

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 8 Mai 1945-Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Ref :/2025



MEMOIRE

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

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par : Brahimi Ramzi et Ghoumrian Abdenour

Thème

**Décharge couronne en géométrie cylindre-fil-plan: Application
pour la charge et la neutralisation des particules**

Soutenu publiquement, le **23/06/2025**, devant le jury composé de :

Mr.Kachi Miloud	Professeur	Univ, Guelma	Président/Examineur
Mr.Remadnia Mokdad	MCA	Univ, Guelma	Examineur
Mr.Bouchelkha Abdelhafid	MAA	Univ, Guelma	Encadreur
Mme.Moussaoui Aida	MCB	Univ, Guelma	Examineur principal

Année Universitaire: 2024/2025

REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements les plus chaleureux vont en premier lieu à notre superviseur, **Mr. BOUCHELKHA ABDELHAFID**, pour ses précieux conseils, sa patience et son soutien scientifique tout au long de cette recherche. Son expertise et ses orientations ont été déterminantes dans l'aboutissement de ce projet.

Nous adressons également toute notre reconnaissance à **notre famille**, pour son amour inconditionnel, ses encouragements constants et sa patience, qui ont été une source de motivation essentielle dans l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions vivement les **membres du corps enseignant du Génie Électrotechnique et Automatique**, ainsi que ceux du **Laboratoire de Génie Électrique de l'Université 8 Mai 1945 – Guelma**, pour leurs connaissances, leurs idées enrichissantes et leur accompagnement tout au long de notre parcours universitaire.

Une pensée spéciale va à **nos collègues et amis**, qui ont été d'un grand soutien et avec lesquels les échanges fructueux ont permis de surmonter les défis rencontrés.

Enfin, nous n'oublions pas **toutes les personnes** qui, de près ou de loin, ont contribué à ce projet, ne serait-ce que par un mot d'encouragement ou un conseil utile.

Merci à tous pour votre précieuse contribution.

(هود: ٨٨) "وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ"

Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier dieu de m'avoir donné la force et le courage
Pour faire cet humble travail*

*Je dédie ce modeste travail à MA CHEREMAMAN et MON CHER PERE
qui m'ont beaucoup appris dès mon existence.*

*Ainsi qu'à mes frères et mes sœurs qui ont toujours eu la volonté de me
soutenir moralement.*

A toute ma famille

A tous mes amis.

A toute personne qui m'a aimée

Abdenmour Ghomriane

Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier **dieu** de m'avoir donné la force et le courage
Pour faire cet humble travail*

*Le rêve n'était pas proche, ni le chemin facile à atteindre... mais je l'ai fait et je
l'ai obtenu*

Avec tout mon amour, je dédie les fruits de ma réussite et de mon diplôme

A ma chère mère

A mon cher père

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et
de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mon frère haroun

A ma chère sœur rayane

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

À mon cher grand-père

À mes chères grands-mères

Je leur souhaite santé et bien-être.

A mes amis,

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille

Ramzi Brahimi

Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------	----

Chapitre I : Généralité sur les décharges couronne

I.1 Introduction	03
I.2 Historique	03
I.3 Différents régimes de décharges électriques	05
I.4 La décharge couronne	06
I.5 Mécanismes de formation et processus physique	07
I.5.1 Théorie de Townsend	07
I.5.2 Théorie de Streamer	09
I.6 Les différentes géométries d'électrodes	10
I.7 Différents types de décharge couronne	10
I.7.1 Décharge couronne passive	11
I.7.2 Décharge couronne active	11
I.7.2.1 Décharge couronne positive	12
I.7.2.2 Décharge couronne négative	13
I.7.2.3 Décharge à tension alternative	14
I.8 Facteurs influençant la décharge couronne	14
I.8.1 Facteurs géométriques	14
I.8.1.1 Rayon de courbure	14
I.8.1.2 Distance inter-électrodes	14
I.8.2 Facteurs physiques	15
I.8.2.1 Nature du gaz	15
I.8.2.2 Effet de la pression	15
I.8.2.3 Influence de la température	15
I.8.2.4 Influence de l'humidité	15
I.8.3 Facteurs électriques	15
I.9 Applications de la décharge couronne	16
I.9.1 Paratonnerre	16
I.9.2 Neutralisation	16
I.9.3 Filtre électrostatique	17
I.9.4 Séparateur électrostatique	18
I.9.5 Autres applications	18
I.10 conclusion	18

Chapitre II : Caractérisation d'un système de décharge couronne en configuration cylindre/fil/plan

II.1 Introduction	19
II.2 Description du système de décharge	19
II.3. Caractéristiques électriques macroscopique	20
II.3.1. Le champ électrique géométrique	20
II.3.2. Régime critique ou seuil d'apparition de la décharge couronne	20

II.3.2.1.Champ critique (disruptif) :	20
II.3.2.2.Tension d'amorçage de la décharge	21
II.3.3 Caractéristique courant-tension de la décharge couronne :	22
II.4 Dispositifs expérimentaux, modes opératoires et outils de simulation	22
II.4.1 Description des installations expérimentale	22
II.4.1.1 Système d'électrodes de décharge couronne	23
II.4.1.2 Les alimentations électriques:	24
II.4.1.3 Les appareils de mesures électriques et de visualisations	24
II.4.1.3.1 Mesure du courant moyen	24
II.4.1.3.2 Mesure de la température et de l'humidité relative	25
II.4.1.3.3.Appareils d'affichage et d'acquisition	25
II.4.2 Outils de simulation	26
II.5 Résultats et discussions	27
II.5.1 Caractérisation par calcul numérique	27
II.5.1.1 Modèle FEMM du système d'électrodes	27
II.5.1.2 Distribution spatial du potentiel et champ électriques	27
II.5.1.3 Distribution du champ dans les espaces inter-électrodes	28
II.5.1.3.1 Champ dans l'espace plaque-fil	28
II.5.1.3.2 Champ dans l'espace fil-cylindre	29
II.5.1.4 Champ à la surface des électrodes	30
II.5.1.4.1 Champ à la surface de la plaque	30
II.5.1.4.2 Champ à la surface de fil	31
II.5.1.4.3 Champ à la surface du cylindre	33
II.5.2 Caractérisation expérimentale	34
II.5.2.1 Formes d'onde de courants de la décharge couronne	34
II.5.2.2 Caractéristiques I-V	35
II.5.2.2.1 Influence de la polarité	35
II.5.2.2.2 Influence de la distance plaque-fil (dpw)	36
II.5.2.2.3 Influence de la distance inter-électrodes fil-cylindre (dwc)	37
II.6 Conclusion	37

Chapitre III: Application du système cylindre-fil-plan pour la charge et la neutralisation des granules de polyéthylène.

III.1 Introduction	38
III.2 Dispositifs expérimentaux, modes opératoires	38
III.2.1 Essai de chargement des particules PE	38
III.2.1.1 Description de l'installation expérimentale	38
III.2.1.1.1 Schéma	38
III.2.1.1.2 Poste de chargement	38
III.2.1.1.3 Poste de mesure	39
III.2.1.2 Matériau utilisé dans l'étude	40
III.2.1.3 Description de la démarche expérimentale	42
III.2.2 Essais de neutralisation des charges électriques	42
III.2.2.1 Installation expérimentale	42
III.2.2.2 Description de la démarche expérimentale	43
III.3 Résultats et discussion	43
III.3.1 Caractéristique de charge des particules de polyéthylène	43
III.3.2 Caractéristique de neutralisation des particules de polyéthylène	45
III.4 Conclusion	45

Conclusion générale	46
Bibliographie	47

Liste de figure

Chapitre I : Généralité sur les décharges couronne

Figure I.1 : Effet couronne sur différents éléments	04
Figure I.2 : Caractéristique courant-tension d'une décharge dans l'air à pression atmosphérique	05
Figure I.3 : Vue de l'effet couronne dans un conducteur	06
Figure I.4 : Géométries les plus couramment utilisées	10
Figure I.5 : Descriptif de la décharge couronne positive	12
Figure I.6 : Descriptif de la décharge couronne négative	13
Figure I.7 : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre	16
Figure I.8 : Principe de la neutralisation par décharge couronne.	17
Figure I.9 : Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique	17
Figure I.10 : Utilisation de la décharge couronne la séparation Electrostatique	18

Chapitre II : Caractérisation d'un système de décharge couronne en configuration cylindre/fil/plan

Figure II.1 : Système de décharge en configuration cylindre-fil-plan	19
Figure II.2 : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit p. d	21
Figure II.3 : Installation expérimentale pour la caractérisation du système d'électrodes cylindre-fil-plaque	23
Figure II.4 : Photographie du dispositif de décharge couronne	23
Figure II.5 : Alimentations électriques, (a): Source négative (b): Source positive	24
Figure II.6 : Multimètre numérique utilisé pour la mesure du courant de décharge.	24
Figure II.7 : Photographie de l'hygromètre numérique	25
Figure II.8 : Oscilloscope	25
Figure II.9 : Logiciel gratuit FEMM	26
Figure II.10 : Modelé de simulation sous FEMM	27
Figure II.11 : Distribution spatial du potentiel électrique	28
Figure II.12 : Distribution spatial (a) du potentiel électrique (b) du champ électrique	28
Figure II.13 : Distribution du champ électrique le long de l'axe vertical dans la zone plaque-fil pour différentes valeurs de la distance (a) plaque-fil (b) fil-cylindre	29
Figure II.14 : Distribution du champ électrique le long de l'axe vertical(y) dans la zone fil-cylindre pour différentes valeurs de la distance (a) plaque-fil 1(b) fil-cylindre	30
Figure II.15 : Distribution du champ électrique le long de la surface de la plaque pour différentes distance: (a) plan-fil et (b) fil-cylindre	31
Figure II.16 : Angle sur la surface de fil	31
Figure II.17 : Distribution du champ électrique à la surface du fil pour différentes valeurs de la distance:(a) plan-fil (b) fil-cylindre	32
Figure II.18 : Distribution du champ électrique à la surface du cylindre pour différentes valeurs de la distance (a) plan-fil (b) fil-cylindre	33
Figure II.19 : Enregistrement du courant instantané pour une décharge couronne négative pour la tension -9 kV.	34

FigureII.20 : Impulsions du courant de décharge couronne négative pour une tension de -9 kV.	35
FigureII.21 : Caractéristique I-V des décharges couronnes positive et négative	36
FigureII.22 : Caractéristiques I-V d'une décharge couronne positive pour différentes distance fil plaque.	36
FigureII.23 : Caractéristique I-V des décharges couronnes pour différent dwc	37

Chapitre III: Application du système cylindre-fil-plan pour la charge et la neutralisation des granules de polyéthylène.

Figure III.1 : Installation expérimentale pour mesure la charge	38
Figure III.2 : Mesure du potentiel.	39
Figure III.3 : Mesure de la charge.	39
Figure III.4 : Photographie de la balance	40
Figure III.5 : Photographie de matériau granulaire de polyéthylène.	40
Figure III.6 : Installation expérimentale de neutralisation	42
Figure III.7 : Distribution du potentiel à la surface de l'échantillon avant et après chargement.	43
Figure III.8 : Potentiel à la surface des granules le long des axes (a) transversal x (b) longitudinal z	44
Figure III.9 : Potentiel de surface le long de l'axe z de la plaque avant et après neutralisation avec différentes tensions	45

Liste des tableaux

Chapitre II : Caractérisation d'un système de décharge couronne en configuration cylindre-fil-plan

Tableau II.1 : Coefficient de surface 21

Figure II.2 : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit $p \cdot d$ 21

Chapitre III : Application du système cylindre-fil-plan pour la charge et la neutralisation des granules de polyéthylène

Tableau III1 : Caractéristique principales des granulaires de PE utilisés 41

Introduction Générale

Introduction générale

L'effet couronne désigne un phénomène électrique complexe qui se manifeste par une décharge lumineuse et sonore. Cette dernière se produit lorsque l'ionisation de l'air environnant est rendue possible par la création d'un champ électrique localisé généré par un conducteur soumis à une haute tension. Ce phénomène, objet d'étude depuis plus d'un siècle, revêt des implications aussi bien théoriques que pratiques, avec des applications industrielles diverses, telles que les filtres électrostatiques, les paratonnerres ou encore les systèmes de neutralisation des charges électrostatiques. Cependant, ce procédé est associé à des effets indésirables, parmi lesquels on peut citer les pertes énergétiques, les interférences électromagnétiques, ainsi que la détérioration des matériaux isolants due à la génération d'ozone et d'acide nitrique.

L'objet de ce travail est l'étude de la décharge couronne dans une configuration géométrique spécifique, celle dite duale «cylindre-fil-plan ». Cette configuration asymétrique, couramment utilisée dans les recherches en génie électrique, permet d'explorer les caractéristiques fondamentales de la décharge couronne, telles que les seuils de tension, les distributions de champ électrique, et les mécanismes d'ionisation. L'objectif principal de cette étude est de caractériser expérimentalement et numériquement le système, en analysant notamment l'influence des paramètres géométriques (distance inter-électrodes) et électriques (tension appliquée, polarité) sur les propriétés de la décharge. En outre, cette étude se concentre sur une application pratique de la décharge couronne, à savoir le contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques, et plus particulièrement des granulés de polyéthylène (PE). Tous les essais expérimentaux ont été réalisés au niveau du lab de Génie Electrique de Guelma (LGEG) de l'Université Guelma.

Ce travail est composé de trois chapitres:

Dans le premier chapitre on trouve des généralités sur la décharge couronne où nous présentons les différents types de décharge couronne, les mécanismes et les applications de cette décharge.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation d'un système de décharge couronne en configuration cylindre-fil-plan. Nous présenterons l'étude théorique de la décharge couronne, ainsi que les dispositifs expérimentaux. Nous aborderons également les différents outils de simulation utilisés, ainsi que les résultats expérimentaux et ceux de la simulation, et leurs interprétations.

