

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira –Bejaia-

Département électrotechnique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Mr. Medjdoub bachir

Mr. Aissou youcef

**En vue d'obtention du diplôme de Master en Génie Électrique
Option: électrotechnique industrielle**

Thème :

Décharge couronne fil –plan en polarité positive

Composition des membres du jury :

Mr. Yahiaoui belkacem

Promoteur

Mlle. N. Rouha

Examinatrice

Mlle. Balhoul. T

Examinatrice

Octobre 2021

Remerciement

A l'issu de notre cursus universitaire :

Le grand remerciement s'adresse au bon Dieu qui nous

A aidés à réaliser ce projet.

Nous remercions chaleureusement nos familles pour

Leurs encouragements et soutien durant toute

Notre carrière d'étude.

Nous remercions notre promoteur Mr.Yahiaoui belkacem

D'avoir accepté de nous encadrer.

Nous tenons à remercier également les membres de jury

D'avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

Liste des abréviations et des symboles

Liste des abréviations et des symboles

α : Coefficient effectif d'ionisation.

γ : Deuxième coefficient de Townsend.

δ : Densité du gaz inter-électrodes.

η : Coefficient d'attachement.

$\Delta\Theta$: Espacement angulaire entre deux lignes de champ.

Δ^e : Aire de l'élément fini triangulaire.

μ : Mobilité ionique.

ω : Pulsation d'un signal sinusoïdale.

ε : Permittivité de la particule de poussière.

ε_0 : Permittivité du vide ($8,85 \times 10^{-12} \text{F/m}$).

ρ : Densité de charge.

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

\emptyset : Diamètre du fil.

Φ_s : Flux du vecteur D à travers la sonde.

ϕ_{s0} : Flux du champ électrique a mesuré.

ϕ_{s1} : Contribution du champ de polarisation.

Ω : Domaine d'étude générale.

Ω_i : Sous domaine.

A, B : Constantes.

a^e, b^e, c^e : Coefficients constants.

C : capacité d'un condensateur.

C_0 : Capacité du condensateur constitué par la sonde (S) et l'électrode (E).

D : Coefficient de diffusion ionique.

e : Indice de l'élément fini.

E : Intensité du champ électrique.

Liste des abréviations et des symboles

E_p : Champ électrique critique de la charge d'espace.

E_c : Champ critique du minimum d'ionisation.

E_s : Champ seuil d'apparition de l'effet couronne.

g : Intervalle d'air entre le collecteur et les plaques de polarisations de la sonde.

HT : haute tension.

h : Intervalle électrodes-plan (configuration fil-plan).

I : Courant de décharge collecté par le plan de mesure.

I_0 : Courant généré par radiation ultraviolet de la cathode.

I_S : Courant de décharge collecté par la sonde lorsqu'elle est polarisée.

I_{S0} : Valeur du courant I_S lorsque la sonde n'est pas polarisée ($V_b=0$).

J : Intensité de la densité de courant.

K : Constante.

K_h : coefficient de correction pour les conditions normales.

m : Coefficient empirique dépendant de l'état de surface du conducteur actif.

$N_j^e(x,y)$: Fonctions d'interpolations.

P : Pression du gaz inter-électrodes.

R, r : Rayon de l'électrode active.

R : résistance électrique.

R_c : Rayon de la zone d'ionisation.

r_0 : rayon du fil conducteur ou de l'électrode active.

r_e, R_e : Rayons intérieur et extérieur de l'électrode (E).

r_m : rayon moyen.

r_s : Rayon de la sonde circulaire.

S : surface.

S_m : Surface effective du collecteur de la sonde.

S_s : Surface réelle de la sonde circulaire.

t : temps.

Liste des abréviations et des symboles

T : Température du gaz inter-électrodes.

U : Tension appliquée.

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

U_d : tension entre les intervalles d'air.

v : vitesse.

V, V_a : Tension appliquée.

V_b : Tension de polarisation des plaques de la sonde.

V_S : Tension seuil de l'effet couronne.

MEMS : microsystème électromécanique.

DBD : décharge à barrière diélectrique.

(x, y, z) : Coordonnées cartésiennes.

Liste des figures et des tableaux

Chapitre I

Généralités sur les décharges couronnes

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à la pression atmosphérique (configuration pointe-plan) | 7 |
| Figure I.2: Avalanche électronique | 9 |
| Figure I.3 : Descriptif d'un Streamer positif en géométrie pointe-plan | 11 |
| Figure I.4 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive | 12 |
| Figure I.5 : Schématisation d'une décharge couronne continue négative | 13 |
| Figure I.6 : Effet de la distance sur la caractéristique courant-tension en géométrie..... | 14 |
| Figure I.7 : Caractéristique courant-tension selon la nature des Électrodes en géométrie fil-plan | 15 |
| Figure I.8: Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression | 16 |
| Figure I.9: Représentation schématique d'une décharge couronne continue en géométrie fil-plan | 18 |
| Figure I.10: Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre | 19 |
| Figure I.11: Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique..... | 19 |
| Figure I.12: Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique | 20 |
| Figure I.13 : Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission | 21 |

Chapitre II

Modèle mathématique de la décharge couronne

| | |
|---|----|
| Figure II.1: Éléments finis triangulaire..... | 30 |
| Figure II.2 : Maillage du domaine d'étude avec l'outil de maillage de Comsol | 33 |

Chapitre III

Partie expérimental et simulation numérique de la décharge couronne

| | |
|--|----|
| Figure III.1 : Constitution du dispositif expérimental | 36 |
| Figure III.2 : Vue de profil du dispositif..... | 37 |
| Figure III.3 : Vue de face du dispositif..... | 37 |
| Figure III.4 : Système d'électrodes..... | 38 |
| Figure III.5 : Schéma en bloc de la source de haute tension utilisée | 39 |
| Figure III.6 : Schéma électrique de la source de haute tension utilisée (uniquement pour la Tension positive) | 40 |
| Figure III.7 : Équipements de l'installation haute tension utilisée | 40 |
| Figure III.8 : Installation haute tension utilisée du laboratoire de Bejaia | 41 |
| Figure III.9 : Sonde circulaire de Tassicker..... | 43 |
| Figure III.10 : Exemple d'une fenêtre du programme Comsol | 46 |
| Figure III.11 : Caractéristique courant/ tension pour une géométrie fil-plan dans l'air à Lapression atmosphérique pour H=4 cm et H=5 cm pour une tension $V_{app}=26$ kV | 54 |
| Figure III.12 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=4 cm et une tension de $V_{app}=23$ kV | 55 |
| Figure III.13 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=4 cm et une tension de $V_{app}=26$ kV | 56 |
| Figure III.14 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=5 cm et une tension de $V_{app}=23$ kV | 57 |
| Figure III.15 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=5 cm et une tension de $V_{app}=26$ kV | 57 |
| Figure III.16 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=4 cm pour une tension $V_{app}=23$ et 26 kV..... | 58 |
| Figure III.17 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=5 cm pour une tension $V_{app}=23$ et 26 kV..... | 59 |
| Figure III.18 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=4 cm et H=5 cm pour une tension $V_{app}=23$ kV..... | 59 |

Liste des figures et des tableaux

| | |
|---|----|
| Figure III.19 : Distribution du champ sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=4 cm et H=5 cm pour une tension $V_{app}=26$ kV | 60 |
| Figure III.20 : Distribution de la densité de courant J pour la géométrie fil-plan pour H=4 cm et H=5 cm pour une tension $V_{app}=23$ kV | 61 |
| Figure III.21: Distribution de la densité de courant J pour la géométrie fil-plan pour H=4 cm et H=5 cm pour une tension $V_{app}=26$ kV | 62 |
| Figure III.22 : Distribution de la densité de courant sur le plan de mesure pour la géométrie fil-plan pour H=4 cm pour des tensions $V_{app}=23$ et 26 kV | 63 |
| Figure III.23 : Distribution de la densité de courant sur le plan de mesure pour la géométrie fil-plan pour H=5 cm pour des tensions $V_{app}=23$ et 26 kV | 63 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I.1 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique En tension positive et négative | 15 |
| Tableau II.1 : Les différentes géométries d'éléments finis possibles | 29 |

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre 01

ETUDE THEORIQUE DE LA DECHARGE COURONNE

| | |
|--|---|
| I.1 Introduction..... | 3 |
| I.2 Historique..... | 3 |
| I.3 Généralités sur les décharges électriques | 5 |
| I.3.1 Définition d'une décharge couronne..... | 5 |
| I.4 Phénomènes de multiplications électroniques..... | 5 |
| I.4.1 Phénomènes de collision..... | 5 |
| I.4.1.1 Choc élastique..... | 5 |
| I.4.1.2 Choc inélastique..... | 6 |
| I.4.2 Excitation atomique | 6 |
| I.4.3 Ionisation par choc électrique | 6 |
| I.4.4 Photon suffisamment énergétique | 6 |
| I.4.5 Recombinaison et attachement..... | 6 |
| I.4.5.1 Attachement | 6 |
| I.4.5.2 Recombinaison | 6 |
| I.5 Propriétés spécifiques aux décharges couronnes..... | 7 |
| I.5.1 Différents régimes de la décharge (caractéristique : courant-tension)..... | 7 |
| I.5.1.1 Premier régime..... | 7 |
| I.5.1.2 Second régime..... | 7 |
| I.5.1.3 Troisième régime | 7 |
| I.5.1.4 Quatrième régime | 7 |
| I.5.2 Champ électrique et topographie de la décharge..... | 8 |
| I.5.2.1 Géométrie coaxiale | 8 |
| I.5.2.2 Géométrie fil-plan..... | 8 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| I.6 Mécanisme de développement de la décharge couronne | 8 |
| I.6.1 Décharge de Townsend | 9 |
| I.6.1.1 Mécanismes de la décharge de Townsend | 9 |
| I.6.1.2 Critère de claquage de type townsend | 9 |
| I.6.2 Décharge par Streamers | 10 |
| I.7 Différents types de décharge couronne..... | 11 |
| I.7.1 Décharge couronne positive | 11 |
| I.7.2 Décharge couronne négative..... | 12 |
| I.7.3 Décharge couronne en régime alternatif | 13 |
| 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 électrode | 14 |
| I.8.1.3 Nature des électrodes | 15 |
| I.8.2 Facteurs physico-chimiques..... | 15 |
| I.8.2.1 Température | 15 |
| I.8.2.2 Humidité..... | 16 |
| I.8.2.3 Pression..... | 16 |
| I.8.2.4 Densité de l'air | 16 |
| I.8.3 Facteurs électriques | 17 |
| I.9 Phénomènes induits par la décharge couronne..... | 17 |
| I.9.1 Effet électromagnétiques..... | 17 |
| I.9.2 Effet chimique | 17 |
| I.10 Décharge couronne en géométrie fil-plan | 18 |
| I.11 Applications utilisant la décharge couronne..... | 19 |
| I.11.1 Paratonnerre | 19 |

Sommaire

| | | |
|--------|---|----|
| I.11.2 | Neutralisation..... | 19 |
| I.11.3 | Filtre électrostatique | 19 |
| I.11.4 | Séparateur électrostatique | 20 |
| I.12 | Problèmes liés à la décharge couronnes | 21 |
| I.12.1 | Pertes dans les lignes de haute tension | 21 |
| I.13 | Conclusion..... | 23 |

Chapitre 02

Modèle mathématique de la décharge couronne

| | | |
|----------|--|----|
| II.1 | Introduction | 24 |
| II.2 | Travaux Antérieurs | 24 |
| II.3 | Équations de base du modèle mathématique | 25 |
| II.4 | Modèles et approximations..... | 26 |
| II.4.1 | Approximation de Deutsch..... | 26 |
| II.4.2 | Approximation de popkov | 26 |
| II.4.3 | Approximation de kaptzov | 27 |
| II.4.4 | Mobilité ionique | 27 |
| II.5 | Méthodes numérique de résolutions | 27 |
| II.5.1 | Méthode des éléments finis | 28 |
| II.5.1.1 | Discrétisation du domaine | 28 |
| II.5.1.2 | Fonctions d'interpolations | 30 |
| II.5.2 | Méthode des différences finies MDF pure | 31 |
| II.5.3 | Méthode des caractéristiques..... | 31 |
| II.6 | conditions aux limites..... | 32 |
| II.7 | Discrétisation maillage | 33 |
| II.8 | Conclusion | 34 |

Sommaire

Chapitre 03

Partie expérimental et simulation numérique de la décharge couronne

| | | |
|-----------|--|----|
| III.1 | Introduction | 35 |
| III.2 | Dispositif Expérimental..... | 35 |
| III.2.1 | Système d'électrodes..... | 38 |
| III.2.2 | Source de haute tension..... | 39 |
| III.3 | Sonde polarisée circulaire | 42 |
| III.4 | Sonde polarisée linéaire | 43 |
| III.5 | Systèmes de mesure..... | 44 |
| III.5.1 | Mesure des tensions | 44 |
| III.5.1.1 | Tension appliquée aux électrodes actives | 44 |
| III.5.1.2 | Tension de polarisation V_b | 44 |
| III.5.2 | Mesure du courant..... | 44 |
| III.5.3 | Mesure des paramètres de l'air..... | 45 |
| III.5.4 | Mesure du champ électrique | 45 |
| III.6 | Logiciel de simulation Comsol | 45 |
| III.7 | Caractéristique courant-tension prélevée | 53 |
| III.8 | Détermination des paramètres de la décharge couronne | 54 |
| III.8.1 | Détermination du champ électrique E | 54 |
| III.8.1.1 | Influence de la tension sur la distribution de champ électrique E | 55 |
| III.8.1.2 | Influence de la hauteur sur la distribution de champ électrique E | 56 |
| III.8.1.3 | comparaison entre la partie expérimentale et la partie simulation | 58 |
| III.8.2 | Détermination de la densité de courant J | 60 |
| III.8.2.1 | Influence de la tension sur la distribution de la densité de courant J | 61 |
| III.8.2.2 | Influence de la hauteur sur la distribution de la densité de courant J | 62 |
| III.9 | Conclusion..... | 64 |

Sommaire

| | |
|---------------------------------|-----------|
| Conclusion générale..... | 65 |
|---------------------------------|-----------|

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La décharge couronne représente l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure, les électrodes étant soumises à une différence de potentiel élevée. On désigne sous le nom d'électrode active celle qui possède le plus petit rayon de courbure, la décharge étant positive ou négative suivant que cette électrode joue le rôle d'anode ou de cathode. Le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes ou molécules en électrons et ions positifs.

Les phénomènes de décharge électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [1], [2]. Les premières études décrivant leur évolution et proposant des mécanismes de décharges datent du début du XX^{ème} siècle [3]. En effet, Les premières publications sur l'effet de couronne datent de 1920 avec les travaux effectués par F.W.PEEK [4], qui a établi par des essais expérimentaux une loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de l'effet couronne. Depuis ce temps, un nombre impressionnant de travaux de recherche concernant l'effet couronne sur les lignes aériennes de transport d'énergie électrique ont été effectués et publiés [5], [6].

Une des conséquences du transport de l'énergie électrique à des hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet de couronne autour des lignes de transport [7]. C'est ainsi que les premières expériences sur les fils conducteurs minces portés à des tensions suffisamment élevées ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, universellement employée de décharge couronne ou corona effect [8].

L'effet couronne est à l'origine d'interférences radiophoniques et télévisuelles, téléphoniques, de bruits audibles, de pertes électriques importantes et de vibrations mécaniques [9].

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes d'effet couronne et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce Phénomène et son influence sur les surtensions des lignes de haute tension.

Les résultats de ces multiples études ont permis d'élaborer des modèles donnant les Caractéristiques des décharges couronnes évoluant sur la surface des conducteurs et dans l'air environnant. Le paramètre principal régissant l'amplitude du phénomène couronne est le champ électrique à la surface du conducteur qui dépend du diamètre et de l'état de

Introduction générale

Surface du conducteur, de la densité de l'air environnant, de la pluie et de l'humidité, de la pollution, ...etc [10].

En plus du phénomène couronne, le problème des surtensions dans les lignes a toujours été un sujet de controverses passionnées, due à plusieurs phénomènes de différentes origines, d'où la nécessité de protéger les installations et les appareils connectés au réseau y compris les éléments constituant le réseau électrique.

Le but de ce projet est d'effectuer une étude théorique et expérimentale sur la décharge couronne en géométrie fil-plan dans l'air à la pression et température atmosphériques, pour déterminer ses paramètres électriques (Champ électrique, tension, densité de courant).

Ce travail est composé de trois chapitres :

- Le premier chapitre explique les notions générales de la décharge couronne, l'historique, la définition de la décharge couronne, les différents régimes de la décharge et les mécanismes de cette décharge.
- Le deuxième chapitre nous présente le modèle mathématique de la décharge couronne et les équations de base de ce modèle. Comme nous avons présenté les méthodes numériques de résolutions ainsi que les approximations adoptées dans la résolution numérique du problème.
- Le troisième chapitre est consacré pour la partie expérimentale et la simulation numérique de la décharge couronne. Ou nous avons présenté le dispositif expérimental, la sonde polarisée circulaire, systèmes de mesure, définition de logiciel de simulation Comsol.

Et en fin, une partie a été consacrée à la simulation de la décharge couronne mono polaire en configuration fil-plan sous l'environnement Comsol Multiphysique 5.4. Ce programme, qui utilise la méthode des éléments finis, nous a permis de résoudre les équations de poisson et l'équation de la continuité du courant. A la fin, nous présentons et discutons les différents résultats en faisant une comparaison avec les résultats expérimentaux.

CHAPITRE I
ÉTUDE THÉORIQUE 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 se fait autour d'un électrode de grand rayon de courbure tel que le champ électrique à ces environs est grand, 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 [11].

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 électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [12,13]. Les premières études décrivant leurs évolutions et proposant des mécanismes datent du début de XX^{ème} siècle [14]. En effet, parmi les premières publications sur l'effet couronne datent de 1911 [15]. 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 [16]. C'est ainsi que les premières expériences sur les fils conducteurs minces, portés à des tensions suffisamment élevées, ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression universellement employée de « décharge couronne » ou « corona effect » [17]. Plusieurs études ont été menées pour expliquer les différents mécanismes mis en jeu lors de la formation, du développement et de la propagation de cette décharge. Townsend donna une théorie pour l'obtention d'une décharge auto-entretenu. Cette théorie se retrouve limitée pour la haute pression [18].

Le pionnier de l'étude scientifique de l'effet couronne est un chercheur américain, R.W. Peek, qui, vers 1920 établit une loi empirique exprimant le seuil d'apparition de la décharge couronne, en terme de champ électrique superficiel. Cette loi célèbre est

Chapitre I : Étude théorique de la décharge couronne

Toujours d'usage aujourd'hui. Par la suite on trouve de nombreuses théories qui ont été élaborées pour expliquer la formation des pertes par effet couronne. On peut citer les travaux de Ryan et Henline (1924), de Hesselmeyer et Kostko (1925), de Holm (1927). Les premiers essais en laboratoire datent de 1932 [14]. Le développement des systèmes de haute tension a donné une grande impulsion à la recherche sur les décharges couronne pour différents intervalles d'air. Vers les années 1940, Loeb, Meek et Raether, proposent un nouveau modèle de propagation de l'avalanche électronique lors de la décharge [18].

Vers les années 1950, les très hautes tensions utilisées pour le transport d'énergie électrique ont amené les concepteurs à considérer un autre phénomène. En effet, en présence de pluie, de brouillard ou de neige mouillée, on observe des vibrations mécaniques induites par effet couronne sur les conducteurs portés à la haute tension.

Les phénomènes de décharges électriques, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et 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 et d'avancer dans les applications qui ont d'ailleurs connu de bien plus larges expansions [19]. 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 « coronalike » avec deux électrodes immergées dans l'eau, avec et sans bulles d'air au travers de l'électrode haute tension. Avec le type de décharge électrique de géométrie pointe-plan, la spectroscopie d'émission est employée pour montrer la production de quantité significative des radicaux d'hydrogène dans la phase liquide [20].

