

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:...../2022



MEMOIRE

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

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par: SAKLOUL Issam
KECHITI Zakaria

Thème

Etude de la décharge couronne dans un système d'électrodes en configuration fil-cylindre

Soutenu publiquement, le 18/06/2022, devant le jury composé de :

Mr. KACHI Miloud	Professeur	Université Guelma	Président / Examineur
Mr. REMADNIA Mokdad	MCA	Université Guelma	Examineur
Mr. BOUCHELKHA Abdelhafid	MAA	Université Guelma	Encadreur

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions dieu (الله) qui nous a donné la force et la patience pour terminer notre étude.

Nous remercions vont en particulier à notre encadreur : Mr. BOUCHELKHA ABDELHAFID qui nous a éclairé avec ces conseils et suggestions, merci pour votre aide précieuse.

Nous aimerons exprimer aussi nos remerciements au staff du Laboratoire de Génie Electrique de Guelma (LGEG), pour l'accueil et pour toutes les facilités que nous avons trouvé durant la réalisation de la partie expérimentale de notre projet de fin d'étude.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Enfin nous tenons à exprimer nos reconnaissances à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral et matériel.

Sommaire

Introduction générale	VI
Chapitre I : Etude bibliographique de la théorie de la décharge couronne	
I.1 Introduction	1
I.2 Historique	1
I.3 La décharge couronne	2
I.4 Différents régimes de la décharge	3
I.5 Mécanismes de formation et processus physique	5
I.5.1 Théorie de Townsend	5
I.5.2 Théorie de Streamer	7
I.6 Les différents types de la décharge couronne	7
I.6.1 Décharge couronne positive	8
I.6.2 Décharge couronne négative	9
I.6.3 Décharge à tension alternative	9
I.7 Caractéristique électrique macroscopique	10
I.7.1 Champ électrique géométrique	10
I.7.2 Régime critique ou seuil d'apparition de la décharge couronne	11
I.7.3 Régime auto-entretenu ou critère de Townsend	13
I.7.4 Régime de claquage	13
I.8 Caractéristique courant/tension de la décharge couronne	14
I.9 Facteurs influençant la décharge couronne	14
I.9.1 Facteurs géométriques	15
I.9.2.1 Rayon de courbure	15
I.9.2.2 Distance inter-électrodes	15
I.9.2 Facteurs physiques	15
I.9.2.1 Nature du gaz	15
I.9.2.2 Effet de la pression	16
I.9.2.3 Influence de la température	16
I.9.2.4 Influence de l'humidité	16
I.9.3 Facteurs électriques	16
I.10 Applications de la décharge couronne	16
I.10.1 Paratonnerre	16
I.10.2 Neutralisation	17
I.10.3 Filtre électrostatique	17
I.10.4 Séparateur électrostatique	17
I.11 Problèmes liés à la décharge couronnes	18
I.12 Réduction de l'effet couronne dans les postes électriques	20
I.13 Conclusion	20

Chapitre II : Dispositifs expérimentaux et outils de simulation

II.1	Introduction	21
II.2	Description des installations expérimentales	21
II.2.1	Les alimentations électriques	21
II.2.2	Les systèmes d'électrodes de décharge couronne	22
II.2.3	Les appareils de mesures électriques et visualisations	22
II.2.3.1	Mesure du courant moyen	22
II.2.3.2	Mesure de la charge	23
II.2.3.3	Mesure de la masse du matériau	23
II.2.3.4	Mesure de la température et de l'humidité relative	24
II.2.3.5	Appareils d'affichage et d'acquisition	24
II.2.4	Matériau utilisé dans l'étude	25
II.3	Essai de caractérisation électrique de la décharge couronne	26
II.4	Essai de chargement des particules PE	26
II.4.1	Installation expérimentale	26
II.5	Essais de neutralisation des charges électriques par décharge couronne	27
II.5.1	Installation expérimentale	27
II.5.2	Description de la démarche expérimentale	28
II.6	Outils de simulation	28
II.7	Conclusion	29

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1	Introduction	30
III.2	Résultats de simulation	30
III.2.1.	Distribution du champ et du potentiel dans l'espace inter-électrodes	30
III.2.2.	Distribution du champ et du potentiel dans l'espace inter-électrodes en présence d'une particule diélectrique chargée	32
III.3	Résultats expérimentaux	34
III.3.1	Formes d'onde de courants de la décharge couronne	34
III.3.2	Caractéristique I-V	37
III.3.3	Caractéristique de charge des particules de Polyéthylène (PE)	38
III.3.4	Neutralisation des particules PE	40
III.4	Conclusion	41
	Conclusion générale	
	Bibliographie	
	Annexes	

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique de la théorie de la décharge couronne

Figure I.1: Effet couronne sur différents éléments	2
Figure I.2: Vue de l'effet couronne dans un conducteur	2
Figure I.3: caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique	3
Figure I.4: Descriptif de la décharge couronne positive	8
Figure I.5: Descriptif de la décharge couronne négative	9
Figure I.6: Système en configuration fil- cylindre	10
Figure I.8: Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit p.d.	12
Figure I.7: Effet de la distance inter-électrode sur les paramètres de la décharge couronne.	15
Figure I.8: Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre	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
Figure I.11: Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission.	19

Chapitre II : Dispositifs expérimentaux et outils de simulation

Figure II.1: Alimentations électriques	21
Figure II.2: Système de la décharge couronne en configuration fil-cylindre	22
Figure II.3: Multimètre numérique utilisé dans la mesure du courant de décharge	23
Figure II.4: mesure de la charge	23
Figure II.5: Photographie de la balance.	23
Figure II.6: photographie de l'hygromètre numérique.	24
Figure II.7: Oscilloscope	24
Figure II. 8: Photographie de matériau granulaire de polyéthylène.	25
Figure II.9: Installation expérimentale pour la caractérisation du système fil-cylindre	26
Figure II.10: Installation expérimentale pour mesure la charge	27
Figure II.11 : Installation expérimentale de neutralisation	28
Figure II.12: Logiciel gratuit FEMM	29
Figure II.13: Logiciel Octave	29

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1: Distribution spatial du potentiel électrique.	30
Figure III.2: Distribution du potentiel électrique.	30
Figure III.3: Distribution spatial du champ électrique.	31
Figure III.4: Distribution du champ électrique pour la géométrie Fil-Cylindre sans granule.	31
Figure III.5: Distribution spatial du potentiel électrique en présence d'une particule diélectrique	32
Figure III.6: Distribution du potentiel électrique en présence d'une particule diélectrique.	32
Figure III.7: Distribution spatial du champ électrique en présence d'une particule diélectrique.	33
Figure III.8: Distribution du champ électrique pour la géométrie Fil-Cylindre avec granule	33
Figure III.9: Enregistrement du courant instantané pour une décharge couronne négative en configuration fil-cylindre.	35
Figure III.10: Impulsions du courant de décharge couronne négative.	36
Figure III.11: Impulsion du courant de masse pour une tension de 9 kV	37
Figure III.12: caractéristique I-V des décharges couronnes négative et positive.	38
Figure III.13 : Caractéristiques I-V calculée et expérimentale.	38
Figure III.14: Charge des particules PE pour deux échantillons de 5 g et 10 g.	39
Figure III.15: Rapport charge/masse	39
Figure III.16: Caractéristique de neutralisation	40
Figure III.17: Effet de la charge initiale des particules diélectriques sur leur charge finale	41
Figure III.8: Variation du taux de neutralisation avec la tension de neutralisation.	41

Liste des tableaux

Chapitre I : Etude bibliographique de la théorie de la décharge couronne

Tableau I.1 : Constantes dans l'équation de Peek pour les cylindres coaxiaux 11

Tableau I.2: Facteur de surface m 12

Chapitre II : Dispositifs expérimentaux et outils de simulation

Tableau II.1: principales caractéristiques des granulaires PE utilisés dans les expériences 25

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 est dû en fait 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 d'électrodes (multipointes/Plan, Fil-Cylindre, point/plan, fil-plan, ... etc.)[2].

Le but de ce travail intitulé '**Etude de la décharge couronne dans un système d'électrodes en configurations fil-cylindre**' est d'étudier l'influence de la tension sur les caractéristiques électrique des décharges couronne notamment celles de charge et de neutralisation des particules. A cet effet une étude numérique et expérimentale de la décharge couronne en polarité positive et négative pour une géométrie fil-cylindre est réalisée.

Ce travail est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est une étude bibliographique de la théorie de la décharge couronne où nous présentons les différents types de régimes de la décharge couronne, les mécanismes et les applications de cette décharge.

Au deuxième chapitre nous présenterons les dispositifs expérimentaux et les méthodes de mesure utilisée lors des manipulations au laboratoire. On parlera aussi des différents outils de simulation utilisés.

Enfin, et avant de conclure, nous présenterons au dernier chapitre les résultats de simulation et expérimentaux obtenus et leurs interprétations.

Chapitre I

**Etude bibliographique de la théorie de la
décharge couronne**

I.1 Introduction

L'effet couronne est une décharge lumineuse et sonore qui se produit en cas de présence d'un champ électrique localisé excessif sur un conducteur, qui provoque l'ionisation et une éventuelle décharge électrique de l'air à proximité de ce point. L'effet de couronne se caractérise par des phénomènes de nature électrique optique et acoustique qui se fait autour d'une électrode de petit rayon de courbure tel que le champ électrique à ces environs est faible, qui se traduit généralement par un sifflement subtil, augmente d'intensité avec la tension de sortie. De l'ozone, une forme d'oxygène odorante et instable, est souvent généré au cours de ce processus. L'ozone détruit le caoutchouc, et de l'acide nitrique peut être créé en cas de présence d'une quantité suffisante d'humidité. Ces éléments ont des conséquences négatives sur les matériaux, y compris les isolants électriques [4].

Il existe plusieurs types de décharges électrique et parmi lesquelles on distingue la décharge couronne. Elle désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Ce milieu est soumis à des champs électriques intenses mais non disruptifs et les électrodes peuvent former divers systèmes : pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre, fil-plan, sphère-plan,...etc.

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, 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].



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

I.3 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.

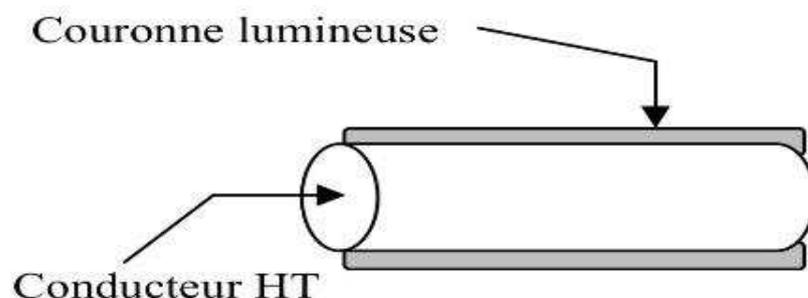


Figure I.2: Vue de l'effet couronne dans un conducteur [1].

Avantages:

La décharge couronne est à la bases de plusieurs applications industrielles (Filtres électrostatiques, séparateurs électrostatiques, photocopie...).

