programmes pour résoudre des problèmes électromagnétiques à basse fréquence sur des domaines planaires et axisymétriques bidimensionnels. Le programme aborde actuellement les problèmes magnétostatiques linéaires/non linéaires, les problèmes magnétiques harmoniques linéaires/non linéaires, les problèmes électrostatiques linéaires et les problèmes de flux de chaleur en régime permanent.

Le langage script Lua est intégré au shell interactif. Une instance unique de Lua peut à la fois construire et analyser une géométrie et évaluer les résultats du post-traitement, simplifiant la création de divers types d'exécutions « par lots ».

On utilisant le script Lua, ce logiciel open source peut être conduit par le logiciel Matlab ou un clone de Matlab, le logiciel Octave. Figure III.12.

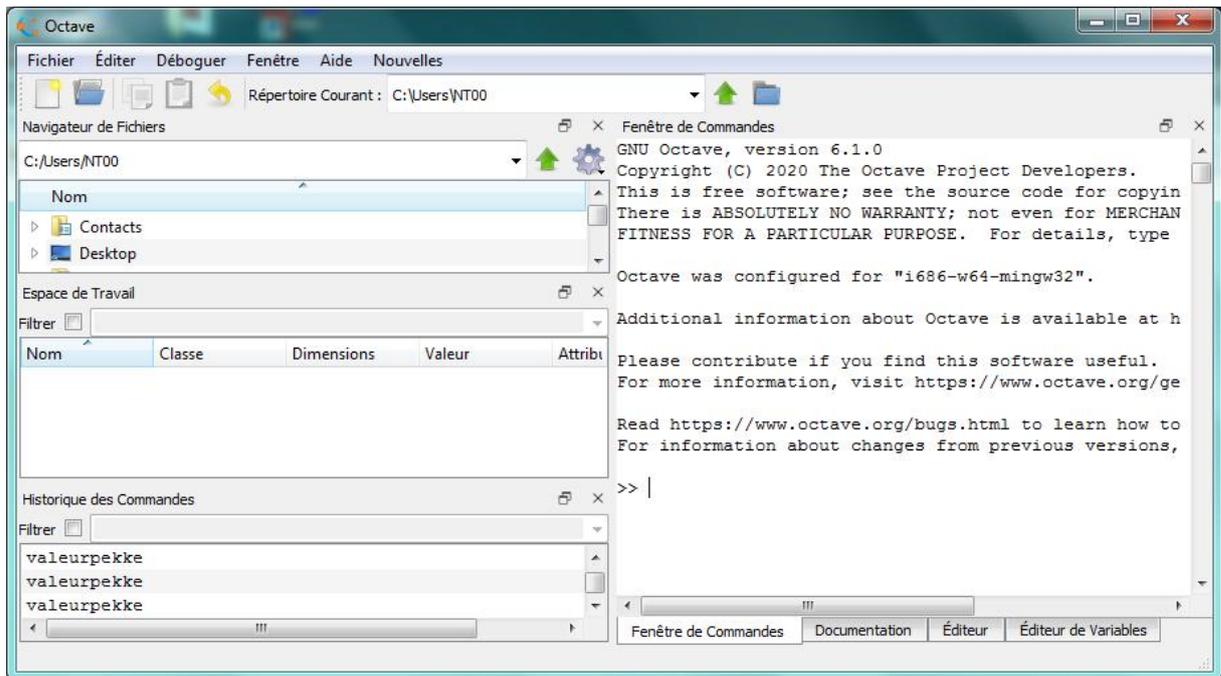


Figure II.12 : logiciel Octave

Des programmes Octave sont élaborés pour la création des modèles de simulation des systèmes d'électrodes en configurations fil-cylindre et multipointes-plan sur FEMM; voir annexes 1,2 et 3.

II.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description des installations et de l'instrumentation nécessaire utilisé au cours de ces études.

CHAPITRE III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et interpréter les résultats de simulation et ceux issus des essais réalisés sur les installations expérimentales des figures II.8, II.9 et II.10 du chapitre II.

III.2. Résultats expérimentaux

Le but de cette étude est de mieux comprendre l'influence de la tension sur le comportement de la décharge couronne pour deux configurations: multipointes-plan et fil-cylindre.

Dans ce but le courant moyen est mesuré (à l'aide d'un ampèremètre analogique) et l'évolution instantanée de l'onde des impulsions de courant sont enregistrés (en utilisant un oscilloscope) en augmentant progressivement la tension appliquée aux électrodes actives.

III.2.1. Caractéristiques I-V

Sur la figure III.1 sont représentées les caractéristiques I-V de la décharge couronne en configuration multipointes-plan avec et sans couche de granules (PE).

Le courant de la décharge couronne négative fil-cylindre en configuration multipointes devient de plus en plus important avec l'augmentation de la tension appliquée. On peut expliquer ce résultat par l'intensification de l'activité de la décharge durant les valeurs élevées de la tension appliquée. Le courant est plus intense en décharge sans granule qu'avec granules.

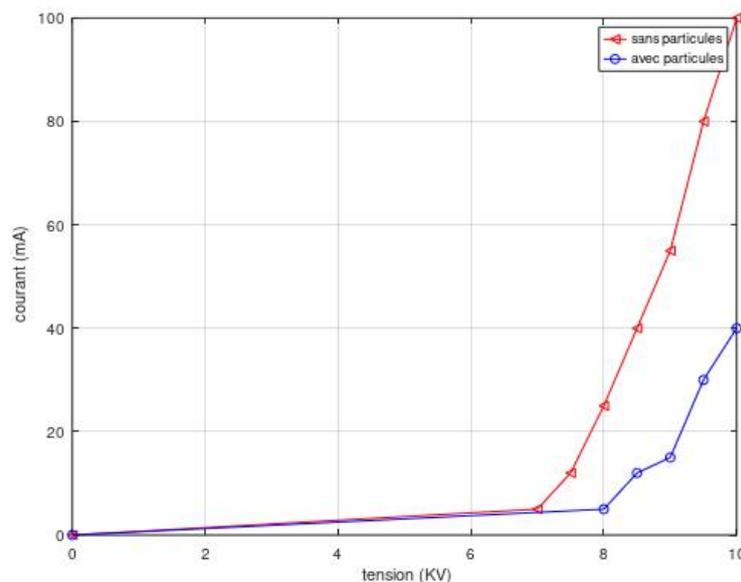


Figure III.1 : caractéristique courant – tension d’une décharge couronne négative en configuration multipointes-plan avec et sans granule

Sur la figure III.2 sont représentés les caractéristiques I-V de la décharge couronne négative et positives pour une configuration multipointes-plan.

Le courant moyen de décharge est plus intense en décharge couronne négative qu'en décharge couronne positive.

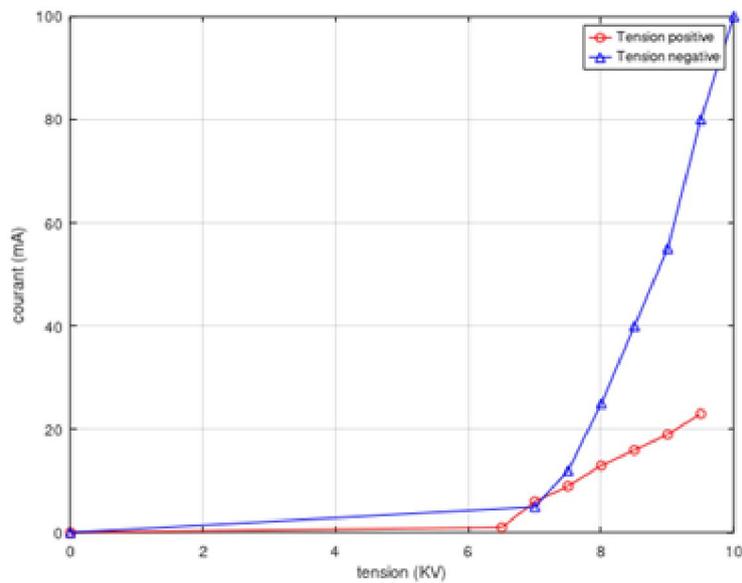


Figure III.2 : caractéristique courant – tension des décharges couronne négative et positive pour une configuration multipointes-plan

Sur la figure III.3 sont représentés les caractéristiques I-V de la décharge couronne négative et positives pour les configurations fil-cylindre. Le courant moyen de décharge est plus intense en décharge couronne négative qu'en décharge couronne positive.