Depuis le milieu des années 1990 [21], l'intérêt des constructeurs automobiles vis à vis des technologies liées aux plasmas froids produits par décharge couronne, pour la problématique NOx-Particules des moteurs Diesel n'ont cessé de croître. Cependant le côté utile de la décharge couronne ne doit pas éluder un autre côté nuisible de cette décharge [22], comme les pertes de puissance au niveau des lignes de transport d'énergie haute tension et la détérioration d'isolation dans les matériels électriques utilisant la haute tension. Les propriétés physico-chimiques des décharges couronne ont rapidement suscité un intérêt important dans différents domaines et les applications actuelles dans l'industrie sont nombreuses, des néons aux écrans plasma en passant par les ozoneurs [14]. De nombreux travaux ont été orientés dans la direction de l'analyse des différents paramètres caractérisant cette décharge. Tous ces travaux plus ou moins récents sur la décharge couronne montrent que la théorie de la décharge couronne n'est pas établie de manière indiscutable [22, 23].

I.3. Généralités sur les décharges électriques :

Une décharge électrique désigne tout mécanisme de passage d'un courant dans un gaz [24]. On dit qu'un gaz est ionisé lorsqu'il contient une certaine proportion d'électrons et d'ions positifs, l'existence de ces particules chargées confère au gaz des propriétés spéciales (conductivité électrique, émission de lumière et onde radioélectrique...etc). Si le gaz est complètement chargé, on dit que c'est un plasma [25]. Les plasmas sont désignés comme étant le quatrième état de la matière faisant suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz [26]. Selon les valeurs de température et/ou de degré d'ionisation ces plasmas peuvent être classés en deux grandes catégories : les plasmas thermiques (chauds) et les plasmas non thermiques (froids) hors équilibre [27]. Selon les techniques utilisées pour les générer, la pression appliquée et la géométrie des électrodes, les plasmas hors équilibre se présentent sous différentes formes telle que la décharge luminescente, couronne ou encore les décharges à barrière diélectrique (DBD) [28].

I.3.1 Définition d'une décharge couronne :

La décharge couronne est liée à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères.

La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation du gaz « air » et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [29].

L'étude de ce phénomène est basée expérimentalement sur la configuration fil-plan sous tension continue. Cependant la bonne compréhension des phénomènes agissant dans cette configuration permet la maîtrise des phénomènes apparaissant dans les autres géométries d'électrodes (pointe-plan). L'avantage de la décharge couronne est de pouvoir fonctionner avec tous les types d'alimentation électrique, par contre la difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc [30].

I.4. Phénomènes de multiplications électroniques :

I.4.1 Phénomènes de collision :

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

I.4.1.1 Choc élastique : dans ce cas les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. L'énergie du système reste inchangée.

Chapitre I : Étude théorique de la décharge couronne

I.4.1.2 Choc inélastique : dans ce cas l'énergie interne des particules change. Les chocs vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz.

I.4.2 Excitation atomique :

Un atome neutre peut être excité par collision avec un électron ou bien par absorption d'un photon.

- Excitation par collision avec un électron :



- Excitation par absorption d'un photon :



Avec : h : Constante de Planck $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s.

ν : Fréquence du photon « Hz ».

$h\nu$: Énergie du photon « J ».

Lorsque l'atome excité revient à son état initial, un photon est émis, c'est ce processus qui intervient dans l'effet couronne et qui est responsable des effets lumineux.



I.4.3 Ionisation par choc électrique : ce phénomène est régi par l'équation (I-4).



I.4.4 Photon suffisamment énergétique :



I. 4. 5 Recombinaison et attachement : Les processus conduisant à la diminution du nombre d'électrons libres dans un gaz ionisé peuvent être de deux types : attachement ou recombinaison.

I. 4. 5. 1 Attachement:



I. 4. 5. 2 Recombinaison :



I.5. Propriétés spécifiques aux décharges couronnes :

I. 5. 1 Différents régimes de la décharge (caractéristique : courant-tension) :

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

I.5.1.1 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.

I.5.1.2 Second régime : qui se produit à partir d'une tension seuil « V_s », traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend du processus d'ionisation externe pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.

I.5.1.3 Troisième régime : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter des phénomènes d'ionisation extérieurs : la décharge est auto-entretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards, appelés aussi streamers, qui est responsable de la composante impulsionnelle du courant.

I.5.1.4 Quatrième régime : au-delà d'une tension appliquée « V_{app} », la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit « E/N » (avec N représente la densité des particules) est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. Le régime d'arc est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

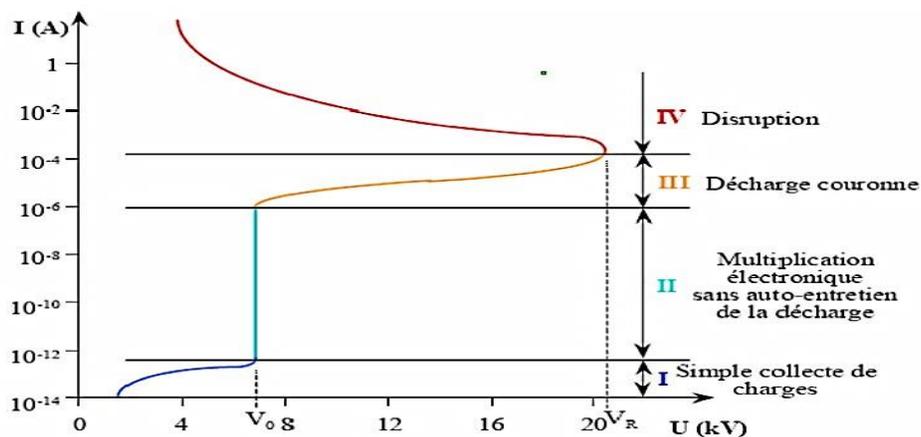


Figure (I.1) : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à la pression atmosphérique (configuration pointe-plan).

I.5.2 Champ électrique et topographie de la décharge :

Le champ électrique sur la surface de l'électrode pour lequel la décharge électrique couronne est amorcée a été étudié intensivement [31,32], ce champ électrique dépend du potentiel d'ionisation du gaz, la densité du gaz et l'état de surface de l'électrode pour laquelle on applique la haute tension, Peek a établi une expression semi-empirique qui donne le champ électrique d'amorçage dans le cas de l'air sec :

$$(ro) = 3 \cdot 10^4 \cdot m \cdot \eta \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r ro}}\right) \text{ Vcm}^{-1} \quad (\text{I-8})$$

- **m** est un nombre sans dimension lié à l'état de lissage de la surface du fil.
- **m=1** pour les surfaces lisses et **m < 1** pour les surfaces rugueuses.
- **δr** est la densité relative de l'air $\delta r = \frac{T_o P}{T P_o}$ Où **T** et **P** sont respectivement la Température et la pression du gaz (**T_o** = 293 °, **P** = 101325 Pa).

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

I.5.2.1 Géométrie coaxiale :

$$Vi = 3 \cdot 10^6 \cdot m \cdot (\delta + 0.03\sqrt{_}) \frac{\ln(\frac{Rc}{ro})}{ro} \text{ Volt} \quad (\text{I-9})$$

I.5.2.2 Géométrie fil-plan :

$$Vi = 3 \cdot 10^6 \cdot m \cdot (\delta + 0.03\sqrt{_}) \frac{\ln(\frac{4l}{\pi ro})}{ro} \text{ Volt} \quad (\text{I-10})$$

Avec **Rc** rayon du cylindre externe et **ro** le rayon du fil.

I.6. Mécanisme de développement de la décharge couronne :

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [33] [34] :

- Le premier concerne les décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier et notamment les effets secondaires à la cathode : c'est de décharge de Townsend.
- Le deuxième modèle mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concernant les décharges à court rayon d'action, faisant intervenir la situation locale : c'est la décharge par streamers.

I.6.1 Décharge de Townsend :

I.6.1.1 Mécanismes de la décharge de Townsend :

Les ions positifs produits dans l'espace inter-électrodes lors de l'avalanche électronique dérivent vers la cathode. Si ces ions ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode lesquels viendront renforcer l'avalanche. On définit le coefficient γ appelé coefficient d'émission secondaire ou second coefficient de Townsend qui représente le rapport entre le nombre d'électrons libérés à partir de la cathode et le nombre d'ions positifs qui tombent sur la cathode. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz employé. Lors que l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important.

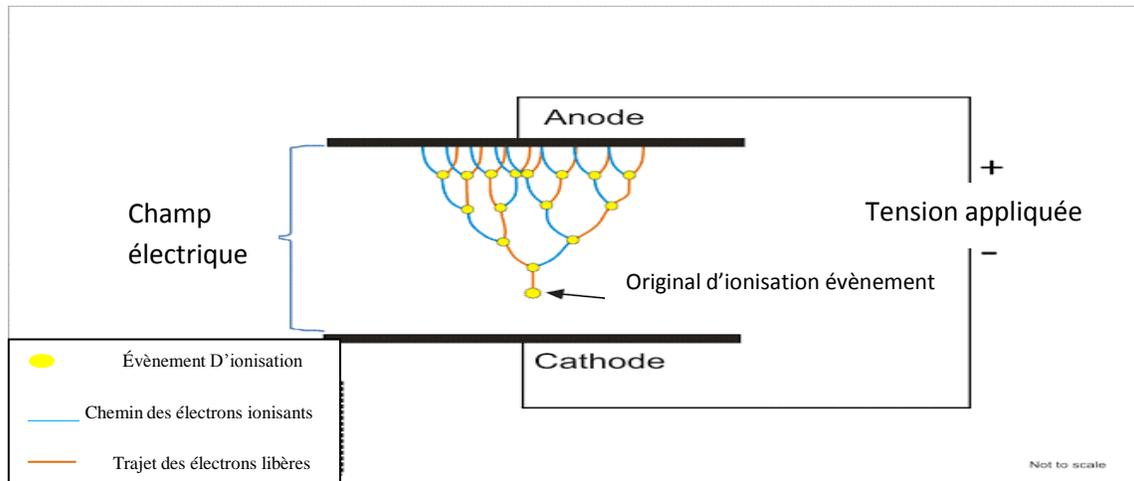


Figure (I.2) : Avalanche électronique.

I.6.1.2 Critère de claquage de type townsend :

Le courant I obtenu dans une configuration de champ uniforme pour une distance – inter électrode d est donne par [35] :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\frac{\alpha}{\alpha-\gamma} \exp(\alpha-\gamma)d - \frac{\gamma}{\alpha-\gamma}}{1 - \frac{\alpha\gamma}{\alpha-\gamma} [\exp(\alpha-\gamma)d - 1]} \quad (I-11)$$

Ou d est la distance inter-électrodes, I_0 le courant initial émis par la cathode sous l'effet du rayonnement extérieur, α le coefficient d'ionisation, γ le coefficient d'émissions secondaire et η le coefficient d'attachement. Ce dernier caractérise la propriété qu'ont certain gaz à capture des électrons (gaz dits électronégatifs).

Le critère de claquage selon le mécanisme de townsend est donne par :

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha-\gamma} [\exp(\alpha - \eta) d - 1] = 1 \quad (\text{I-12})$$

Pour un champ uniforme et pour un gaz non électronégatif ($\eta = 0$), le critère de claquage se réduit à :

$$[\exp(\alpha d - 1)] = 1 \quad (\text{I-13})$$

En champ non uniforme les relations (I-11, I-12) doit être modifiée pour tenir compte du fait que le coefficient d'ionisation dépend de la position ; on aura :

$$\gamma \int_0^d \exp[\int_0^x (\alpha - \eta) dx] \alpha dx = 1 \quad (\text{I-14})$$

I.6.2 Décharge par Streamers :

En géométrie fil-plan, le champ électrique présent n'est pas uniforme. **Figure (I.3)** nous montre les étapes qui constituent le mécanisme de formation des dards. Ce mécanisme de propagation du streamer a été proposé par Loeb et Meek [36,37]. Cette théorie du streamer introduit la notion de production d'électrons en amont de la charge d'espace. En effet, une fois l'avalanche primaire arrivée à l'anode, les électrons se trouvant à sa tête pénètrent dans celle-ci. La déformation du champ géométrique initial est maximale en tête de l'avalanche, où la concentration des ions positifs est la plus élevée. Si le champ engendré par ceux-ci est assez grand pour être comparable au champ géométrique initial, alors des avalanches secondaires prennent naissance. On émet alors l'hypothèse que le mécanisme prédominant réside dans la photo ionisation par des photons énergétiques produits dans l'avalanche par des atomes excités. Les électrons ainsi formés au voisinage de l'avalanche génèrent des avalanches secondaires se dirigeant vers le sillon du nuage sous l'effet du champ résultant. Les avalanches secondaires se dirigent vers la tête de l'avalanche primaire et s'y raccordent en formant des dards lumineux et les électrons des avalanches secondaires s'écoulent vers l'anode. Les ions positifs, demeurés derrière les électrons, allongent et intensifient vers la cathode la charge d'espace positive due à l'avalanche primaire. Le processus se développe à l'instar d'un streamer se propageant de l'anode vers la cathode. En atteignant la cathode, le streamer devient un filament conducteur constitué de gaz fortement ionisé (plasma), à travers lequel se décharge le circuit extérieur formant une colonne conductrice dite canal de l'étincelle [38].

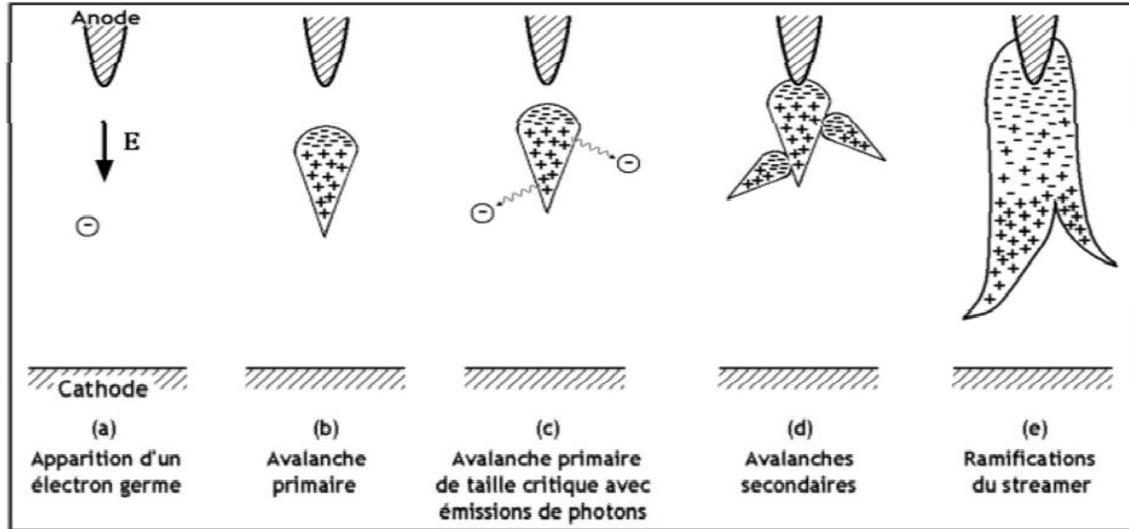


Figure (I.3) : Descriptif d'un Streamer positif en géométrie fil-plan.

Les conditions de claquage font intervenir un champ critique de la charge d'espace, E_p , correspondant à une valeur déterminée du produit $\alpha \cdot d$. Les critères établis respectivement pour ces deux quantités par Meek [37] et par Raether [39] conduisent à la relation:

$$E_p = K \cdot E_0 \quad (I-15)$$

Pour $\alpha d \approx 20$, où K est une constante voisine de 1.

Soit encore à un nombre de charges, dans l'avalanche primaire, proche de 10^8 électrons. Ces critères sont vérifiés en particulier dans l'air à pression atmosphérique et avec d compris entre 1 cm et 10 cm [40]. Ce phénomène du dard se développe en des temps de l'ordre de 10^{-8} secondes alors que la décharge de Townsend nécessite des temps de l'ordre de 10^{-5} secondes pour entraîner un claquage.

I.7. Différents types de décharge couronne:

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure. Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon d'une décharge couronne négative, comme on peut aussi ajouter la décharge couronne en régime alternatif.

I.7.1 Décharge couronne positive :

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand l'électrode active est portée à un potentiel positif et l'électrode passive (une plaque) à la terre. Dans ce cas, une zone à champ intense et de forte ionisation est créé autour de la pointe, des électrodes sont produits par photo-ionisation et sont accélères vers celle-ci (zone en pointillé sur **Figure (I.4)** [41]).

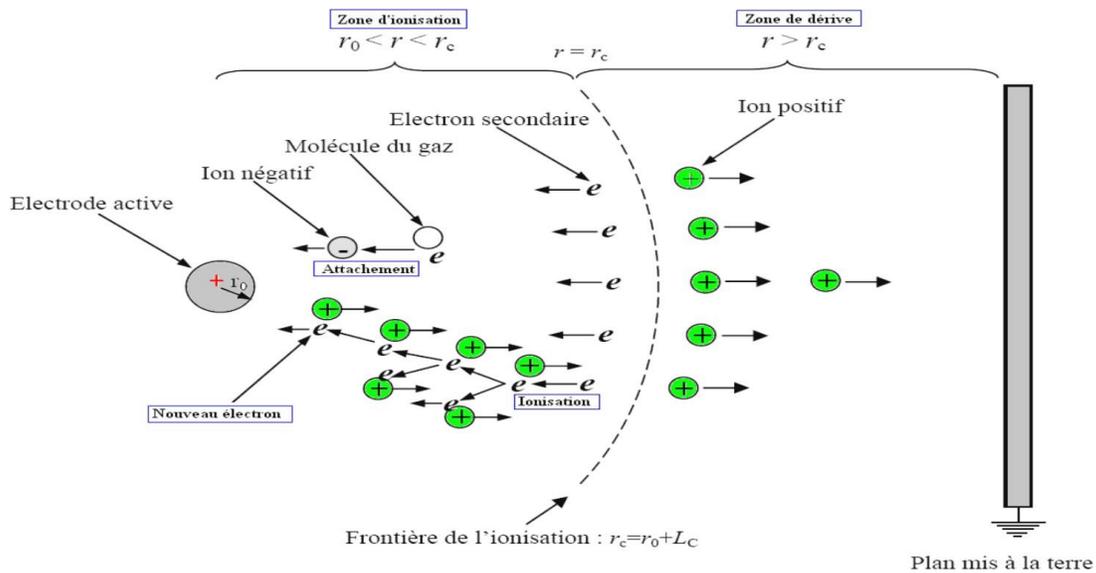


Figure (I.4) : Schématisation d'une décharge couronne continue positive

Le phénomène est plus complexe dans ce cas parce que la zone à champ électrique intense n'est pas juxtaposée la source des électrons. Les électrons qui sont au voisinage de la pointe produisent des Avalanches mais quand les électrons arrivent sur la pointe, ils ne produisent rien qui puisse entretenir le phénomène. La cathode ne joue pas le rôle de pourvoyeuse des électrons car cette cathode est située loin de la zone où le champ électrique est intense. Si le champ est assez fort, les électrons germes produits sous l'action du rayonnement ultraviolet émis par une avalanche créent de nouvelles avalanches. Le champ est renforcé par l'avalanche, mais la formation d'une chaîne entre électrodes est peu probable, le champ devenant trop faible au voisinage de la cathode [42].

I.7.2 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 (1982) expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode **Figure (I.5)** [41].

Des électrons sont extraits de cathode par choc, chaque électron ainsi libéré produit une nouvelle avalanche qui s'en dégage. Ces avalanches ont une extension limitée. D'une part, le champ décroît rapidement dès qu'on s'éloigne de la pointe vers le plan collecteur. D'autre part, les avalanches qui se développent laissent derrière elles les ions positifs moins mobiles qui font écran entre les électrons et la pointe. Cette deuxième cause d'affaiblissement du champ vient renforcer la première [42].

Un usage d'ions positifs est formé par les avalanches d'électrons. Quand le nuage positif est développé de manière suffisante, les avalanches arrêtent de se produire parce que le champ est très affaibli au-delà. Les ions positifs sont attirés par la pointe, donc ils sont neutralisés par la pointe si bien que la zone positive dont nous vu la formation disparaît [41].