Inconvénients :

A partir de 345 kV l'effet couronne devient très gênant pour les réseaux. En effet il provoque des pertes couronne, des interférences avec les ondes radio, des bruit et vibrations des conducteurs. Le bruit et le champ électrique superficiel représentent actuellement les paramètres d'environnement les plus importants à prendre en considération lors de la construction de nouvelles lignes $U \geq 750$ kV.

I.4) Différents régimes de la décharge

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

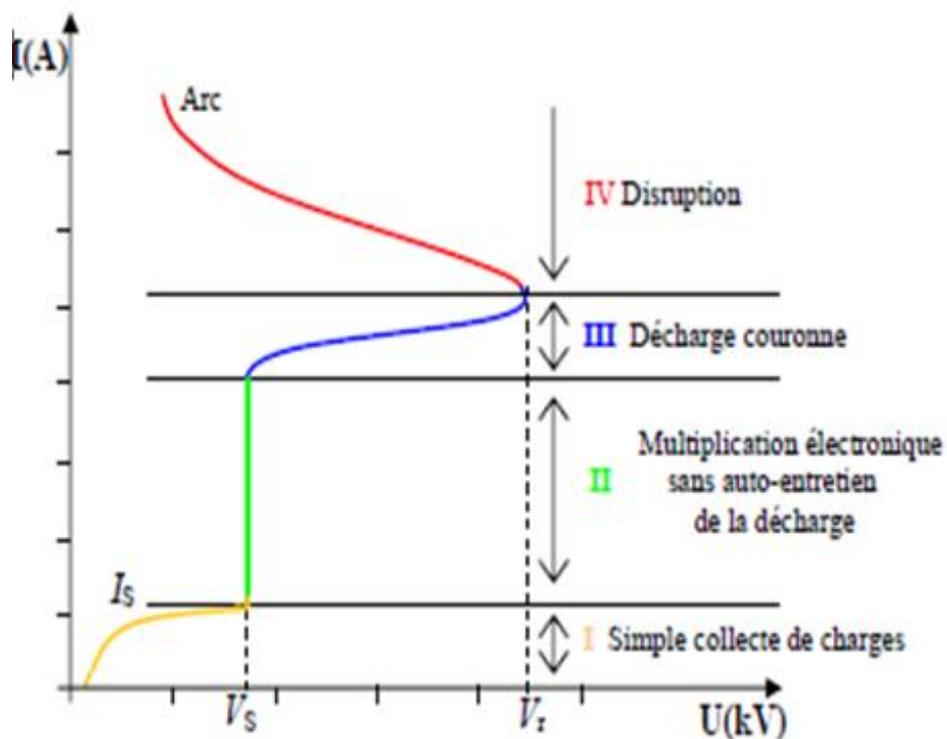


Figure I.3 : caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique [7].

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

❖ Premier régime

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

❖ Second régime

Qui se produit à partir d'une tension seuil « V_0 », traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée [7].

❖ Troisième régime

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

❖ Quatrième régime

Au-delà d'une tension appliquée « V_R », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale de gaz. Le champ réduit $\frac{E}{N}$ est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électrique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique [7].

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 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 créées 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:

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

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

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

D'où le courant collecté est :

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

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 γ , 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 :

$$\int_0^{L_c} (\alpha - \eta) dx = 1,5.108 \text{ electrons} \quad (\text{I.6})$$

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. Différents types de la décharge couronne

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.6.1 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-ionisation 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.4). 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.

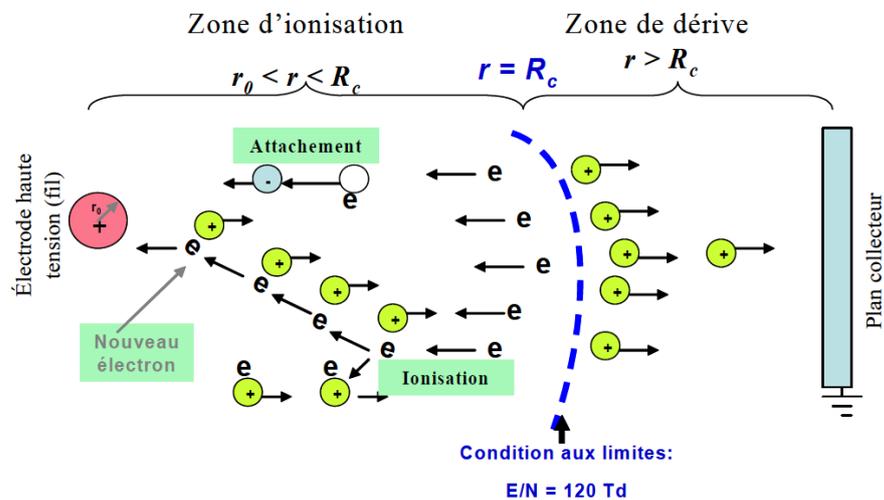


Figure I.4 : Descriptif de la décharge couronne positive [1]

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.6.2 Décharge couronne négative

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

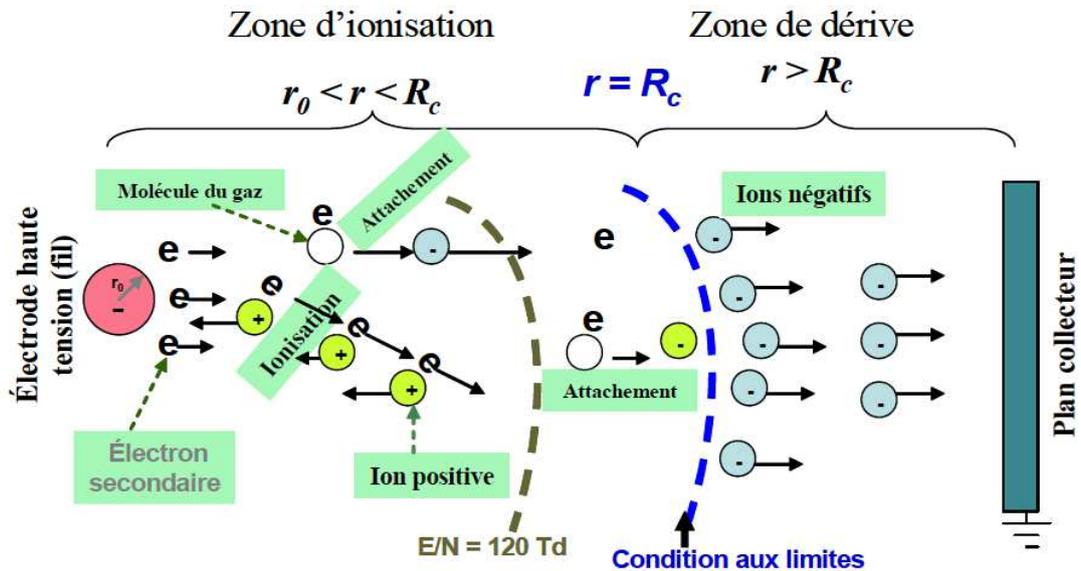


Figure I.5 : Descriptif de la décharge couronne négative [1]

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].

1.6.3 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 évacués 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 [13].

I.7. Caractéristique électrique macroscopique

I.7.1. Champ électrique géométrique

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 [2]:

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(r_c / r_f)} (KV / cm) \quad (I.7)$$

Où : V est le potentiel appliqué au fil (KV),

r_f le rayon du fil (cm)

r_c le rayon du cylindre (cm).

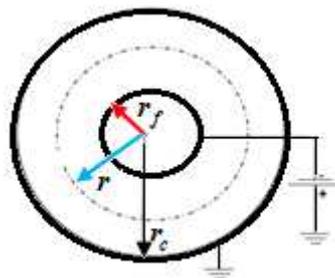


Figure I.6: Système en configuration fil-cylindre [2]

I.7.2. 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 pour une configuration fil-cylindre:

$$E_c = E_p \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta \cdot r_f}} \right) \quad (I.8)$$

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

Divers chercheurs ont attribué des valeurs différentes à ces constantes telles que celles qui sont données dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Constantes dans l'équation de Peek pour les cylindres coaxiaux

	E_p [KV/cm]	K
Peek(AC) : cylindres coaxiaux	31	0.308
Peek(AC) : fils parallèle	30	0.301
Whitehead (DC+)	33.7	0.24
Whitehead (DC-)	31	0.308

La densité de l'air δ peut être calculée par la formule :

$$\delta = \frac{273 + T_n}{273 + T} \frac{P}{P_n} \quad (I.9)$$

Où : T: température, en $^{\circ}C$;
P: pression de l'air, en $cm\ Hg$;
 $T_n=20^{\circ}C$: température normale ;
 $P_n=76\ cm\ Hg$: pression normale.

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, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental $m \leq 1$, appelés coefficients de surface dont les valeurs sont données au tableau I.2 [2].

Tableau I.2 : Facteur de surface m . [2]

conducteur	Facteur de surface m
Lisse et neuf	1
Lisse, oxydé	0.93-0.98
toronné	0.72-0.9 par défaut : 0.85

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

$$E_o = mE_c = mE_p \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta \cdot r_f}} \right) \quad (\text{I.10})$$

La différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes correspondant au champ critique est appelée tension d'amorçage V_o . Si r_c est la distance entre le fil et le cylindre périphérique en cm, elle peut être calculée de la manière suivante :

$$V_o = E_o r_f \ln \frac{r_c}{r_f} \quad (\text{I.11})$$

Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension d'amorçage à la pression du gaz et la distance inter-électrode dite: loi de Paschen. Cette loi est habituellement représentée par la courbe caractéristique $V_o = f(p \cdot d)$, de la figure I.8 où p est la pression et d la distance inter-électrode, et dépend de la nature du gaz introduit.

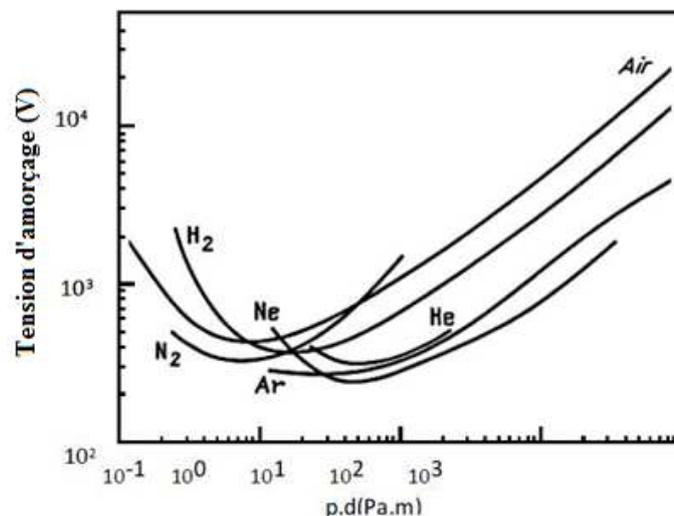


Figure I.8 : Tension d'amorçage pour différents gaz en fonction du produit $p \cdot d$. [8]

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

$$V_{vicu} = \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{k \times r}} \right) \cdot V_0 \quad (\text{I.12})$$

I.7.3. Régime auto-entretenu ou critère de Townsend

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

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1 \Rightarrow d = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} \right) \quad (\text{I.13})$$

d : Distance inter-électrode (m)

α : Premier coefficient de Townsend (m-1)

γ : Second coefficient de Townsend.