Le dernier chapitre est réservé à l'utilisation du système de décharge couronne en configuration cylindre-fil-plan pour la charge et la neutralisation des particules. Ici, on va présenter les dispositifs expérimentaux et les méthodes de mesure utilisées lors des manipulations au laboratoire. On va aussi présenter les résultats expérimentaux et ceux de la simulation avec interprétation.

Chapitre I

Généralité sur la décharge couronne

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 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 XX^{ème} siècle. En effet, les premières publications sur l'effet de la décharge couronne datent de 1911 avec les travaux effectués par un des génies de cette époque, M. F. Peek.

Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne autour des lignes de transport. 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 (Figure I.1). 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 [3]. 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 Hessenlmeyer 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.

Ces dernières décennies de grandes avancées ont été faites 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.

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. [3]



Figure I.1: Effet couronne sur différents éléments [3].

I.3 Différents régimes de décharges électriques

La figure I.3 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée.

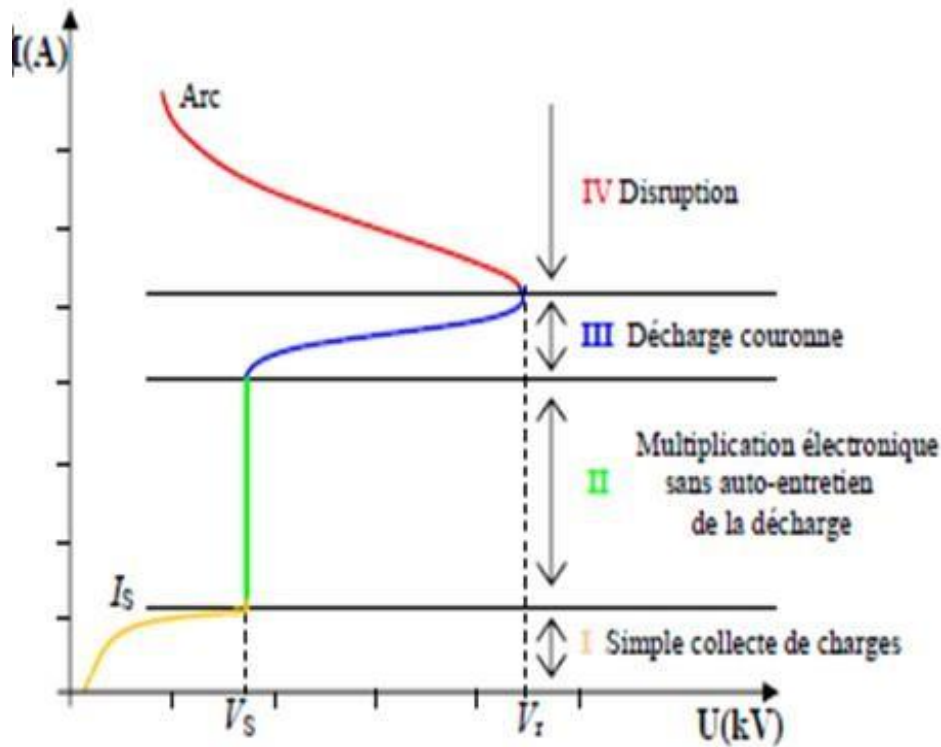


Figure I.2: caractéristique courant-tension d'une décharge dans l'air à pression atmosphérique [7]

La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge électrostatiques [7]

❖Premier régime : Collecte de charge

Consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter électrodes [7].

❖Second régime : Régime impulsif ou de décharge de Trichel non autoentretenu.

Qui se produit à partir d'une tension seuil « V_0 », traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation

externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée [7].

❖ Troisième régime: Régime de décharge couronne

L'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs. La décharge est autoentretenue. C'est le régime de la décharge couronne, ou apparaissent les streamers, qui est responsable de la composante impulsionnelle du courant [7].

❖ Quatrième régime : 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 de gaz. Le champ réduit $\frac{E}{N}$ est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électrique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique [7].

I.4 La décharge couronne

L'effet couronne se produit principalement sur les conducteurs et lignes soumises à une haute tension, mais aussi sur les parties métalliques aiguës reliées à la haute tension, telles que sur l'isolateur, surtout par temps humide.

Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air, $\approx 30 \text{ kV/cm}$), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse (**Figure I.2**) [1].

La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($U \geq 400\text{kV}$), lorsqu'il fait sombre.

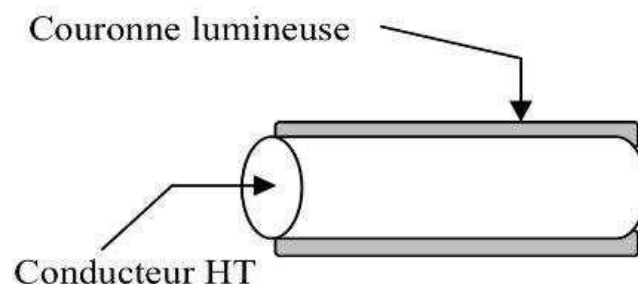


Figure I.3: Vue de l'effet couronne dans un conducteur [1].

I.5 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 amorcer 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. Une difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge 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 [3].

I.5.1 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 :

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

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

L'étude expérimentale du courant i en fonction de la distance d , effectuée par Townsend, 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 [3].

Désignons par α , coefficient d'ionisation primaire de Townsend, le nombre moyen de paires électron-ion créés par un électron 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 $\frac{E}{p}$.

Dans le cas d'un champ homogène α reste constant. Supposons donc qu'il se soit formé $n(x)$ électrons à une distance x de la cathode, alors ils vont produire $dn(x)$ électrons sur une distance dx :

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

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

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

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

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

D'où le courant collecté est:

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

L'étude expérimentale du courant i en fonction de la distance d , effectuée par Townsend, 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, dit coefficient d'ionisation secondaire de Townsend, qui représente le nombre d'électrons émis à la cathode par ion incident [3].

I.5.2 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 [3].

I.6 Les différentes géométries d'électrodes

La décharge couronne est l'un des principaux mécanismes impliqués dans le contrôle de la charge dans divers processus industriels. Cette diversité d'application a incité les utilisateurs et les chercheurs à développer et à mettre en œuvre des électrodes de différentes sortes. Les utilisateurs et les chercheurs ont développé et mis en œuvre des électrodes de formes différentes géométriques.

Le choix de la géométrie d'électrodes la plus adéquate pour une application donnée doit prendre en compte à la fois les critères de performance électrique et mécanique. Parmi les principaux critères de choix, on distingue : Les principaux critères de choix sont les suivants :

- Tension d'apparition de la décharge corona.
- Stabilité de la décharge corona pendant un fonctionnement de longue durée,
- Temps d'entretien.

Dans la liste des géométries les plus couramment utilisées, on trouve les systèmes : fil / plan, fil / cylindre, pointe / plan, plan / plan, etc.

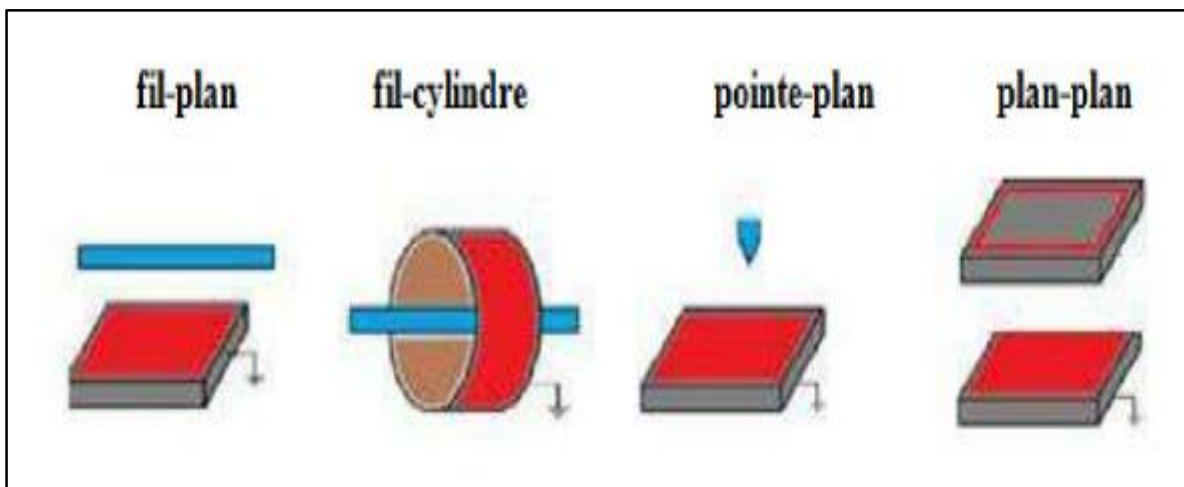


Figure I.4.Géométries les plus couramment utilisées [5].

I.7 Différents types de décharge couronne :

Il y a deux types de décharge couronne :

- Décharge couronne passive,
- Décharge couronne active

I.7.1 Décharge couronne passive

L'ioniseur passif est une électrode de faible rayon de courbure, reliée à la masse et placée à proximité de la surface chargée. Lorsqu'elle s'en approche, des charges de signe contraire sont créées sur cette électrode par influence électrostatique. Plus la surface à neutraliser est grande, ou plus la distance entre cette dernière et l'électrode est importante, plus les charges créées sont importantes. Plus la distance entre l'électrode et la surface à neutraliser est petite, plus la charge image sur l'électrode neutralisante devient importante, et plus la quantité d'air chargé sur la surface à neutraliser est importante. Est petite, la charge image sur l'électrode neutralisante devient importante, ce qui a pour effet de charger l'air. Entourant l'électrode peut s'ioniser. Des ions sont ainsi créés, qui, sous l'effet du champ électrique,

L'ioniseur passif est une électrode de faible rayon de courbure, reliée à la masse et placée électriquement de sorte que les ions soient attirés par la surface chargée où les charges de signe contraire seront neutralisées. Par recombinaison, ces ions de même signe seront repoussés. L'ioniseur passif est une électrode de faible rayon de courbure, reliée à la masse et placée à proximité de la surface chargée. Lorsqu'elle s'en approche, des charges de signe contraire sont créées sur cette électrode par influence électrostatique. Plus la distance entre la surface à neutraliser et l'électrode est importante, plus les charges créées sur cette dernière sont importantes. Plus la distance entre l'électrode neutralisante et la surface à neutraliser est petite, plus la charge image sur l'électrode neutralisante devient importante, et plus l'air chargé sur la surface à neutraliser est important. Est petite, la charge image sur l'électrode neutralisante devient importante, ce qui a pour effet de charger l'air. Entourant l'électrode peut s'ioniser. Des ions sont ainsi créés, qui, sous l'effet du champ électrique, sont attirés par la surface chargée où les charges de signe contraire seront neutralisées. Par recombinaison, les ions de même signe seront repoussés, tandis que ceux de signe contraire seront neutralisés [5][11].

I.7.2 Décharge couronne active

L'application d'une tension alternative, positive ou négative sur l'électrode à faible rayon de courbure va déterminer la polarité de la décharge couronne. La décharge couronne est dite positive lorsque la haute tension positive est appliquée sur l'électrode incurvée, l'autre étant reliée à la masse. Elle est dite négative dans le cas contraire.

I.7.2.1 Décharge couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisations et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé à la **figure (I.5)**. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieur au millimètre) au de la de laquelle le champ électrique trop faible ($< 30 \text{ kV/cm}$ dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positive.

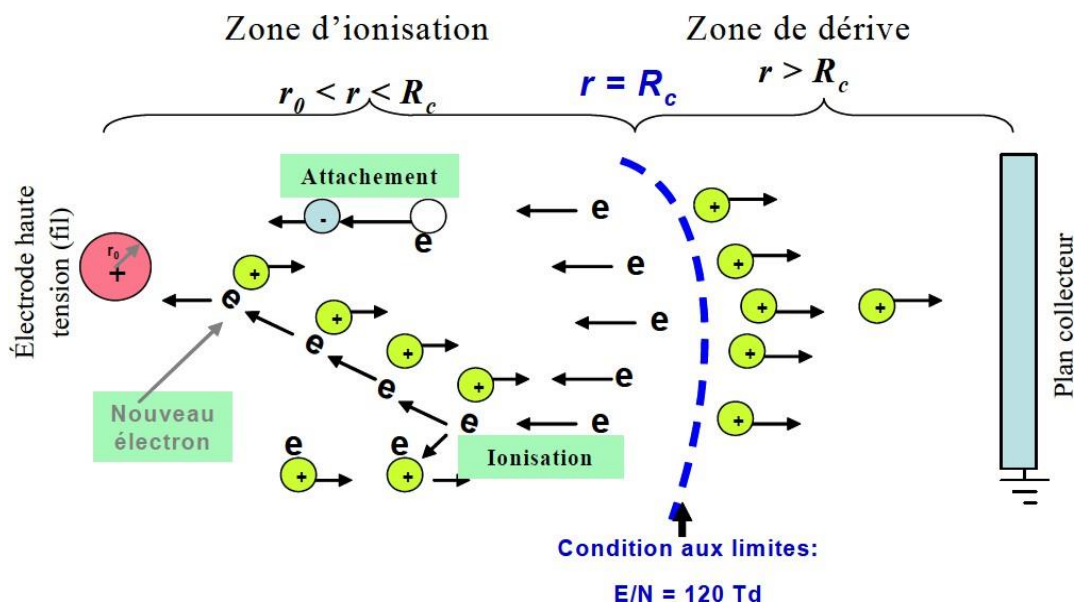


Figure I.5: Descriptif de la décharge couronne positive [1].

Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs, est appelée région de « dérive ». Pour cette décharge, il y'a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode.

D'après les modélisations de L'oiseau *et al.* la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de 210 m/s) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence de 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires.