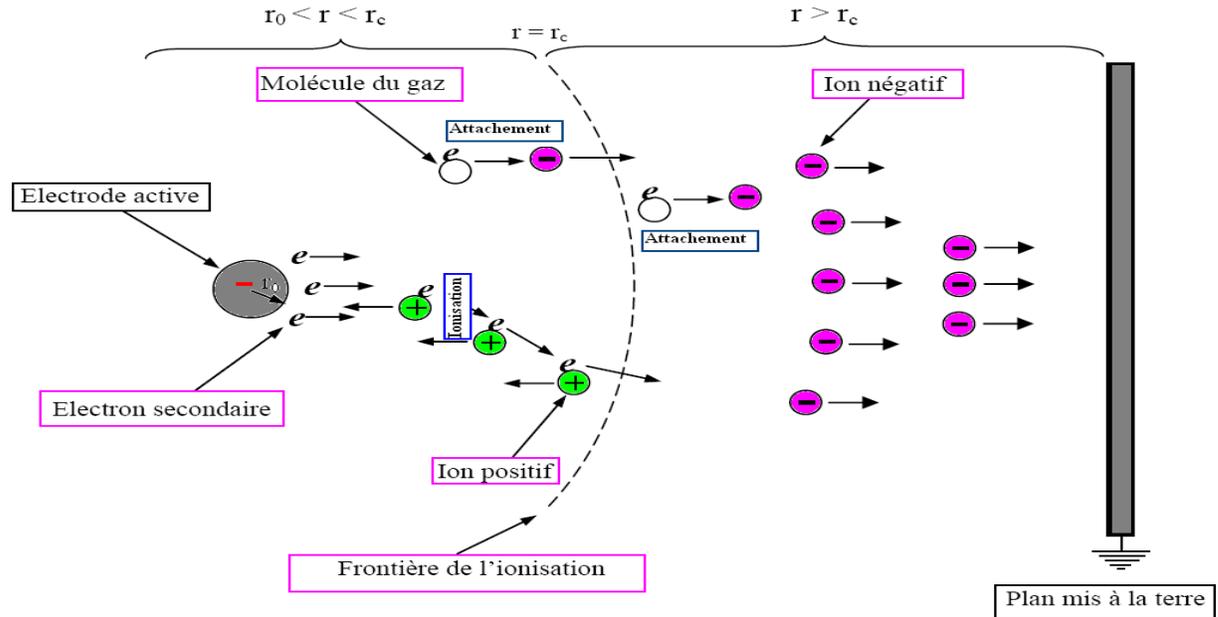


Figure (I.5) : Schématisation d'une décharge couronne continue négative.

L'effet d'écran disparaît quand tous les ions positifs ont été captés par la pointe; on a, à nouveau, le champ initial et le phénomène recommence. Il a donc une allure cyclique, la durée du cycle étant égale au temps mis par la couche positive pour être balayée par la pointe [42] [43].

I.7.3 Décharge couronne en régime alternatif :

A la place d'un potentiel continu appliqué à la pointe, on peut également y appliquer un Signal sinusoïdal à valeur moyenne nulle. Les alternances positives et négatives peuvent donner Lieu à leurs modes de décharge respectifs. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à Une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, dans la Mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que Toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées [48].

Si l'excitation est supérieure à la fréquence f_{\max} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faible qu'en continu. Goldman et al [49] a identifié trois composantes de courant dans le cas d'une tension alternative:

- Le courant capacitif dû à l'intervalle gazeux entre les électrodes qui jouent le rôle d'un Condensateur.
- Le courant synchrone, continu et en phase avec la tension appliquée.
- Le courant impulsionnel, somme des impulsions « streamers » pour les alternances positives et des impulsions de « Trichel » lors des alternances négatives.

On peut aussi utiliser des décharges couronnes pulsées. Elles consistent à appliquer des pics de forte tension mais pendant un très court instant ($t < 1\text{ms}$) pour limiter le passage à l'arc. Dans ce cas, la valeur moyenne de la tension n'est pas nulle.

I.8. Facteurs influençant la décharge couronne :

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [44], on distingue trois facteurs essentiels :

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

I.8.1 Facteurs géométriques :

I.8.1.1 Rayon de courbure :

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

I.8.1.2 Distance inter électrode :

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la **figure (I.6)**. Il apparaît clairement que le courant est grand pour les petites distances et à chaque fois que la distance augmente le courant diminue.

De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites [44] et l'augmentation de la distance inter-électrode augmente la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne.

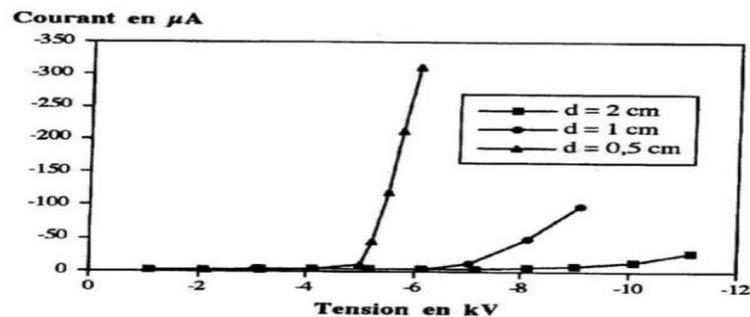


Figure (I.6) : Effet de la distance sur la caractéristique courant-tension
En géométrie fil-plan [44].

I.8.1.3. Nature des électrodes :

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium, et acier) sur la **figure (I.7)**.

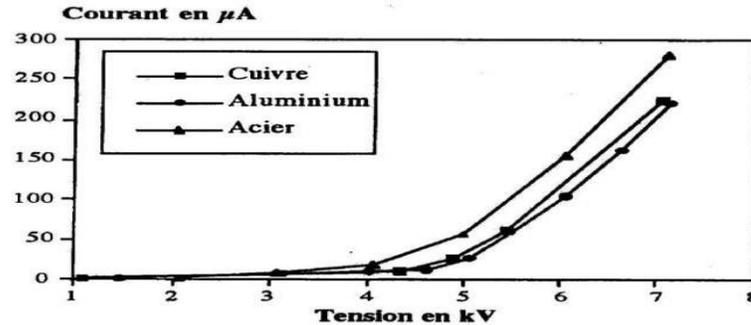


Figure (I.7) : Caractéristique courant-tension selon la nature des Électrodes en géométrie fil- plan (d=0.5 cm, Ø = 125 µm) [44].

La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique comme le montre le **tableau (I.1)** [36].

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

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

A partir de ce tableau on peut conclure que les ions négatifs sont plus rapides par rapport aux ions positifs.

I.8.2 Facteurs physico-chimiques :

I.8.2.1 Température :

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [22]. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit « **P.T** » [45].

I.8.2.2 Humidité :

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% et pour 5% d'humidité relative [36]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

I.8.2.3 Pression :

A partir de la tension atmosphérique, L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La **figure(I.8)** montre l'effet de la pression sur la décharge.

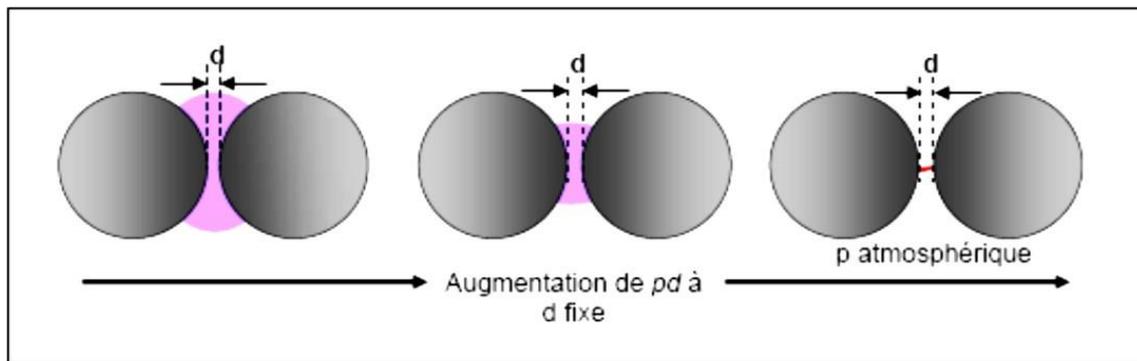


Figure (I.8) : Schéma d'évolution de la décharge observée En fonction de la pression [46].

I.8.2.4 Densité de l'air :

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

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

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta}$$

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

K_h/δ : correction à apporter pour avoir les conditions normales.

I.8.3 Facteurs électriques :

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

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

I.9. Phénomènes induits par la décharge couronne :

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

I.9.1 Effet électromagnétiques :

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

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

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

I.9.2 Effet chimique :

Suivant la polarité de la décharge nous assistons à la naissance de certaines espèces chimiques dérivées du gaz chimique, par exemple dans le cas de l'air, la naissance des oxydes d'azotes (NO, NO₂), des radicaux (H₀) et (H₂O) ainsi que l'ozone (O₃) qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières.

I.10. Décharge couronne en géométrie fil-plan :

Un système d'électrode fil-plan est constitué d'une électrode cylindrique de faible rayon de courbure tendue parallèlement à une hauteur l d'un plan mis à la terre, **figure (I.9)**. L'espace inter électrode est reparti en deux zones délimitées par une frontière distante de l_c de la surface de l'électrode active, sur cette frontière le champ électrique est égal au champ critique E_c du minimum d'ionisation correspondant à $\alpha - \eta = 0$. La zone d'ionisation (I) est caractérisée par une charge d'espace nulle, par contre la zone de dérive (II) est caractérisée par une charge d'espace mono polaire positive ou négative selon la tension appliquée à l'électrode active.

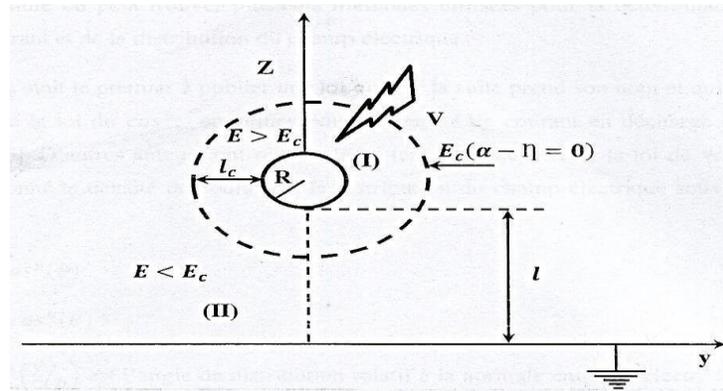


Figure (I.9) : Représentation schématique d'une décharge couronne continue en géométrie fil-plan

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

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

En dépassant la frontière l_c les électrons ne peuvent plus ioniser le gaz en raison du champ électrique qui se trouve inférieur au champ du minimum d'ionisation E_c . Certains électrons vont s'attacher à des atomes ou molécules neutres. Quant aux ions positifs créés dans la zone d'ionisation, ils sont accélérés dans le fort champ vers l'électrode active et peuvent ainsi accélérer l'effet couronne [47].

I.11. Applications de la décharge couronne :

I.11.1 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.10**).

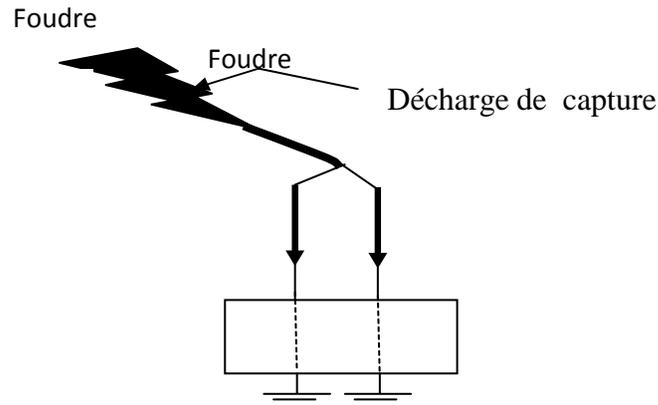


Figure (I.10) : Utilisation de la décharge couronne pour le paratonnerre

I.11.2 Neutralisation :

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

I.11.3 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.11**).

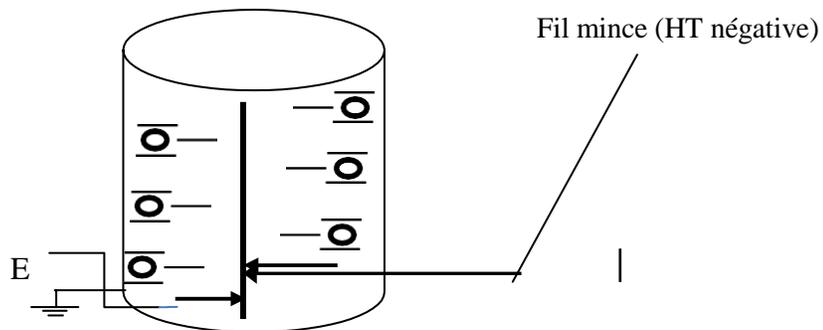


Figure (I .11) : Utilisation de la décharge couronne dans le filtre électrostatique.

I.11.4 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.12**).

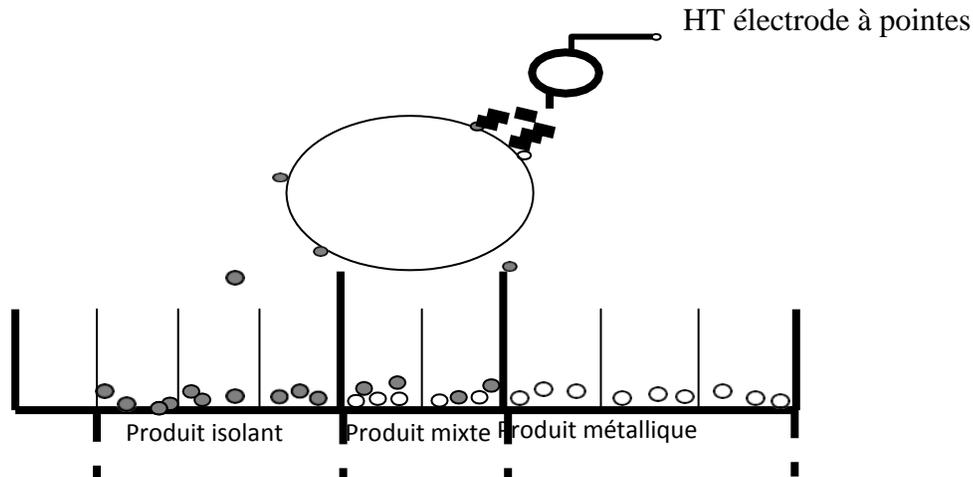


Figure (I .12) : Utilisation de la décharge couronne la séparation électrostatique

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.

➤ Comme on peut citer d'autres avantages liés à la décharge couronne :

Quand le champ superficiel dépasse le seuil critique, les charges créées par effet couronne éliminent par neutralisation une partie des charges du conducteur. Ceci provoque la diminution du champ superficiel et du potentiel du conducteur. On dit que l'effet couronne est un régulateur de tension.

Donc la décharge couronne amortit les surtensions sur les lignes surtout les surtensions dues à la foudre. Lorsque l'effet couronne se produit autour du conducteur dans l'air environnant celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur tend à augmenter, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique. Des calculs récents

Effectués sur des modèles simulés d'une ligne de 220 kV soumise à une onde de choc 1,2/50 s simulant une surtension atmosphérique, l'atténuation de la surtension atteint 60% quand on s'éloigne de 7 km du point d'impact de cette surtension.

I.12. Problèmes liés à la décharge couronne :

I.12.1. Pertes dans les lignes de haute tension :

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.13)**. 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 [50].

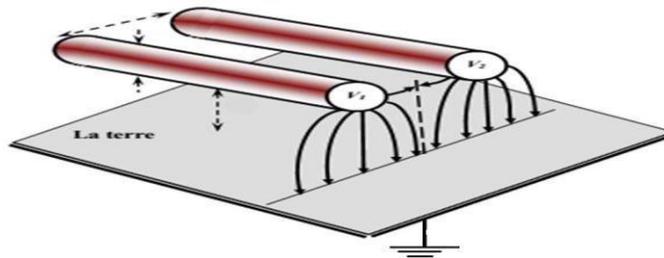


Figure (I.13) : Représentation schématique des lignes de champ pour une ligne de transmission.

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

Chapitre I : Étude théorique de la décharge couronne

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. Produire des vibrations (« le galop des lignes électriques ») [51], qui vont ajouter leurs effets à ceux des vibrations des câbles aériens [52] 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 [53] 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 » [54] Ou de présence de gouttes d'eau suspendues sur le dessous d'un câble; « la présence intermittente de la charge d'espace [55,56] et du vent ionique situé à proximité immédiat des gouttes d'eau suspendues au conducteur sont les causes principales de ce phénomène » [51]. 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 [53], température [57].
4. 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 [51].
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).

I.13. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les décharges électriques, plus particulièrement la décharge couronne.

Ensuite, nous avons discutés sur les phénomènes de multiplication électrique et les différents régimes de la décharge « caractéristique : courant-tension ».

Chapitre I : Étude théorique de la décharge couronne

Ainsi, nous avons brièvement décrit ces différents mécanismes de développement de la décharge et cités les différents types de la décharge couronne et les facteurs influençant avec les phénomènes induit par cette décharge.

Enfin, nous avons donné quelques applications et les problèmes liés à la décharge couronne.

CHAPITRE II
MODÈLE MATHÉMATIQUE DE
LA DÉCHARGE COURONNE

II.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de résoudre des équations qui gouvernent la décharge couronne par la méthode des éléments finie, c'est donc fournir une solution approchée de comportement réel d'un phénomène physique.

La résolution numérique des équations qui gouvernent cette décharge n'est pas une simple procédure. En effet, le système couplé composé de l'équation de poisson et de la continuité du courant propose des difficultés d'ordre numérique très complexes. Ce que nous proposons dans cette partie du travail, est de résoudre le système d'équation « poisson/continuité » en utilisant la méthode des éléments finis pour déterminer les paramètres recherchés de la décharge couronne.

Nous allons présenter dans ce chapitre les méthodes numérique les plus utilisées pour résoudre les équations régissant la décharge couronne ainsi que les approximations de cette décharge.

II.2. Travaux Antérieurs :

Sunaga [58] fut le premier à employer la méthode des différences finis (MDF) pour résoudre les équations du champ de la décharge couronne en géométrie fil-plan. Selon son analyse la différence maximum entre les solutions, avec et sans l'approximation de Deutsch est de 10% pour le champ électrique et 40% pour la densité de courant, calculés tous les deux sur le plan mis à la terre.

La méthode des éléments finis (MEF) a été appliquée pour la première fois par Janischewskyj et Gela [59] pour la configuration fil-cylindre. Ils ont adopté, dans leur méthode, la plus part des approximations citées juste après. Ils ont étendu en 1980 [60] leur procédure pour calculer les pertes d'énergie dans le système fil-plan. Ils ont conclu alors que l'approximation de Deutsch est acceptable pour le calcul des pertes d'énergie, mais elle est moins précise pour le calcul du champ électrique et de la densité de courant au plan mis à terre.

Takuma et al. [61,62] ont succédé dans l'application de la (MEF) en géométrie fil-cylindre et fil-plan. Ils ont remplacé l'approximation de Kaptsov par celle de la constance de la densité de charge sur la périphérie du fil. Sa valeur, qui devrait être considérée comme une condition aux limites, est déterminée par une procédure itérative qui identifie le courant calculé avec sa valeur mesurée correspondante.

Abdel-Salam et al. [63] ont repris le processus itératif de Janischewskyj et Gela pour résoudre les équations mono-polaires du champ en géométrie fil-plan et en utilisant des conditions aux limites différentes pour ρ . Celle-ci est déterminée le long de la ligne de symétrie en considérant l'approximation de Deutsch.

Aboelsaad et al. [64] ont proposé un algorithme basé sur la (MEF) et dont lequel l'approximation de Kaptzov est remplacée par l'utilisation d'un polynôme reliant le champ électrique sur le fil à la tension appliquée. Ce polynôme est formulé à partir des résultats expérimentaux et numériques antérieures [63,65]. Cette relaxation a été aussi utilisée, plus tard, par Abdel-Salam et Al-Hamouz [66,67].