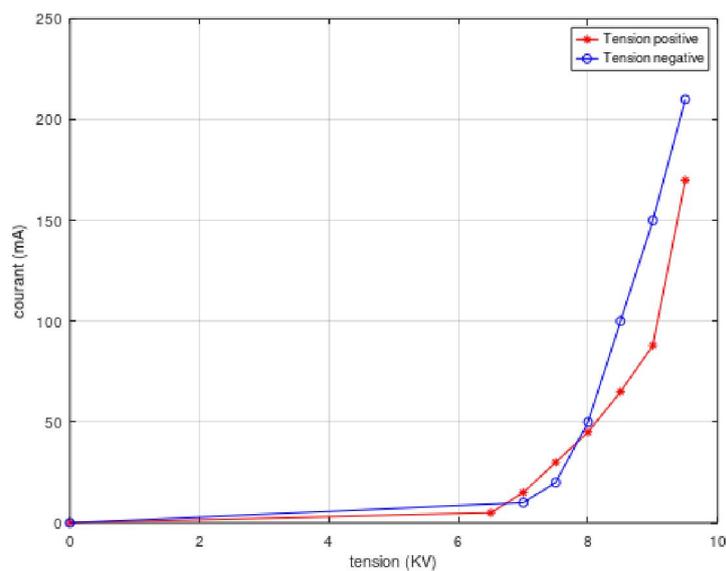


Figure III.3 : caractéristique courant – tension des décharges couronne négative et positive pour une configuration fil-cylindre

Sur la figure III.4 sont représentés les caractéristiques I-V de la décharge couronnes négative et positives pour les configurations fil-cylindre et multipointes-plan.

Le courant moyen de décharge est plus intense pour une décharge couronne négative en configuration fil-cylindre que pour les autres cas. Il est le moins intense pour la décharge couronne positive en configuration multipointes-plan.

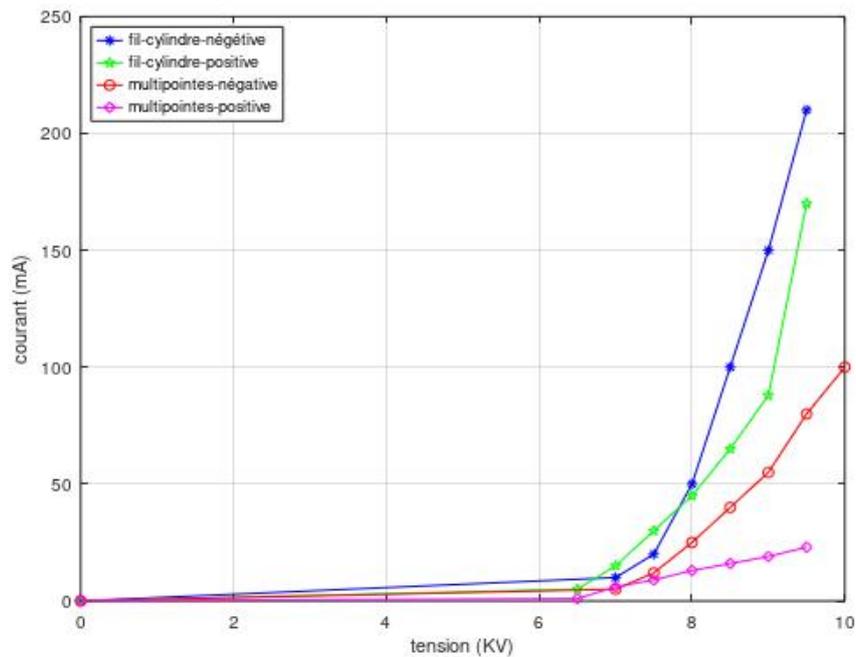


Figure III.4: caractéristique courant – tension des décharges couronnes négative et positive pour une les configurations fil-cylindre et multipointes-plan

III.2.2. Formes d'onde de courants de décharge couronne

III.2.2.1. Influence de la tension

Un enregistrement de 20 ms du courant de décharge couronne négative en configuration multipointes pour différentes valeurs de la tension est donné à la figure III.5.

On constate qu'on a un régime impulsionnel dont la durée des cycles n'est pas identique, nous parlons de cycles asymétriques. L'augmentation de la tension appliquée, provoque une augmentation de la fréquence de répétition des impulsions des courants de décharge.

Sur la figure III.7 on a représenté la variation de la fréquence en fonction de la tension lors des décharges couronnes négatives en configurations multipointes-plan et fil-cylindre

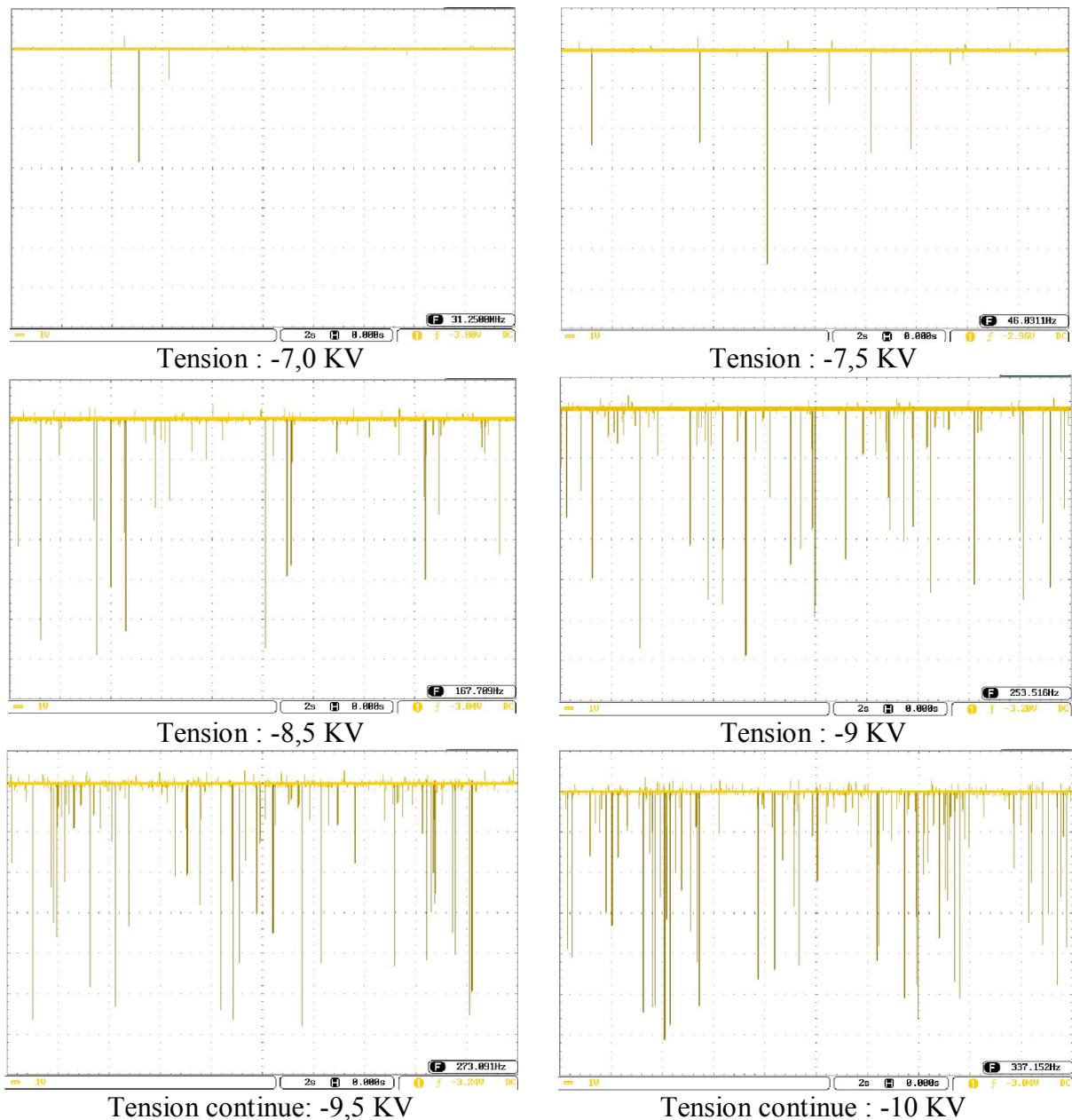


Figure III.5 : Enregistrement du courant instantané pour une décharge couronne négative en configuration multipointes-plan.

Sur la figure III.6 sont représentés les formes d'onde du courant instantané lors de la décharge couronne négative en configuration multipointes pour différentes valeurs de la tension. On constate que les impulsions négatives gardent une même largeur de $2\mu\text{s}$ pour les différentes tensions appliquées.