Goldman *et al* en 1985 indique qu'un courant positif de $50\mu\text{A}$ se décomposerait en un courant unipolaire continu de $20\mu\text{A}$, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à $30\mu\text{A}$ percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz [1].

I.7.2.2 Décharge couronne négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisations et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Goldman et Sigmund en 1982 expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode.

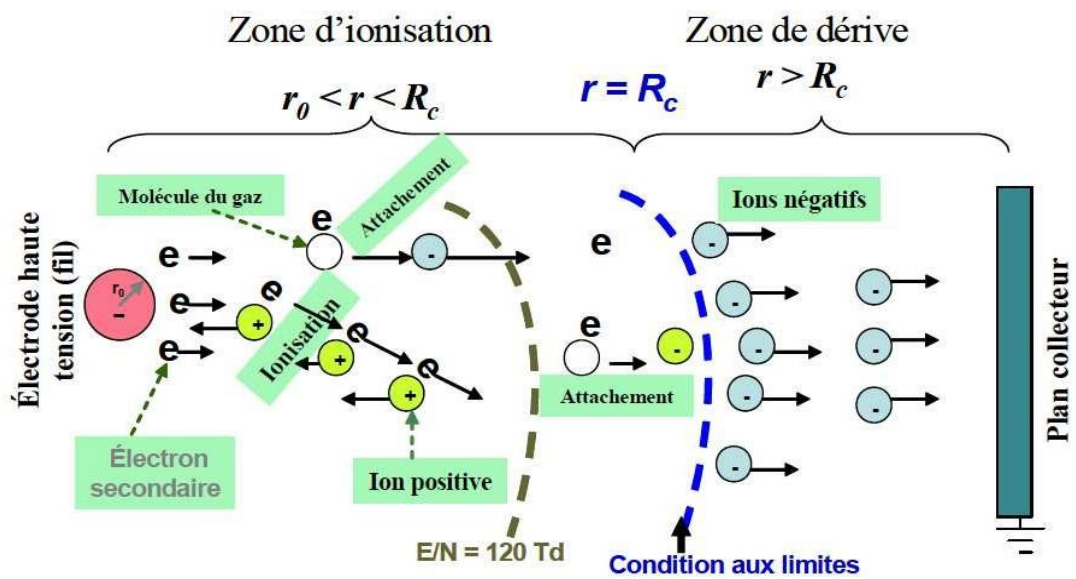


Figure I.6: Descriptif de la décharge couronne négative [1].

Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers la plaque. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc. Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel où la fréquence qui dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques.

Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode.

Les mécanismes physico-chimiques au sein des décharges couronnes sont assez complexes et sont actuellement étudiés par les physiciens des plasmas, car ils ne sont pas encore totalement connus [1].

I.7.2.3 Décharge à tension alternative

En appliquant un champ alternatif au gaz, le comportement du système dépendra de la distance inter électrodes et de la fréquence de la tension d'alimentation. En effet, si le temps de parcours de l'intervalle par les particules chargées du gaz est inférieur au temps d'inversion de la polarité, alors les charges d'espace créées par une décharge auront quitté l'espace inter électrodes avant l'apparition de la décharge suivante. Le comportement élémentaire du système consistera donc en une alternance de décharges positives puis négatives indépendantes.

En augmentant la fréquence du signal électrique, les ions n'ont pas le temps d'être évacuées avant le changement de polarité de la tension appliquée et une charge d'espace résiduelle persistera dans l'espace inter électrodes, ceux-ci réduisent le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante. Donc, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continu [10].

I.8 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 [3].

I.8.1 Facteurs géométriques

I.8.1.1 Rayon de courbure

L'augmentation du rayon de courbure fait diminuer le champ électrique entre les électrodes engendrant une augmentation de la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne et la diminution du courant de décharge [3].

I.8.1.2 Distance inter-électrodes

La distance inter-électrodes a une grande influence sur les paramètres de la décharge couronne à savoir les intensités des courant et des seuils de décharge [3].

I.8.2 Facteurs physiques

Ces facteurs se résument en la nature du gaz, sa pression, son humidité et sa température. Alités sur la décharge couronne [9].

I.8.2.1 Nature du gaz

Les expériences ont montré que la tension de l'effet couronne diffère d'un gaz à un autre. Le caractère électronégatif des gaz comme le SF₆, joue un rôle important au niveau des processus d'attachement [9].

I.8.2.2 Effet de la pression

Une augmentation de la pression du gaz s'accompagne toujours d'une augmentation correspondante de la tension d'apparition de l'effet couronne à cause de la diminution du libre parcours moyen, empêchant les électrons d'acquérir une énergie suffisante entre les chocs [10].

I.8.2.3 Influence de la température

A la pression normale, lorsque la température augmente, 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 [9].

I.8.2.4 Influence de 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. Lorsque le taux d'humidité augmente, la tension de décharge augmente. En effet les électrons libres dans l'air deviennent des centres de condensation de la vapeur d'eau, leurs masses augmentent et ils perdent leurs mobilités, donc leurs pouvoirs ionisants.

I.8.3 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.9 Applications de la décharge couronne

I.9.1 Paratonnerre

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre Qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre (Figure I.8) [4].

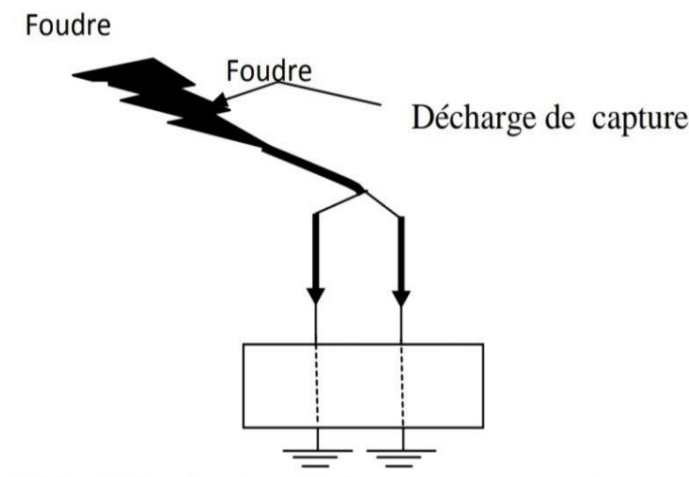


Figure I.7: Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre [4].

I.9.2 Neutralisation :

D'un point de vue technique, il existe deux types de neutralisation par décharge coronne, à savoir :

- Généralement appelés « éliminateurs statiques », les premiers utilisent le champ électrique pour déplacer les ions de la source vers l'objet chargé, tandis que les seconds utilisent des gaz circulant (air) pour déplacer un nuage ionique bipolaire au voisinage de l'objet chargé. Dans les deux cas, le champ sélectionne les ions appropriés pour réaliser la neutralisation.
- En raison de la désintégration des éléments radioactifs présents dans le sol et dans l'air, il reste toujours quelques électrons libres dans l'atmosphère
- Les ioniseurs couronne utilisent des champs électriques intenses en appliquant une haute tension à une électrode de faible rayon de courbure afin de déplacer les électrons.
- L'espace inter-électrodes est divisé en deux zones : la première, proche de la pointe, où l'ionisation est supérieure à l'attachement électronique (zone de multiplication électronique), et la seconde, où les phénomènes d'attachement sont prépondérants.

Dans cette dernière zone (zone de dérive ionique), les ions de même polarité que le potentiel appliqué à la pointe dérivent vers l'électrode plane sous l'effet du champ électrique. Les décharges s'amorcent ainsi à la pointe sous l'effet d'un champ électrique très intense qui y règne, et leur évolution est caractérisée par la propagation de canaux ionisés appelés « streamers ». Les décharges couronne peuvent être de plusieurs types : continues (négatives ou positives) ou alternatives, selon le type de tension appliquée à la pointe.

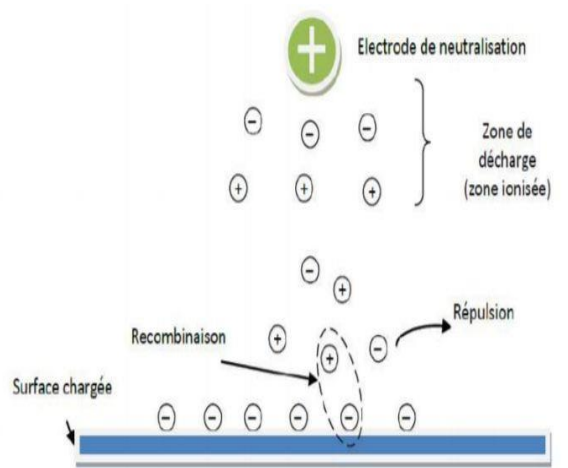


Figure I.8: Principe de la neutralisation par décharge couronne.

I.9.3 Filtre électrostatique :

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (**Figure I.10**) [6].

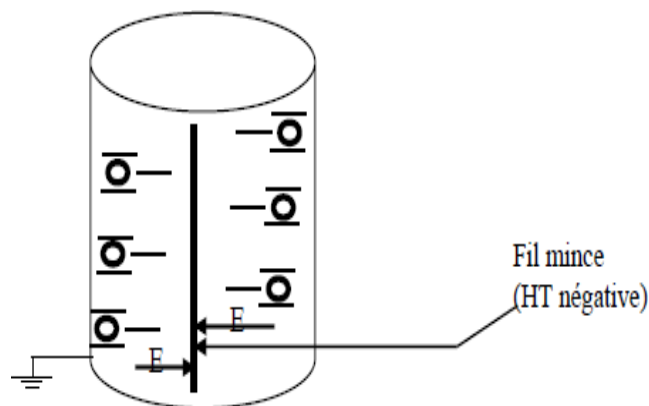


Figure I.9: Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique [6].

I.9.4 Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquière des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (**Figure I.11**) [8].

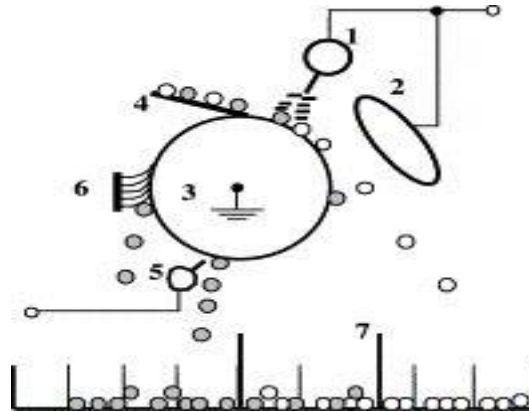


Figure I.10: Utilisation de la décharge couronne la séparation Électrostatique [4].

I.9.5 Autres applications

Les décharges couronne ont de nombreuses autres applications commerciales et industrielles tel que:

- Production d'ozone.
- Traitement de surface de certains polymères.
- Photocopieur.
- Laser à azote.
- Refroidissement de composants électroniques (la migration des particules ionisées génère un flux qui expulse l'air chaud).
- Coloration des véhicules. [4]

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.

Chapitre II

Caractérisation d'un système de décharge couronne en configuration cylindre-fil-plan

II.1 Introduction

Parmi les diverses configurations géométriques des électrodes de décharge couronne on a choisi d'étudier une configuration duale: cylindre-fil-plan. Cette étude est composée de deux parties. Une partie numérique qui a porté sur l'étude de l'influence des distances entre les différentes électrodes sur la distribution du champ et potentiel électriques dans les différents espace inter-électrodes. Une deuxième partie expérimentale qui a porté sur l'étude de l'influence de la polarité de la tension appliquée à l'électrode active et des distances entre électrodes sur les caractéristiques courant-tension.

II.2 Description du système de décharge

Le système de décharge couronne étudiés est représenté à la figure II.1. Il s'agit d'un système en configuration cylindre-fil-plan.

Ce système de décharge est constitué de trois électrodes:

- Un cylindre de rayon r_c , maintenu à un potentiel V .
- Un fil mince de rayon r_w , maintenu au même potentiel V .
- Un plan conducteur situé en $y=0$, mis à la terre ($V=0$).

Les électrode sont les positions suivantes:

- Le cylindre a son axe situé à une distance h_c du plan conducteur.
- Le fil a son axe situé à une distance h_w du même plan conducteur.

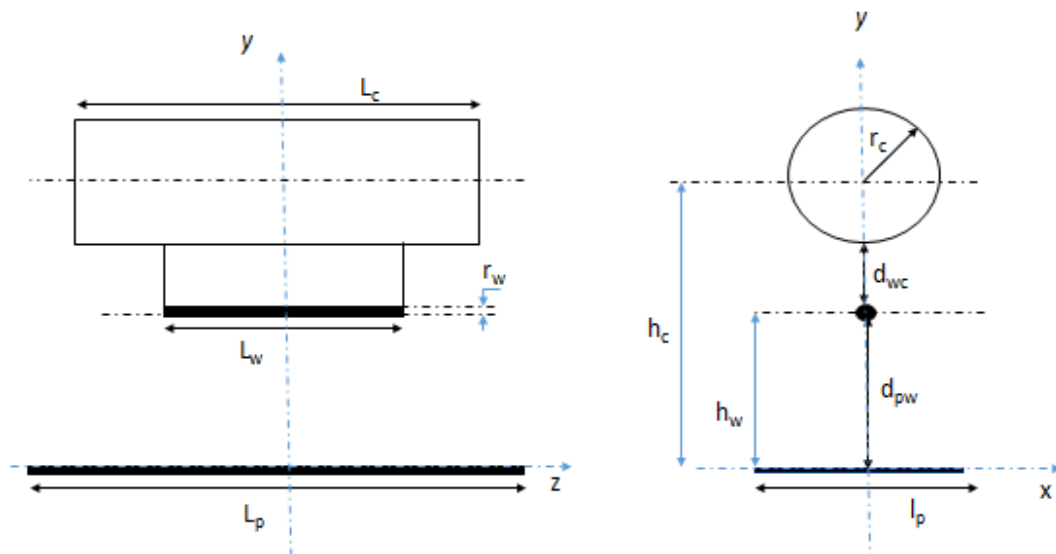


Figure II.1: système de décharge en configuration cylindre-fil-plan

L_w: longueur de fil

d_{pw} : distance plan-fil

L_c: longueur de cylindre

d_{wc} : distance fil-cylindre

L_p: longueur de la plaque

r_c : le rayon de cylindre

l_p: largeur de la plaque

r_w : le rayon de fil

II.3.Caractéristiques électriques macroscopique

II.3.1.Le champ électrique géométrique

Cette configuration se distingue par son caractère asymétrique et sa complexité, la plaçant ainsi au-delà de la configuration coaxiale. La disposition du fil, placé entre une électrode cylindrique et une plaque plane, engendre une répartition non uniforme du champ. Généralement, le champ est le plus intense autour du fil et décroît rapidement en s'éloignant de celui-ci.