I.7.4. 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 [2] :

$$E_c = m \cdot E_p \delta \left(1 + \frac{r_i K}{2,718 r_i \sqrt{\delta \cdot r_i}} \right) \quad (\text{I.14})$$

Avec : $r_i = r_f + 0,03 \sqrt{r_f}$

La tension de claquage équivalente à ce champ est calculée par :

$$V_c = E_c r_f \ln \frac{r_c}{r_f} \quad (\text{I.15})$$

I.8. Caractéristique courant/tension de la décharge couronne

La relation entre la tension appliquée 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 :

$$I = C^{st} \cdot V \cdot (V - V_s) \quad (\text{I.16})$$

Où C^{st} est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la température, de la pression atmosphérique et de la composition du gaz. D'après Townsend, pour une géométrie fil-cylindre, la constante C^{st} est donnée par la relation suivante :

$$C^{st} = \frac{8\pi\mu_{ion}\epsilon_0}{r_c^2 \ln \frac{r_c}{r_f}} \quad (\text{I.17})$$

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.9. 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.9.1. Facteurs géométriques

I.9.2.1. 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.9.2.2. Distance inter-électrodes

La figure I.7 illustre l'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge couronne [3].

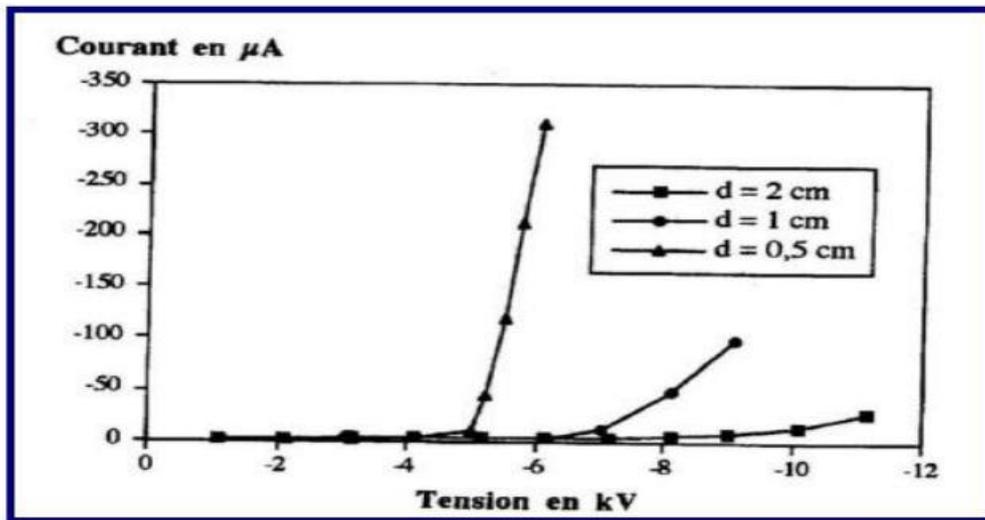


Figure I.7: Effet de la distance inter-électrode sur les paramètres de la décharge couronne. [3]

D'après cette figure, le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites [3].

I.9.2. Facteurs physiques

Ces facteurs se résument en la nature du gaz, sa pression, son humidité et sa température. Alités sur la décharge couronne [10].

I.9.2.1. 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 [10].

I.9.2.2. 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.9.2.3. 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 [10].

I.9.2.4. 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.9.3 Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative. Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [4].

I.10 Applications de la décharge couronne

I.10.1 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].

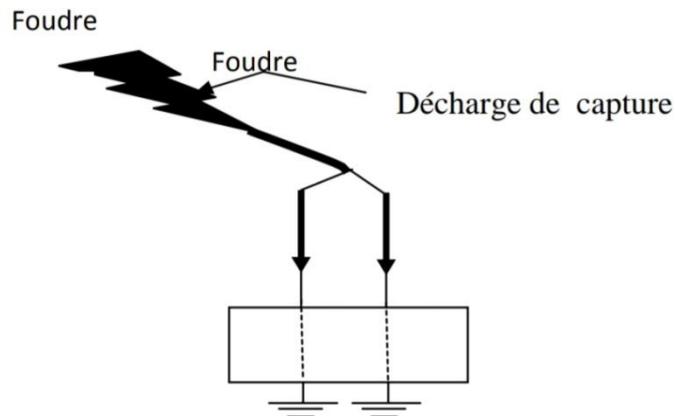


Figure I.8: Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre [4]

I.10.2 Neutralisation :

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques[5].

I.10.3 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.9**) [6].

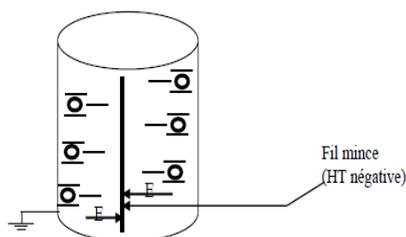


Figure I.9: Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique[6]

I.10.4 Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces

particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (**Figure I.10**) [8].

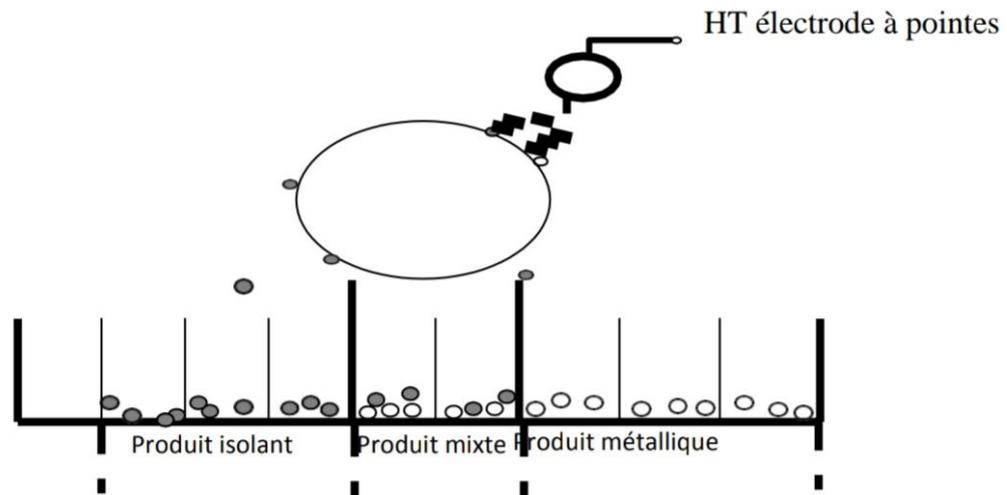


Figure I.10 : Utilisation de la décharge couronne la séparation Electrostatique [4]

Les décharges de corona 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]

I.12. Problèmes liés à la décharge couronnes:

L'un des problèmes rencontrés dans les lignes de transmission d'électricité à haute tension est celui de la perte de puissance électrique à cause de l'effet couronne **Figure (I.11)**. Ces pertes sont négligeables par beau temps mais deviennent importantes par temps de pluie. En effet les gouttes d'eau sur les fils conducteurs s'allongent sous l'action du champ électrique et donnent un effet de pointe très intense déclenchant un effet couronne et les pertes sont multipliées par 100 au début d'une pluie. Quand le fil est mouillé, il n'y plus formation de gouttes et les pertes diminuent.

Un fil gras favorise la formation des gouttes, donc les pertes par effet couronne, tandis qu'un fil propre les réduit. Les pertes peuvent atteindre 100 kW par km de ligne [4].

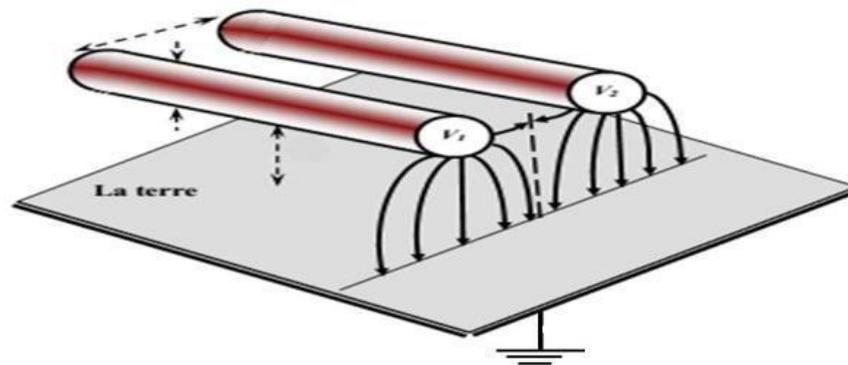


Figure I.11: Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission [4].

Le facteur essentiel pour contrôler l'apparition de décharges couronne est le diamètre des fils. On est limité dans l'augmentation du diamètre par la rigidité mécanique qui en résulte. On peut cependant réduire le champ et diminuer les pertes en prenant deux ou plusieurs conducteurs en parallèle. Remarquons que, à la limite, un grand nombre de conducteurs en parallèle seraient équivalents à un conducteur unique de grand diamètre. L'effet couronne joue un rôle important dans l'amortissement des surtensions sur les lignes et constitue à ce titre une protection non négligeable des lignes et des installations électriques à très haute tension.

Le phénomène de décharge couronne n'est pas un phénomène simple ; il dépend de la géométrie des électrodes, de leur distance, de la nature et de la pression du gaz, de la tension appliquée, etc... nous allons définir un modèle mathématique et développer une technique numérique car il n'y a pas de solution analytique pour cette configuration d'électrodes. Pour développer un modèle numérique, il faut toujours commencer par la formulation mathématique du phénomène physique.

Comme on peut citer d'autres problèmes liés à la décharge couronnes :

1. Produire des bruits acoustiques directement rayonnés par les conducteurs, clairement Audibles.
2. Perturber certaines fréquences (radio et télévisuelles, avec des perturbations qui ne doivent Pas être confondues avec une autre forme de perturbation des images de télévision...etc).

3. Une perte de puissance et une usure accélérée de certains composants de la ligne (conducteurs, pinces d'ancrages, supports, chaînes d'isolateurs). La vibration du câble associée à l'effet couronne ne dépasse pas, en général une dizaine de centimètres et la fréquence naturelle de la portée mais peut conduire à la fatigue des conducteurs et leurs éléments de support.

4. Produire des vibrations (« le galop des lignes électriques »), qui vont ajouter leurs effets à ceux des vibrations des câbles aériens et accélérer le vieillissement des câbles, plus la surface d'un conducteur est dégradée, plus l'effet couronne sera important et plus le champ perturbateur sera élevé. Ces 3 phénomènes apparaissent notamment sous la pluie ou par temps très humide « s'émettent à vibrer à la fréquence naturelle du conducteur, par faible vent sur les lignes à haute tension lorsque des gouttes d'eau sont suspendues sous les conducteurs en condition de pluie, de neige ou de brouillard intense » Ou de présence de gouttes d'eau suspendues sur le dessous d'un câble; « la présence intermittente de la charge d'espace et du vent ionique situé à proximité immédiat des gouttes d'eau suspendues au conducteur sont les causes principales de ce phénomène ». L'ampleur et la localisation vont dépendre de plusieurs paramètres valeur et polarité du champ électrique à la surface du conducteur, intensité des précipitations, vitesse du vent transversal, température.