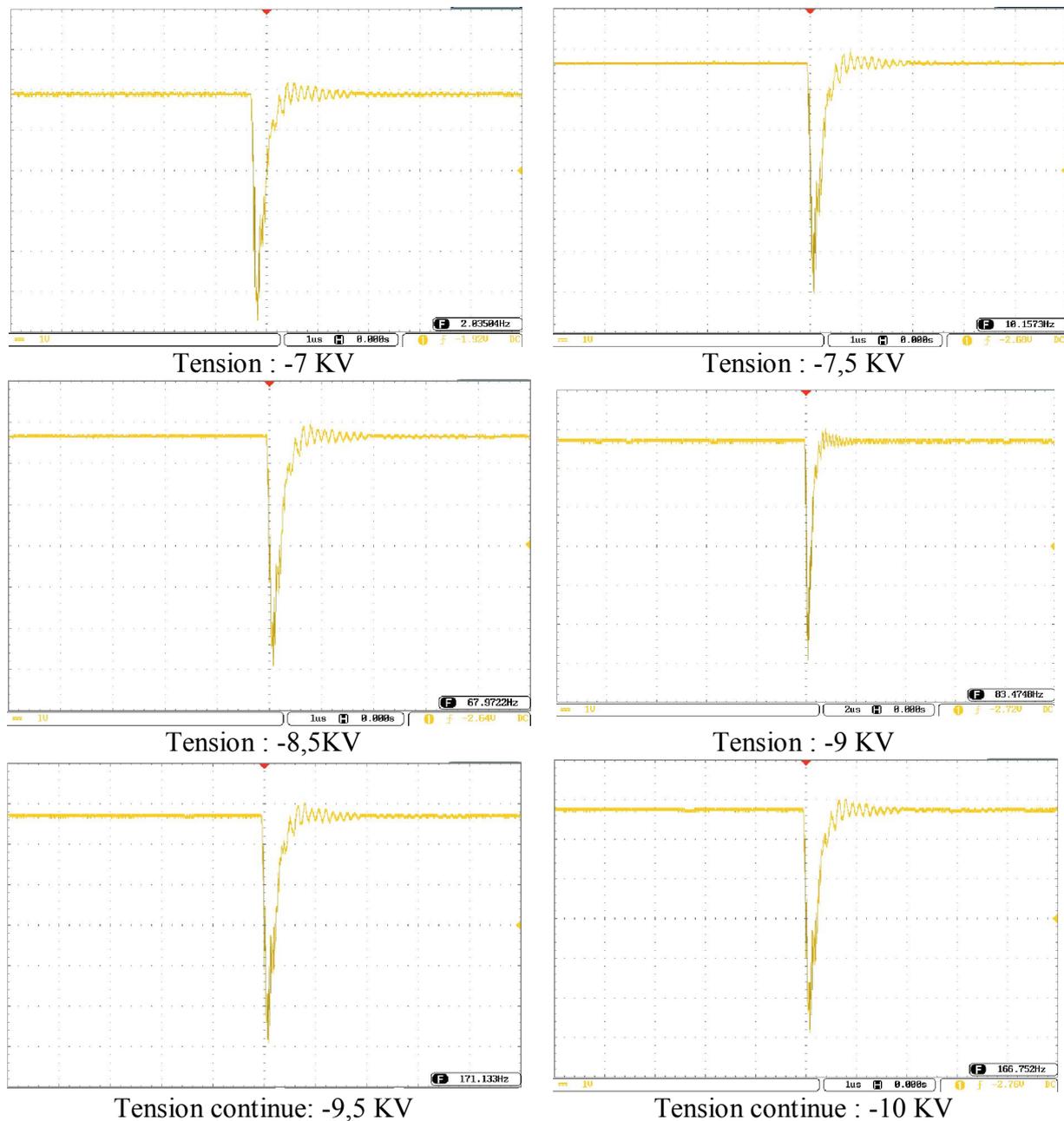


Figure III.6 : Impulsions du courant de décharge couronne négative pour une configuration multipointes-plan.

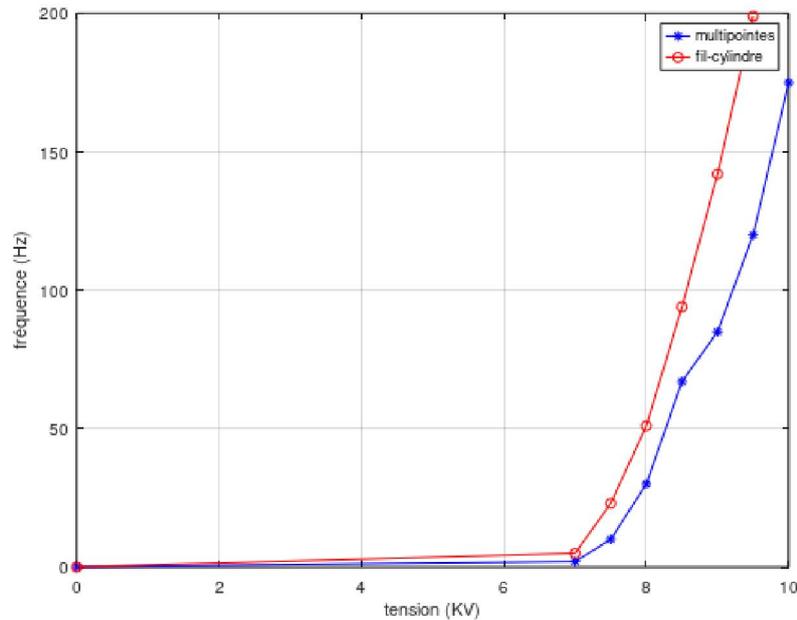
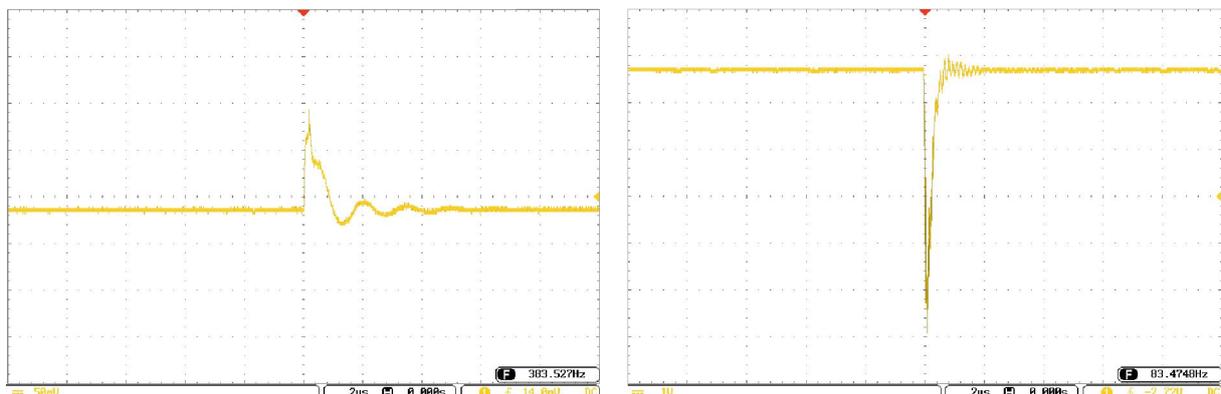


Figure III.7 : Variation de la fréquence en fonction la tension lors des décharges couronnes négatives en configurations multipointes-plan et fil-cylindre

III.2.2.2. Influence du signe de tension

La figure III.8 montre la forme de l'impulsion du courant instantané lors de la décharge couronne en configuration multipointes-plan pour une tension de 9 KV positive et négative. La valeur maximale de l'impulsion du courant pour la décharge couronne négative est nettement supérieure à celle de la décharge couronne positive. La durée de l'impulsion pour la décharge positive est égale à 6 μ s, alors que celle pour la décharge couronne négative n'est que de 2 μ s seulement.