II.3.2. Régime critique ou seuil d'apparition de la décharge couronne

II.3.2.1.Champ critique (disruptif) :

La décharge couronne est un phénomène de décharge électrique partielle qui se produit lorsque le champ électrique local dépasse la rigidité diélectrique de l'air (ou d'un autre gaz), mais sans amorcer une décharge complète. 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 pour une Configuration cylindre-fil-plan [11]:

$$E_c = E_p \delta \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta \cdot r_f}} \right) \quad \text{II.2}$$

Où : E_c: champ critique, en kV/cm,

E_p: champ superficiel, en kV/cm,

k: un coefficient, en cm^{-1/2},

r_f: le rayon du fil conducteur, en cm,

δ: Densité de l'air qui est égal à 1 dans les conditions normales.

La densité de l'air δ est donnée par :

$$\delta = \frac{273 + T_n}{273 + T} \cdot \frac{p}{p_n} \quad \text{II.3}$$

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, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental $m < 1$, appelé coefficient de surface dans les valeurs sont donnée au tableau II.1.

Tableau II.1:Coefficient de surface

Conducteur	Facteur de surface m
Lisse et neuf	1
Lisse, oxyde	0.93-0.98
Toronne	0.72-0.9 par défaut : 0.85

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

$$E_0 = mE_c = m \cdot E_p \delta \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r_f}}\right) \quad \text{II.4}$$

II.3.2.2.Tension d'amorçage de la décharge

La différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes correspondant au champ de disruptive est appelée tension d'amorçage V_0 . 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 de la figure II.2 où p est la pression et d la distance inter-électrode, et dépend de la nature du gaz introduit [11].

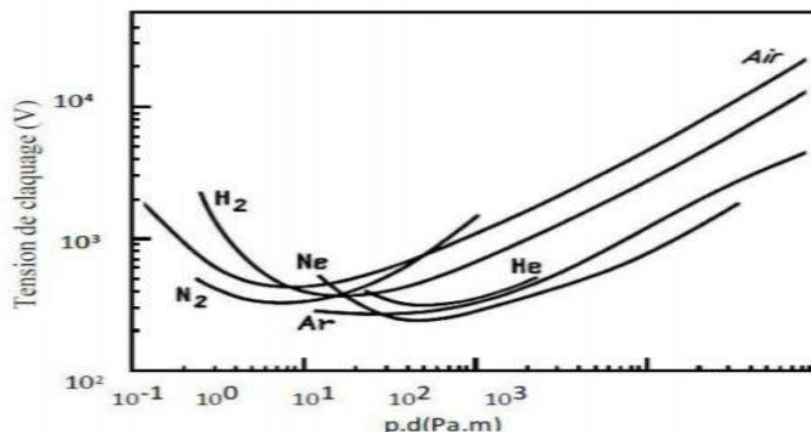


Figure II.2:Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit $p \cdot d$ [11]

L'effet visuel :

L'effet visuel apparaît à une tension (simple) légèrement supérieure à la tension d'amorçage

II.3.3 Caractéristique courant-tension de la décharge couronne :

La relation entre la tension appliquée à l'électrode active et le courant généré est une caractéristique fondamentale d'un système de charge couronne. 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 en appliquant les équations de Maxwell aux conditions de géométrie choisie. Une relation empirique simple entre le courant généré par unité de longueur et la tension appliquée proposée par Townsend est généralement utilisée, qui s'exprime par:

$$I = AV(V - V_s) \quad \text{II.5}$$

Où A est une constante qui dépend de la configuration de l'électrode, de la température, de la pression atmosphérique et de la composition du gaz.

II.4 Dispositifs expérimentaux, modes opératoires et outils de simulation

II.4.1 Description des installations expérimentale

L'installation expérimentale pour la caractérisation du système de décharge couronne est donnée à la Figure II.3.

Les éléments constitutifs de cette installation peuvent être groupés en trois blocs:

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

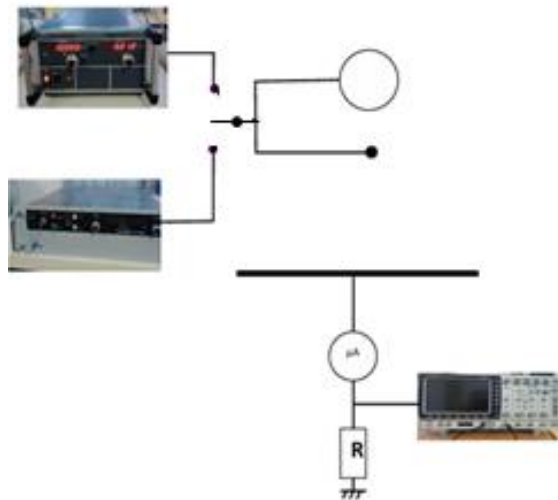


Figure II.3 Installation expérimentale pour la caractérisation du système d'électrodes cylindre-fil-plaque

II.4.1.1 Système d'électrodes de décharge couronne

Le dispositif de décharge couronne étudié est donné à la Figure II.4. Il est constitué des éléments suivants:

- un cylindre en cuivre de diamètre 2 cm et 25cm de longueur
- un fil en cuivre de 0,2 mm de diamètre et 20 cm de longueur.
- une plaque carrée 12cm sur 12cm en aluminium.
- distance plan-fil: d_{pw} variable.
- distance fil-cylindre: d_{wc} variable.



Figure II.4: Photographie du dispositif de décharge couronne

II.4.1.2 Les alimentations électriques:

Pour alimenter les électrodes actives des systèmes de décharge couronne, on a utilisé deux sources de haute tension: une positive et l'autre négative. La source négative est un modèle TECHNIX 0-10 kV, 0-30 mA (figure II.5.a), alors que la source positive est de la marque Fug, le modèle HCP 140-12500, 0-12,5 kV, 0-10 mA (figure II.5.b).



(a)



(b)

Figure II.5 Alimentations électriques, (a): Source négative (b): Source positive

II.4.1.3 Les appareils de mesures électriques et de visualisations

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

II.4.1.3.1 Mesure du courant moyen

Pour mesurer le courant de décharge, la plaque de collecte n'est pas relié directement à la masse mais plutôt à travers un multimètre numérique de marque PHILIP MODAL Figure.III.6.



Figure II.6 Multimètre numérique utilisé pour la mesure du courant de décharge.

II.4.1.3.2 Mesure de la température et de l'humidité relative

Pour la mesure de la température et de l'humidité relative on utilise un hygromètre de marque LUTRON modèle AM-4205A de la Figure II.7



Figure II.7. Photographie de l'hygromètre numérique

II.4.1.3.3.Appareils d'affichage et d'acquisition

Pour visualiser et enregistrer les ondes du courant de décharge, on a utilisé l'oscilloscope GWINSTEK GDB- 2204A de la Figure II.8. 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.8Oscilloscope

II.4.2 Outils de simulation

Pour étudier comment le champ électrique et le potentiel se distribuent dans les systèmes, on utilise le calcul de champ par éléments finis. Il y a beaucoup d'outils, que vous pouvez acheter ou télécharger gratuitement. Dans notre étude on a utilisé le logiciel open source FEMM, dont la fenêtre principale est donnée à la Figure II.9.

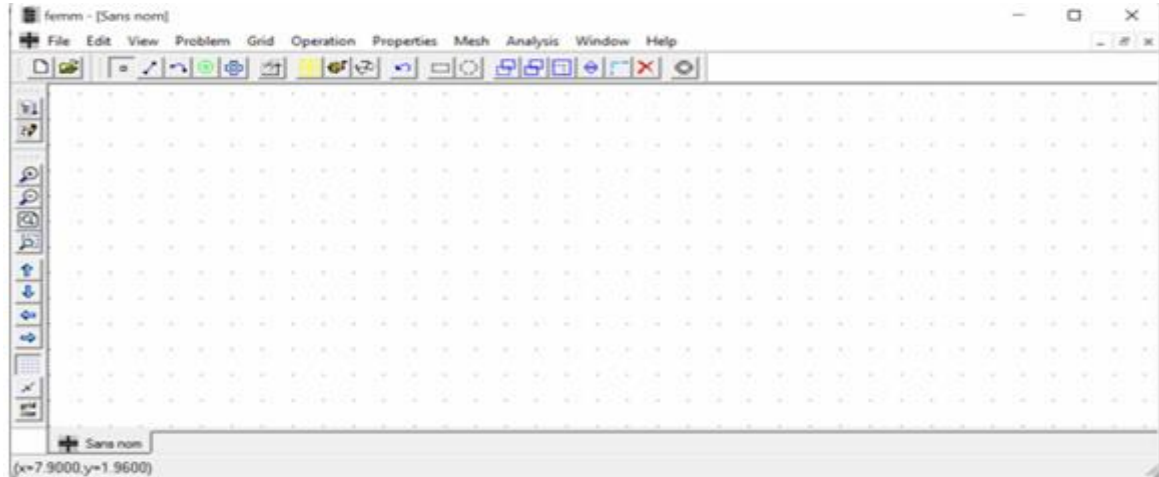


Figure II.9: logiciel gratuit FEMM

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 ». En utilisant le script Lua, ce logiciel open source peut être conduit par le logiciel Matlab ou un clone de Matlab, le logiciel open source Octave.

Dans ce travail, nous avons utilisé les logiciels Matlab et FEMM pour l'étude des :

- distributions spatiales du champ électrique et du potentiel dans les espaces inter-électrodes
 - zone fil-plaque
 - zone cylindre/fil
- champs surfaciques:
 - à la surface du fil
 - à la surface du cylindre
 - à la surface de la plaque

II.5 Résultats et discussions

Dans cette partie, les résultats de simulations et expérimentaux portant sur la caractérisation du système de décharge couronne sont présentés et interprétés.

II.5.1 Caractérisation par calcul numérique

Les programmes développés sous MATLAB permettent de concevoir les modèles de simulation du système d'électrodes étudié sous FEMM et d'analyser son fonctionnement. Les résultats de cette analyse sont présentés et interprétés dans les paragraphes suivants

II.5.1.1 Modèle FEMM du système d'électrodes

Le modèle de simulation du système d'électrodes étudié sous FEMM est donné à la Figure II.10.

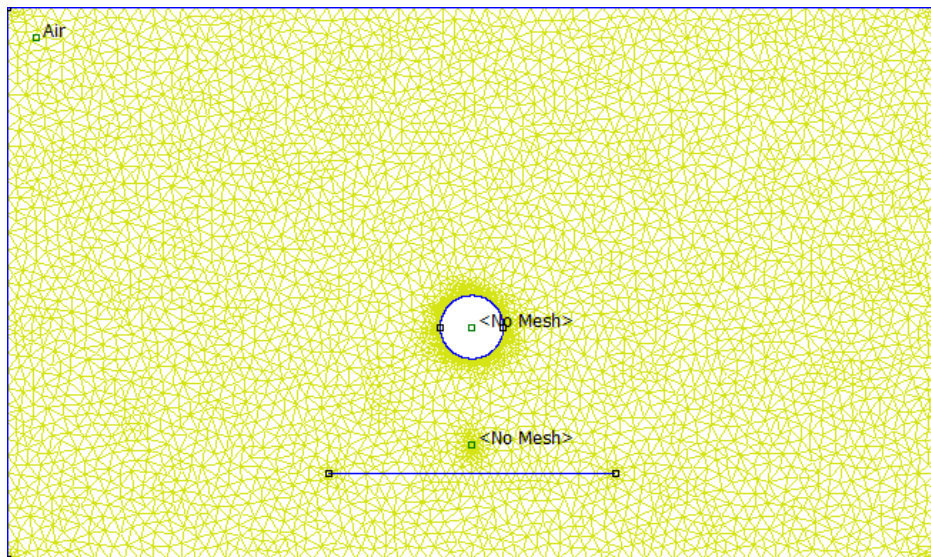


Figure II.10: Modèle de simulation sous FEMM

II.5.1.2 Distribution spatiale du potentiel et champ électriques

Sur la Figure II.11 sont représentées les distributions spatiales du potentiel électrique et du champ électrique en absence de particules diélectriques pour une tension appliquée de 10 kV.