5. Une pollution de l'air qui pourrait avoir localement un impact sur la santé d'animaux ou d'êtres humains à proximité des lignes de transport (l'ozone troposphérique est un polluant mais aussi un précurseur de plusieurs autres polluants de l'air) [4].

I.13. Réduction de l'effet couronne dans les postes électriques :

Dans les postes électriques haute tension, les considérations précédentes restent valables.

L'aspect de perturbations sur les fréquences radio devient critique, en raison de la présence d'équipements électriques sensibles. Les appareils HTB (sectionneur, Disjoncteur à haute tension, parafoudre,...) doivent être conçus et testés pour limiter ces perturbations radioélectriques liées à l'effet couronne [9].

I.14. Conclusion

La décharge couronne regroupe l'ensemble des phénomènes électriques qui se développent dans des intervalles gazeux, soumis à des champs fortement non uniformes obtenus par une configuration asymétrique des électrodes. L'une présentant un rayon de courbure très faible dite électrode active par opposition à l'autre appelée électrode passive.

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.

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

La simplicité de mise en oeuvre, a fait de la configuration "fil-cylindre" une des configurations les plus utilisées dans les laboratoires de recherche pour produire une décharge couronne. Nos essais sont réalisés sur deux systèmes d'électrodes de ce type de configuration.

Dans le premier système de décharge l'électrode passive est un tube en cuivre de 4 cm de diamètre et 30cm de longueur relié à la masse, alors que l'électrode active est un fil en cuivre de 29 cm de longueur et 0,2 mm de diamètre placé au centre du cylindre.

Dans le deuxième système de décharge l'électrode passive est un tube en cuivre de 4 cm de diamètre et 27,5 cm de longueur relié à la masse, alors que l'électrode active est un fil en cuivre de 26,5 cm de longueur et 0,2 mm de diamètre placé au centre du cylindre.



Figure II.2: Système de la décharge couronne en configuration fil-cylindre

II.2.3 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 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 cylindre de collecte est relié à la masse à travers un multimètre numérique Figure II.3.



Figure II.3: Multimètre numérique 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 un électromètre Keithly 6514, doté d'unseau 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.4).



Figure II.4: 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.5: Photographie de la balance.

II.2.3.4 Mesure de la température et de l'humidité relative

L'instrument utilisé avant chaque série d'expériences pour la mesure de la température et de l'humidité relative est un Hygromètre (**Figure II.6**).



Figure II.6: photographie de l'hygromètre numérique.

II.2.3.5 Appareils d'affichage et d'acquisition

Pour afficher et acquérir les résultats de mesures, on a utilisé l'oscilloscope GWINSTEK GDS-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 quasisphérique, avec une taille typique autour de 3 mm.



Figure II. 8: Photographie de matériau granulaire de polyéthylène.

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 [12].

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)	1014-1018
masse volumique moyenne kgm⁻³	946- 960
Résistance de rupture diélectrique (kV/mm)	200
Température de fusion (°C)	130
Température maximum d'utilisation T_{max} (°C)	60

II.3. Essai de caractérisation électrique de la décharge couronne

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.

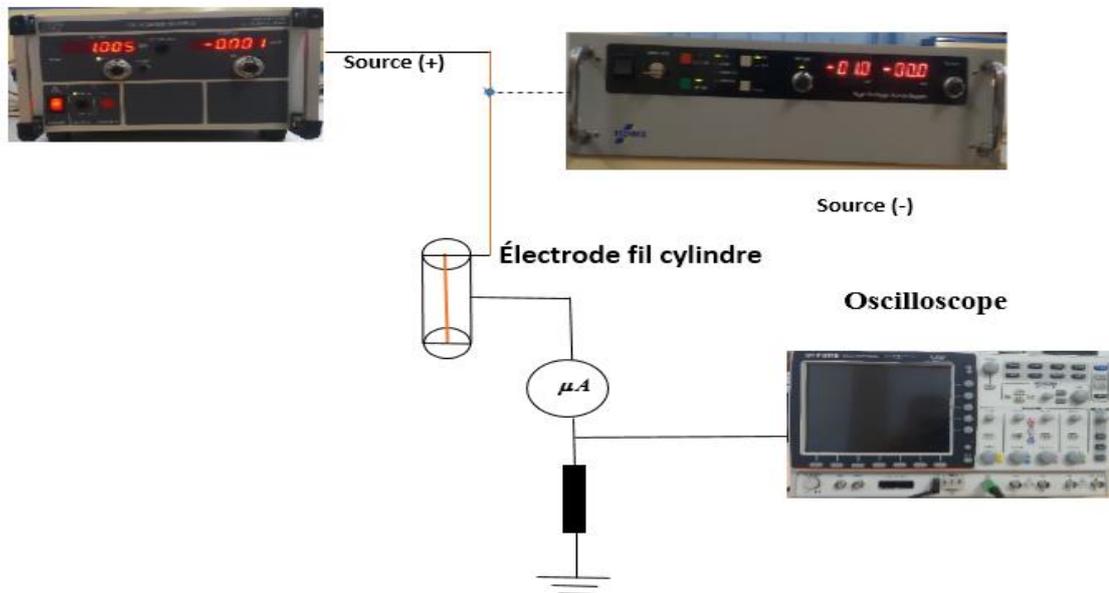


Figure II.9: Installation expérimentale pour la caractérisation du système fil-cylindre

II.4 Essai de chargement des particules PE

II.4.1 Installation expérimentale

Le schéma de l’installation expérimentale est donné à la figure 10, elle est essentiellement formée de deux poste : 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 ;
- La source positive est un modèle Fug Modèle HCP 140-12500, 0-12,5 kV;

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

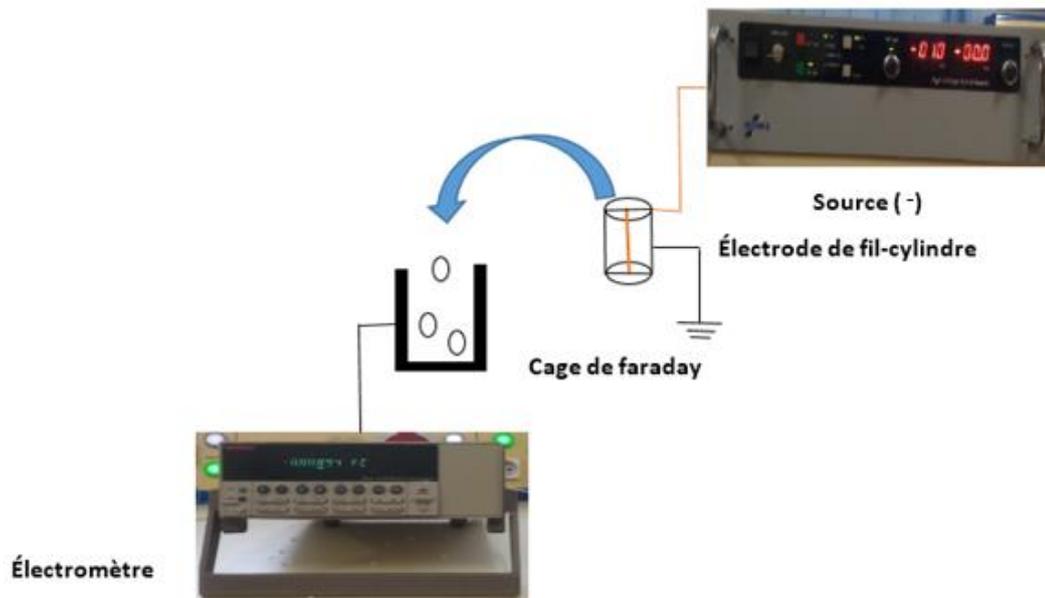


Figure II.10: Installation expérimentale pour mesure la charge

II.5 Essais de neutralisation des charges électriques par décharge couronne

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.

II.5.1 Installation expérimentale

Le schéma de l'installation expérimentale est donné à la figure II.11, 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 fil-cylindre ;
- 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'un seau de Faraday.

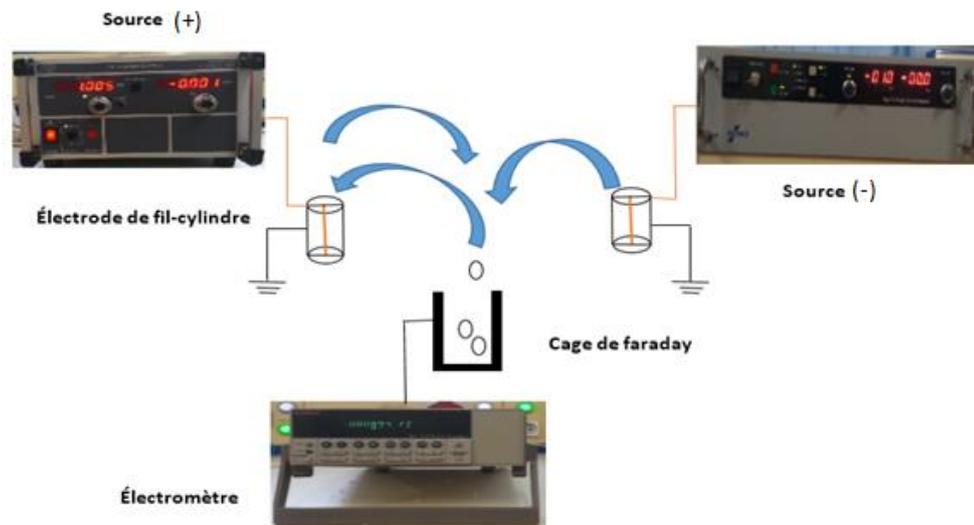


Figure II.11 : Installation expérimentale de neutralisation

II.5.2 Description de la démarche expérimentale

Après leurs chargement au poste de chargement, les échantillons PE de 10g 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.6 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 qui est une suite de programmes pour résoudre des problèmes électromagnétiques à basse fréquence sur des domaines plans 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 ».

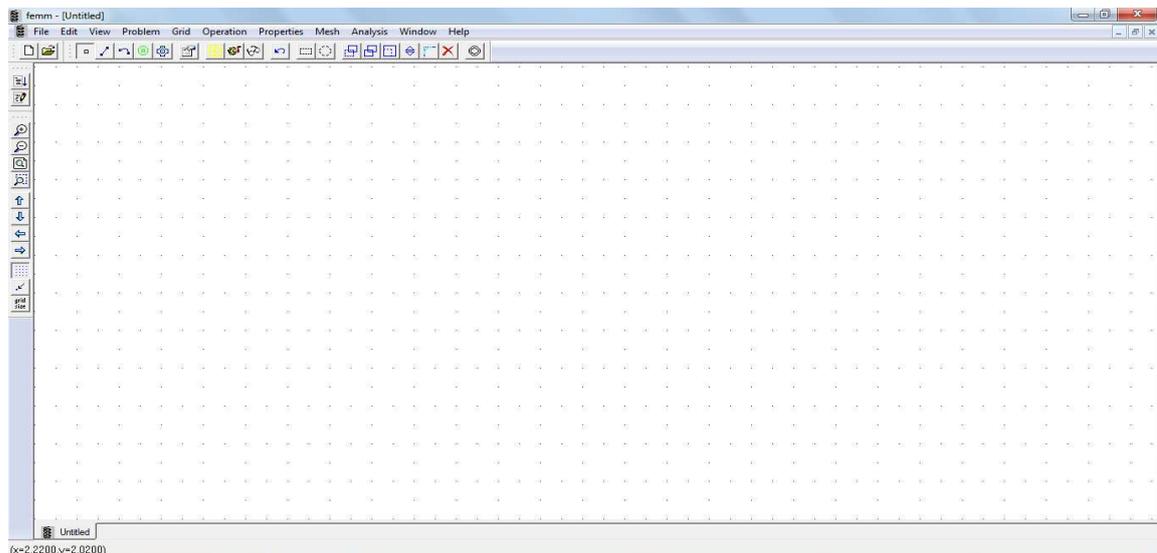


Figure II. 12: Logiciel gratuit FEMM

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.13.