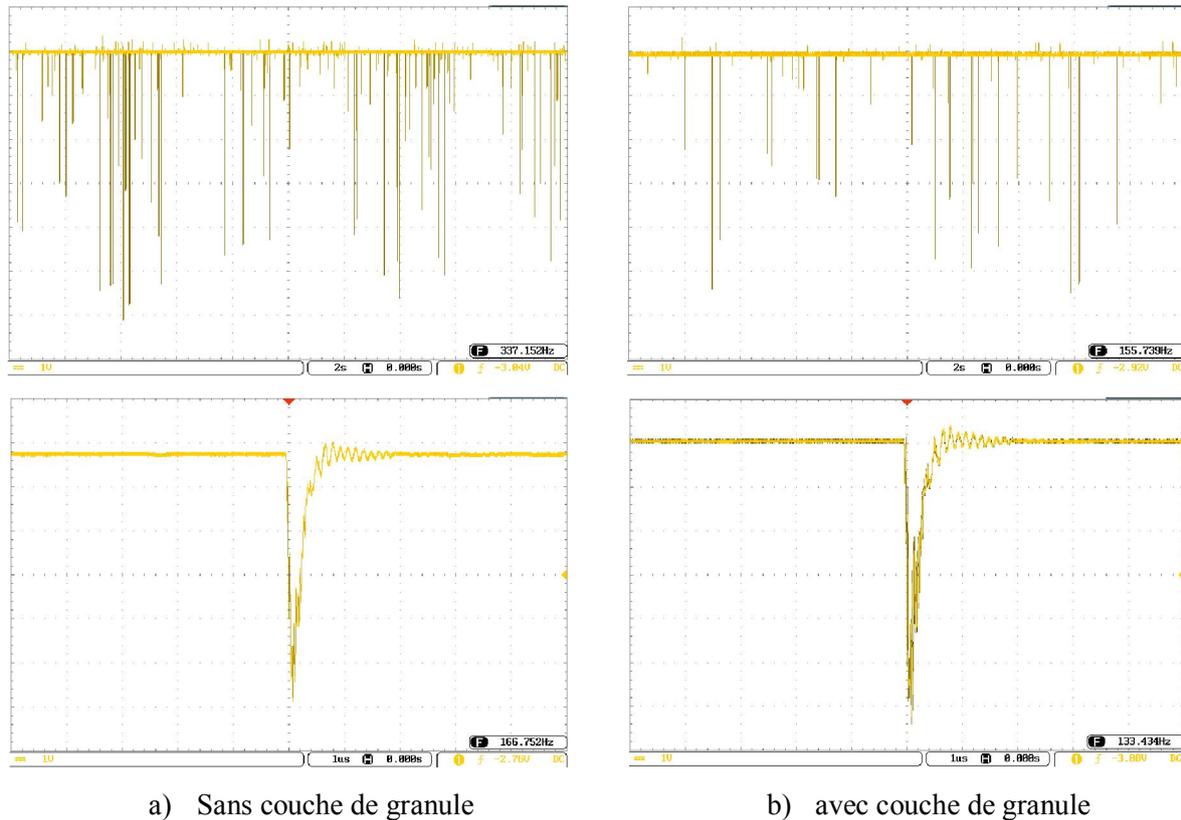
Tension positive 9 KV DC

Tension négative -9 KV DC

Figure III.8 : Impulsions du courant de décharge couronne pour une configuration multipointes-plan

III.2.2.3. Influence de la présence d'une couche de granule sur la décharge

Sur la figure III.9 on donne un enregistrement de 20 ms du courant d'une décharge couronne négative en configuration multipointes avec et sans couche de granule pour une tension de 10 KV. Les impulsions ont presque les mêmes amplitudes et les mêmes largeurs alors que la fréquence de répétition des impulsions des courants pour le cas sans granules est nettement supérieure à celle pour celui avec granules.



a) Sans couche de granule

b) avec couche de granule

Figure III.9 : Courant de décharge pour une configuration multipointes-plan avec et sans une couche de granule pour une tension de -10 KV.

III.2.2.4. Influence de types de configuration des électrodes.

La figure III.10 montre la forme de l'impulsion du courant instantané lors de la décharge couronne négative (-8,5 KV) pour la configuration multipointes-plan et celle fil-cylindre. Alors que les valeurs maximales des impulsions de courant sont presque égales pour les deux configurations. La fréquence de répétition des impulsions pour la décharge couronne en configuration fil-cylindre est nettement supérieure à celle de la décharge couronne en configuration multipointes-plan. La durée de l'impulsion pour la configuration multipointes-plan est égale à 2 μ s, alors que celle pour la configuration fil-cylindre n'est que de 1 μ s seulement.

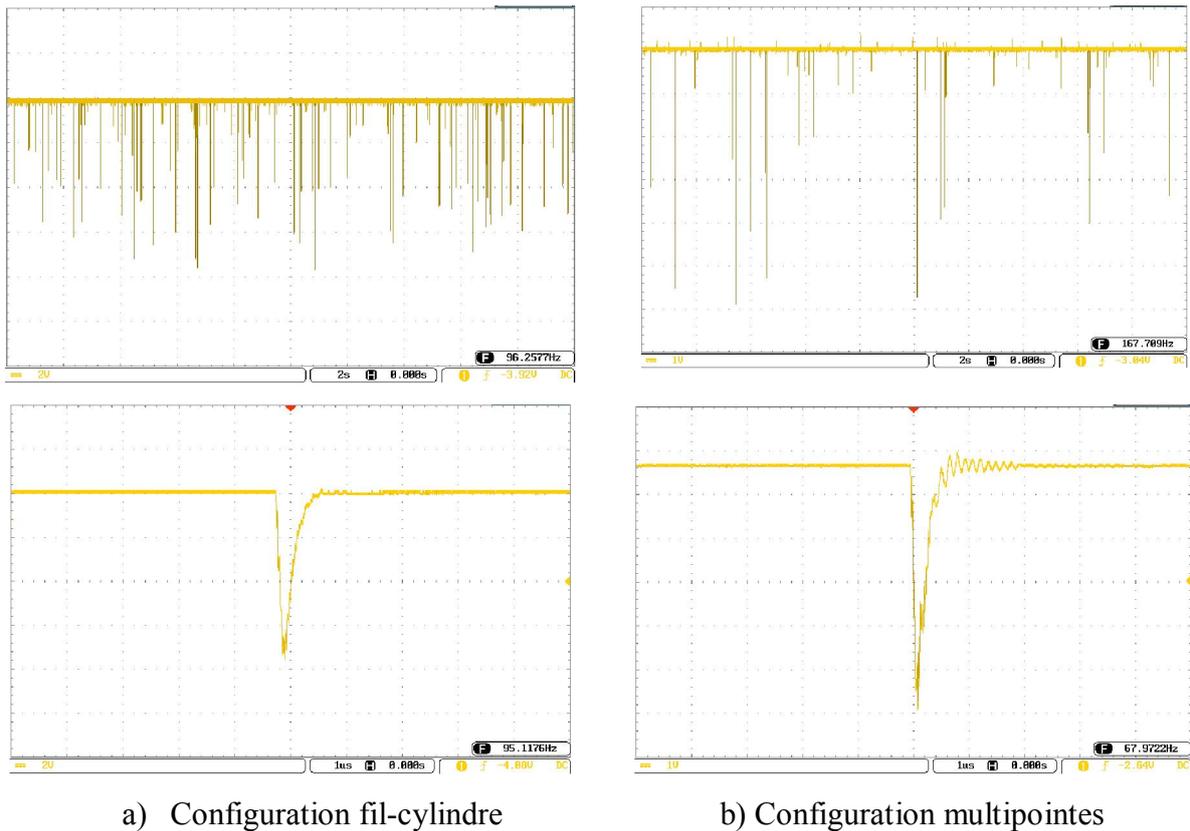


Figure III.10 : Courant de décharge couronne pour les configurations fil-cylindre et multipointes pour une tension négative de -8,5 KV DC

III.4. Neutralisation par un système de décharge couronne en configuration fil-cylindre

Les résultats des essais de neutralisation des charges par une décharge couronne en configuration fil-cylindre effectuée sur un échantillon de 6g de granules de polyéthylène sont donnés au tableau III.4.

Avant neutralisation, et pour une tension négative de 9.5KV, les granules de polyéthylène (PE) ont une charge initiale comprise entre 0,032 μC et 0,0423 μC . Après passage des granules de PE à travers le cylindre du système de neutralisation, la charge totale diminue subitement et n'aura que des valeurs comprises entre -0.006 μC et 0.008 μC à 7 kV.

Tableaux III.1 : neutralisation de la décharge couronne Fil-cylindre

Charge	Tension (KV)	-9.5	-9.5	-9.5	-9.5	-9.5	-9.5
	Charge (pC)	-32	-35.7	-37	-41	-42	-42.3
Neutralisation	Tension (KV)	+7	+7	+7	+7	+7	+7
	Charge (pC)	+5	+1	-6	+8	-2	+3
Efficacité (%)		84	97	83	80	95	92

III.3 Résultats de simulation

III.3.1. Système de décharge couronne en configuration multipointes-plan

L'exécution du programme Octave de l'annexe 3 permis à la fois la construction et l'analyse de la géométrie multipointes-plan.

Le modèle obtenu est celui de la figure III.11. Les résultats d'analyse sont donnés aux figures : Figure III.12, Figure III.13, Figure III.14, et Figure III.14.