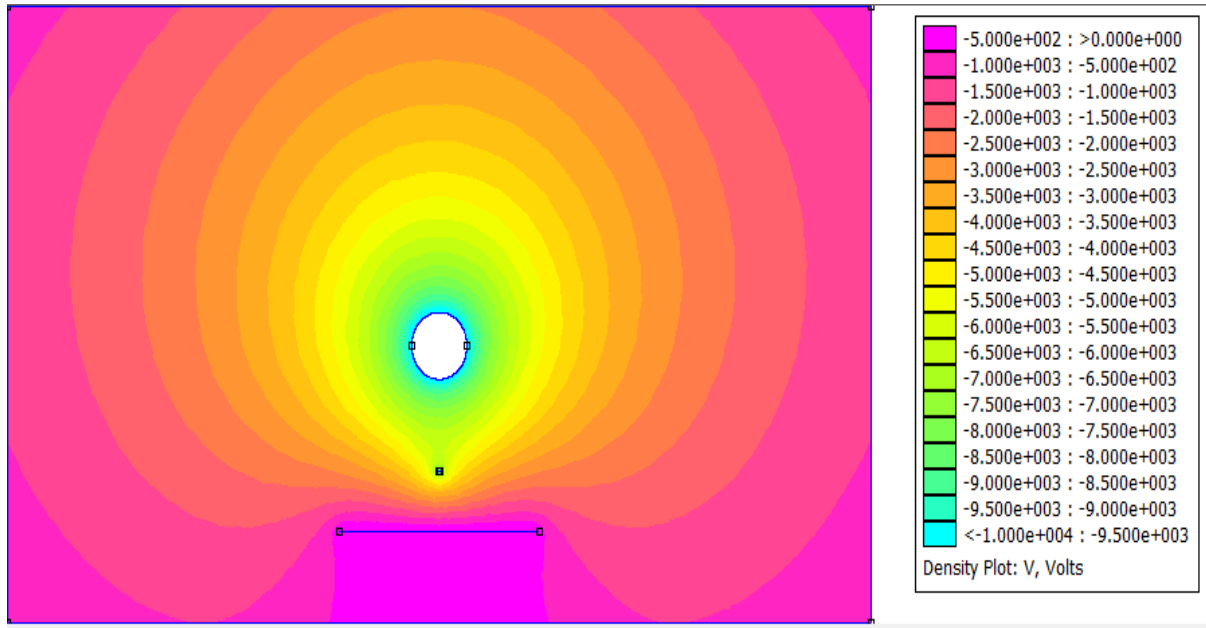


Figure II.11: Distribution spatiale du potentiel électrique

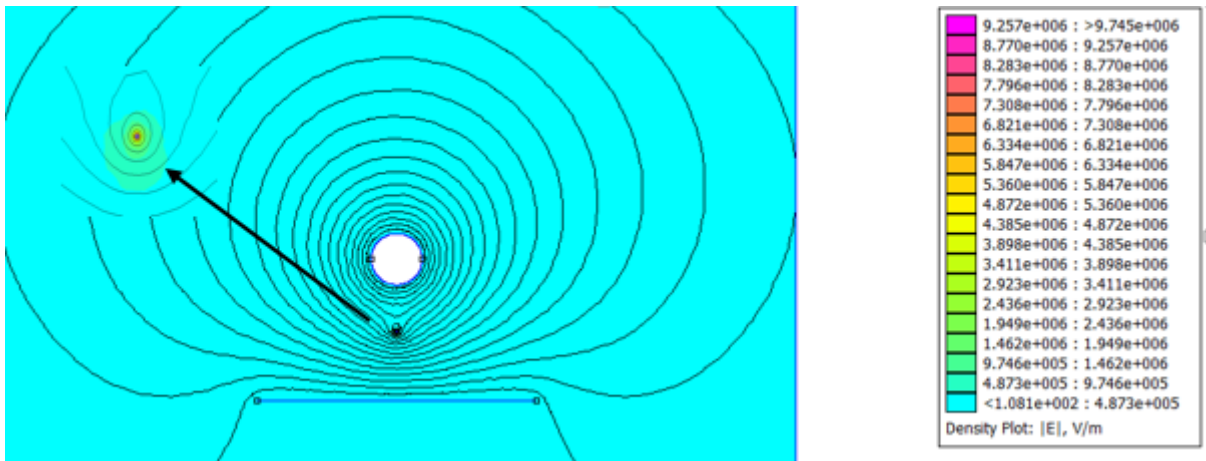


Figure II.12 : Distribution spatiale (a) du potentiel électrique (b) du champ électrique

II.5.1.3 Distribution du champ dans les espaces inter-électrodes

II.5.1.3.1 Champ dans l'espace plaque-fil

La Figure II.13 présente l'impact de la valeur des distances plaque-fil (d_{pw}) et fil-cylindre (d_{cw}) sur la distribution du champ électrique le long de l'axe vertical entre la plaque et le fil.

Le champ électrique est le plus élevé au niveau du fil (électrode active), puis décroît rapidement pour prendre la valeur la plus faible près de la plaque (électrode passive).

La valeur maximale du champ est celle pour les plus petites valeurs des distances fil-cylindre et/ou plan-fil.

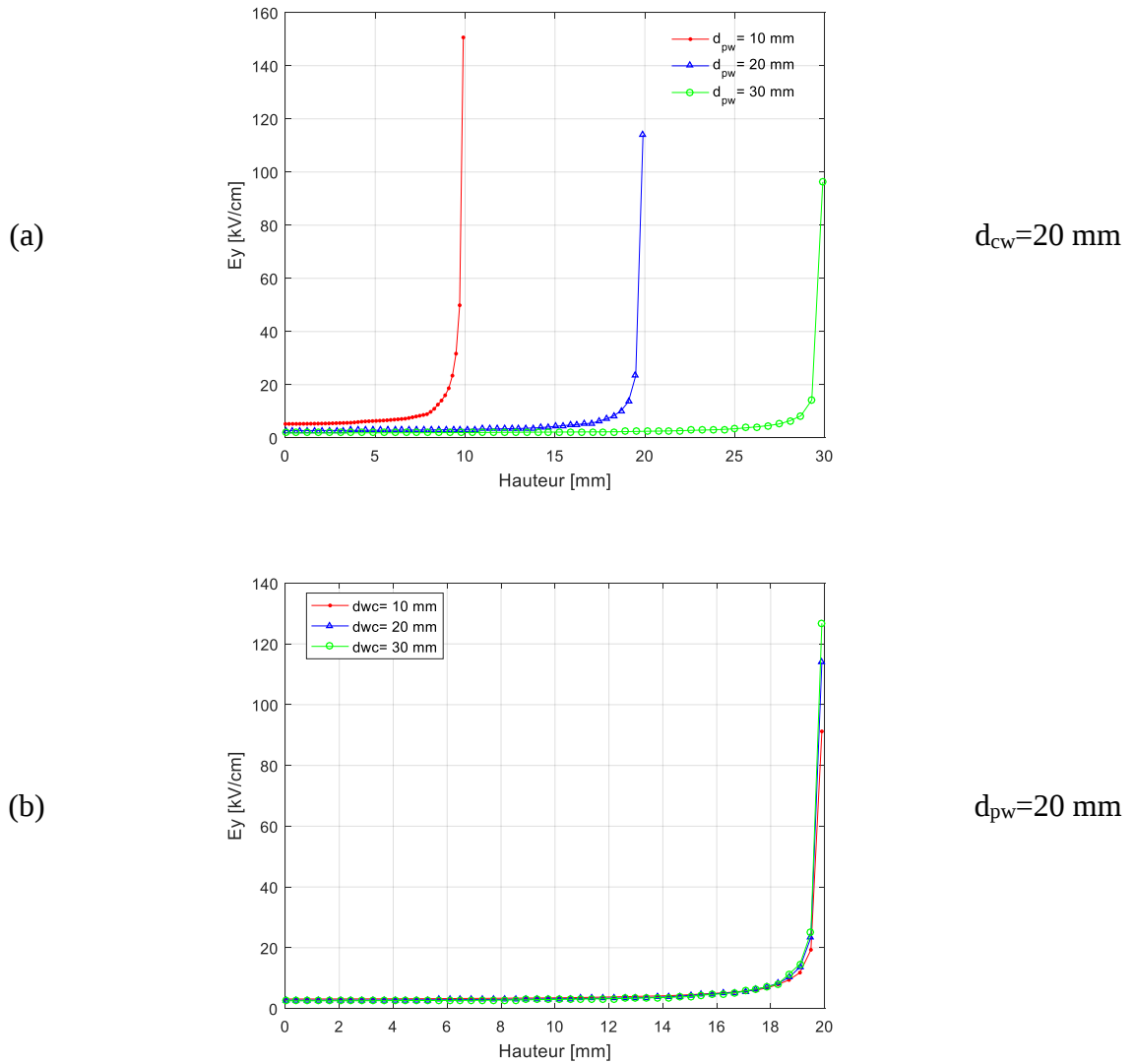


Figure II.13 : distribution du champ électrique le long de l'axe vertical dans la zone plaque-fil pour différentes valeurs de la distance (a) plaque-fil (b) fil-cylindre

II.5.1.3.2 Champ dans l'espace fil-cylindre

La Figure II.14 présente les effets des distances plaque-fil (d_{pw}) et fil-cylindre (d_{cw}) sur la distribution du champ électrique le long de l'axe vertical entre le fil et le cylindre.

La sensibilité du champ électrique à la variation de la distance inter-électrodes diminue lorsque d_{wc} augmente (10 à 30 mm), révélant un effet protecteur contre l'effondrement du champ.

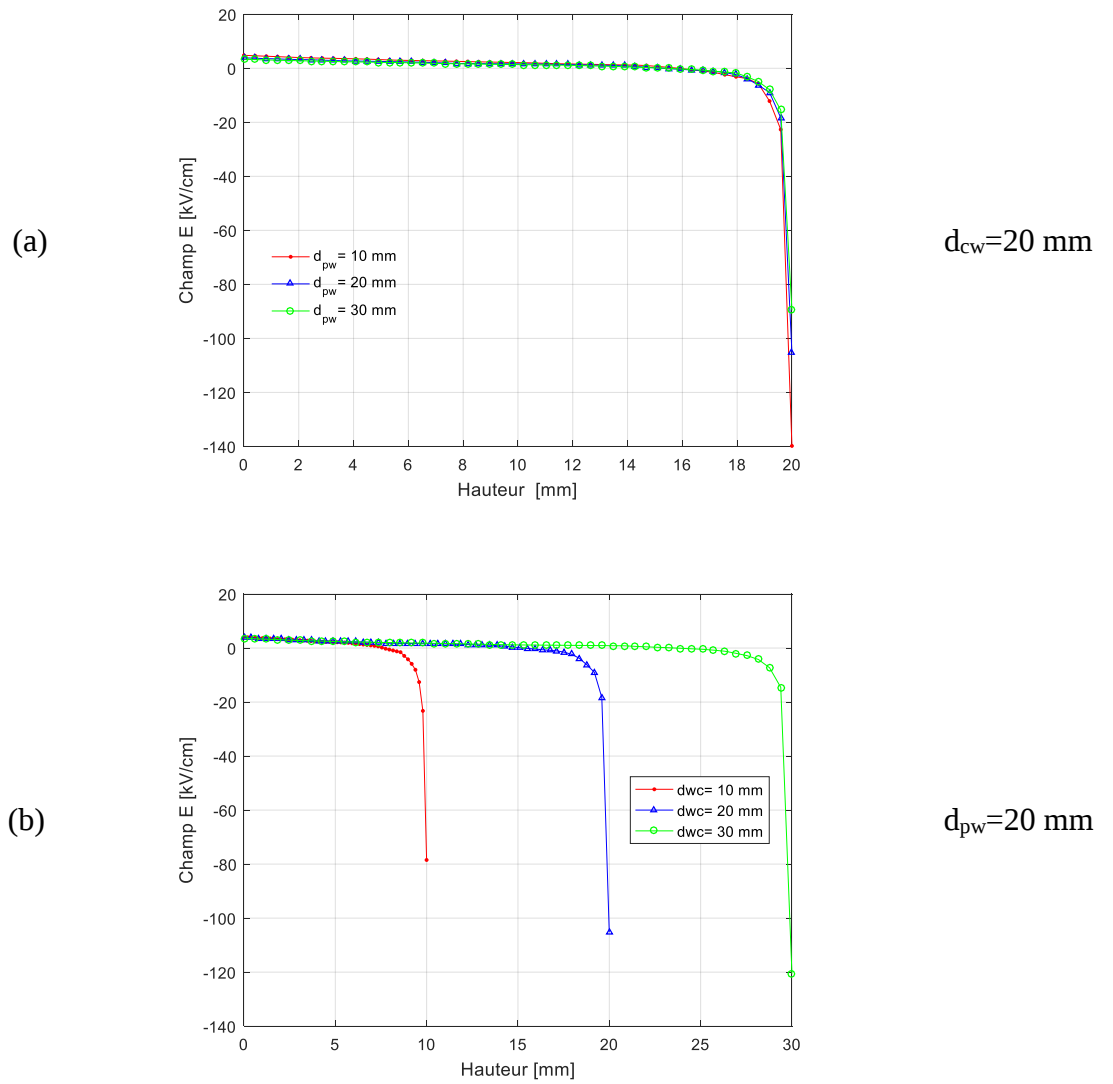


Figure II.14: distribution du champ électrique le long de l'axe vertical(y) dans la zone fil-cylindre pour différentes valeurs de la distance (a) plaque-fil (b) fil-cylindre

II.5.1.4 Champ à la surface des électrodes

II.5.1.4.1 Champ à la surface de la plaque

Les courbes de la Figure II.15 présente l'impact de la variation des distances fil-cylindre et plan-fil sur la distribution du champ à la surface de la plaque le long de l'axe transversale x.

Pour tous les cas examiné, le champ est maximal sous le fil ($x=0$) et il diminue à mesure qu'on s'éloigne de part et d'autre de ce point.

La valeur maximale du champ sur la surface de la plaque est celle pour les plus petites distances fil-cylindre et/ou plan-fil.