Davis et Hoburg [68,69] ont proposé une méthode hybride ou ils ont combiné la (MEF), utilisée pour la résolution de l'équation de poisson, en supposant la distribution de la densité de la charge d'espace connue, avec la méthode des caractéristique (MOC) qui permet de renouveler, dans chaque itération, la distribution de la densité de charge pour une distribution du champ électrique connue. Le processus itératif continu jusqu'à ce que la solution self-consistante est obtenue. Dans ce modèle, l'approximation de Kaptzov est utilisée comme condition aux limites pour la densité de charge sur le fil.

Abdel-salam et Al-Hamouz [66,70] sont les premiers à proposer une méthode de calcul incluant la diffusion ionique.

II.3. Équations de base du modèle mathématique :

Les équations de base gouvernant le phénomène de la décharge couronne se ramènent aux équations de maxwell de l'électrostatique auxquelles s'ajoutent les équations du milieu considère (l'air dans notre cas). Ces équations sont :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \quad \text{Équation de poisson} \quad (\text{II-1})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad \text{Équation de la continuité du courant} \quad (\text{II-2})$$

$$\vec{j} = \mu \rho \vec{E} + D \vec{\nabla} \rho \quad \text{Équation de la densité de courant} \quad (\text{II-3})$$

$$\vec{E} = - \vec{\nabla} \Phi \quad \text{Équation reliant le champ au potentiel} \quad (\text{II-4})$$

Pour l'équation de la place c'est la même équation de poisson lorsque la densité de la charge égale à zéro elle est sous forme :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{II-5})$$

Ou ϵ_0 est la permittivité du vide, μ la mobilité moyenne des ions, ρ la densité de la charge d'espace et D le coefficient de diffusion ionique.

En substituent l'équation (II-4) dans (II-1), nous obtenons l'équation de poisson pour le potentiel Φ .

$$\Delta \Phi + \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0 \quad (\text{II-6})$$

La résolution de ce système d'équation est simple si la densité de la charge d'espace est connue au préalable. La recherche simultanée des deux grandeurs, champ électrique et densité de la charge d'espace, est un problème d'une grande complexité. En réalité, la solution exacte de ces équations est complexe à cause de leur nature non linéaire. Le calcul du champ électrique nécessite la connaissance de la distribution de la densité de la charge d'espace et inversement. \vec{E} et ρ sont inter-liés, une méthode itérative s'impose. Cependant, des solutions analytiques existent pour des simples géométries telles que les configurations sphériques et cylindriques coaxiales. Par contre, toutes les tentatives faites, jusqu'à présent, sont basées sur plusieurs approximations et hypothèses simplificatrices.

II.4. Modèles et approximations :

II.4.1 Approximation de Deutsch :

L'analyse approximative de Deutsch date de 1933 [71]. Elle inclut trois hypothèses simplificatrices :

- La présence de la charge d'espace modifie l'amplitude du champ électrique laplacien et non sa direction.
- La densité de la charge d'espace est constante dans l'espace inter électrodes.
- La charge d'espace n'affecte pas le champ électrique au plan.

II.4.2 Approximation de Popkov :

Popkov [72] a repris les travaux de Deutsch en 1949. Il garde la première approximation et a apporté d'autres approximations supplémentaires :

- La région inter-électrode est constituée uniquement d'une charge d'espace monopolaire (la zone d'ionisation est négligée).
- La mobilité des ions est constante.
- La diffusion thermique des ions est négligée.
- Le champ électrique à la surface de l'électrode active demeure à sa valeur seuil.

La dernière approximation est connue, généralement, sous le nom de l'approximation de Kaptsov.

Plus de détails sur les approximations de Deutsch et de Popkov peuvent être consultés dans les articles de Sigmon [73] et de Winter [74].

II.4.3 Approximation de kaptzov :

Considérons le champ électrique et la charge d'espace lorsqu'on applique une tension à l'électrode active. Avant le seuil de l'apparition de l'effet couronne, le champ électrique laplacien à la surface de l'électrode active est proportionnel à la tension appliquée. Si nous considérons une légère hausse de la tension appliquée au-dessus du seuil de l'effet couronne, le champ électrique à la surface du conducteur augmente en conséquence. Tout fois, cette hausse du champ résulte directement de l'augmentation de la production de la charge d'espace sur l'électrode active et qui est due à son tour à l'augmentation de la valeur du coefficient d'ionisation. Cette charge d'espace supplémentaire a tendance à réduire le champ électrique local. Ces effets contraires s'équilibrent, sur une large gamme du potentiel appliquée, à la valeur du champ seuil de peek. Cette invariance, souvent adoptée dans la modélisation de la décharge couronne, est connue sous le nom d'hypothèse de kaptzov [75].

II.4.4 Mobilité ionique :

La mobilité des ions est une grandeur physique très importante dans la résolution du problème de la décharge couronne. Sa valeur moyenne pour les ions positifs de l'air reste difficile à évaluer jusqu'à nos jours. Les valeurs attribuées par divers auteurs sont diversifiées. La valeur la plus basse est voisine de $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{v.s}$ et la plus élevée est voisine de $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{v.s}$. Elle dépend de plusieurs paramètres telle la nature de l'ion en questions, la nature et la pression du gaz, la température de l'environnement et les impuretés en suspension dans le gaz, la chute de tension dans la zone de dérive ainsi que de l'humidité absolue. Cependant, la mobilité ionique est indépendante du champ électrique, comme la indique Zebboudj et al [76] en géométrie cylindres-coaxiaux.

II.5. Méthodes numérique de résolutions :

Plusieurs méthodes ont existé en vue de la résolution numérique des équations qui gouvernent la décharge couronne. Au départ elles ont toutes fait appel à l'hypothèse de Deutsch [77] qui stipule que la charge d'espace affecte seulement l'intensité du champ électrique mais pas sa direction, ce qui introduit des erreurs aux résultats des calculs. Le recours à cette hypothèse est éliminé par l'introduction d'approches de calcul basées essentiellement sur la méthode des différents (MDF), la méthode de simulation de charge (MSC ou méthode des charges fictives MCF) ou encore la méthode des éléments finis (MEF) [78]. L'équation de conservation de la charge est résolue par la méthode des caractéristiques (MC) ou la méthode des volumes finis (MVF). Mais dans notre cas la méthode des éléments finis celle qu'on va utiliser dans notre procédure de résolution.

II.5.1 Méthode des éléments finis :

C'est l'ingénieur américain Ray William Clough qui semble-t-il, a utilisé le terme de méthode des éléments finis le premier dans un article de 1960 intitulé *the finite Element Method in plane stress Analysis*. La méthode des éléments finis se propose de mettre en place, sur la base de formulations faibles, un algorithme discret (discrétisation) permettant de rechercher une solution approchée d'un problème aux dérivées partielles sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact [77]. Elle est constituée essentiellement de deux étapes primordiales, la discrétisation du domaine d'étude et la formulation des valeurs aux nœuds du maillage.

II.5.1.1 Discrétisation du domaine :

La discrétisation du domaine d'étude ou encore l'étape de maillage constitue l'opération de base de la méthode des éléments finis. Elle consiste à décomposer un domaine d'étude générale Ω en une multitude de sous domaines Ω_i de façon à le recouvrir tout entièrement. Ces sous domaines sont appelés « éléments géométriques », En résumé il faut donc :

- Définir le domaine Ω ;
- Le diviser en mailles Ω_i telles que :

$$\bigcup_{i=1}^n \Omega_i = \Omega$$

Et $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, \forall i \neq j$

Cette phase de maillage est l'étape la plus méticuleuse qui soit dans cette méthode de Résolution. Et sans logiciels de simulation, on y passera une très grande portion temporelle.

Il existe plusieurs manières de définir et de représenter les éléments géométriques qui constituent le maillage. Le tableau suivant représente quelques éléments géométriques les plus utilisés dans cette opération :

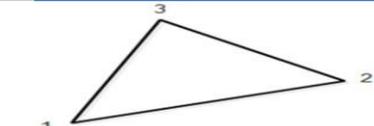
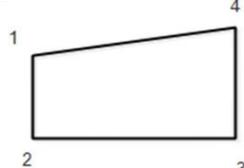
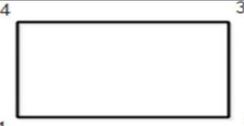
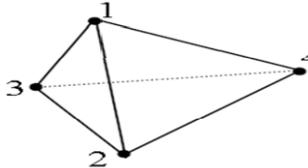
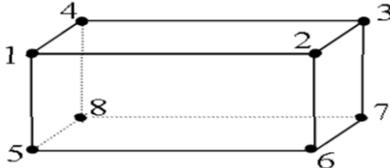
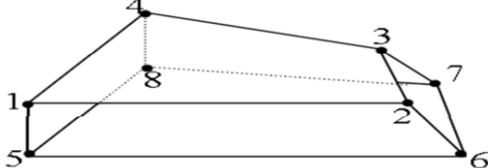
| Éléments finis | Représentation géométrie |
|----------------------------------|--|
| Élément unidimensionnel | |
| Ligne simple | 1 ————— 2 |
| Éléments bidimensionnel | |
| Triangulaire |  |
| Quadrilatérale |  |
| Rectangulaire |  |
| Éléments tridimensionnels | |
| Tétraédrique |  |
| Prisme rectangulaire |  |
| Hexaédrique |  |

Tableau (II.1) : Les différentes géométries d'éléments finis possibles.

II.5.1.2 : Fonctions d'interpolations :

Dans le cas des éléments finis à géométrie bidimensionnelle sous forme d'un triangle.

Figure (II.1). La fonction de base du potentiel φ à approcher se trouve à l'intérieur de Chaque élément, comme le décrit ce polynôme d'interpolation linéaire:

$$\Phi^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y \quad (\text{II-7})$$

Où a^e , b^e et c^e sont des coefficients constants à déterminer et e l'indice de l'élément.

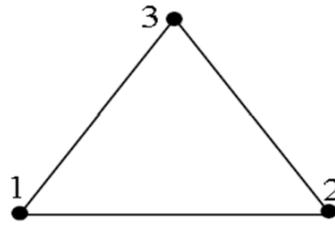


Figure (II.1): Éléments finis triangulaire.

On numérote les nœuds dans le sens trigonométrique par les nombres 1, 2 et 3. Les Valeurs correspondantes de φ^e sont respectivement notées φ^e_1 , φ^e_2 et φ^e_3 . En exprimant (II-7) aux trois nœuds, on obtient :

$$\varphi^e_1 = a^e + b^e x^e_1 + c^e y^e_1 \quad (\text{II-8})$$

$$\varphi^e_2 = a^e + b^e x^e_2 + c^e y^e_2 \quad (\text{II-9})$$

$$\varphi^e_3 = a^e + b^e x^e_3 + c^e y^e_3 \quad (\text{II-10})$$

x_j^e et y_j^e ($j=1, 2,3$) représentent les valeurs des coordonnées du $j^{\text{ème}}$ nœud dans le $e^{\text{ème}}$ élément. La résolution de ce système d'équations permet d'avoir les coefficients a^e , b^e et c^e , lesquels seront remplacés dans l'équation (II-7) qui devient :

$$\phi^e = \sum_{j=1}^3 N_j^e(x, y)\phi_j^e \quad (\text{II-11})$$

Où $N_j^e(y, x)$ sont les fonctions d'interpolation, données par :

$$N_j^e = \frac{1}{2\Delta^e} (a_j^e + b_j^e + c_j^e) \quad j=1, 2, 3 \quad (\text{II-12})$$

Avec :

$$a_1^e = X_2^e Y_3^e - Y_2^e X_3^e \quad b_1^e = Y_2^e - Y_3^e \quad c_1^e = X_3^e - X_2^e \quad (\text{II-13})$$

$$a_2^e = X_3^e Y_1^e - Y_3^e X_1^e \quad b_2^e = Y_3^e - Y_1^e \quad c_2^e = X_1^e - X_3^e \quad (\text{II-14})$$

$$a_3^e = X_1^e Y_2^e - Y_1^e X_2^e \quad b_3^e = Y_1^e - Y_2^e \quad c_3^e = X_2^e - X_1^e \quad (\text{II-15})$$

Et Δ^e est l'aire du triangle (e), tel que :

$$\Delta^e = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & X_1^e & Y_1^e \\ 1 & X_2^e & Y_2^e \\ 1 & X_3^e & Y_3^e \end{vmatrix} = \frac{1}{2} (b_1^e c_2^e - b_2^e c_1^e) \quad (\text{II-16})$$

Durant notre investigation, on ne se contentera pas de réaliser un algorithme spécial pour cette méthode de résolution, mais on va utiliser un logiciel muni d'un code de calcul Basé sur cette méthode (MEF), qui est le Comsol Multiphysique 5.4.

II.5.2 Méthode des différences finies MDF pure :

McDonald et al. Ont construit un maillage structuré pour appliquer la méthode de différences finies [79] ; ils utilisent la (MDF) pour résoudre les deux équations (équation de poisson et l'équation de la continuité du courant) ; ils utilisent la solution harmonique analytique pour déterminer le champ électrique en l'absence de charge d'espace. Ils ont utilisé la (MDF) pour calculer la densité de charge d'espace à partir du champ calculé. Après le calcul de la densité de charge d'espace, McDonald et al. Calculent la nouvelle distribution du potentiel en utilisant la (MDF) ; les deux équations sont résolues de manière itérative jusqu'à la convergence ("self-consistent solution").

II.5.3 Méthode des caractéristiques :

La méthode des caractéristiques (MOC) est basée sur une technique par laquelle l'équation aux dérivées partielles gouvernant la densité de la charge d'espace devient une équation différentielle ordinaire le long d'une « caractéristique » trajectoire espace-temps, donnée par l'équation du mouvement des ions [80,81].

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \mu \cdot \vec{E} \quad (\text{II-17})$$

Le long de cette trajectoire, la combinaison des équations **(II-1)**, **(II-3)** conduit à l'équation différentielle décrivant l'évolution de la charge d'espace suivante [82,83] :

$$\frac{d\rho}{dt} = -\mu \cdot \frac{\rho^2}{\epsilon_0} \quad (\text{II-18})$$

Cette équation admet une solution analytique de la forme suivante :

$$\frac{1}{\rho(t)} - \frac{1}{\rho(0)} = \frac{\mu \cdot t}{\epsilon_0} \quad (\text{II-19})$$

Où $\rho(0)$ est la valeur de la densité de charge au point de départ de la ligne caractéristique.

Pour une distribution du champ électrique connue, l'équation **(II-17)** est intégrée numériquement. Spécifiquement, un incrément d'une ligne droite est tracé à travers les triangles individuels du maillage éléments finis, basé sur la valeur constante du champ électrique à l'intérieur de l'élément donnée. A l'intersection avec la frontière de l'élément, le temps t est déterminé ensuite utilisé dans l'équation **(II-19)** pour calculer la densité de charge ρ en ce point. Les valeurs de la densité de charge aux nœuds du maillage sont alors calculées en utilisant une interpolation linéaire entre les valeurs de deux proches intersections. Pour simplifier l'interpolation, les lignes caractéristiques doivent être tracées de telle sorte que chaque nœud soit compris entre deux lignes [84].

L'avantage que présente la (MOC), comme il a été rapporté par Davis et Hoburg [80,81] est d'être facilement extensible pour introduire plusieurs types de charges, la génération, la recombinaison, la diffusion...ets. Elle n'est pas limitée à l'étude des systèmes stationnaires. Le seul inconvénient, par contre, est qu'elle prend beaucoup de temps [84].

II.6. Conditions aux limites:

Les équations à résoudre pour le potentiel ϕ et la densité de la charge d'espace ρ sont celles de poisson **(II-1)** et de continuité du courant **(II-2)** pour la géométrie fil-plan ou la diffusion ionique est négligée. Les conditions aux limites appropriées sont les suivantes :

- Le potentiel à la surface du fil conducteur est égale la tension appliquée V_{app} .
- Le potentiel à la surface du plan est égal à zéro.
- La charge d'espace à la surface de la frontières zone d'ionisation /zone de dérive est donnée comme suit :

Cette dernière n'est pas connue au préalable. Sa valeur est déterminée de la même manière que dans le cas du fil-cylindre.

- Les valeurs du potentiel aux frontières artificielles sont déterminées comme suit :

Lors du tracé du maillage, le potentiel est systématiquement relevé en tout point le long de chaque ligne de champ. Les valeurs du potentiel aux points situés sur les frontières artificielles sont stockées dans un vecteur POT_{lim} . Elles sont utilisées par la suite, dans la formulation par éléments finis, comme condition aux limites sur ces frontières.

II.7. Discrétisation maillage :

Dans la méthode de résolution que nous allons décrire dans ce chapitre, le maillage joue un rôle important. Il est construit à partir des lignes de champ et des équipotentielles en effet, les nœuds du maillage représentent les points d'intersection entre celle-ci. Les éléments triangulaires simples utilisés dans la formulation par éléments finis sont obtenus en divisant chaque quadrilatère en deux. Pour la configuration fil-plan, les lignes de champ ne sont plus des droites, comme c'est le cas pour le système fil-cylindre coaxial. Ces lignes sont tracées point par point en utilisant la méthode des images électrique [85,86] nous on a utilisé le maillage en électrostatique.

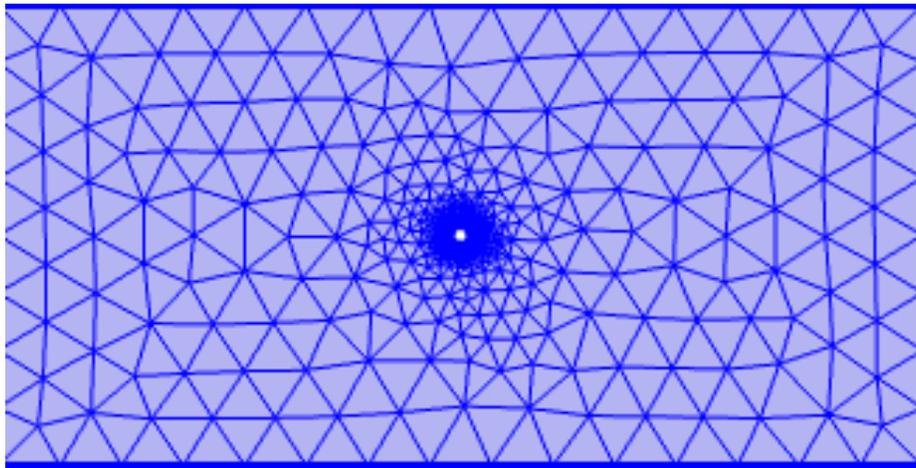


Figure (II.2) : Maillage du domaine d'étude avec l'outil de maillage de Comsol.

Le maillage généré a été réalisé en utilisant le logiciel Comsol, l'application Maillage (Mesh). Il est constitué de 2198 nœuds et comme énoncé dans ce chapitre, les éléments choisis sont les éléments triangulaires.

Étape 1 : Cette première étape consiste en la construction du maillage. En effet, le domaine de compilation a été divisé en plusieurs sous-domaines comme le montre la **figure (II.2)**.

Étape 2 : Supposition d'une valeur initiale pour ρ_0 à fin de définir ρ_{fil} sur la périphérie du fil.

Étape 3 : Calcul de la distribution du champ électrique aux nœuds du maillage à partir du potentiel.

Étape 4 : Estimation de la densité de la charge d'espace ρ aux nœuds du maillage.

Étape 5 : Résoudre pour le potentiel, l'équation de poisson avec la nouvel estimé Aux ρ nœuds du maillage.

Étape 6 : Calcul de l'intensité du champ électrique sur la superficie du fil (Efil), et la Comparer avec la valeur du champ seuil.

Si la condition ξ sur ce champ électrique est respectée, on stoppe le calcul. Sinon, on met à jour la valeur de ρ , et on revient à l'étape 3.

II.8. Conclusion:

La méthode de résolution que nous avons présenté dans ce chapitre présente une bonne approximation pour la détermination du champ électrique et de la densité du courant lors de la décharge couronne positive dans l'air.