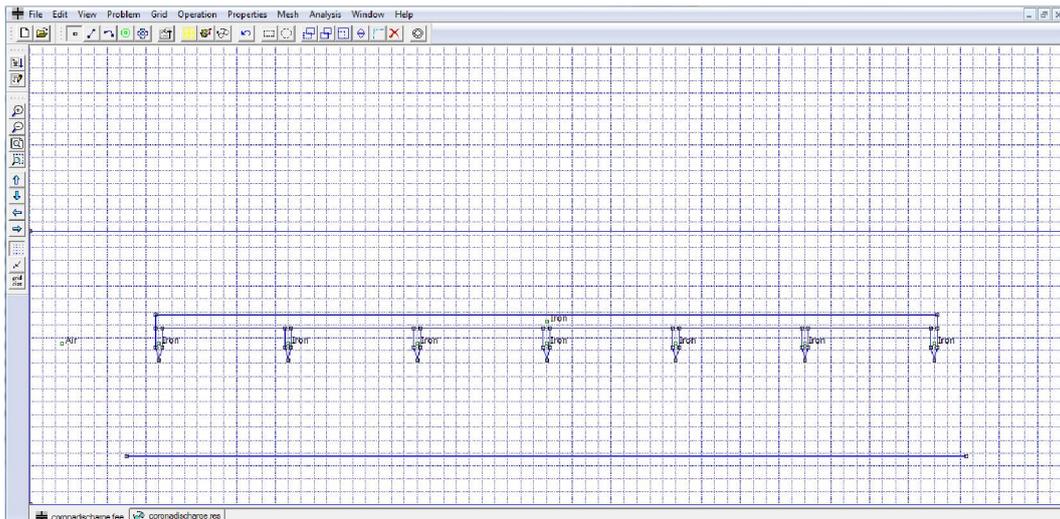


Figure III.11: Modèle FEMM de la géométrie multipointes/plan

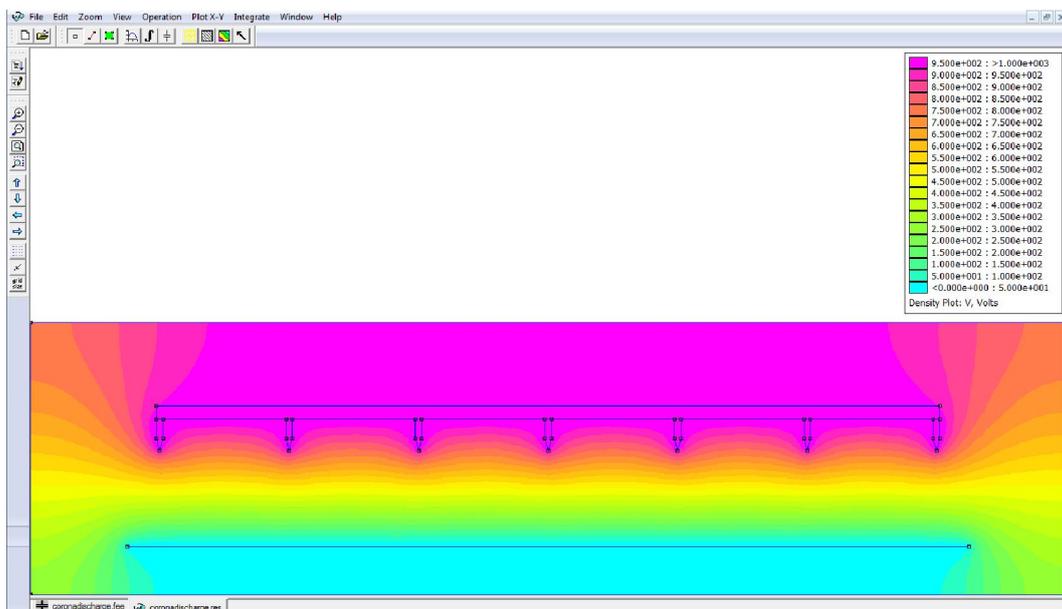


Figure III.12 : Distribution spatiale du potentiel électrique

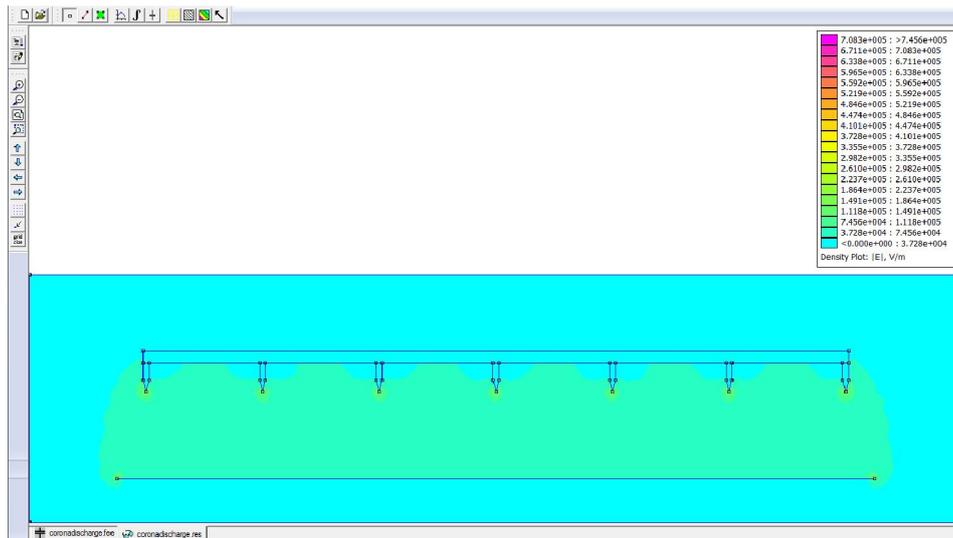


Figure III.13 : Distribution spatiale du champ électrique

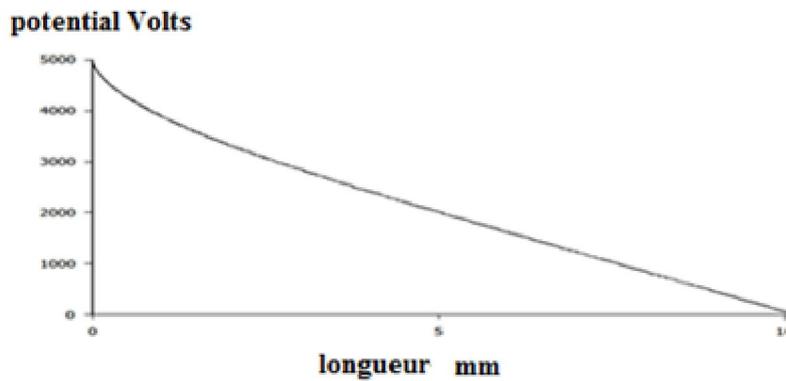


Figure III.14 : Distribution du potentiel électrique le long du système multipoints

Le potentiel électrique est maximal sur l'électrode active (la pointe) et il est nul au niveau de l'électrode passive (plan de masse).

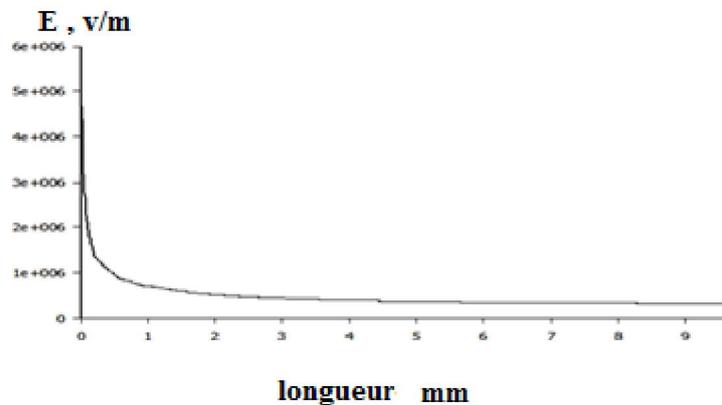


Figure III.15: La distribution du champ électrique dans un système multipoints

Le champ électrique est maximal près de l'électrode active, puis il décroît rapidement pour atteindre une valeur minimale près de l'électrode passive.

III.3.2. Système de la décharge couronne configuration fil-cylindre

L'exécution du programme Octave de l'annexe 1 permis à la fois la construction et analyse de la géométrie fil cylindre.

Le modèle obtenu est donné à la figure III.15. Les résultats d'analyse sont donnés aux figures : Figure III.16, Figure III.17, Figure III.18, et Figure III.19