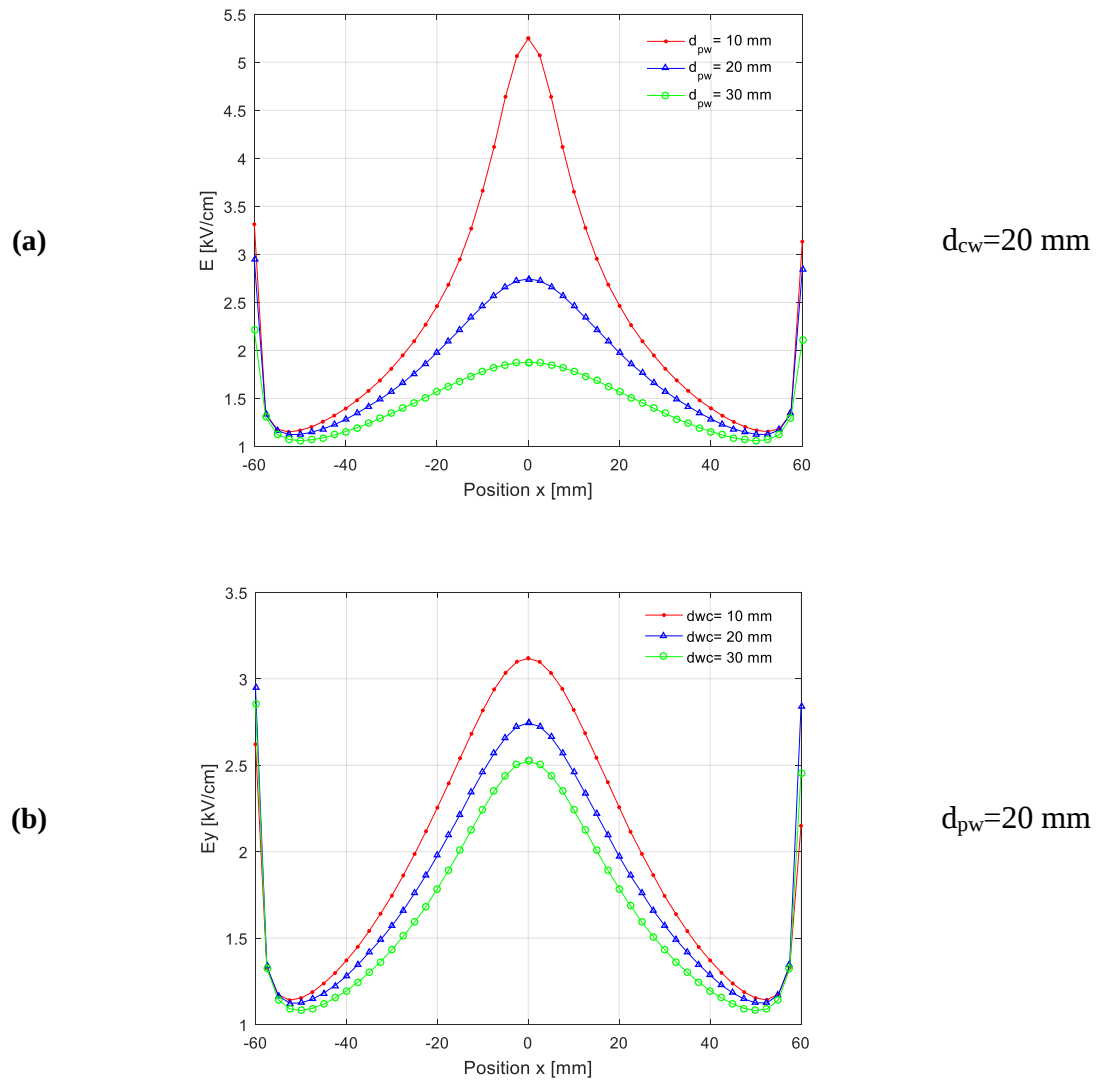


Figure II.15: distribution du champ électrique le long de la surface de la plaque pour différentes distance: (a) plan-fil et (b) fil-cylindre

II.5.14.2 Champ à la surface de fil

La Figure II.16 présente l'impact de la variation des distances fil-cylindre et plan-fil sur la distribution du champ électrique à la surface du fil.

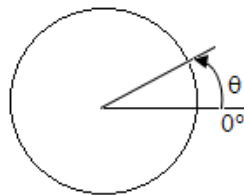


Figure II.16: Angle sur la surface de fil

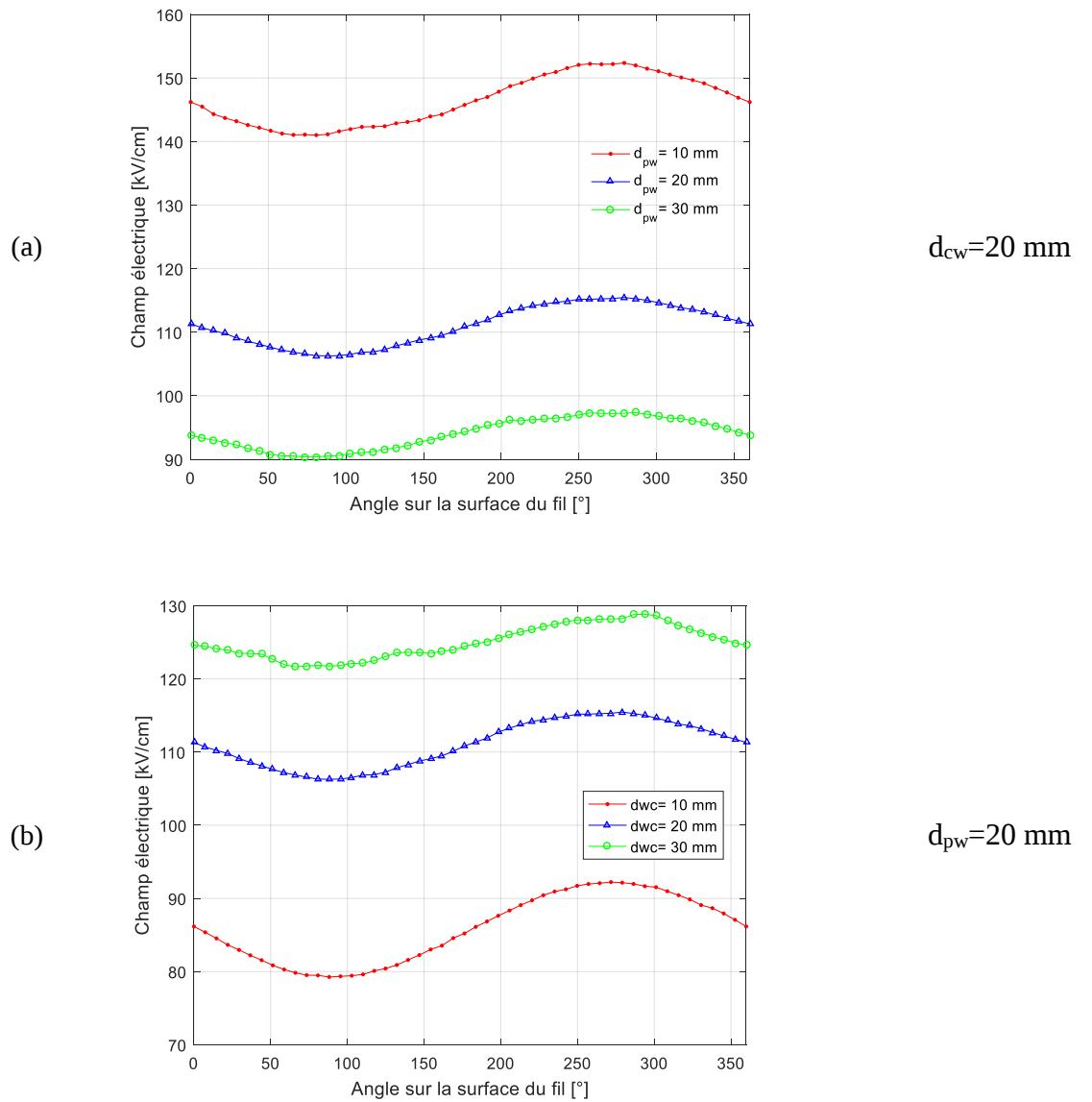


Figure II.17: distribution du champ électrique à la surface du fil pour différentes valeurs de la distance:(a) plan-fil (b) fil-cylindre

La Figure II.17.a représente la variation du champ électrique à la surface du fil pour trois valeurs différentes de la distance plan-fil: 10,20 et 30mm. Les courbes montrent que pour un point donné de la circonférence du fil, une augmentation de la valeur de la distance plan-fil entraîne une diminution du champ à la surface du fil.

Pour les 6 cas examinés, le champ diminue et augmente de manière non uniforme autour de la surface du fil. Il est plus important dans la région en regard de la plaque ($180^\circ < \theta < 360^\circ$) et atteint sa valeur maximale pour $\theta=270^\circ$. Il est plus faible dans la région en regard du cylindre ($0^\circ < \theta < 180^\circ$), et atteint sa valeur minimale pour $\theta=90^\circ$.

II.5.1.4.3 Champ à la surface du cylindre

La Figure II.18 présente l'impact de la variation des distances plan-fil et fil-cylindre sur le champ à la surface du cylindre.

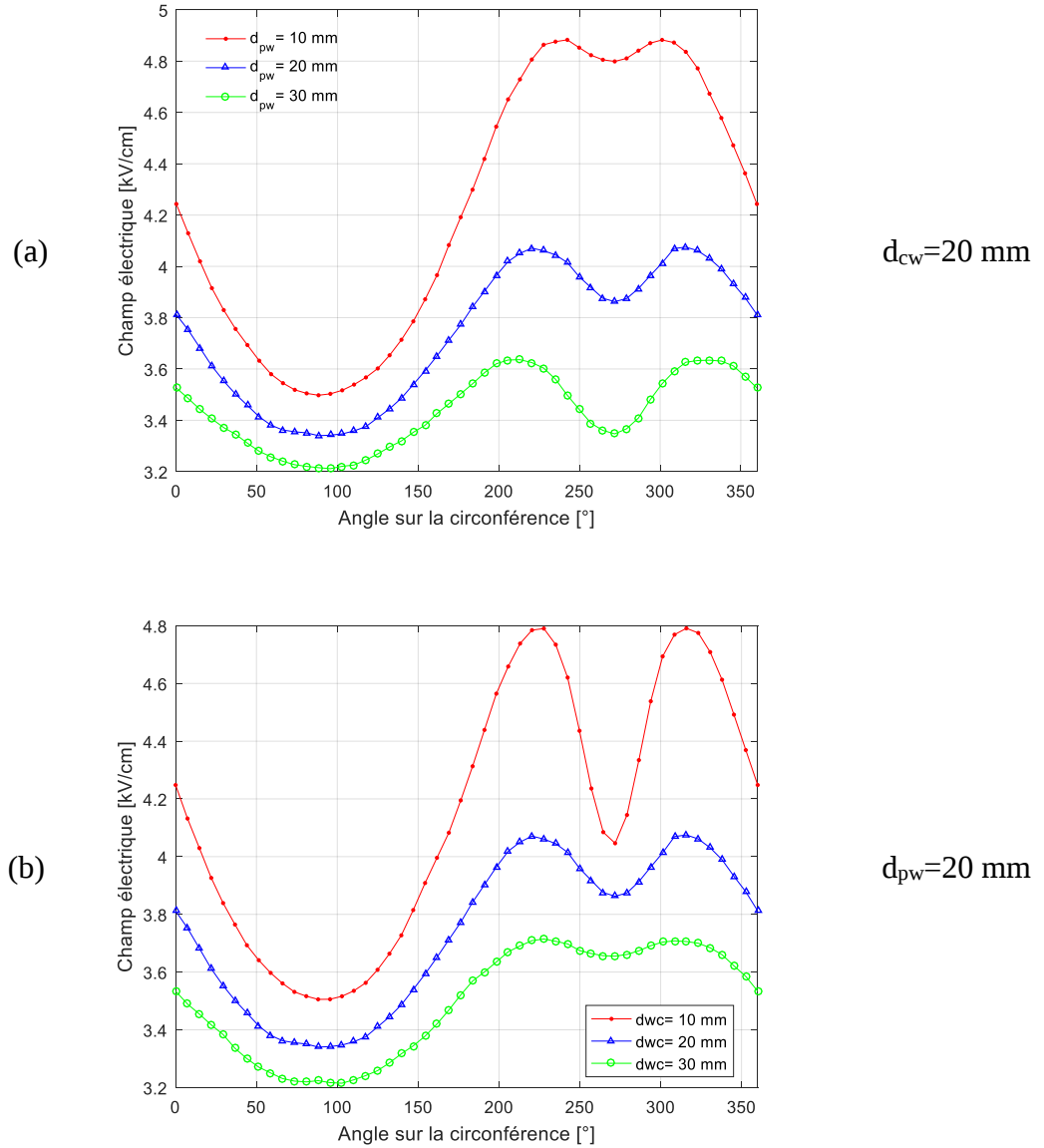


Figure II.18: distribution du champ électrique à la surface du cylindre pour différentes valeurs de la distance (a) plan-fil (b) fil-cylindre

Pour les 6 cas, le champ diminue et augmente de manière non uniforme autour de la surface du cylindre. Il est plus important dans la région en regard du fil ($180^\circ < \theta < 360^\circ$) et atteint ses valeurs maximale pour ($\theta=225^\circ$ et $\theta=315^\circ$). Il est plus faible dans la haute région du cylindre ($0^\circ < \theta < 180^\circ$), et atteint sa valeur minimale pour $\theta=90^\circ$.

Les courbes montrent que pour un point donné de la circonférence du cylindre (angle donné), une augmentation de la valeur des distances plan-fil et fil-cylindre est suivie d'une augmentation du champ électrique à la surface du cylindre.

II.5.2 Caractérisation expérimentale

Dans les paragraphes subséquents, une présentation et une interprétation des résultats expérimentaux sont proposées. L'étude en question porte sur l'analyse de l'influence des paramètres suivants : la polarité de la tension appliquée $V+$ ou $V-$, la distance entre le fil et le cylindre (d_{wc}) et la distance entre plaque et fil (d_{pw}).

II.5.2.1 Formes d'onde de courants de la décharge couronne

Un enregistrement de 5s du courant de décharge couronne négative est donné à la Figure II.19. On voit que le régime est impulsionnel.