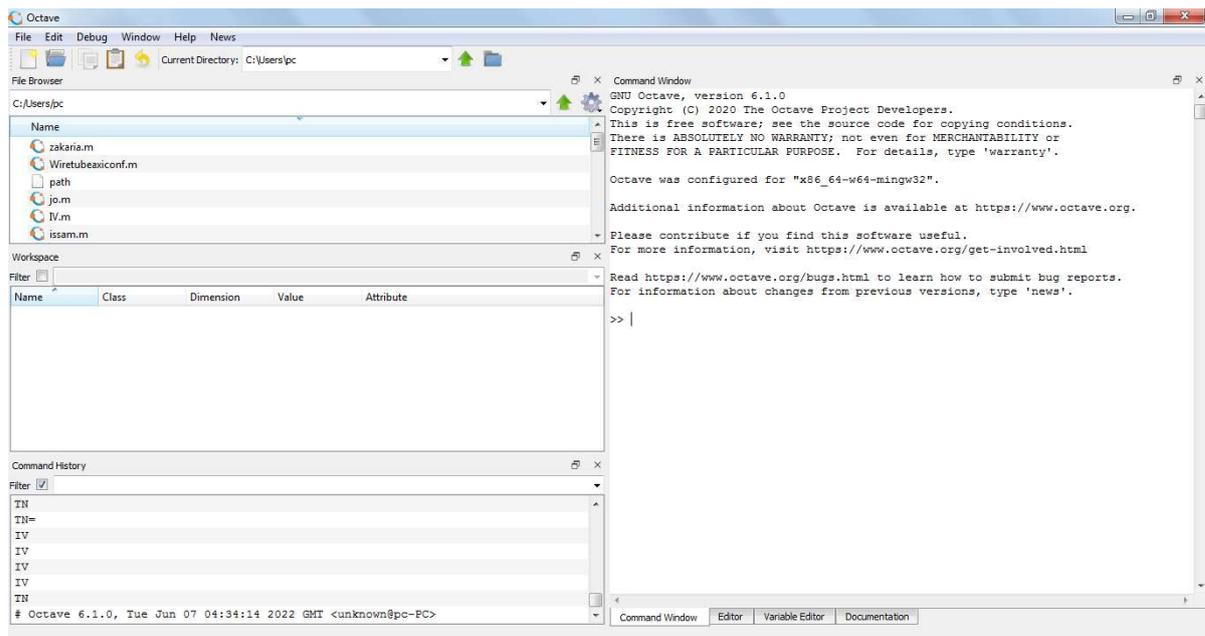


Figure II.13 : Logiciel Octave

Des programmes Octave sont élaborés pour la création des modèles de simulation des systèmes d'électrodes en configurations fil-cylindre sur FEMM.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les installations et les équipements nécessaires utilisés lors 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 décrites au chapitre II.

III.2. Résultats de simulation

III.2.1. Distribution du champ et du potentiel dans l'espace inter-électrodes

L'exécution des programmes Octave permis à la fois la construction et l'analyse de la géométrie fil-Cylindre. Le modèle obtenu et les résultats d'analyse sont donnés aux figures : Figure III.1, Figure III.2, Figure III.3, et Figure III.4.

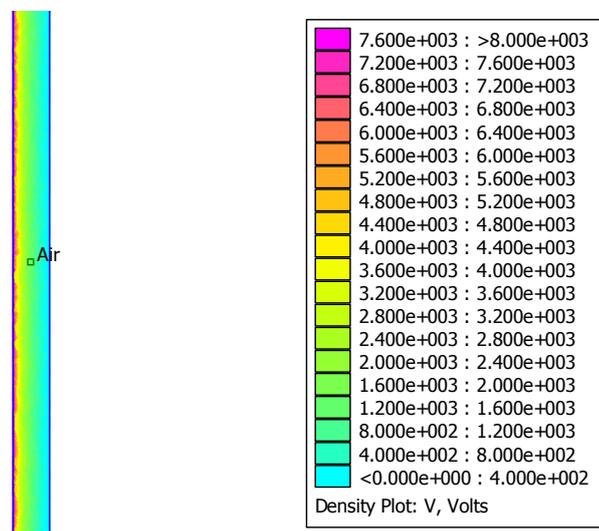


Figure III.1 : Distribution spatiale du potentiel électrique.

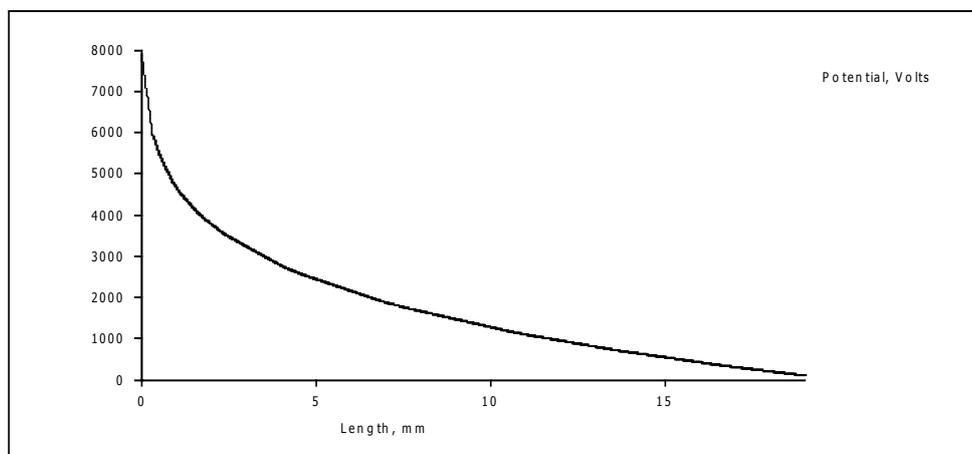


Figure III.2 : Distribution du potentiel électrique.

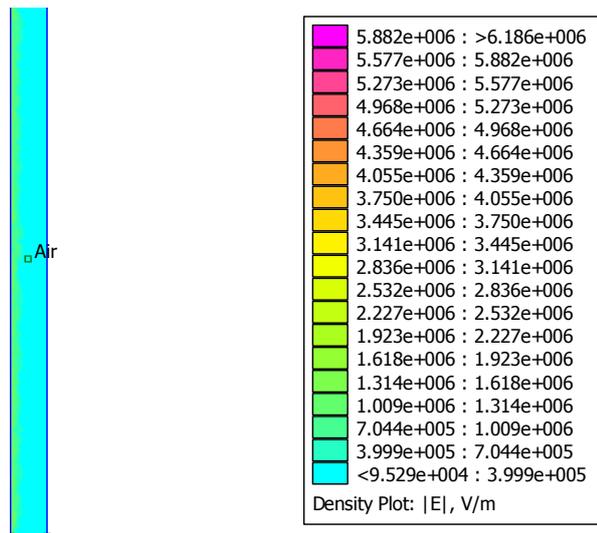


Figure III.3 : Distribution spatiale du champ électrique.

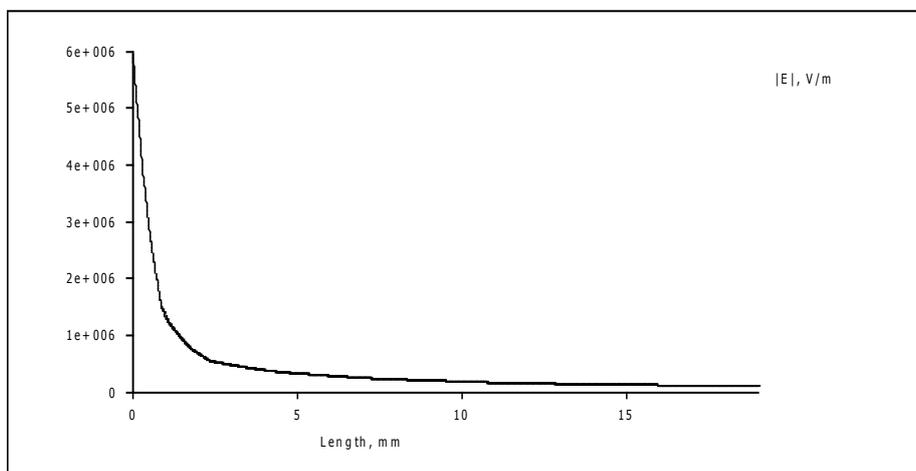


Figure III.4 : Distribution du champ électrique pour la géométrie Fil-Cylindre sans granule.

Les figures III.1 et III.2 montrent que le potentiel électrique est maximal sur l'électrode active (fil au centre du cylindre), puis il décroît rapidement pour atteindre une valeur nulle sur l'électrode passive (cylindre).

Les figures III.3 et III.4 montrent que le champ électrique est le plus élevé au niveau du fil au centre du cylindre (électrode active), puis décroît rapidement pour prendre la valeur la plus faible près du cylindre (électrode passive).

III.2.2. Distribution du champ et du potentiel dans l'espace inter-électrodes en présence d'une particule diélectrique chargée

Les résultats de simulation donnés aux figures : Figure III.1, Figure III.2, Figure III.3, et Figure III.4 montrent l'effet de présence d'une particule diélectrique chargée ($Q_p = -0.1$ nC) dans l'espace inter-électrode sur le champ et le potentiel.