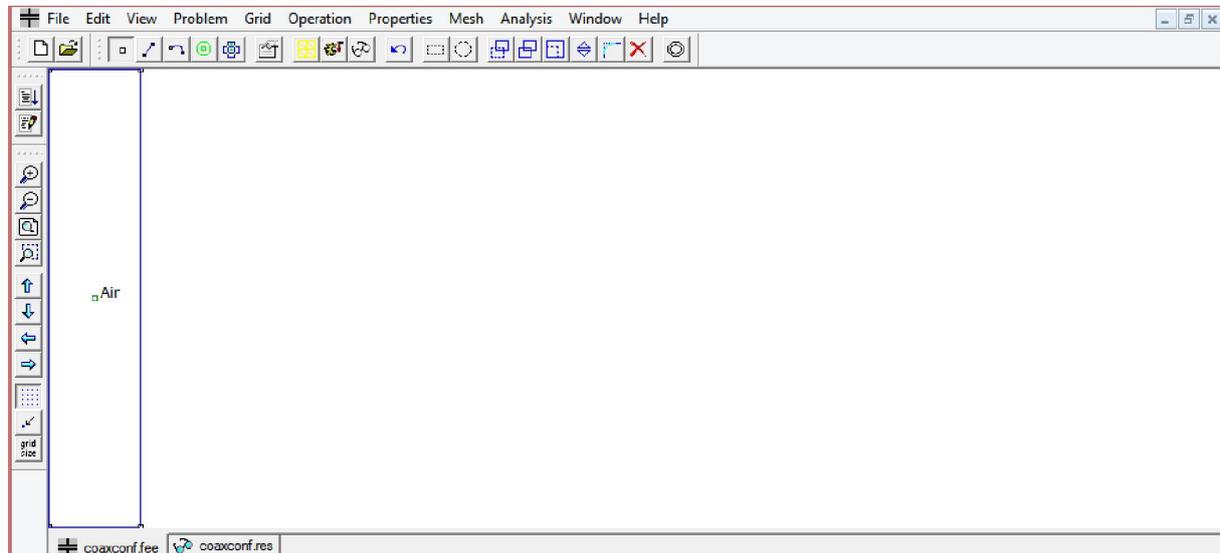


Figure III.16 : Modèle FEMM de la géométrie fil-cylindre sans granule

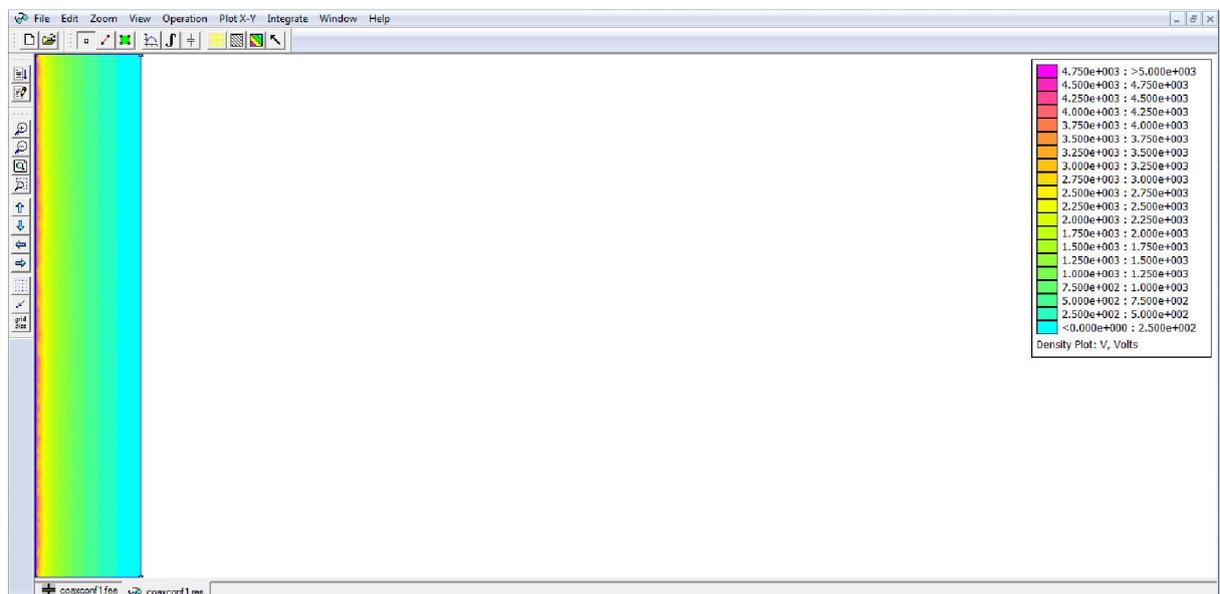


Figure III.17 : Distribution spatiale du potentiel électrique pour la géométrie Fil-Cylindre sans granule

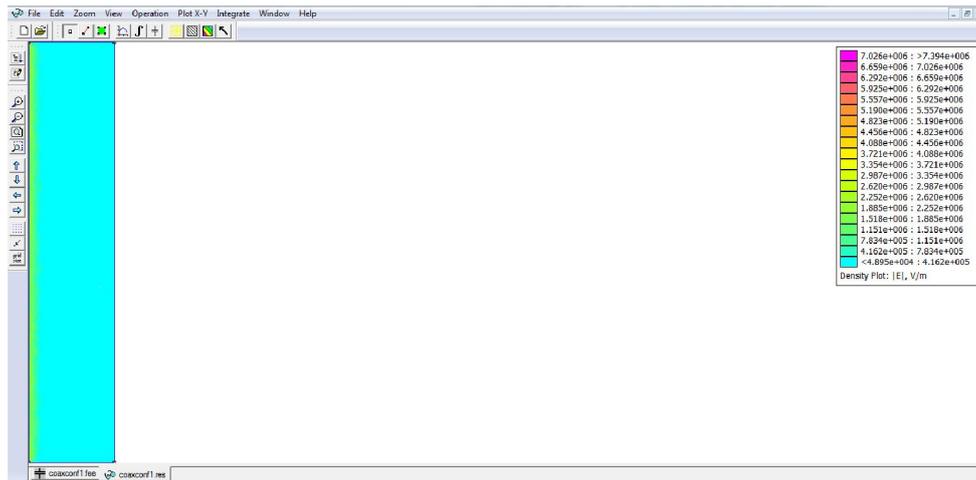


Figure III.18: Distribution spatiale du champ électrique pour la géométrie Fil-Cylindre sans granule

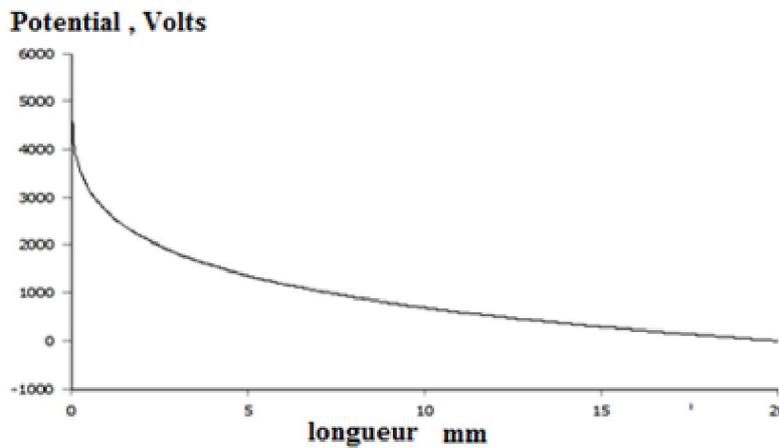


Figure III.19 : La distribution du potentiel électrique dans un système Fil-cylindre

Le potentiel électrique est maximal près de l'électrode active (fil au centre du cylindre), puis il décroît rapidement pour atteindre une valeur nulle près de l'électrode passive (cylindre).

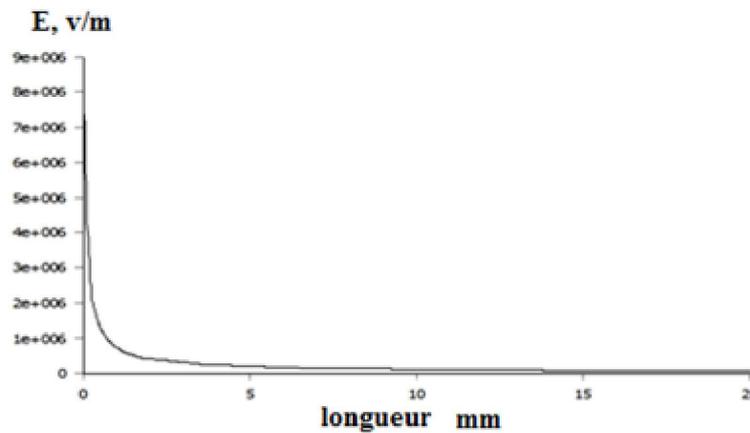


Figure III.20 : La distribution du champ électrique dans un système Fil-cylindre

Le champ électrique est maximal près de l'électrode active (fil au centre du cylindre), puis il décroît rapidement pour atteindre une valeur minimale près de l'électrode passive (cylindre).

III.3.3. Système de la décharge couronne configuration Fil-cylindre avec granule

L'exécution du programme Octave de l'annexe 2 permis à la fois la construction et analyse de la géométrie fil cylindre avec une particule en polyéthylène.

Le modèle obtenu est donné à la figure III.20. Les résultats d'analyse sont donnés aux figures : Figure III.21, Figure III.22, Figure III.23, et Figure III.24



Figure III.21 : Modèle FEMM de la géométrie fil-cylindre avec particule PE



Figure III.22: Distribution spatiale du potentiel électrique pour la géométrie Fil-Cylindre avec particule

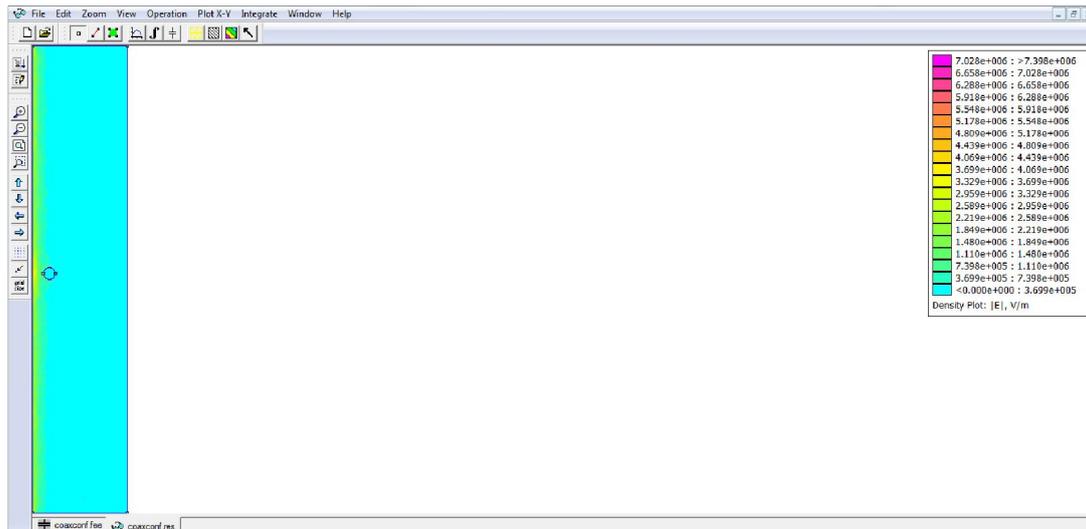


Figure III.23: Distribution spatiale du champ électrique pour la géométrie Fil-Cylindre avec particule