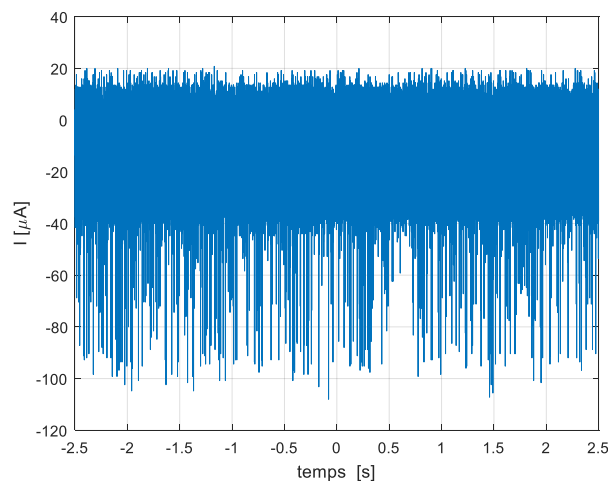


Figure II.19: Enregistrement du courant instantané pour une décharge couronne négative pour la tension -9 kV.

Sur la Figure II.20 est représentés une impulsion du courant instantané lors de la décharge couronne négative.

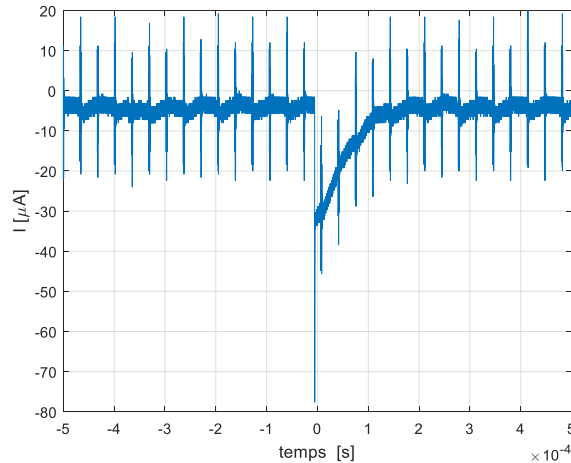


Figure II.20: Impulsions du courant de décharge couronne négative pour une tension de 9 kV.

II.5.2.2 Caractéristiques I-V

Nous avons caractérisé la décharge couronne par mesure des courants de la décharge (I) en fonction de la tension de source (V) appliquée en variant chaque fois un seul paramètre tout en gardant les autres fixes. Les paramètres sont: la polarité de la tension appliquée $V+$, $V-$, la distance entre le fil et le cylindre (d_{wc}) et la distance entre plaque et fil (d_{pw}).

II.5.2.2.1 Influence de la polarité

Sur la Figure VI.21 sont représentées les caractéristiques I-V des décharges couronnes négative et positive. Pour les deux polarités, le courant de décharge est une fonction non linéaire de la tension appliquée. On constate que, pour des tensions inférieures à la tension de seuil, le dispositif est inopérant. Au-delà de cette valeur seuil, on observe une augmentation graduelle du courant de décharge avec la tension appliquée. La tension seuil d'une décharge négative est plus faible que celle d'une décharge positive. En outre, pour une tension donnée, le courant de la décharge couronne négative est plus élevé que celui d'une décharge couronne positive.

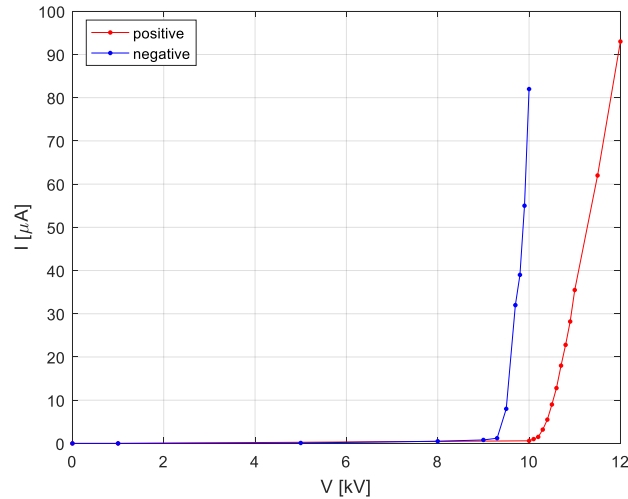


Figure II.21: Caractéristique I-V des décharges couronnes positive et négative.

II.5.2.2 Influence de la distance plaque-fil (d_{pw})

Sur la Figure II.22 sont représentées les caractéristiques I-V d'une décharge couronne positive pour une même distance fil-cylindre et différentes distance plaque-fil.

Pour une tension donnée, le courant de la décharge couronne pour une distance de 0,5cm est plus élevé que celui pour une distance de 1cm.

La tension de seuil d'amorçage de la décharge pour une distance plaque-fil de 0.5 cm est plus faible que celle pour une distance plaque-fil de 1 cm.

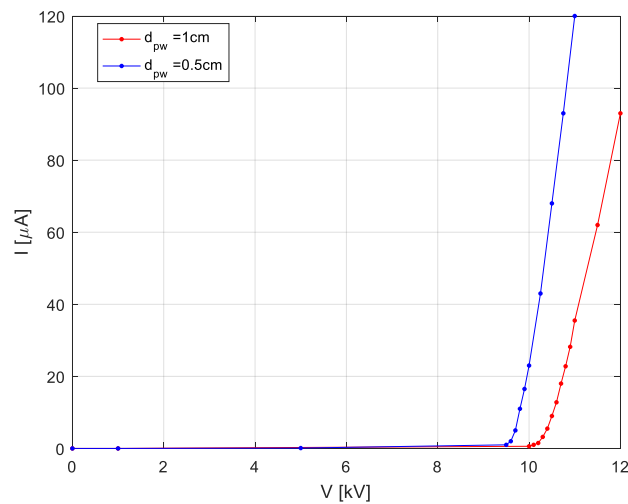


Figure II.22: Caractéristiques I-V d'une décharge couronne positive pour différentes distance fil-plaque.

II.5.2.2.3 Influence de la distance inter-électrodes fil-cylindre (d_{wc})

La figure I.7 illustre l'influence de la distance fil-cylindre sur les paramètres de la décharge couronne.

D'après cette figure, pour une tension appliquée donnée, le courant de la décharge couronne est plus important et croît plus rapidement pour de faibles distances fil-cylindre.

De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances fil-cylindre plus petites.

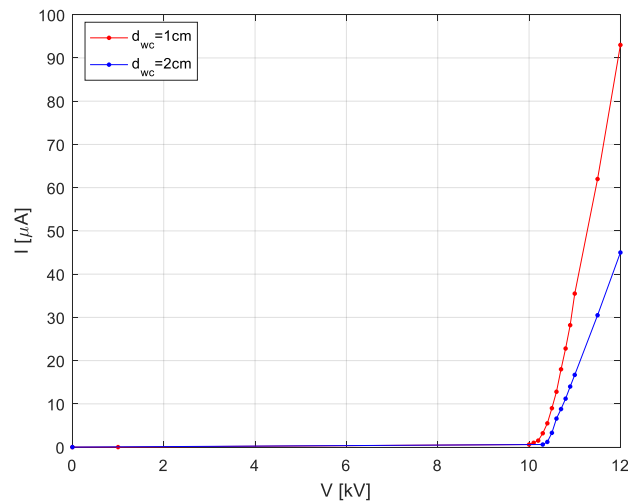


Figure II.23: Caractéristique I-V des décharges couronnes pour différent d_{wc}

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats expérimentaux et de simulation ont été présentés et interprétés. La forme d'onde du courant de décharge, la caractéristique courant-tension et les caractéristiques de charge ont été étudiées.

Chapitre III

**Application du système de décharge couronne en
configuration cylindre-fil-plan pour la charge et la
neutralisation des particules**

III.1 Introduction

Ce chapitre portera sur l'application du système cylindre-fil-plan pour la charge et la neutralisation des granules de polyéthylène. Après description des différents éléments du dispositif expérimental, les méthodes expérimentales lors de nos études, on expose les résultats en deux parties. La première est dédiée à au chargement d'un matériau diélectrique, la deuxième partie est réservée au contrôle de son état de charge par ce système de décharge couronne.

III.2 Dispositifs expérimentaux, modes opératoires

III.2.1 Essai de chargement des particules PE

III.2.1.1 Description de l'installation expérimentale

III.2.1.1.1 Schéma

La figure III.1. montre l'installation expérimentale utilisée pour l'essai de charge des particules. Elle est essentiellement formée de deux postes : un poste de chargement et un poste de mesure de la charge.

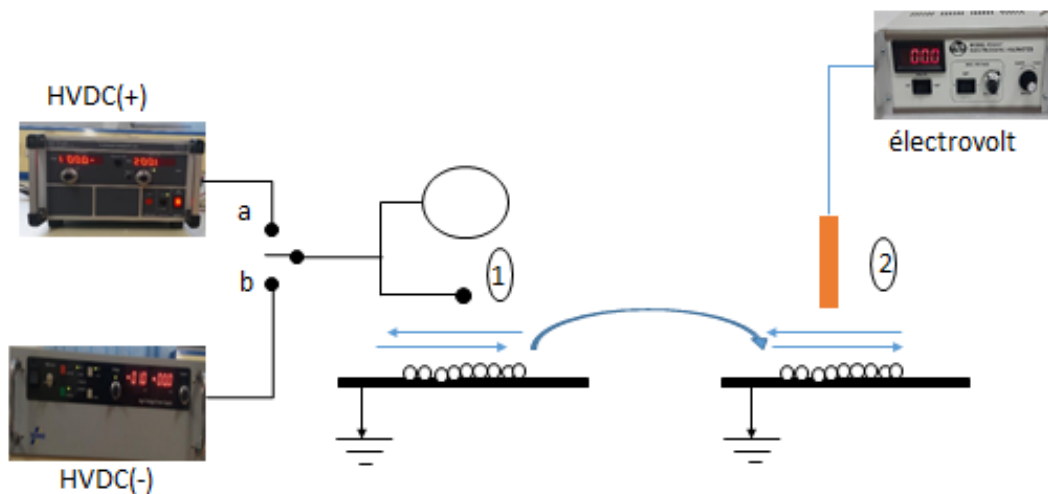


Figure III.1: Installation expérimentale pour mesure la charge.

III.2.1.1.2 Poste de chargement

Le poste de chargement contient les éléments suivants :

- le système d'électrodes de chargement en configuration cylindre-fil-plan
- deux sources hautes tensions, une positive et l'autre négative

III.2.1.1.3 Poste de mesure

Mesure du potentiel de surface

La mesure de potentiel en surface après la fin de la phase de chargement, se fait par simple transfert des granules sous une sonde électrostatique de type Trek 3450 reliée à un voltmètre électrostatique Trek, modèle 341B, Figure III.2. La sonde électrostatique est fixée à une distance $h=5$ mm au-dessus de la surface de la couche des granules.



Figure III.2: mesure du potentiel.

Mesure de la charge

Pour la mesure de la charge des matériaux diélectrique granulaires on utilise un électromètre Keith Ly 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 III.3.



Figure III.3: mesure de la charge.

Mesure de la masse du matériau

Les essais de charges et de neutralisation ont été faits sur trois échantillons de masses différentes d'un matériau diélectrique granulaire. Pour la mesure de la masse des échantillons on utilisé une balance électronique de Marque MIHEE, Modèle MH-999 de la Figure III.4



Figure III.4: Photographie de la balance.

III.2.1.2 Matériau utilisé dans l'étude

Les expériences ont été effectuées sur un matériau diélectrique granulaire: le polyéthylène haute densité (HDPE). Les particules du polyéthylène ont une forme quasi sphérique, avec une taille typique autour de 3mm.



Figure III.5: Photographie de matériau granulaire de polyéthylène.

Chapitre III : Application du système cylindre-fil-plan pour la charge et la neutralisation des granules de polyéthylène.

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique, translucide, chimiquement inerte (il est plus résistant aux oxydants forts que le polypropylène), facile à manier et résistant au froid. Les trois principales familles de PE sont le HDPE (PE haute densité), le LDPE (PE basse densité) et le LLDPE (PE à basse densité linéaire). Le polyéthylène est un matériau largement utilisé dans l'isolation des câbles et dans les médias filtrants fibreux. La taille et la forme des grains jouent un rôle très important dans le processus de charge et décharge des couches de granules. En effet, la forme des grains détermine la régularité de la surface de la couche et, par conséquent, l'amplification du champ à la surface. L'arrangement des grains dans la même couche influe sur la conduction de surface soit vers la masse soit latéralement [53]. Pour notre étude nous avons utilisé le polyéthylène haute densité (HDPE) en forme de granules, avec une taille typique d'environ 3mm. La masse des échantillons de PE est de 3.65 g ; ils ont été répartis en monocouche sur une surface de 50×50 mm² entourée par un cadre mis à la masse afin d'assurer la fixation des granules pendant le déplacement. Les échantillons ont été déposés sur une plaque mise à la terre supportée par un système de convoyeur assurant le mouvement aller et retour. Le Tableau III.1 représente les principales caractéristiques des granulaires PE utilisés dans tous les expériences.

Tableau III.1: Caractéristique principales des granulaires de PE utilisés [13].

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 (Ω.cm)	10^{-4}
masse volumique moyenne kg/m³	946- 960
Résistance de rupture diélectrique (kV/mm)	200
températures de fusion (°C)	130
Température maximum d'utilisation Tmax (°C)	60

III.2.1.3 Description de la démarche expérimentale

Au poste de chargement on verse les particules dans l'espace inter-électrode à l'aide d'un entonnoir placé en haut du cylindre. En bas, à la sortie du cylindre, les particules sont récupérées et transférées au poste de mesure afin de mesurer leur charge.