Dans cette partie, nous avons essayé de combiner tous les éléments qui nous avons besoin avec des méthodes numériques et informatiques afin de résoudre le problème de couplage champ électrique-densité du courant.

Résolvez des systèmes complexes qui n'avaient auparavant aucune frontière connue .nous avons essayé d'écrire une méthode (des éléments finis) pour cet outil mathématique, pour comprendre ces étapes et conditions d'analyse, tout en présentant des hypothèses (c'est ce qui a été indiqué dans l'hypothèse de kaptzov) simplifiées. Généralement adoptées pour la résolution du système d'équations du phénomène couronne.

CHAPITRE III

**PARTIE EXPÉRIMENTAL ET
SIMULATION NUMÉRIQUE DE
LA DÉCHARGE COURONNE**

III.1. Introduction :

Dans ce troisième chapitre, nous allons présenter une étude expérimentale dans le but de déterminer les différents paramètres électrique de la décharge couronne, Les travaux présentés ont été réalisés au sien du laboratoire Haute tension de l'Université A.Mira de Bejaia en collaboration avec le hall de technologie.

Au court de nos expérimentations, le principe des essais consiste à la détermination des paramètres de la décharge couronne tels que : la distribution du champ électrique E, et la distribution de la densité de courant J.

Nous allons présenter une étude expérimentale de la mesure du courant et de la tension lors de la décharge couronne en géométrie fil-plan.

Notre étude consiste, dans un premier temps, à relever la caractéristique courant-tension de la décharge en mesurant la tension de seuil d'apparition ainsi que le courant de décharge à température ambiante en variant les paramètres géométrique (les hauteurs de l'électrode active par rapport au plan de mesure et les tensions appliquée).

Finalement en utilisant le logiciel Comsol comme on 'a déjà dit, basé sur la méthode des éléments finis, on va simuler cette décharge dans la géométrie fil-plan. Les résultats de simulation seront comparés avec ceux de l'expérimentation en fin du chapitre.

III.2. Dispositif Expérimental :

L'ensemble du dispositif expérimental pour la géométrie fil-plan réalisé est représenté Sur la **figure (III.1)**. Le système d'électrodes et les éléments mis sous haute tension sont isolés par une grille séparatrice (cage de protection (3)) du manipulateur et des autres appareils de mesure basse tension. L'électrode active (1) de diamètre 0.1cm, tendue à des hauteurs de $h=4$ cm et $h=5$ cm par des supports isolants en plexiglas (2), est reliée à l'installation haute tension continue V_a (on applique deux tensions 23 et 26 kV). Cette installation haute tension est composée principalement d'un générateur de basse tension (10), puis à l'aide d'un transformateur élévateur et d'un circuit redresseur, on génère une haute tension continue qui sera de l'ordre de kilovolts (9). Pour mesurer le courant de décharge, un pico ampèremètre (13) est connecté à la sonde circulaire de mesure (A). Le plan de polarisation (4) est relié à une alimentation continue basse tension (18) aux bornes de laquelle est connecté un voltmètre (19) pour mesurer la tension de polarisation V_b appliquée.

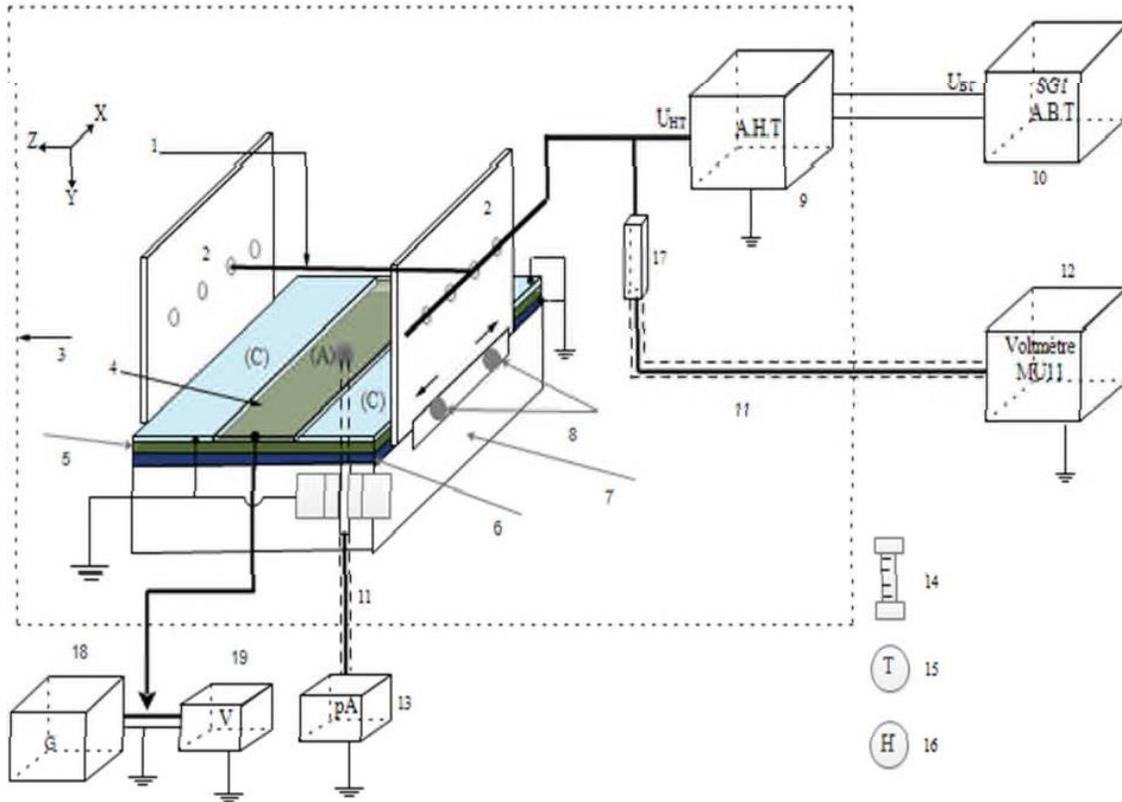


Figure (III.1) : Constitution du dispositif expérimental.

- | | | |
|--|---|---------------------------------|
| A : Collecteur de courant. | C : Plans de garde. | 1 : Électrodes actives. |
| 2 : Supports des électrodes actives. | 3 : Cage de protection. | 4 : Plan de polarisation. |
| 5 : plaque isolante en Bakélite (38/55). | 6 : Plaque isolante en plexiglas (38/55). | |
| 7 : Support en bois. | 8 : Système coulissant. | 9 : Source haute tension. |
| 10 : Source basse tension. | 11 : Câbles coaxiaux. | 12 : Voltmètre de crête (MU11). |
| 13 : Pico-ampèremètre. | 14 : Baromètre à mercure. | 15 : Thermomètre à mercure. |
| 16 : Hygromètre à cheveux. | 17 : Résistance haute tension. | |
| 18 : Source de polarisation basse tension. | 19 : Voltmètre. | |



Figure (III.2) : Vue de profil du dispositif

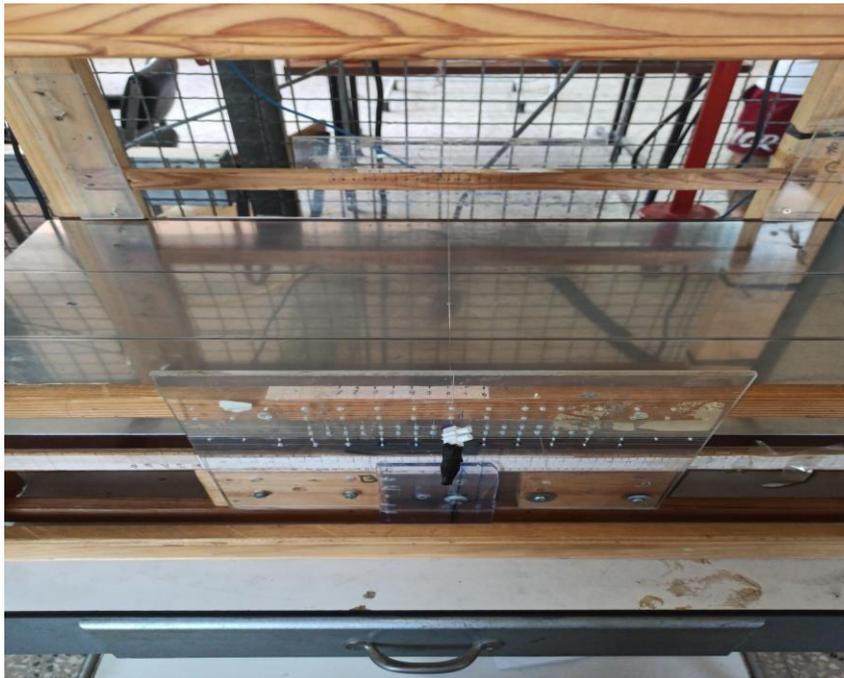


Figure (III.3) : Vue de face du dispositif

III.2.1 Système d'électrodes :

Le système d'électrodes utilisé dans notre étude est celui de la géométrie fil-plan décrit précédemment. Il est composé de deux électrodes principales. L'une constitue le fil qui est l'électrode active (1) à faible rayon de courbure et l'autre est plane qui représente le plan de polarisation ou de mesure (4). Et d'un ensemble de surfaces côtières qui représentent les plans de garde (C) qui sont mis à la terre **figure(III.4)**. L'électrode active est tendue parallèlement par deux supports en plexiglas (2) à une hauteur h du plan de mesure. L'une des électrodes (fil) est portée au potentiel V_a et l'autre au potentiel V_b (plan de polarisation). Les plans de gardes (C) entourent la plaque de polarisation (4) formant avec celle-ci des intervalles d'air très réduits pour assurer la continuité de la distribution du champ aux bords de la sonde. Cette dernière étant fixe, la mesure du champ en différents points du plan se fait par le déplacement des électrodes actives fixées sur des supports coulissants.

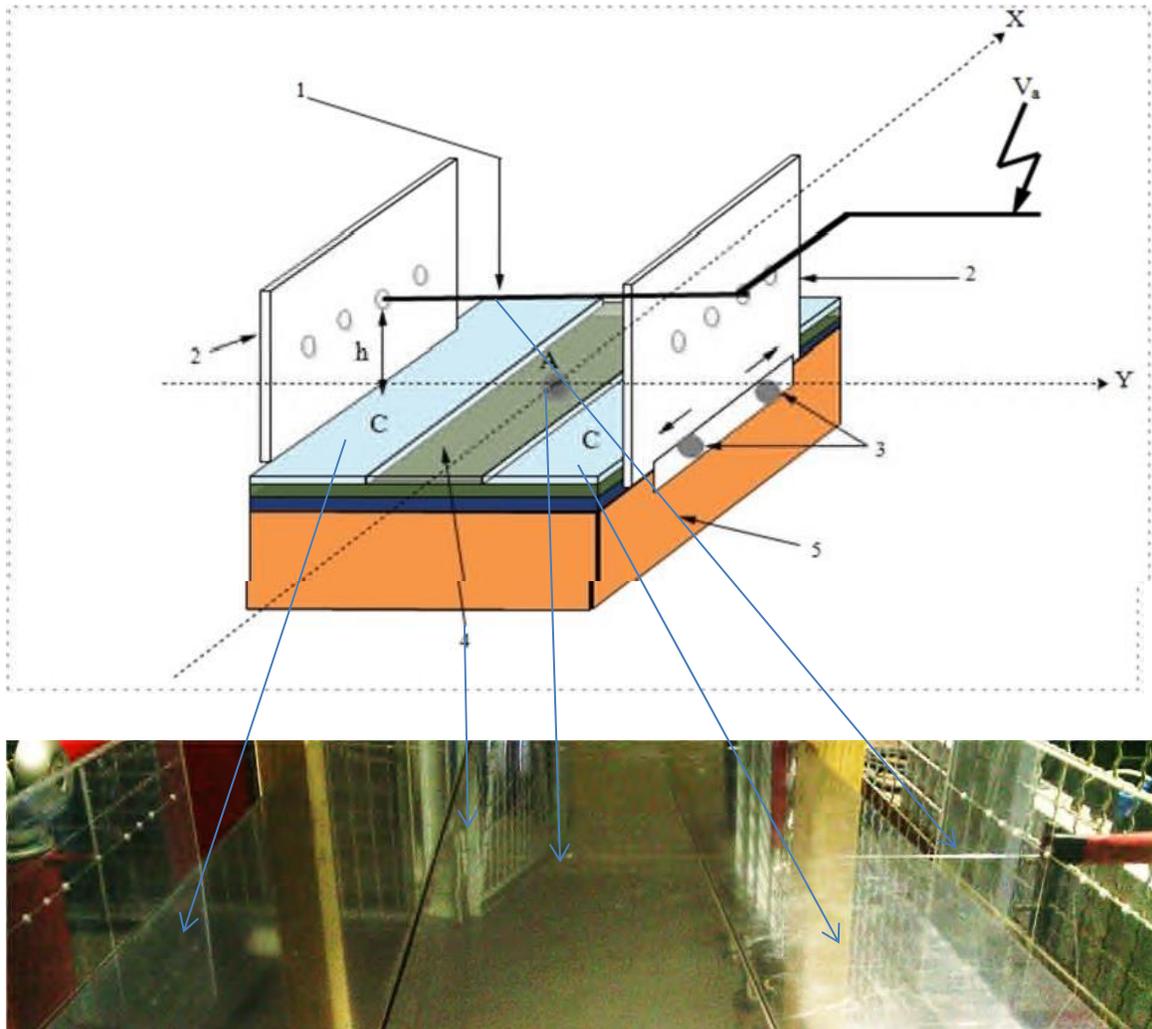


Figure (III.4) : système d'électrodes.

1- Électrode active (fil).

3- Système coulissant.

2- Support en plexiglass.

4- Plan mis à la terre.

5- Support en bois.

A- Sonde circulaire.

C- Plans de gardes.

III.2.2 Source de haute tension :

Afin de mesurer les paramètres de la décharge couronne en configuration fil–plan, Nous avons besoin d’une source de tension continue de polarité positive. Pour cela, nous Avons utilisés une installation haute tension présente au laboratoire de haute tension de L’université de Bejaia, qui délivre des tensions variant de 0 à140 kV, continue ou Alternative, de polarité positive ou négative, **figure (III.5)**. Cette installation est composée:

- D’une source basse tension SG1.
- D’un transformateur de haute tension T100, alimenté par la source SG1.
- De deux diodes à haute tension G270.
- De deux condensateurs de lissage C10.

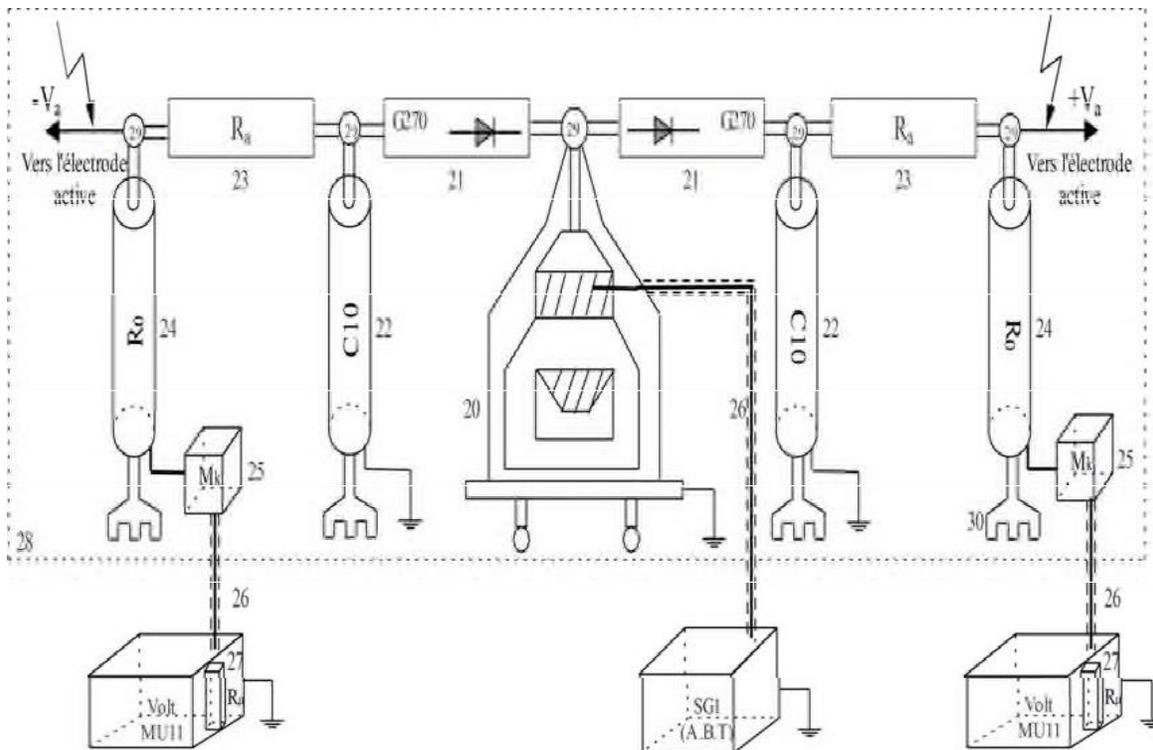


Figure (III.5) : Schéma en bloc de la source de haute tension utilisée [87].

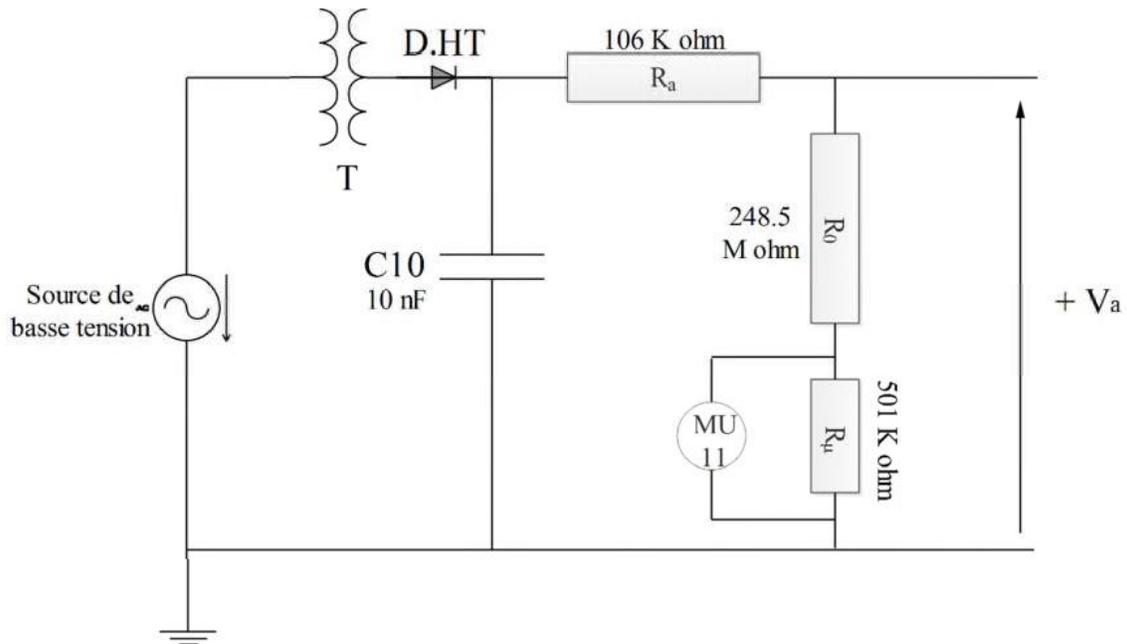


Figure (III.6) : Schéma électrique de la source de haute tension utilisée (uniquement pour la Tension positive).



Figure (III.7) : Équipements de l'installation haute tension utilisée.



Figure (III.8) : Installation haute tension utilisée du laboratoire de Bejaia.

SG1 : Générateur de basse tension.

MU11 : Voltmètre de crête.

20 : Transformateur haute tension (T100).

21 : Diode haute tension (G270).

22 : Condensateur de lissage (C10).

23 : Résistance d'amortissement (R_a).

24 : Résistance haute tension (R_0).