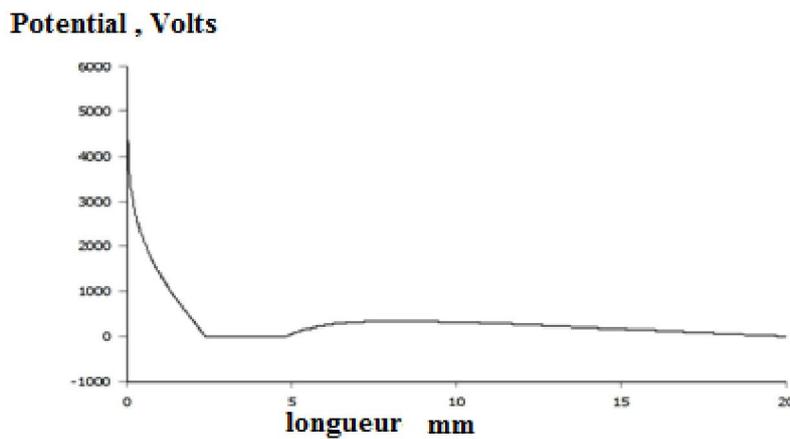


Figure III.24: la distribution de voltage de la décharge couronne Fil-cylindre avec granule

Le potentiel électrique est maximal près de l'électrode active (fil au centre du cylindre), puis il décroît rapidement pour s'annuler près de la particule. Après la particule, il augmente sensiblement puis diminue pour s'annuler près de l'électrode passive (cylindre).

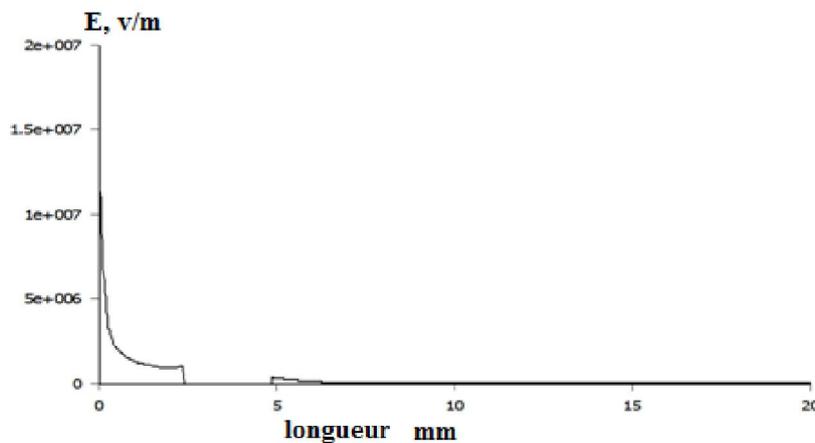


Figure III.25: La distribution du champ dans la décharge couronne Fil-cylindre avec particule

Le champ électrique est maximal près de l'électrode active (le fil au centre du cylindre), puis il décroît rapidement pour atteindre une valeur minimale près de l'électrode passive (le cylindre).

La présence de la particule à l'intérieur du cylindre a augmenté l'amplitude du champ près de l'électrode active (le fil) et a altéré sa distribution près de la particule.

III.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats expérimentaux et de simulation obtenus et leurs interprétations. La caractéristique courant-tension et la forme d'onde du courant de décharge ont été étudiées.

Conclusion générale

Conclusion générale

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.

Cette étude nous a permis d'élargir nos connaissances sur les décharges couronne, le choix des configurations géométriques (Fil-cylindre, multipointes), et l'étude des neutralisations de la décharge couronne Fil-Cylindre.

Enfin, nous espérons que ce travail servira de base pour les étudiants qui s'intéressent à l'étude des neutralisations de la décharge couronne.

Bibliographie

Bibliographie

[1] MEGHAR Abdelghani et OUNNOUGHI Tacfarinas, “ Etude de la distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative”, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, juin 2014.

[2] ABDALI Sabrina. AIANE Cherif , “ L’effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne ”, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira –Bejaïa, 2017/2018.

[3] LONGWEN CHEN, “ Etude Expérimentale de la décharge couronne pour le traitement de l’Air intérieur : COV et particules ”, Thèse de doctorat, université Grenoble Alpe, 13 /12/2018.

[4] MOUSSAOUI Aida, “ Etude des phénomènes de charge et de neutralisation des milieux diélectriques granulaires en utilisant la décharge à barrière diélectrique ”, Thèse de doctorat, Université 08 Mai 1945, Guelma, 2018/1019.

[5] MIHOUBI Soumia & KERDOUSSI Hakima, “ Décharge couronne en configuration coaxiale : Application à la neutralisation des charge ”, Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945, Guelma, 3/10/2020.

[6] CHICOUCHE HAMINA Bilal, “ Etude de la dégradation du polyéthylène soumis à une décharge couronne”, Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf, M’Sila, 2015/2016

[7] BACHA MOHAND Arezki, “ Etude de la décharge couronne en Géométrie Fil-plan”, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia.

[8] TIFAOUI Djilali & LADJEL Amine, “ Etude de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continu”, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 28/62016.

[9] BEDJAOUI Tassadit & MEDJEKDOUD Nardjes, “ Caractérisation de la décharge couronne dans un système à configuration Triode”, Mémoire de Master, université Abderrahmane Mira, BEJAIA, 2017.

[10] ASSIA BOUAROURI, “Développement d’un chargeur à décharge couronne pour la mesure à 10 HZ de la concentration d’aérosol atmosphérique”, Mémoire de Master, Université PARIS-SUD, 12/12/2014.

[11] MOUATSI Abdelmalek, “étude de l’effet de l’humidité sur les propriétés électrique de la surface d’un polymère”, Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine.

Annexes

Annexe 1

Programme Octave pour la simulation d'un système de décharge en configuration fil-cylindre sans particule avec le logiciel FEMM

```
clc                                %Effacer la fenêtre de commande
clear all                          %Effacer toutes les variables locales et globales
close all                          %fermer toutes les fenêtres ouvertes
openfemm;                          %chargement de FEMM
newdocument(1);                    %definition of new electrostatic project
global data                         % Déclarer "data" comme variable globale

% paramètres géométrique et électrique du système
%tube cylindrique:
data.units='millimeters';
data.rayon=20; %R=20mm
data.longueur=100; %longueur 100mm
data.materialcylindre='Air';
data.ex=1;
data.ey=1;
data.qv=0;

%Energized wire parameters
data.Vs_wire=2*1e+3; %surface potentiel
data.Qs_wire=0; %surface charge density

confilcyl % appel de la fonction " confilcyl" pour la création du modèle avec FEMM

ei_analyze; % analyze
ei_loadsolution; % chargement de la solution
```

Fichier fonction "confilcyl" pour création du modèle FEMM d'un système de décharge en configuration fil-cylindre

function confilcyl

global data;

%définition du problème

ei_probdef(data.units,'axi',1.e-8,0,30); **%ei_probdef(units,type,precision,depth,minangle)**

%Drawing the problems geometry

ei_drawrectangle([0 0;data.rayon data.longueur])

ei_addblocklabel(data.rayon/2,data.longueur/2);

%defining materials

ei_addmaterial(data.materialcylindre,...

 data.ex,... **%ex: relative permittivity in the x- or r-direction**

 data.ey,... **%ey: relative permittivity in the y- or z-direction**

 data.qv); **%qv: volume charge density in units of c/m3**

ei_selectlabel(data.rayon/2,data.longueur/2);

ei_setblockprop(data.materialcylindre,0,0,0);

ei_clearselected;

%defining boundary conditions

%energized wire: Vs=1000 v ; qs=0

ei_addboundprop('high',data.Vs_wire,data.Qs_wire,0,0,0);

ei_selectsegment(0,1);

ei_setsegmentprop('high',0,1,0,0,'inconductor');

ei_clearselected;

%ground

ei_addboundprop('ground',0,0,0,0,0);

ei_selectsegment(20,1);

ei_setsegmentprop('ground',0,1,0,0,'inconductor');

ei_clearselected;

%now, the finished input geometry can be displaye

ei_zoomnatural;