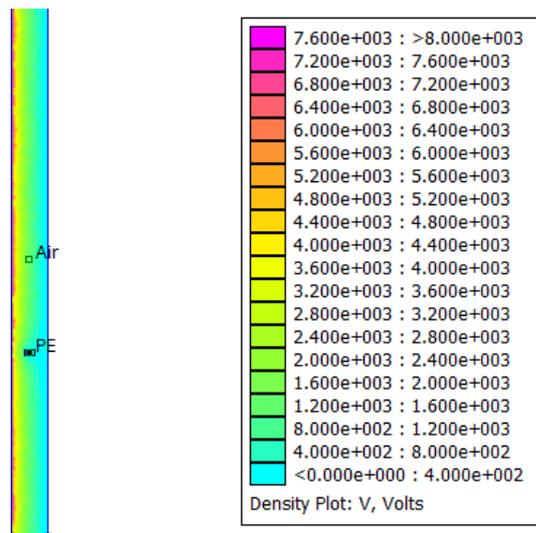


Figure III.5 : Distribution spatiale du potentiel électrique en présence d'une particule diélectrique

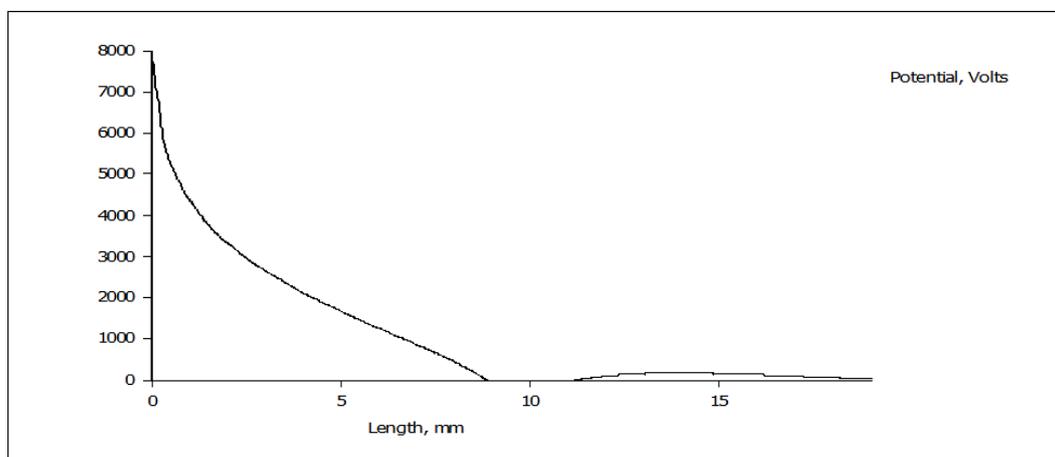


Figure III.6 : Distribution du potentiel électrique en présence d'une particule diélectrique.

Les figures III.5 et III.6 montrent que le potentiel électrique est maximum au niveau du fil (électrode active), puis il décroît rapidement pour s'annuler à la surface de la particule. Après la particule, il augmente sensiblement puis diminue rapidement jusqu'à ce qu'il devienne nul sur le cylindre (électrode passive).

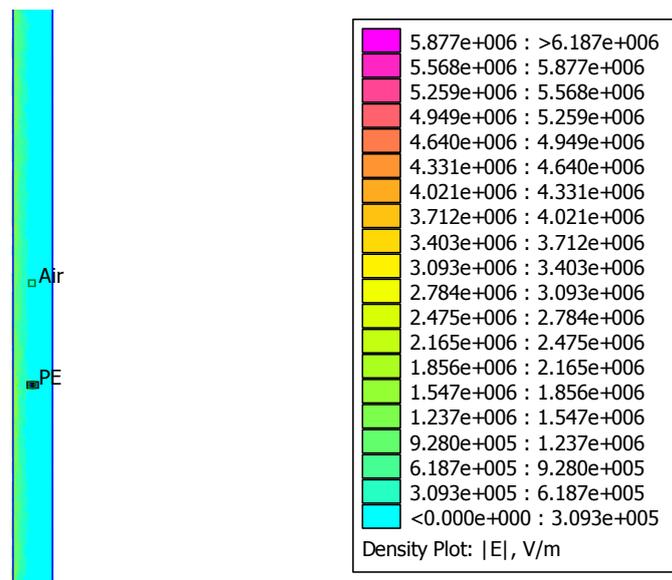


Figure III.7 : Distribution spatiale du champ électrique en présence d'une particule diélectrique

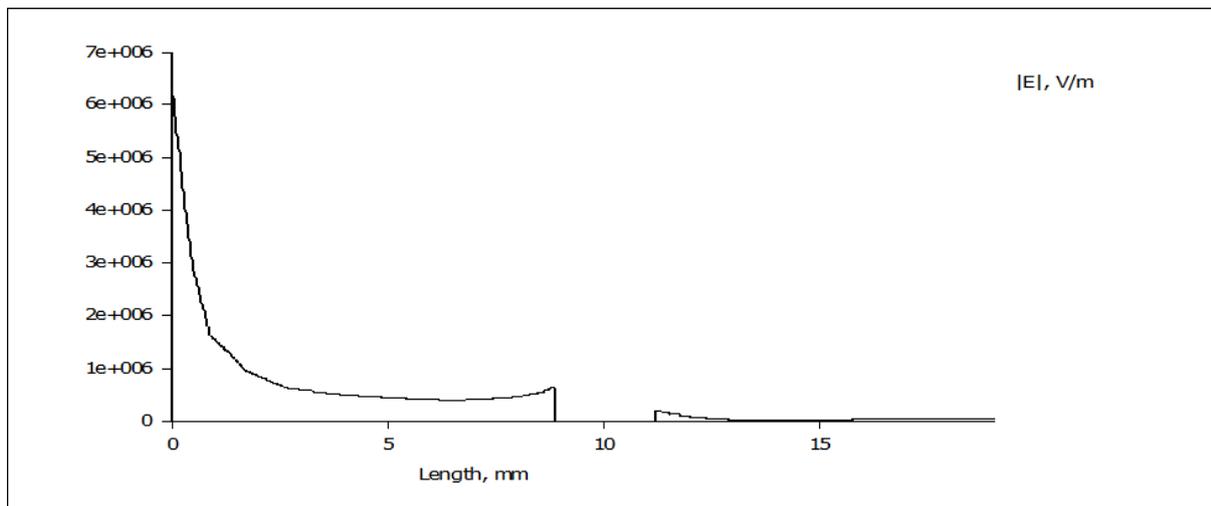


Figure III.8 : Distribution du champ électrique pour la géométrie Fil-Cylindre avec granule

Les figures III.5 et III.6 montrent que la présence de la particule à l'intérieur du cylindre a altéré la distribution du champ près de la particule. L'amplitude du champ près de la particule a augmentée du côté l'électrode active.

III.3 Résultats expérimentaux

Le but de cette étude est de mieux comprendre l'influence de la tension sur le comportement de la décharge couronne pour une configuration 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.

Une étude de l'influence de la tension sur la charge et la neutralisation des particules de polyéthylène est aussi faite. A ce but on a mesuré la charge des échantillons de PE à la sortie des systèmes de décharge couronne. Les valeurs tracées correspondent à la valeur moyenne d'au minimum deux à trois mesures consécutifs.

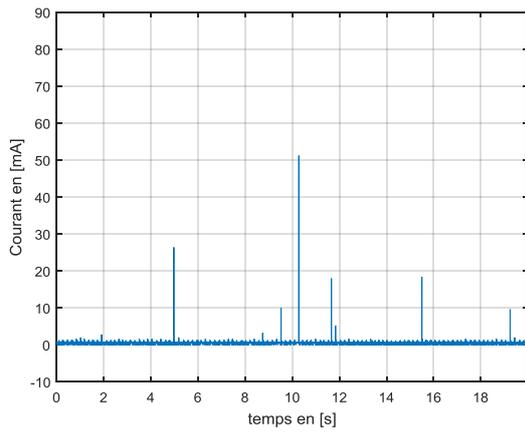
III.3.1 Formes d'onde de courants de la décharge couronne

Un enregistrement de 20 ms du courant de décharge couronne négative pour différentes valeurs de la tension est donné à la figure III.9.

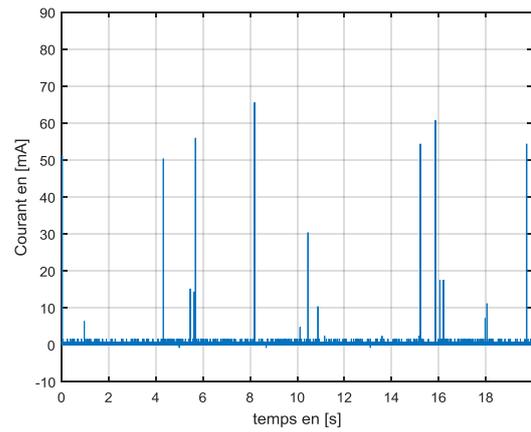
On constate qu'on a un régime impulsionnel dont la durée des cycles n'est pas identique, nous parlons de cycles asymétriques. L'augmentation de la tension appliquée, provoque une augmentation de la fréquence de répétition des impulsions des courants de décharge.

Sur la figure III.10 sont représentés les formes d'onde du courant instantané lors de la décharge couronne négative en configuration fil-cylindre 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.

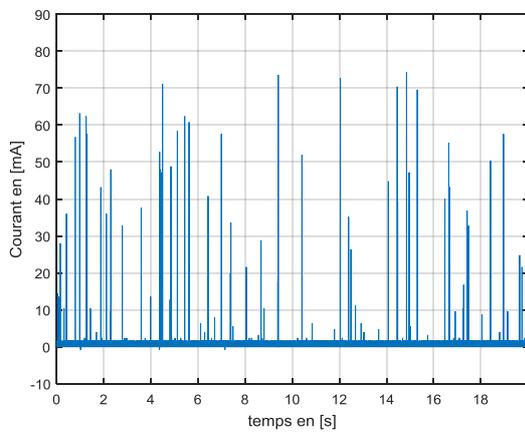
La valeur maximale du courant de décharge dans le régime de décharge est autour du 75 mA avec une durée de 2ms.