28 : Grille de protection.

L'enroulement primaire du transformateur élévateur T100 (20) utilisé dans cette installation (ayant un faible pas de variation de 100 V environ et délivrant des hautes tensions) est alimenté par une source basse tension variable (SG1) via un câble. On a associé à cet transformateur deux redresseurs mono-alternance afin d'obtenir une haute tension continue. Chacun de ces deux redresseurs est constitué d'une diode haute tension (21) à base de silicium et d'un condensateur de lissage C10 (22) de capacité de 10 nF. Une résistance R_a (23) de 106 k Ω relie le condensateur au système d'électrodes. Son rôle est d'amortir le courant, protégeant ainsi la diode des surintensités. Pour la mesure de la haute tension continue V_a , nous disposons d'un diviseur de tension résistif composé d'une résistance basse tension R_0 (24) de 248,5 M Ω et d'une résistance haute tension R_u (27) de 501 k Ω incorporée dans le voltmètre de crête MU11. Ces deux résistances sont reliées par un câble coaxial (26) blindé.

III.3. Sonde polarisée circulaire :

Le principe de la sonde est introduit par Tassiker en 1974 [88]. Le signal de la sonde polarisée dérive du courant de conduction qui la traverse. Ce courant est contrôlé par un champ électrique créé localement par polarisation de la sonde. La connaissance du courant et de ce champ local permet de déduire l'intensité du champ extérieur.

Tassiker a développé un modèle théorique sur la sonde polarisée de forme circulaire. Il considère un plan circulaire de rayon r_s et de surface S centre au milieu d'une électrode (E) en forme d'un disque de rayon intérieur et extérieur respectifs r_e et R_e (**figure III.9**). Les surfaces S_s et S_e des deux parties de la sonde sont au même niveau et forment un intervalle d'air de largeur $g = r_e - r_s$.

Donc en principe, en ayant les valeurs des courants I collectés par la surface S_s de cette sonde, il restera que d'utiliser les équations qui vont suivre pour calculer les valeurs Expérimentales du champ électrique :

$$I = J \cdot S_s \quad (\text{III-1})$$

$$J = \frac{\mu \cdot \rho}{\epsilon_0} \cdot D \quad (\text{III-2})$$

$$I = \frac{\mu \cdot \rho}{\epsilon_0} \cdot D \cdot S_s = \frac{\mu \cdot \rho}{\epsilon_0} \cdot \Phi_s \quad (\text{III-3})$$

Avec :

- μ : Mobilité moyenne des ions [$\text{m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$] ;
- ρ : Densité de la charge d'espace [C/m^3] ;
- D : Vecteur du déplacement électrique ;
- Φ_s : Flux du vecteur D à travers la sonde ;
- S_s : Surface réelle de la sonde ;
- J : Densité de courant électrique ;
- ϵ_0 : Permittivité électrique du vide ;

Lorsque la sonde est polarisée positivement, nous avons deux contributions du flux Φ_s , L'un provenant du champ E à mesurer et l'autre provenant de la tension de polarisation V_b . Le flux Φ_s à travers la sonde est donné par :

$$\Phi_s = \Phi_{s0} + \Phi_{s1} \quad (\text{III-4})$$

Où Φ_{s0} est le flux du champ à mesurer et Φ_{s1} la contribution du champ de polarisation E_b . Ces flux sont donnés par :

$$\Phi_{s0} = S_s \cdot E \cdot \epsilon_0 \quad (\text{III-5})$$

$$\Phi_{s1} = C_0 \cdot V_b \quad \text{(III-6)}$$

Avec : $S_s = \pi \cdot r_s^2$ est la surface effective de la sonde, r_s étant le rayon effectif et C_0 est la capacité du condensateur constitué par la sonde (S) et l'électrode (E) D.

Avec :

$$C_0 = 4 \cdot r_m \cdot \epsilon_0 [1,07944 + 0,5 \cdot \ln(\frac{1+r_m}{2 \cdot g})] \quad \text{(III-7)}$$

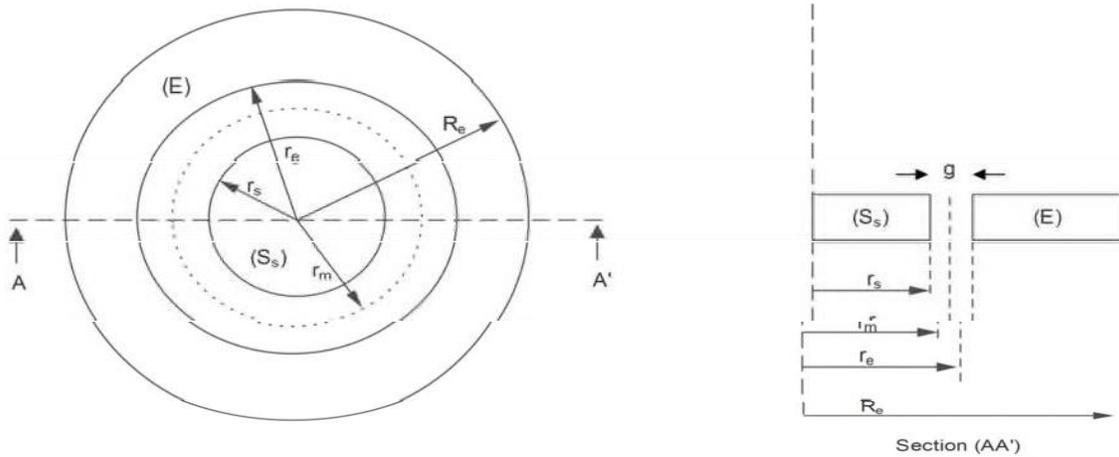


Figure (III.9) : Sonde circulaire de Tassicker.

III.4. Sonde polarisée linéaire :

Si dans la théorie de Selim et Waters le calcul du champ de polarisation se fait numériquement, alors un calcul analytique plus commode de ce champ est possible sur une autre géométrie de la sonde. Cette nouvelle géométrie est la configuration linéaire, laquelle est mieux adaptée à la mesure du champ électrique en géométrie fil-cylindre et fil-plan.

Pour les configurations linéaires des sondes polarisées, le collecteur est de forme rectangulaire entouré par deux plaques polarisées à la tension V_b . Cette sonde est incorporée dans un même niveau de surface sur l'électrode mise à la terre et sur laquelle on veut mesurer le champ électrique. Ce type de sonde a été utilisé pour la mesure du champ lors de la décharge couronne en géométrie fil-cylindre coaxiale [90, 91, 92] et par axiale [93,94] et en géométrie fil-plan [95,96].

Le courant de conduction I_0 , collecté par la sonde en absence de la polarisation, c'est-à-dire pour $V_b=0$, sera augmenté ou réduit à I selon que la polarité de la tension de polarisation V_b est positive ou négative respectivement. On a alors :

Connaissant les fonctions $f_-(V_b, E)$ et $f_+(V_b, E)$, Le champ électrique extérieur E peut être déterminé par les mesures de I_0 et de I .

Alors que la théorie de la sonde prévoit que le champ mesuré doit être indépendant de la tension de polarisation, une différence de 20% entre les valeurs du champ mesurées a été observée sous les deux polarités de V_b . Cette sonde présente des effets de bords.

Des méthodes analytique et numérique [91] ont montré que ces effets sont négligeable quand on applique une tension V_b négative, Alors qu'ils deviennent important pour une tension V_b positive. Pour éliminer ces effets de bords, une nouvelle configuration linéaire a été proposée récemment, par Zebboudj et al. [95, 97, 98].

Dans cette nouvelle géométrie, le collecteur (A) est supposé de longueur infinie le long de l'axe x par la présence des plans de garde G. Par conséquent, le champ présente seulement une composante suivant l'axe des y . La composante tangentielle est nulle alors qu'elle est non-négligeable dans la configuration initiale.

III.5. Systèmes de mesure :

III.5.1 Mesure des tensions :

III.5.1.1 Tension appliquée aux électrodes actives :

Mesurer la tension V_a à l'électrode active en utilisant le diviseur de résistance et le voltmètre de crête MU11 comme est mentionné dans la **figure (III.7)**. Ce dernier mesure la tension U aux bornes de la résistance basse tension R_u et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée $V_a = k.u$, ou k est le rapport du diviseur de tension .En outre, le voltmètre présente une résistance d'entrée R_e de 4,24 M Ω dont nous tenons compte dans l'évaluation du rapport K [87] :

$$k = \frac{R_o R_e + R_o R_u + R_u R_o}{R_u R_e} = 555.6 \quad (\text{III-8})$$

III.5.1.2 Tension de polarisation V_b :

La plaque polarisante de la sonde est connectée à une alimentation continue de faible stabilité, fournissant une tension négative ou positive V_b , avec une plage de tension de 0 à 250 V. La tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre numérique avec une grande impédance d'entrée.

III.5.2 Mesure du courant :

Le courant I_s traversant la sonde est mesuré avec un pico-ampèremètre connecté au collecteur (A) via un câble coaxial blindé. La précision de la mesure dépend du

Collecteur (A) par rapport à la plaque polarisante (4) de la sonde d'une part, et d'autre part, du courant de fuite provoqué par l'accumulation de poussière autour des deux parties (A) et (4). Il est recommandé de nettoyer régulièrement la sonde et la plaque de protection avant chaque essai, et de vérifier si le collecteur est au même niveau de surface que la plaque polarisante (4). Avant chaque essai, il est nécessaire de revérifier la continuité entre toutes les plaques ainsi qu'avec la sonde de mesure.

III.5.3 Mesure des paramètres de l'air :

Étant donné que la décharge couronne est très influencée par les paramètres physiques de l'air [99,100]. Ensuite, il est nécessaire de connaître les conditions dans lesquelles cette décharge se produit. En effet, dans le programme numérique généré, la valeur du champ seuil E_s constituée la condition aux limites sous laquelle le champ calculé sur le conducteur doit converger. Par conséquent, le calcul de E_s doit tenir compte des conditions atmosphériques dans lesquelles la mesure expérimentale est effectuée, afin de mieux comparer les résultats de laboratoire avec les résultats de simulation. Au cours de l'étude expérimentale, nous avons utilisé un baromètre à mercure (14) **figure(III.1)** pour mesurer la pression, un thermomètre à mercure (15) pour mesurer la température et un hygromètre à cheveux (16) pour mesurer l'humidité.

III.5.4 Mesure du champ électrique :

La mesure du champ électrique a été faite par une sonde circulaire polarisée dite sonde de Tassicker. Le principe de fonctionnement de la sonde polarisée de Tassicker est basé sur la mesure du courant collecté par la surface de la sonde, pour ensuite déduire le champ électrique à sa surface. En partant de ce principe, il considère que la sonde est un plan circulaire (S_s) de rayon r_s . Centré au milieu d'une électrode (E) de rayons intérieur et extérieur respectivement r_e et R_e . Les surfaces S_s et S_e des deux parties ainsi formées au même niveau et forment un intervalle d'aire annulaire de largeur $g = r_e - r_s$ [15], **Figure (III.9)**.

III.6. Logiciel de simulation comsol :

Comsol Multiphysique est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes de processus de modélisation : de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique, décrivant des phénomènes spécifiques, à la résolution et au post-traitement des modèles tout en assurant des résultats précis et fiables.

Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel Comsol multiphysique est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries. Pour ce faire, il est possible d'étendre le logiciel par des modules complémentaires.

Disposant d'interfaces physiques prédéfinies, ce logiciel permet la simulation de plusieurs physique et applications en ingénierie, et particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physique.

Multiplateforme et compatible avec Windows, Mac, Linux, le logiciel Comsol Multi physique autorise à l'utilisateur de définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbro- différentiels (EAD) sont également possibles.

Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab.

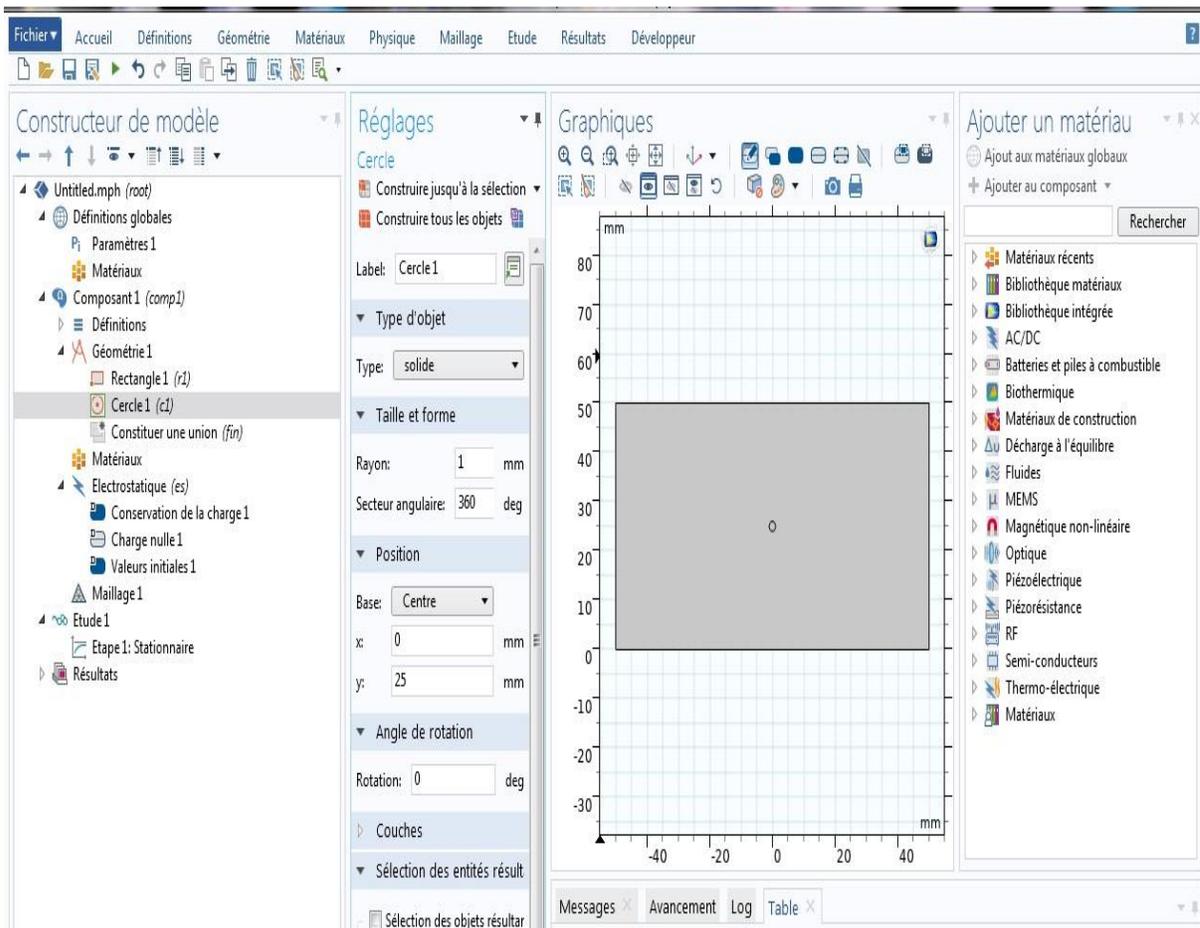
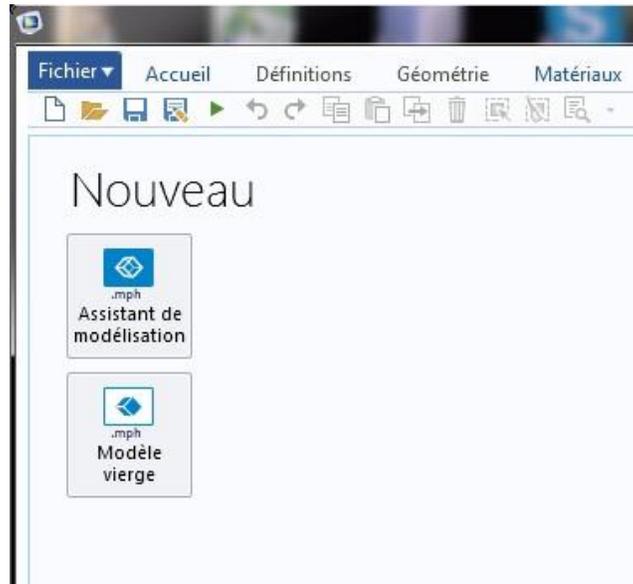


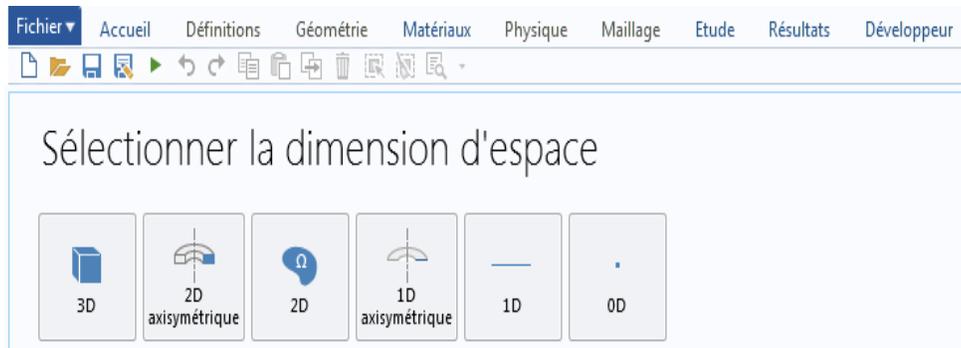
Figure (III.10) : Exemple d'une fenêtre du programme Comsol

Pour l'utilisation de ce logiciel-là elle faut suivie beaucoup des étapes, parmi ces étapes-là :

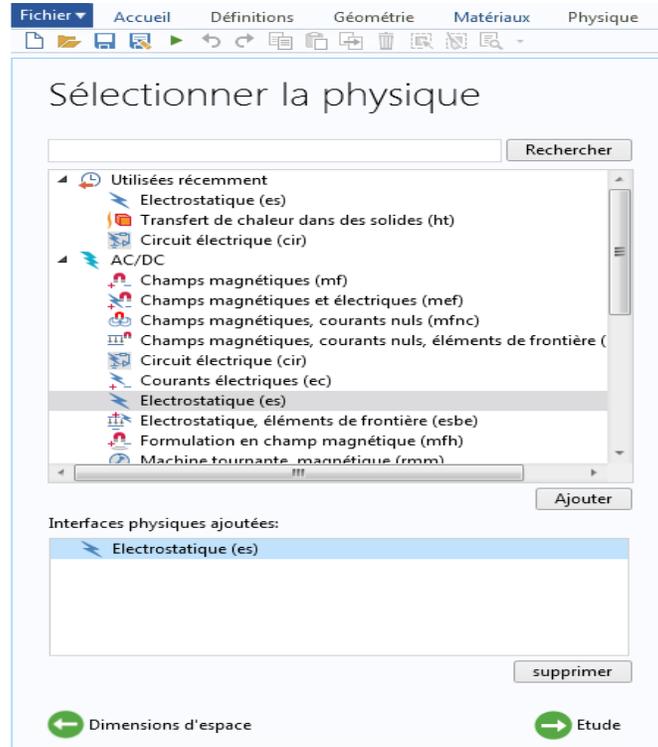
- On configure un modèle guidé par l'**assistant de modèle** comme indiqué dans la figure ci-dessous.



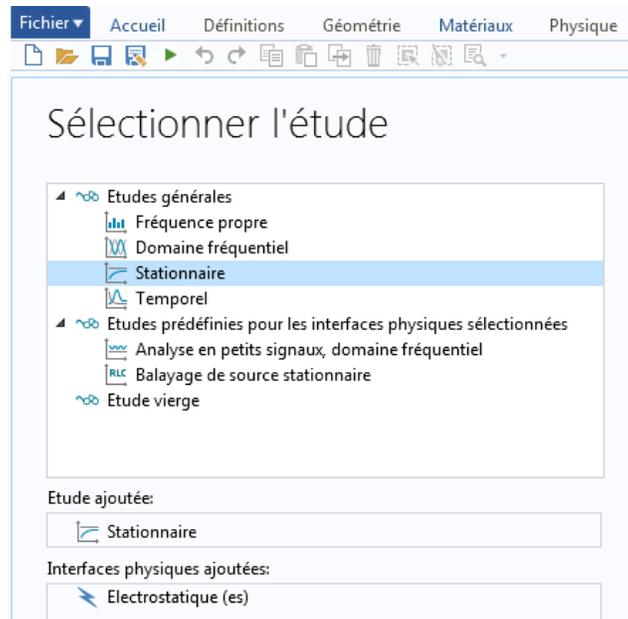
- On commence par sélectionner la dimension de l'espace pour notre composant de modèle **2D** comme il est indiqué sur la fenêtre suivante.