%we have to give the geometry a name before we can analyze it

ei_saveas('coaxconf.fee');

endfunction

Annexe 2

Programme Octave pour la simulation d'un système de décharge en configuration fil-cylindre avec particule 'PE' avec le logiciel FEMM

```
Clc                %Effacer la fenetre de commande
clear all          %Effacer toutes les variables locales et globales
close all         %Fermer toutes les fenetres ouvertes
openfemm;         %chargement de FEMM
newdocument(1);  % definition of new electrostatic project
global data      % declarer data comme variable globale
```

```
% parametres geometrique et electrique du systeme
```

```
% tube cylindrique;
```

```
data.units ='millimeters';
```

```
data.rayon =20;           %rayon R=20mm
```

```
data.longueur=100;      % longueur 100mm
```

```
data.materialcylindre='Air';
```

```
data.ex=1;
```

```
data.ey=1;
```

```
data.qv=0;
```

```
%Energized wire parameters(parametres du fil):
```

```
data.Vs_Wire=2*1e+3;    %surface potentiel
```

```
data.Qs_Wire=0;        %surface charge density
```

```
%particule:
```

```
data.materialparticule='PE'; %matériau: PE;
```

```
data.ex_part=2.3        %permittivity ex
```

```
data.ey_part=2.3;      %permittivity ey
```

```
data.qv_part=0;        %charge qv
```

```
data.propname='particule';
```

```
data.Vs_part=0;        %surface potential
```

```
data.Qs_part=-0.1*1e-9 ; % surface charge density
```

```
data.maxsegdeg=2.5;
```

```
data.m_part=0.02*1e-3; %masse de la particule en Kg
```

```
data.r_part=1.25;     %rayon de la particule
```

%position initiale de la particule

data.r=10;

data.z=98.5;

%création du modèle FEMM

Wiretubeaxiconf

%Wiretubeplanarconf

%Analyze the problem and load the solution when the analysis is finished

dr=0;

dz=0;

dt=0.1;

t(1)=0;

VoZ=0;

g=9.81;

i=1;

while and((data.z>2),(data.r>2))

ei_selectgroup(1);

ei_movetranslate(dr,dz)

ei_analyze;

ei_loadsolution ;

pos(i,:)=[data.r,data.z];

%calcul du champ Er et Ez

res1(i:)=eo_gete(data.r-data.r_part-.1,data.z);

res2(i:)=eo_gete(data.r+data.r_part+.1,data.z);

res(i:)=(res1(i:)+res2(i:))./2;

%calcul de la nouvelle position

data.r=(data.Qs_part*res(i,1)*t(i)^2)/(2*data.m_part)+pos(1,1);

data.z=-(g*t(i)^2)/2-Voz*t(i)+pos(1,2);

%data.z=-((data.Qs-part*res(i,2)/data.m-part+g)*t(i)^2)/2-voz*t(i)+pos(1,2)

i=i+1;

t(i)=t(i-1)+dt;

dr=data.r-pos(i-1,1);

dz=data.z-pos(i-1,2);

endwhile

Fichier fonction " **Wiretubeaxiconf** " pour création du modèle FEMM d'un système de décharge en configuration fil-cylindre

function Wiretubeaxiconf

global data;

%définition du probleme:

%ei_probdef (units,type,precision,depth,minangle)

ei_probdef(data.units,'axi',1.e-8,0,30);

%drawing the problems geometry

ei_drawrectangle ([0 0;data.rayon data.longueur])

ei_addblocklabel (data.rayon/2,data.longueur/2);

%defining materials

ei_addmaterial(data.materialcylindre,...

data.ex,... **%ex: relative permittivity in the x- or r-direction**

data.ey,... **%ey: relative permittivity in the y- or z-direction**

data.qv); **%qv: volume charge density in units of c/m3**

ei_selectlabel(data.rayon/2,data.longueur/2);

ei_setblockprop(data.materialcylindre,0,0,0);

ei_clearselected;

%defining boundary conditions

%energized Wire: Vs=1000 v ; qs=0

ei_addboundprop('high',data.Vs_Wire,data.Qs_Wire,0,0,0);

ei_selectsegment(0,1);

ei_setsegmentprop('high',0,1,0,0,'inconductor');

ei_clearselected;

%ground

ei_addboundprop('ground',0,0,0,0,0);

ei_selectsegment(20,1);

ei_setsegmentprop('ground',0,1,0,0,'inconductor');

ei_clearselected;

%adding a firts charges particle of 2.5mm

```
ei_drawarc(data.r-data.r_part,data.z,data.r+data.r_part,data.z,180,2.5);  
ei_drawarc(data.r+data.r_part,data.z,data.r-data.r_part,data.z,180,2.5);  
ei_addblocklabel(data.r,data.z);
```

%defining materials

```
ei_addmaterial(data.materialparticule,...  
    data.ex_part,...  
    data.ex_part,...  
    data.qv_part);  
ei_selectlabel(data.r,data.z);  
ei_setblockprop(data.materialparticule,0,0,1);  
ei_clearselected;
```

%defining boundary conditions.

```
ei_addboundprop(data.propname,data.Vs_part,data.Qs_part,0,0,0);
```

%firstArc

```
ei_selectarcsegment(data.r-data.r_part+1,data.z+1);  
ei_setarcsegmentprop(data.maxsegdeg,data.propname,0,1,'<None>');  
ei_clearselected;
```

%secondArc

```
ei_selectarcsegment(data.r-data.r_part+1,data.z-1);  
ei_setarcsegmentprop(data.maxsegdeg,data.propname,0,1,'<None>');  
ei_clearselected;
```

%NOW, the finished input geometry can be displayed.

```
ei_zoomnatural;
```

%we have to give the geometry a name before we can analyze it .

```
ei_saveas('coaxconf.fee');
```

endfunction

Annexe 3

Programme Octave pour la simulation d'un système de décharge en configuration multipointes avec le logiciel FEMM

```
clc                % Effacer la fenêtre de commande
clear all         % Effacer toutes les variables Locales et Globales
close all        % fermer toutes les fenetres ouvertes
openfemm;        %Chargement de FEMM
newdocument(1);  % definition of new electrostatic project
ei_probdef('millimeters','planar',1.e-8,0,30); %ei_probdef(units,type,precision,depth,minangle)
% Drawing the problems geometry
n=7;             % nombre de pointes
e=10;           % distance entre pointes/plaque
l=10;           % Largeur de l'électrode active
r=10;           % Hauteur de la pointe
L=40;           % Longueur de l'electrode
D=50;           % distance entre deux electrodes voisines
Lp=n*D-10;     % Longueur de la plaque

% Space limits
X=n*D/2;
Ymax=L+r+20;
Ymin=-10;
ei_drawrectangle([-X,Ymin,X,Ymax])
ei_addblocklabel(-X+D/4,L);
ei_addmaterial('Air',1,1,0)
ei_selectlabel(-X+D/4,L);
ei_setblockprop('Air',0,0,0);
ei_clearselected;

% configuration des electrodes
%boundaries
ei_addboundprop('high',5*1e+3,0,0,0,0);
ei_addboundprop('Ground',0,0,0,0,0);
ei_drawline(-Lp/2,0,Lp/2,0)           % dessiner la plaque
```

```
DD=[-3*D -2*D -D 0 +D +2*D +3*D]; % positions des points
```

```
% boucle pour dessiner les points
```

```
for i=1:n
```

```
    Xp1=-l/2+DD(i);
```

```
    Xp2=l/2+DD(i);
```

```
    Yp1=r+e;
```

```
    Yp2=L+e;
```

```
    ei_drawline(Xp1,Yp1,Xp1,Yp2)
```

```
    ei_drawline(Xp2,Yp1,Xp2,Yp2)
```

```
    ei_drawline(Xp1,Yp2,Xp2,Yp2)
```

```
    ei_drawline(Xp1,Yp1,DD(i),e)
```

```
    ei_drawline(Xp2,Yp1,DD(i),e)
```

```
    ei_addblocklabel(DD(i),e+L/2);
```

```
    ei_addmaterial('Iron',1,1,0)
```

```
    ei_selectlabel(DD(i),e+L/2);
```

```
    ei_setblockprop('Iron',0,0,1);
```

```
    ei_clearselected;
```

```
% boundaries
```

```
    ei_selectsegment(Xp1,10);
```

```
    ei_selectsegment(Xp2,10);
```

```
    ei_selectsegment(Xp1,30);
```

```
    ei_selectsegment(Xp2,30);
```

```
    ei_selectsegment(DD(i),50);
```

```
    ei_setsegmentprop('high',0,1,0,1, 'none');
```

```
    ei_clearselected;
```

```
endfor
```

```
ei_selectsegment(0,0);
```

```
ei_setsegmentprop('Ground',0,1,0,0, 'none');
```

```
ei_clearselected;
```

```
ei_zoomnatural;
```

```
ei_saveas('multipointes.fee');
```

```
ei_analyze;
```

```
ei_loadsolution;
```