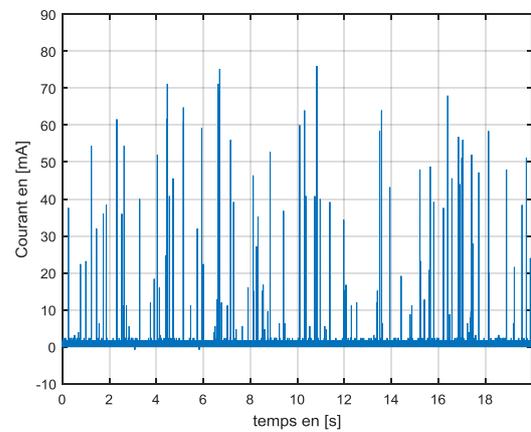
Tension : -7,0 KV



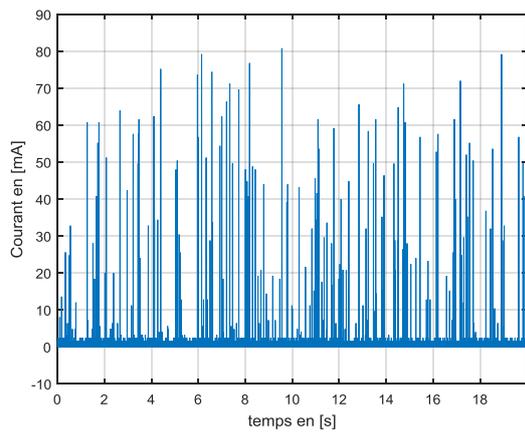
Tension : -7,5 KV



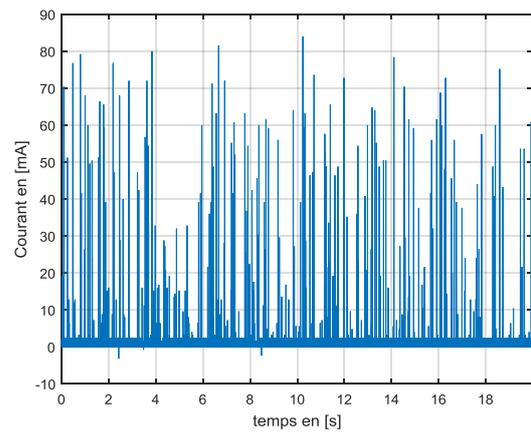
Tension : -8,0 KV



Tension : -8,5 KV

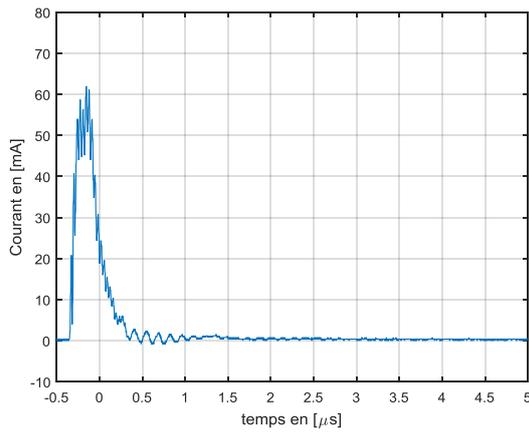


Tension continue : -9,0 KV

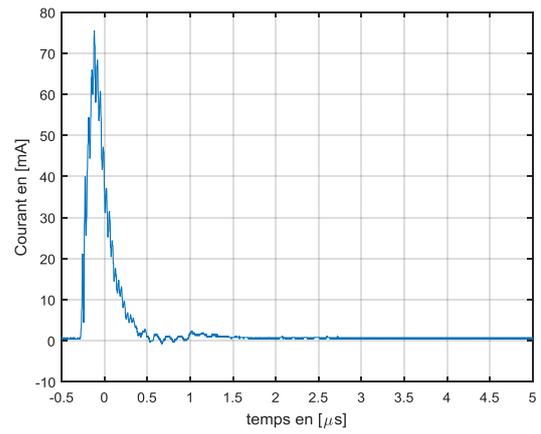


Tension continue : -9,5 KV

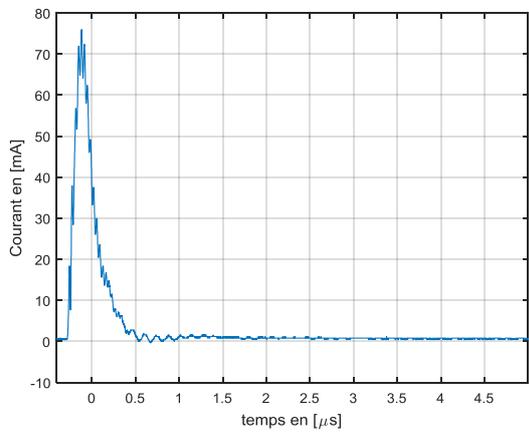
Figure III.9 : Enregistrement du courant instantané pour une décharge couronne négative.



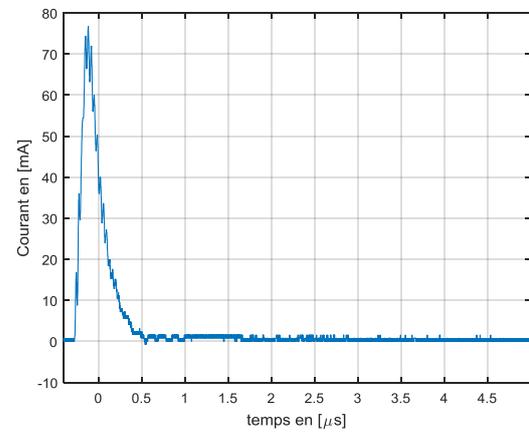
Tension : -7 KV



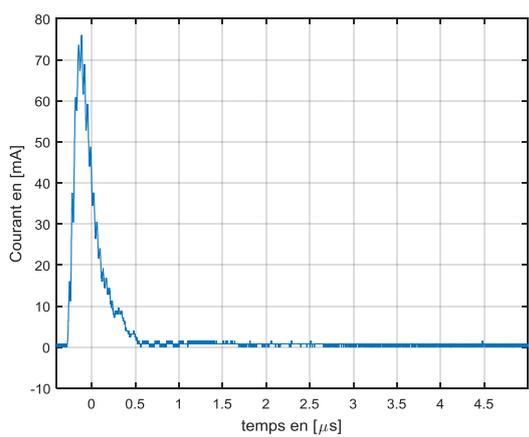
Tension : -7,5 KV



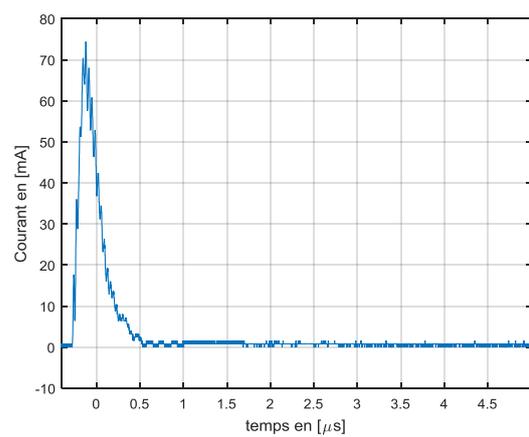
Tension : -8,0KV



Tension : -8,5 KV



Tension continue : -9,0 KV



Tension continue : -9,5 KV

Figure III.10: Impulsions du courant pour une décharge couronne négative.

La forme d'onde du courant peut être divisée en trois phases principales :

- La première phase : correspond à l'augmentation brusque du courant et très rapide
- Une seconde plus progressive et avec une pente d'évolution plus faible que celle de la première phase et qui s'étalant sur une centaine de nanosecondes.
- Une troisième qui correspond à la chute de la valeur du courant de décharge et ce qu'on appelle aussi la phase de relaxation du gaz.

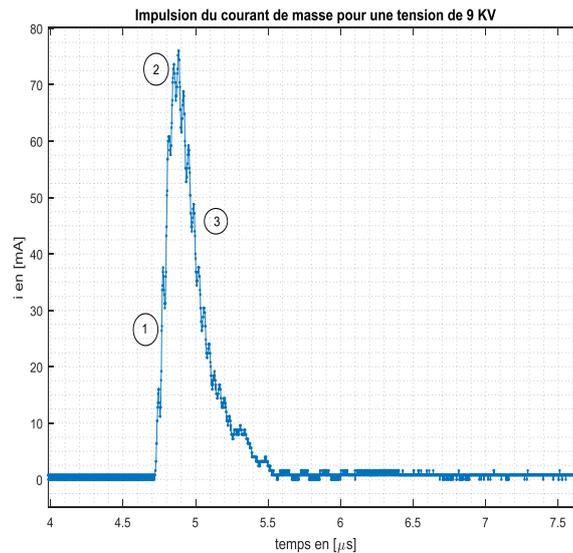


Figure III.11: Impulsion du courant de masse pour une tension de 9 kV

III.3.2 Caractéristique I-V

La figure III.12 représente la caractéristique I-V des décharges couronnes négative et positive. Évidemment pour les deux cas, le courant de décharge augmente progressivement avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse une certaine valeur V_0 jusqu'au claquage. Le courant de décharge moyen I est une fonction non linéaire de la tension appliquée V . De plus, le courant de décharge est plus élevé à polarité négative pour une tension donnée.

Sur la figure III.13 on a représenté la caractéristique I-V calculée selon l'organigramme de l'annexe 1 et celle expérimentale. Un accord satisfaisant entre les valeurs mesurées et calculées apparaît sur ces figures confirmant les expressions utilisées.

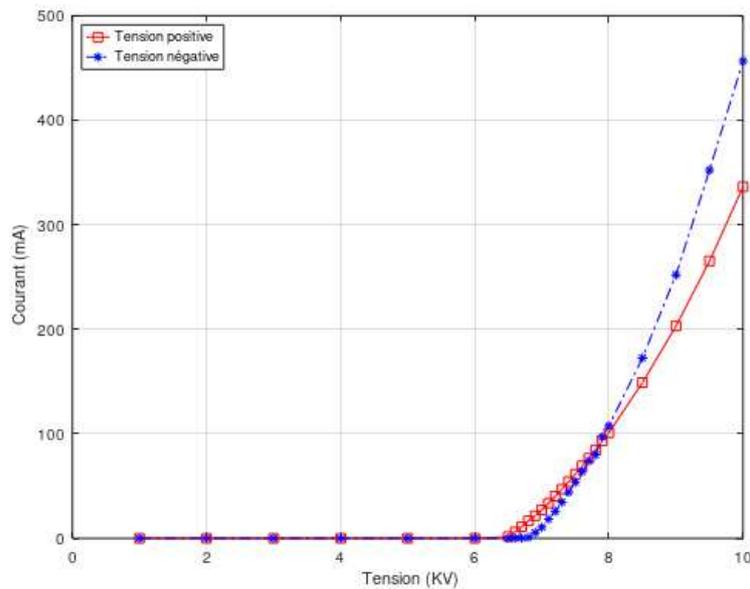


Figure III.12 : caractéristique I-V des décharges couronnes négative et positive.

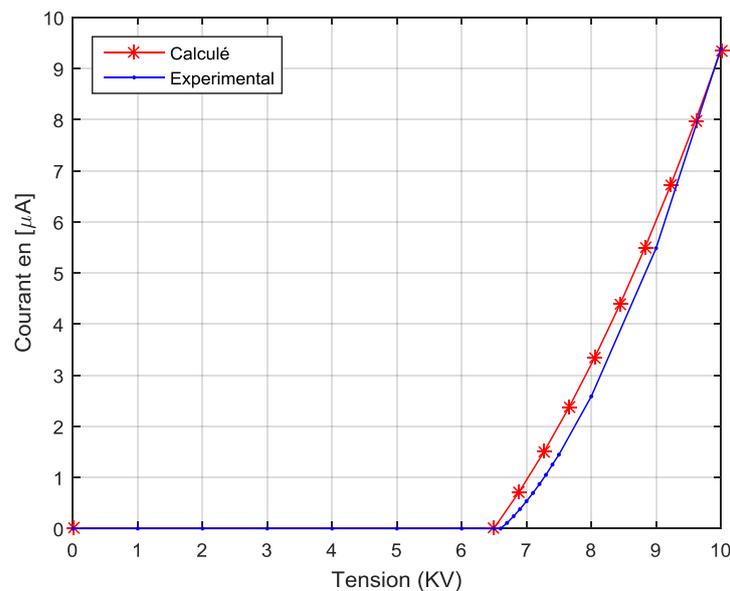


Figure III.13 : Caractéristiques I-V calculée et expérimentale.

III.3.3 Caractéristique de charge des particules de Polyéthylène (PE)

La figure III.14 représente la variation de la charge totale acquise par deux échantillons de 5g et 10g d'un matériau granulaire isolant, le Polyéthylène (PE), après passage dans le système de décharges couronne en configuration fil-cylindre. On constate que les particules commencent à se charger à partir d'une tension a peu près supérieure à 6 KV. La charge acquises par l'échantillon 10g est nettement supérieure à celle acquise par l'échantillon 5g. L'écart entre les deux charges augmente au fur et à mesure que la tension augmente.