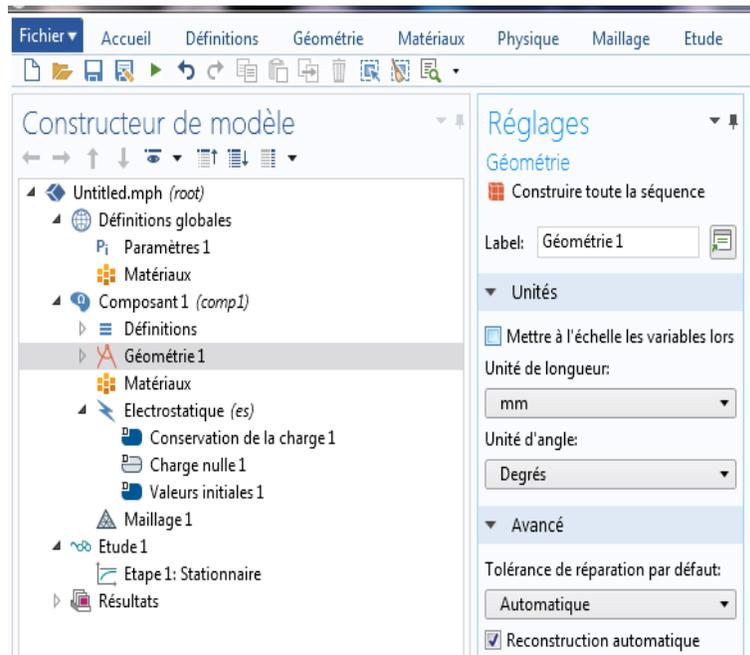
- On choisit **AC/DC** (électrostatique) à cause l'interface électrostatique est utilisée pour calculer le champ électrique, les distributions de potentiel dans les diélectrique dans des conditions ou la distribution des charges électriques est explicitement prescrite.



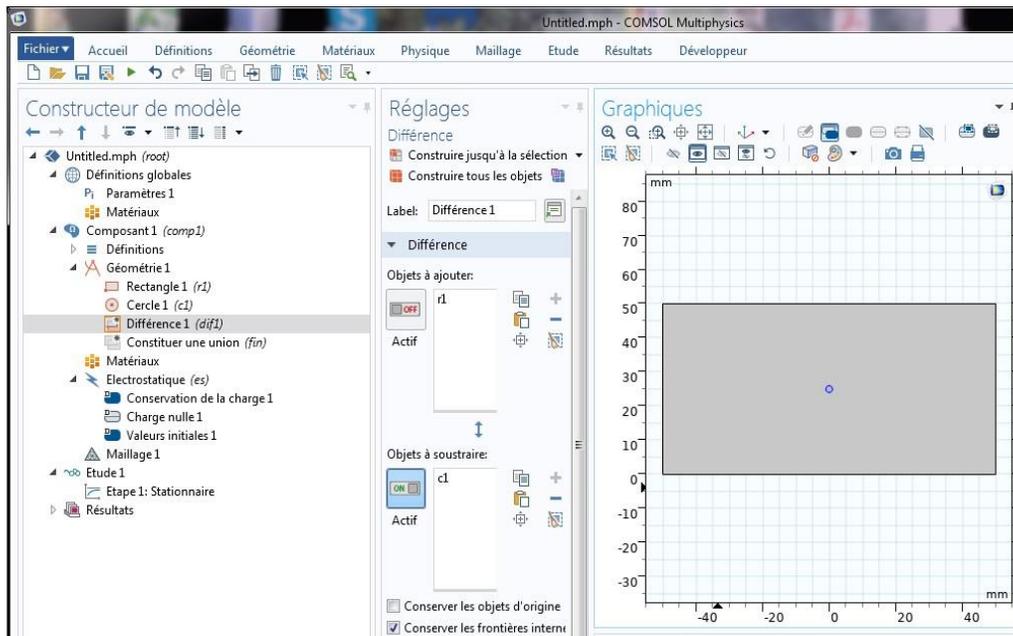
- On sélectionne l'étude **stationnaire** (on a utilisée l'étude stationnaire car les variables de terrain ne changent pas au fil du temps).



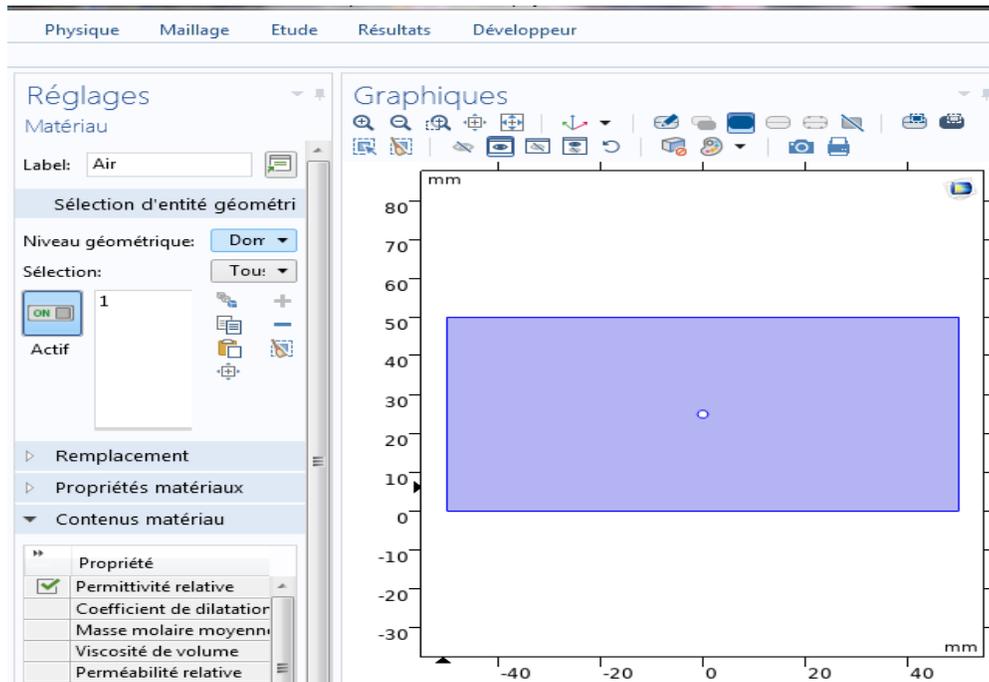
- Sous le nœud des unités, on clique sur **(mm)**.



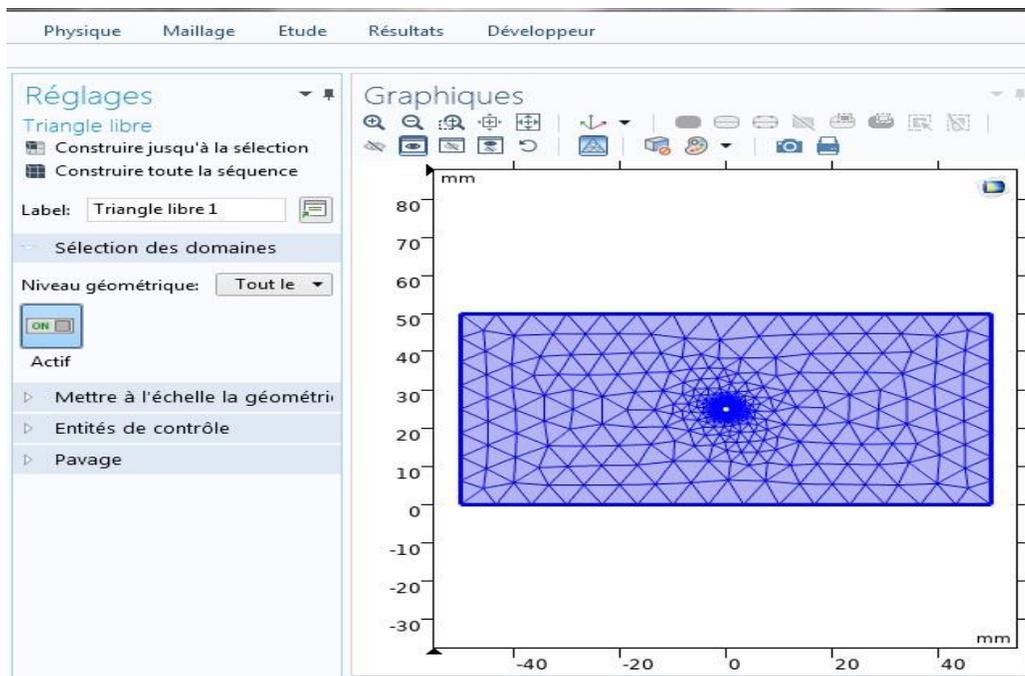
- Sous le nœud des géométries, on clique sur le bouton **(rectangle)** après **(cercle)** à l'intérieur et on règle taille et forme et la position on passe au **(Booléens et partitions)** et on choisit différence pour que le cercle soit vide à l'intérieur lorsque en simule.



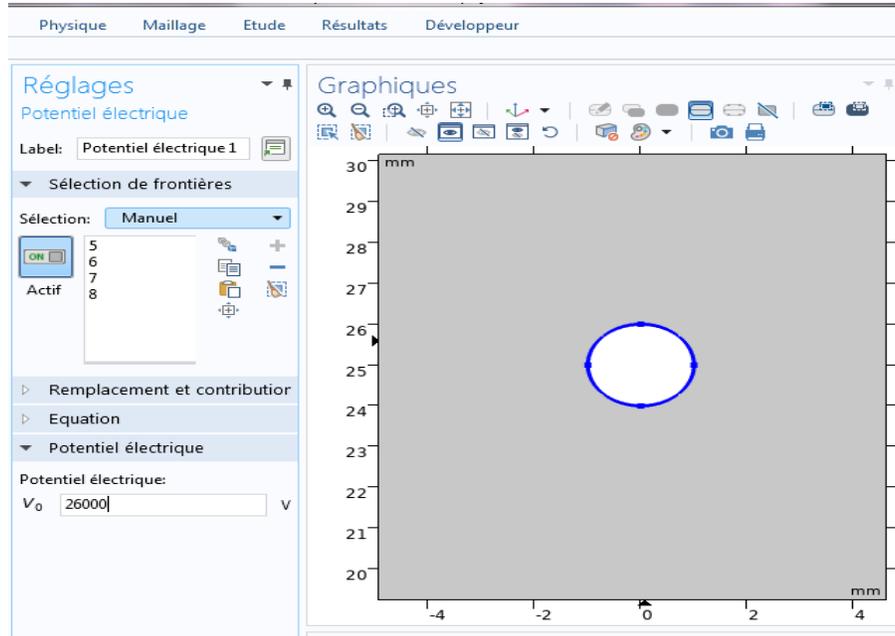
- On spécifié la nature du gaz isolant qui est dans notre cas **l'air**.



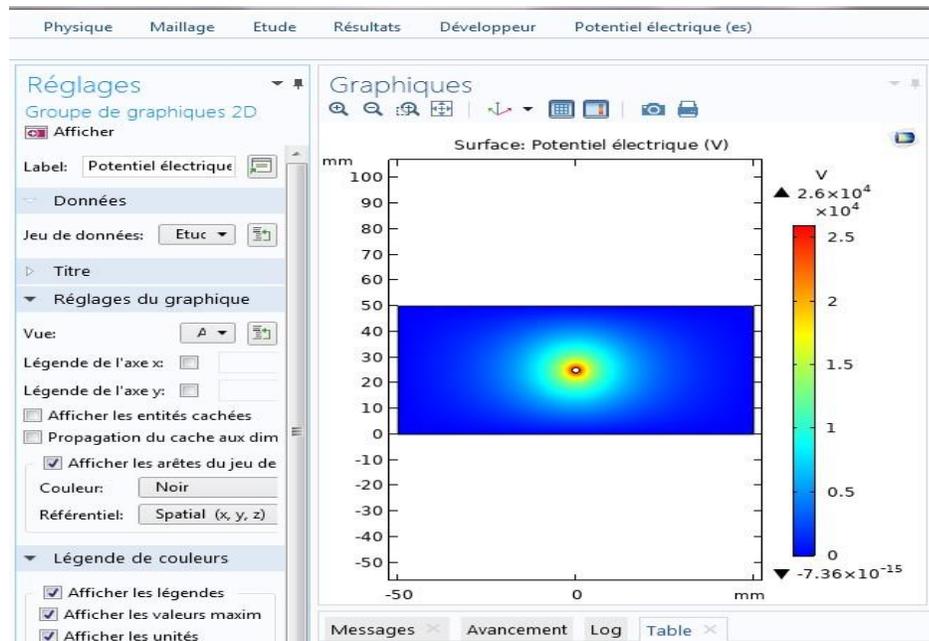
- Dans le générateur de modèles, on développe le nœud **maillage** on choisit l'élément triangulaire libre parce que on' a travaillé avec l'élément finie triangulaire pour cette représentation.



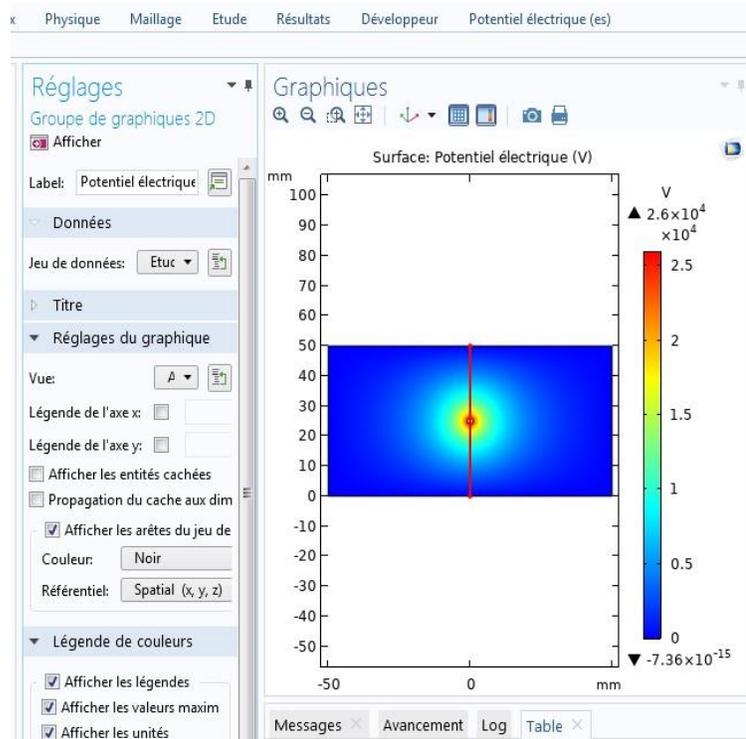
- Sous le nœud (**physique**) on clique sur (**frontières**) on va choisir potentiel flottant pour les trois segments du rectangle et en choisie la masse pour le quatrième segment qui remplace le plan (la base du rectangle). Le cercle qui remplace le fil est porté au potentiel appliqué V_0 .



- D'après la rubrique d'étude et de compilation on aura le résultat suivant.



- Sous le nœud (**potentiel électrique**), on clique sur le bouton **au premier point pour la ligne de coupe** on aura le résultat suivant.



Toutes ces étapes-là sont essentielles pour comprendre notre logiciel de simulation Comsol Multiphysique 5.4. Ici on n'a pas parlé sur les modèles mathématiques mais le paragraphe qui Vient juste après résume de manière très brève notre modélisation sous Comsol.

Au départ, on' a configuré un modèle guidé par l'assistant de modèle et on' a dessiné la géométrie fil-plan en 2D (à cause de la symétrie de révolution suivant l'axe z) et on y a spécifié les paramètres qui lui correspondent comme le rayon du fil et sa hauteur par rapport au plan H..., dans la rubrique paramètres.

On y a aussi spécifié la nature du gaz isolant qui est dans notre cas l'air, avec sa pression et sa température. Nous avons pris le soin de les choisir selon les conditions atmosphériques constatées lors de l'étude expérimentale.

En second lieu, Nous avons créé et aménagé deux modèles mathématiques à partir de La base de données incluse dans le logiciel. Notre choix s'est porté sur l'EDP (Équations aux Dérivées Partielles, forme générale), et l'équation de convection-diffusion.

En troisième partie, nous avons intégré toutes les conditions aux limites ainsi que les Hypothèses adoptées, et puis on l'a conditionné pour faire converger la solution, tout en Indiquant un processus itératif pour la charge d'espace sur la périphérie du fil.

Ceci résume de manière très brève notre modélisation sous Comsol, mais en réalité des

Variation et des paramètres aussi complexes y ont été introduit pour globaliser et traduire les conditions pratique du phénomène étudié. On peut donner une vue générale :

- 1- Rubrique de paramétrage.
- 2- Rubrique pour la définition des variables.
- 3- Rubrique pour les dessins géométriques.
- 4- Base de données des matériaux.
- 5- 1^{er} modèle mathématique (EDP forme générale).
- 6- 2^{ème} modèle mathématique (Équation de convection-diffusion).
- 7- Génération de maillage.
- 8- Rubrique d'étude et de compilation.
- 9- Dossier pour les résultats de simulation.

III.7. Caractéristique courant-tension prélevée :

Les valeurs de mesure de la caractéristique courant-tension ont été transcrites dans un code de calcul Matlab. Ensuite, ce dernier nous a calculé et affiché les deux caractéristiques courant/ tension que représente la **figure (III.11)**. Cette caractéristique montre qu'à un certain moment, il n'y a aucun passage de courant. Ce qui stipule que l'air n'est toujours pas ionisé et donc la tension appliquée demeure insuffisante. Mais près d'une certaine valeur, la caractéristique tend à être linéaire suite au courant récolté par la sonde. Cette valeur correspond à la tension seuil (V_s) et prône que l'effet couronne ne se manifeste qu'au-delà de son amplitude enregistrée. Et on voit que V_s pour les deux hauteurs $H=4$ cm et $H=5$ cm est partante presque de 11 kV. Avec quelques erreurs de mesures dues essentiellement aux matériels utilisés et aux conditions atmosphériques nous de notre cas ($P=1006$ Pa, $T=52^0$ à 68^0 et $U=56$ g/m³) avec : P = pression, T = température et U =humidité.

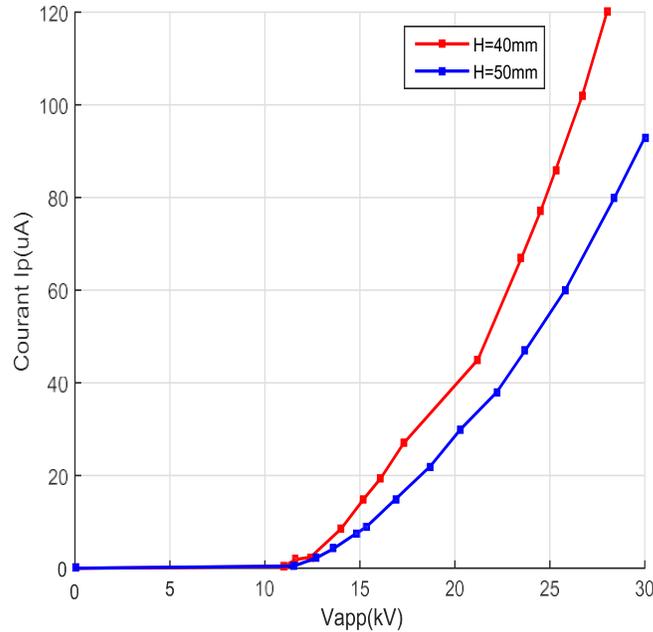


Figure (III.11): Caractéristique courant/ tension pour une géométrie fil-plan dans l'air à lapression atmosphérique pour H=4 cm et H=5 cm et V_{app}=26 kV.