III.2.2 Essais de neutralisation des charges électriques

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

III.2.2.1 Installation expérimentale

La figure III.6 montre l'installation expérimentale utilisée pour l'essai de charge des particules. Elle est essentiellement formée de deux postes : un poste de chargement et un poste de mesure de la charge.

Le poste de chargement contient les éléments suivants :

- Le système d'électrodes de chargement en configuration fil-cylindre;
- Deux sources hautes tensions, une positive et l'autre négative

Le poste de mesure du potentiel est composé sonde électrostatique reliée à un voltmètre électrostatique.

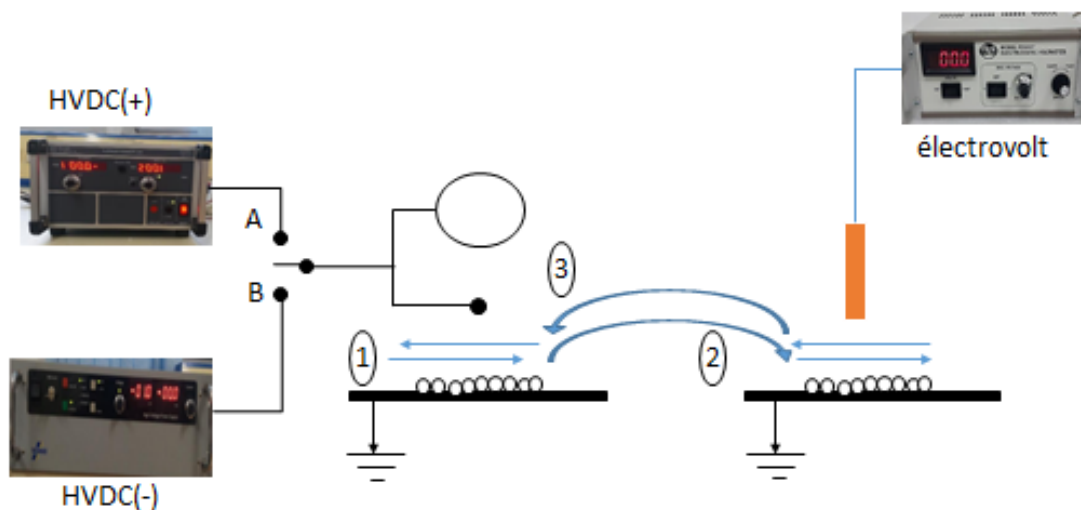


Figure III.6 : Installation expérimentale de neutralisation

III.2.2.2 Description de la démarche expérimentale

Après préparation d'échantillons de masse 25g, chaque essai de neutralisation se fait en 4 étapes:

Etape 1: charge initiale des particules au poste de charge;

Etape 2: mesure du potentiel à la surface de la couche de granules au poste 2;

Etape 3: Neutralisation des particules au poste 3;

Etape 4: mesure du potentiel à la surface de la couche de granules au poste 2.

III.3 Résultats et discussion

III.3.1 Caractéristique de charge des particules de polyéthylène

La figure III.7 représente la variation du potentiel à la surface, donc de la charge, d'un échantillon de 25g de particules de polyéthylène étalé sur la surface de la plaque, avant et après exposition à une décharge couronne positive pendant 20s.

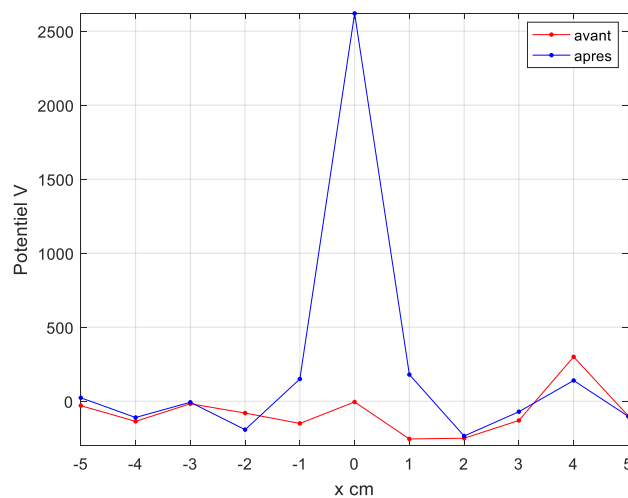


Figure III.7 : Distribution du potentiel à la surface de l'échantillon avant et après chargement.

En comparant les deux courbes, « avant » et « après » charge des particules, on constate que le potentiel à la surface est maximal sous le fil. Il diminue progressivement à mesure que l'on s'en éloigne à droite ou à gauche. Ceci implique que les particules sous le fil sont chargées à une valeur maximale, alors que celles situées plus loin du milieu n'ont gagné pratiquement aucune charge.

Chapitre III : Application du système cylindre-fil-plan pour la charge et la neutralisation des granules de polyéthylène.

La figure III.8 représente les variations du potentiel à la surface le long des axe transversal (x) et longitudinal (z), d'un échantillon de 25g de particules de polyéthylène étalé sur la surface de la plaque après son passage dans un système de décharge couronne positive (10,5 kV) à une vitesse très lente.

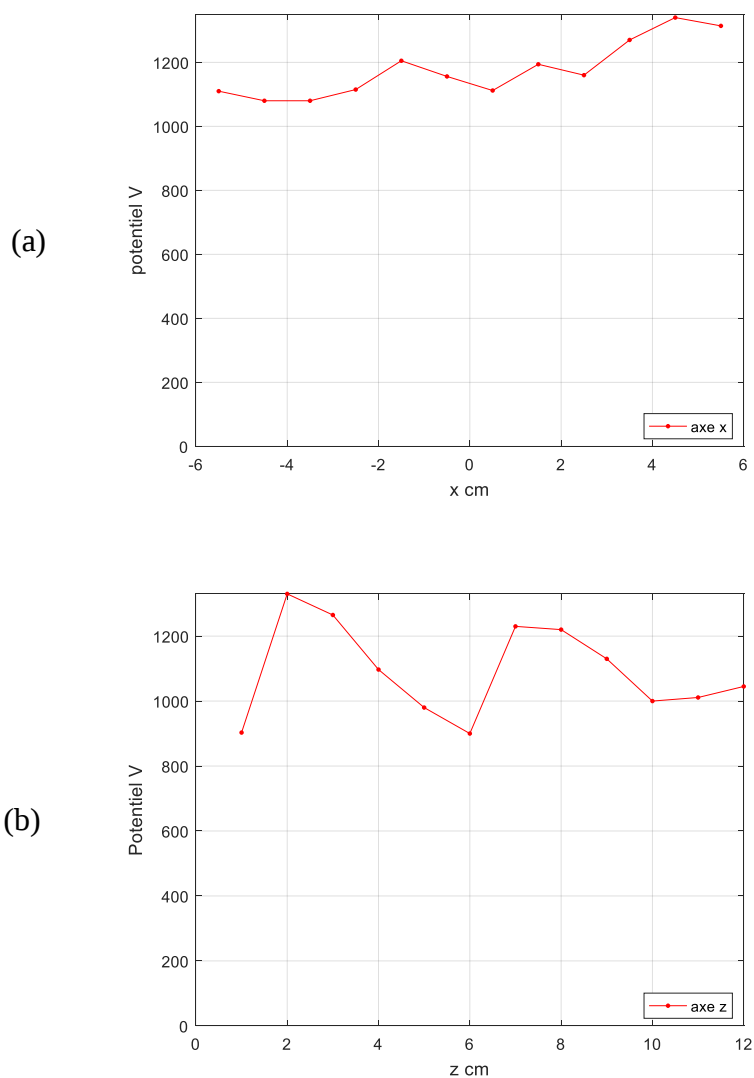


Figure III.8:Potentiel à la surface des granules le long des axes (a) transversal x (b) longitudinal z

III.3.2 Caractéristique de neutralisation des particules de polyéthylène

L'analyse graphique permet de mettre en évidence l'impact de divers niveaux de tension de neutralisation sur un potentiel électrique initialement établi à environ 2 kV.

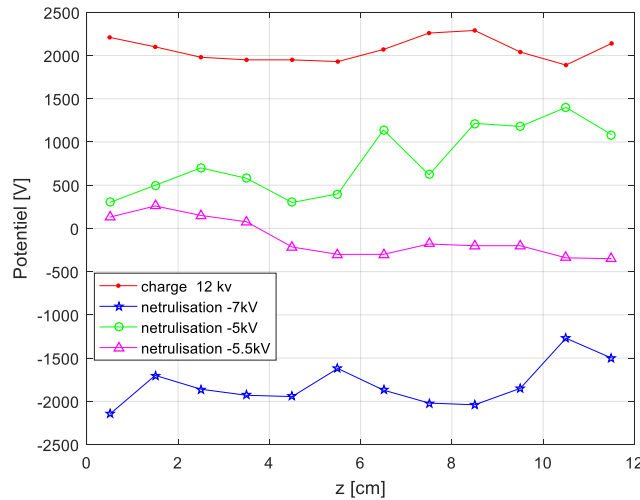


Figure III.9: Potentiel de surface le long de l'axe z de la plaque avant et après neutralisation avec différentes tensions

Ces résultats suggèrent une corrélation entre la tension de neutralisation et le potentiel à la surface des particules. Ainsi, il est possible d'ajuster la neutralisation en fonction des besoins pour atteindre un certain niveau de charge résiduel.

Dans le cas d'une tension de -5 kV, le potentiel demeure, de manière générale, positif, bien qu'il soit réduit, ce qui indique une neutralisation partielle. Lorsque la tension électrique est réglée à -7 kV, le potentiel est devenu négatif, indiquant une neutralisation excessive. C'est-à-dire que les particules sont neutralisées puis chargées en polarité inverse. Dans le contexte des analyses effectuées, il a été observé que, pour une tension de neutralisation de -5.5 kV, le potentiel de référence s'avère optimal en termes de neutralisation.

III.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations. Les caractéristiques de charge et de neutralisation d'un matériau diélectrique granulaire ont été étudiées.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans ce travail, l'effet de la tension appliquée et des distances entre les électrodes sur le comportement du système de décharge couronne en configuration *cylindre–fil–plan*, ainsi que son efficacité dans le processus de neutralisation des particules, sont présentés et analysés.

Les principaux résultats de cette étude sont :

1. Caractérisation numérique du champ et du potentiel électrique :
 - La distribution du champ électrique est fortement non uniforme, avec une intensité maximale autour du fil conducteur.
 - L'étude numérique a permis de déterminer l'effet des paramètres géométriques comme la distance plaque-fil (d_{pw}) et la distance fil–cylindre (d_{wc}) sur la répartition du champ électrique et du potentiel dans l'espace inter-électrodes.
2. Mesures expérimentales du courant de décharge :
 - La forme d'onde du courant de décharge couronne est impulsionnelle dans le cas d'une polarité négative, avec des cycles asymétriques et irréguliers.
3. Caractéristique courant–tension (I–V) :
 - Le courant de décharge est une fonction non linéaire de la tension appliquée.
 - Le courant est plus élevé en polarité négative qu'en polarité positive, à tension équivalente.
 - Les distances plaque-fil et fil-cylindre influencent le niveau du courant: une plus faible hauteur ou distance induit un courant plus important.
4. Évaluation de la charge des particules de polyéthylène (PE) :
 - La charge initiale des particules est plus élevée avec une décharge couronne négative qu'avec une positive.
 - Le système de décharge couronne permet une modification mesurable de la charge des particules, selon la tension appliquée.
5. Efficacité de la neutralisation électrostatique :
 - Après passage dans le champ de décharge, les particules voient leur charge fortement réduite, ce qui démontre l'efficacité du système dans le processus de neutralisation.

Bibliographie :

- [1] BELARBI Yassine et BOULEFDAOUI Mohamed Oussama, Caractérisations de la décharge couronne dans le précipitateur électrostatique (PES) en différentes configuration, Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019/2020.
- [2] AHMERLAINE Selma et BENDJAKHNOUNE Hassina, Etude de la décharge couronne en configurations multipointes-plan et Fil-Cylindre, Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2020/2021.
- [3] ABDALI Sabrina et AIANE Cherif, L'effet de la température sur les paramètres de la décharge couronne, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira–Bejaia, 2017/2018.
- [4] MEDJDOUB Bachir et AISSOU Youcef, Décharge couronne fil–plan en polarité positive, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira –Bejaia, Octobre 2021.
- [5] AL MWLAD Yaqoob Mohammed GHEDDARI Fouad, Neutralisation des charges électriques Sur la surface des polymères isolants, Mémoire de Master, Université kasdi merbah ouargla, 2020/2021.
- [6] MIHOUBI Soumia et KERDOUSSI Hakima, Décharge couronné en configuration coaxiale : application à la neutralisation des charges Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019/2020.
- [7] BENCHERIF Nabile et DJOUADI Toufik, Etude expérimentale de la décharge couronne continue en polarité positive et négative dans la configuration fils-plans, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 22/06/2017.
- [8] BENYAMINA Mokhtaria, Etude de la production de l'ozone dans les décharges couronne, Thèse de Doctorat, Université d'Oran des Sciences et de la Technologie (USTO-MB), 2014.
- [9] HAMOUIMECHE Kaissa, Etude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2009.
- [10] REGUIG Abdeldjalil, Contribution à l'étude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans différents types de configurations d'électrodes, Thèse doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbes, 2017.
- [11] KACHI Miloud, Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères Granulaires, Thèse de Doctorat, Université 8Mai 45 Guelma, 2012.
- [12] SAKLOUL Issam et KECHITI Zakaria, Etude de la décharge couronne dans un système d'électrodes en configuration fil-cylindre, Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2021/2022

- [13] YAGHOOBI Mohammad, “L'effet de la taille et de l'agglomération des charges de CCTO sur les propriétés diélectriques des composites CCTO-époxy,” Mémoire, Université LAVAL Québec, Canada de 2018.