La figure III.15 représente la variation du rapport charge/masse des particules de polyéthylène (PE) en fonction de la tension appliquée à l'électrode active. On constate que pour une tension donnée, le rapport charge/masse pour l'échantillon 5g est sensiblement plus grand que celui pour l'échantillon 10g. Pour une tension de 10 KV, le polyéthylène granule possède un rapport charge/masse à peu près égale à 9 [nC/g]

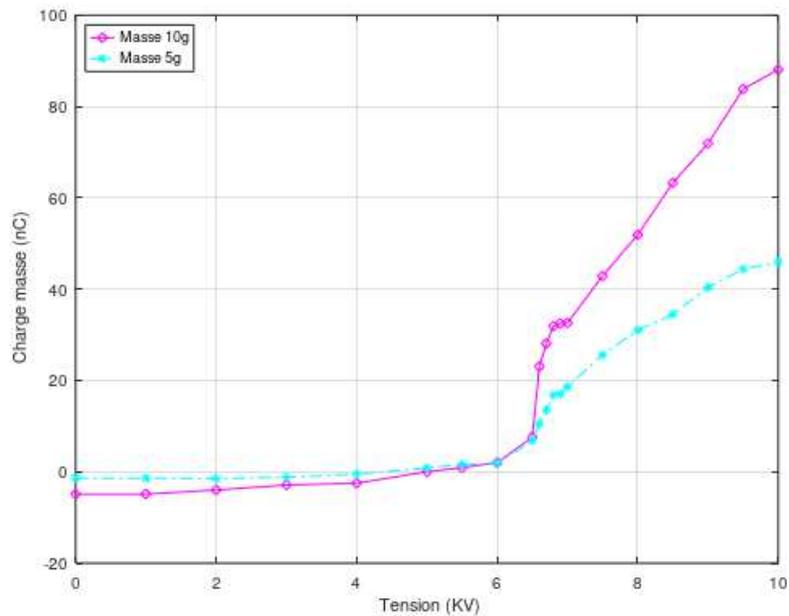


Figure III.14: Charge des particules PE pour deux échantillons de 5 g et 10 g.

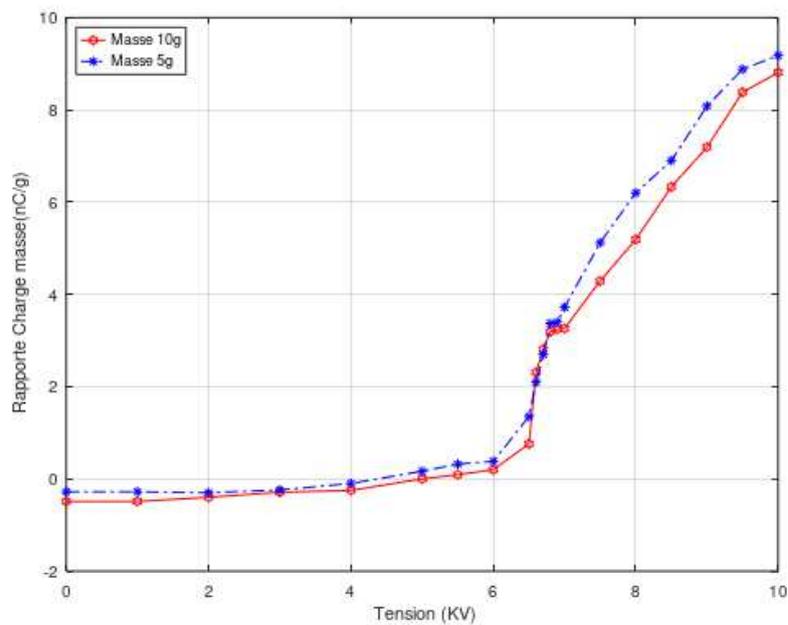


Figure III.15 : Rapport charge/masse

III.3.4 Neutralisation des particules PE

La figure III.16 illustre l'influence de la tension de neutralisation appliquée à l'électrode active sur la charge finale d'un échantillon de 10g de particules PE initialement chargé à une valeur a peu près égale à -50 nC à l'aide d'un premier système de décharge couronne négative.

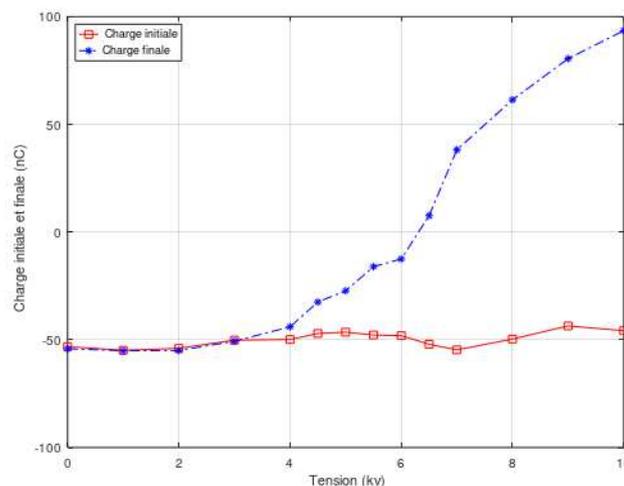
Après leur passage à travers un deuxième système de neutralisation (système de décharge couronne positive) la charge moyenne des particules diminue avec l'augmentation de la tension appliquée pour s'annuler à une tension comprise entre 6 kV et 6.5 kV. Au delà de cette tension les particules commence à se chargé en polarité inverse.

La courbe de la figure III.17 montre l'influence de la charge initiale des particules PE sur leur charge finale après passage dans un système de décharge couronne positive pour une tension de 10 KV. On constate que les particules sont presque toujours chargées à la même valeur. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'ils ont atteint l'état de saturation.

La figure III.18 représente la variation du tau de neutralisation de la charge avec la tension appliqué au fil. Ce tau est quantifié par calcul du rapport de la charge juste avant et juste après la neutralisation avec la formule:

$$N_r (\%) = \left[1 - \frac{Q_{\text{après}}}{Q_{\text{avant}}} \right] \cdot 100 \quad \text{III.1}$$

On constate que le tau de neutralisation s'améliore de plus en plus avec l'augmentation de la tension de neutralisation jusqu'à atteindre une valeur supérieure à 85 % entre 6.5 et 6.7 kV, où le matériau est presque totalement neutralisé. Au delà de cette tension il se détériore puisque les particules commence à se chargé en polarité inverse.



La figure III.16 Caractéristique de neutralisation

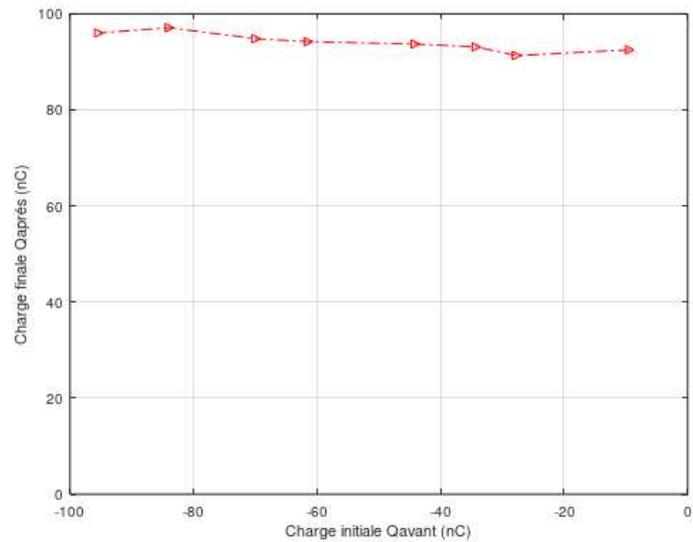


Figure III.17: Effet de la charge initiale des particules diélectriques sur leur charge finale

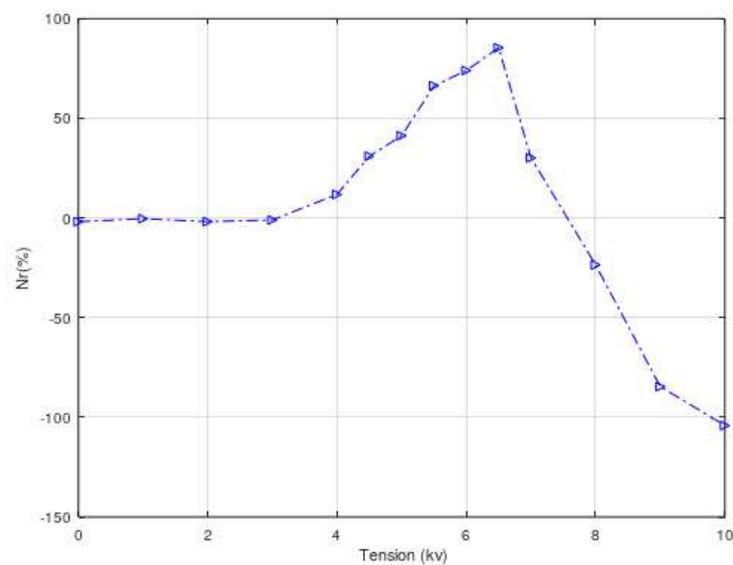


Figure III.18 : Variation du taux de neutralisation avec la tension de neutralisation.

III.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats expérimentaux et de simulation obtenus et leurs interprétations. La caractéristique courant-tension, la forme d'onde du courant de décharge et les caractéristiques de charge et de neutralisation d'un matériau diélectrique granulaire ont été étudiées.

Conclusion générale

Le présent mémoire avait pour objectif l'étude de l'influence de la tension appliquée à l'électrode active d'un système de décharge en configuration fil-cylindre sur les processus de décharge et de neutralisation.

Les principaux résultats sont les suivants:

- Le régime de décharge couronne est impulsionnel de cycles asymétriques et d'amplitudes non identiques.
- L'augmentation de la tension appliquée à l'électrode active provoque une augmentation de la fréquence de répétition des impulsions des courants de décharge ainsi que la valeur du courant moyen et de l'amplitude maximale des impulsions.
- Les impulsions gardent une même largeur de $2\mu\text{s}$ pour les différentes tensions appliquées.
- Le passage des particules chargées à travers le cylindre siège d'une décharge couronne peut donner de très bons résultats quant à la neutralisation de la charge. En effet, des taux de neutralisation dépassant les 85% ont été atteints. Le rôle de la tension est primordiale : plus la tension augmente plus la neutralisation s'améliore jusqu'à un optimum après quoi le matériau commence à se recharger dans le sens opposé. Une tension optimale doit être appliquée afin d'aboutir à de meilleurs résultats.

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

- [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, Octobre2021.
- [5] MEKKIOUI Djaoued, Etude de l'évolution des espèces présentes dans un gaz pur o2 par décharge couronne, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 24 Juin 2018.
- [6] MIHOUBI Soumia et KERDOUSSI Hakima, Déchargecouronne en configuration coaxiale : application à la neutralisation des charges, Mémoire de Master, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019/2020.
- [7] BENCHERIF Nabile 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] HADJADJ L et SMAILI S, effet d'une couche isolante sur la décharge couronne en alternatif et en, Mémoire D'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2007-2008.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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, 28/6/2016.
- [13] 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.

[14] F.W PEEK JR, Dielectric Phenomena In High Voltage Engineering, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, second edition, 1920

[15] J.S. TOWNSEND, Electricity in Gases, Oxford University Press, UK, 1915.

[16] PLEWA Joseph-Marie, Simulation 3D d'une décharge couronne pointe-plan dans l'air: calcul haute performance, algorithmes de résolution de l'équation de poisson et analyses physiques, Thèse doctorat, université de Toulouse, France, 2017.

Annexe 1

Organigramme de calcul et de traçage de la caractéristique I/V