III.8. Détermination des paramètres de la décharge couronne :

Cette étape du travail, consiste à prélever des courants nano-ampérométriques pour Différentes valeurs de tension V_a et de polarisation V_b afin de déterminé les paramètresclés de cette décharge à savoir le champ électrique E et la densité de courant J .

Par la suite, d'autres paramètres essentiels aussi pourront être déterminés en vue de conclue l'étude paramétrique expérimentale telle la densité de charge d'espace ρ , alors Qu'elle sera déterminée à partir du champ et de la densité de courant.

Cette expérimentation consistait à appliquer deux tension V_a sur l'électrode active, et En même temps imposé une basse tension sur l'électrode passive en vue de la polariser. Les courants I_s relevés sont stockés dans des matrices dans le programme de calcul duchamp, de la densité du courant et de la charge d'espace conçu sur Matlab, et les résultats obtenus sont soumise dans ce qui suit.

III.8.1. Détermination du champ électrique E :

Les figures (III.12) et (III.13) expose les valeurs moyennes du champ électrique pour différentes Valeurs de la tension appliquée (23-26 kV) et les hauteurs H=4 cm et H=5 cm. L'équation qui permet de calculer ce champ est l'équation (III-9) :

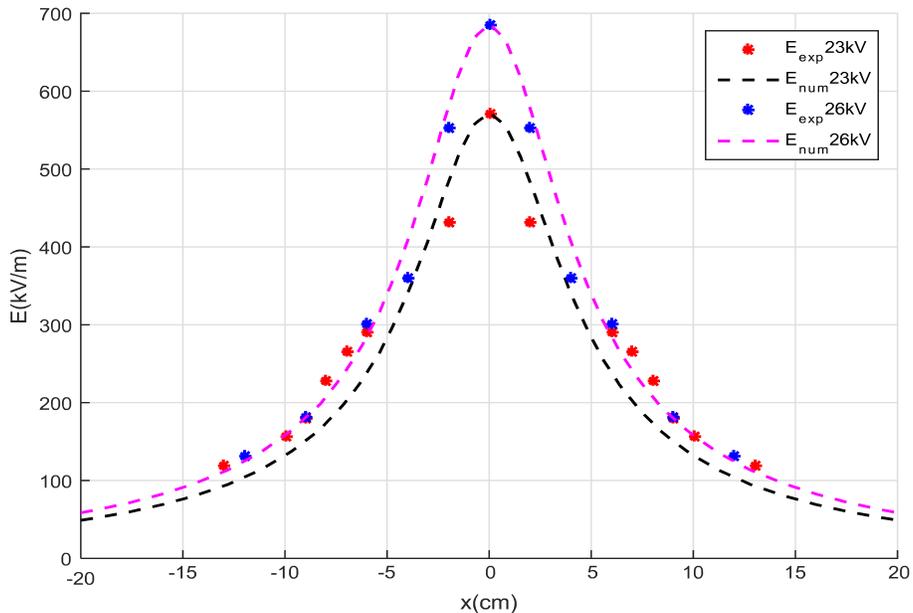
$$EMOY = \frac{Co. Vb}{\left(\frac{I_s}{I_{s0}} - 1\right) . Sm. \epsilon_0} \quad (III. 9)$$

Ceci promulgue que le champ électrique est proportionnel aux tensions de polarisations appliquées sur l'électrode passive, et c'est ce que confirme notre courbe.

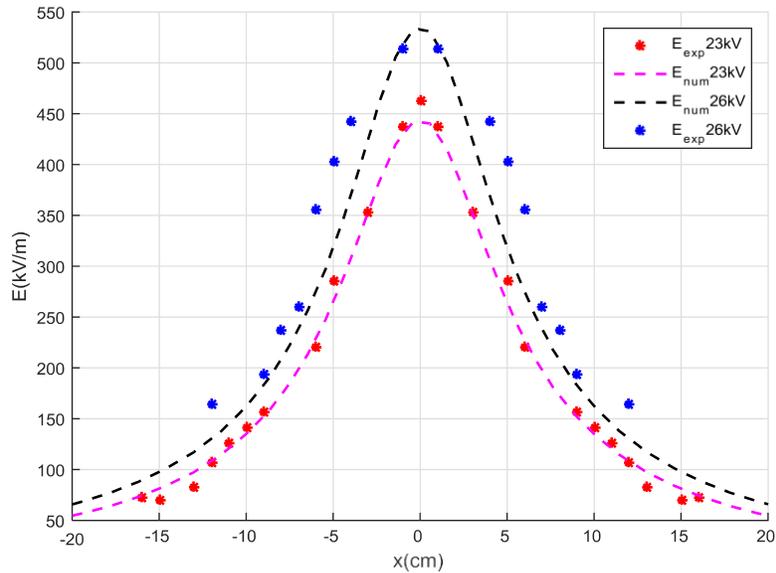
Les courbes montrent aussi que le champ ne dépend pas uniquement de la tension V_b , mais aussi de la distance inter-électrode. En effet, on faisant éloigner à l'aide du support coulissant le fil par rapport à la sonde circulaire, on constate que le champ diminue relativement. Et de par-là, on résume que le champ électrique présente une valeur maximale au-dessous du voisinage proche de l'électrode active ($x=0$), et diminue progressivement en s'éloignant du centre jusqu'à ce qu'il présente ses valeurs les plus minimales aux extrémités ($x=\pm 20$).

III.8.1.1. Influence de la tension sur la distribution de champ électrique E:

Pour savoir l'influence de la tension appliquée sur la distribution de champ électrique E, nous avons réalisé cette expérience en faisant fixer les tensions $V_{app}=23$ kV et 26 kV et varier les hauteurs $H=4$ cm et $H=5$ cm.



Figure(III.12) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour $H=4$ cm et $V_{app}=23$ et 26 kV.



Figure(III.13) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour $H=5$ cm et $V_{app}=23$ et 26 kV.

Interprétation :

L'analyse numérique de la distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour les tensions $V_{app}=23$ et 26 kV montre que le champ électrique présente une valeur maximale dans la partie expérimental et simulation qu'elle est égale à 700 kV/m pour $V_{app}=26$ kV et 580 kV/m pour $V_{app}=23$ kV d'une hauteur de $H=4$ cm , pour $h=5$ cm on a la valeur de champ calculé et simulé égale à 530 kV/m pour $V_{app}=26$ kV et 440 kV/m pour $V_{app}=23$ kV au-dessous du voisinage proche de l'électrode active ($x=0$), et diminues progressivement en s'éloignant du centre jusqu'à ce qu'il présente ses valeurs les plus minimales aux extrémités ($x=\pm 20$), et on voit une bonne approximation entre les valeurs expérimental et simulation dans la **Figure (III.12)** par contre la **Figure(III.13)** ces valeurs que on a obtenus dans la pratique et simulation ne sont pas parfait précisément pour $h=5$ cm et $V_{app}=26$ kV .On remarque par de ces deux figures que le champ électrique est influençable par la tension appliqué. Plus ce dernier est important, plus le champ est grand.

III.8.1.2. Influence de la hauteur sur la distribution de champ électrique E :

Dans le but de savoir l'influence de la hauteur sur la distribution de champ électrique E, nous avons réalisé cette expérience en fixant les hauteurs $H=4$ cm et $H=5$ cm et varier les tensions $V_{app}=23$ kV après $V_{app}=26$ kV.

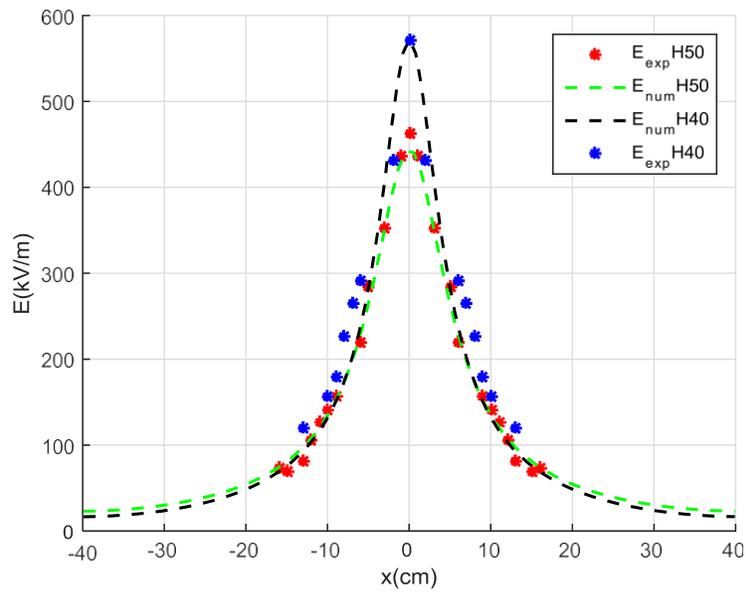


Figure (III.14) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=4 cm et H=5 cm pour $V_{app}=23$ kV.

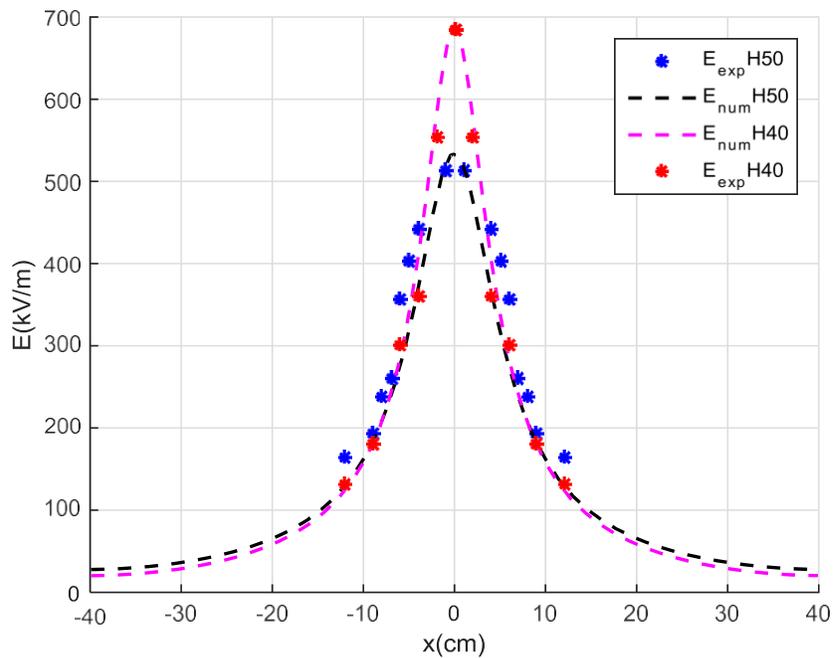


Figure (III.15) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour H=4 cm et H=5 cm pour $V_{app}=26$ kV.

Interprétation :

L'analyse numérique de la distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour les hauteurs $H=4$ cm et $H=5$ cm montre que le champ électrique présente une valeur maximale dans la partie expérimental et simulation qu'elle est égale à 580 kV/m pour $H=4$ cm et 480 kV/m pour $H=5$ cm pour $V_{app}=23$ kV, et 700 kV/m pour $H=4$ cm et 530 kV/m pour $H=5$ cm pour $V_{app}=26$ kV au-dessous du voisinage proche de l'électrode active ($x=0$), et diminues progressivement en s'éloignant du centre jusqu'à ce qu'il présente ses valeurs les plus minimales aux extrémités ($x=\pm 40$), et on voit une bonne approximation entre les valeurs expérimental et simulation dans la **Figure (III.14)** et la **figure (III.15)**. On remarque par de ces deux figures que le champ est influençable par la hauteur. Plus ce dernier est important, plus le champ est plus grand.

III.8.1.3. Comparaison entre la partie expérimentale et la partie simulation :

Après voir calcule le champ électrique les courbes obtenues pour différents variations des hauteurs et des tensions sont données comme suit :

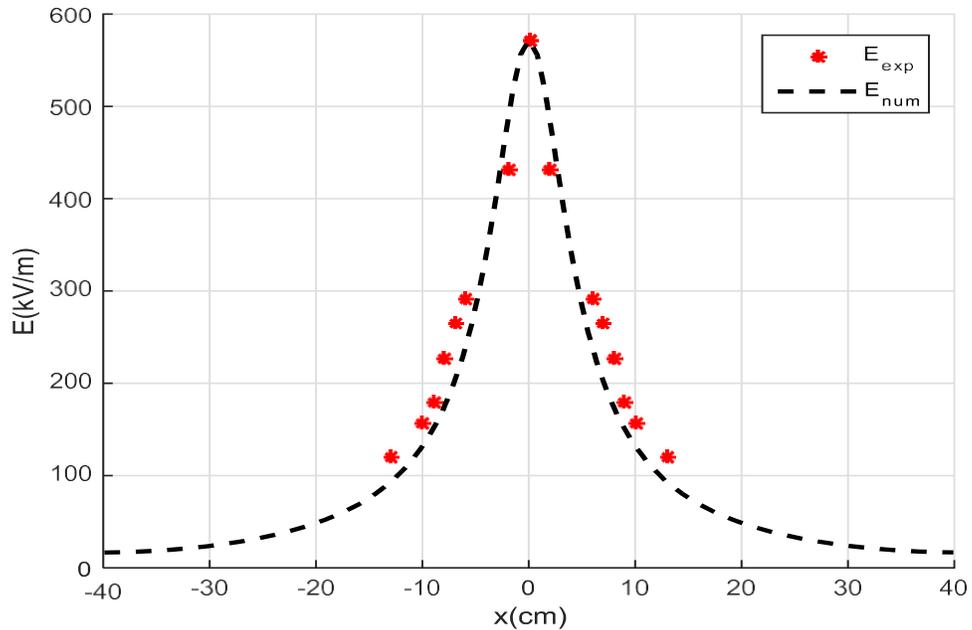


Figure (III.16) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour $H=4$ cm et $V_{app}=23$ kV.

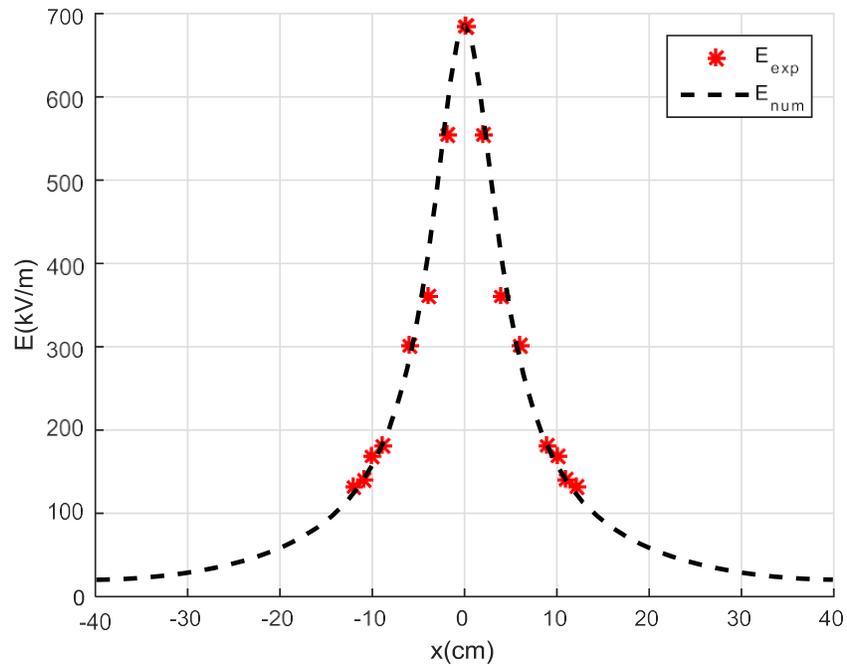


Figure (III.17) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour $H=4$ cm et $V_{app}=26$ kV.

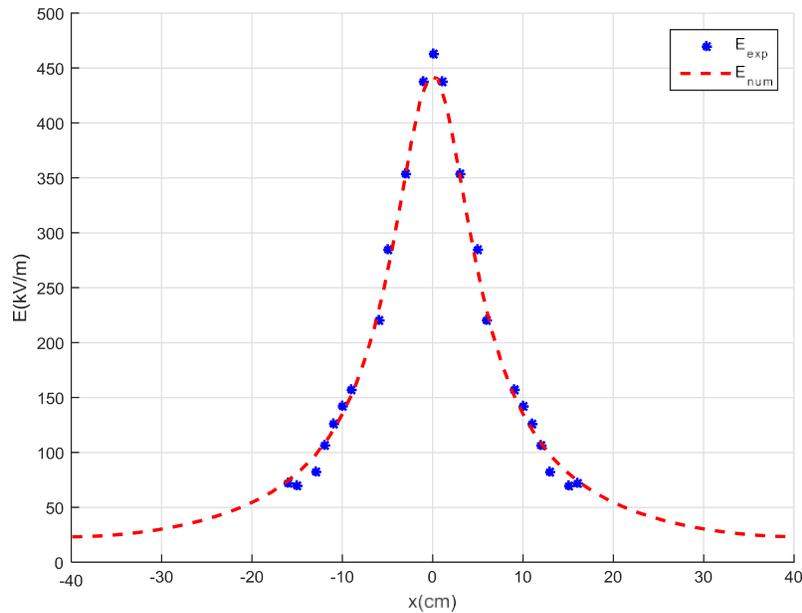


Figure (III.18) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour $H=5$ cm et $V_{app}=23$ kV.

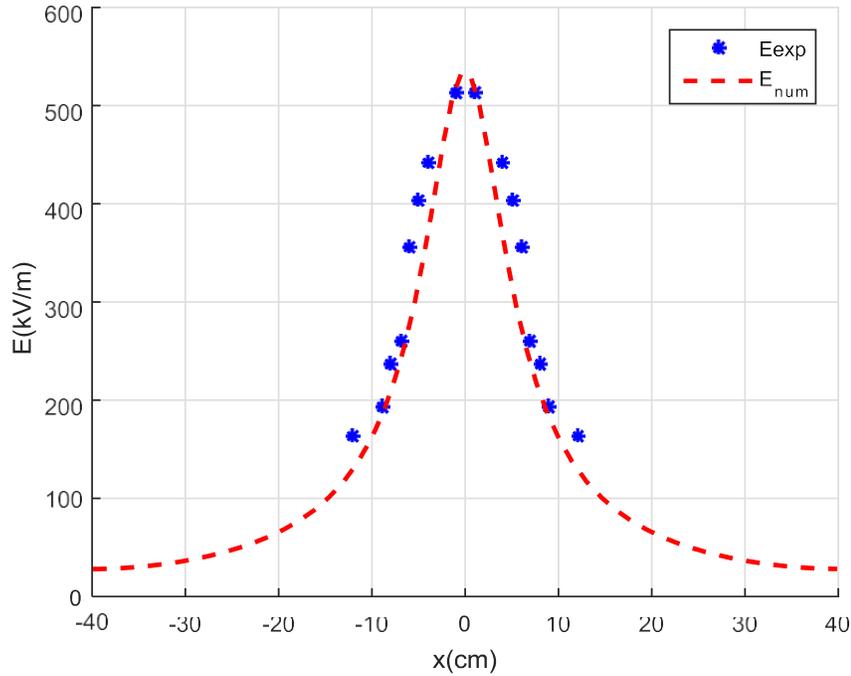


Figure (III.19) : Distribution du champ électrique sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour $H=5$ cm et $V_{app}=26$ kV.

Interprétation :

Les quatre figures montrent une distribution du champ électrique sous forme d’une cloche, composée de plusieurs valeurs admettant un maximum au niveau de l’endroit le plus proche du fil qui correspond à $x=0$. Puis une diminution en amplitude successive en s’éloignant du centre $x=0$ et allant vers les extrémités. Les valeurs expérimental et celle de simulation sont presque identique .on remarque que la valeur de champ électrique pour $H=4$ cm est plus grande par rapport au $H=5$ cm pour les deux tensions $V_{app}=23$ kV et 26 kV qui explique l’influence de champ électrique, plus la tension est grande et la hauteur est courte, plus le champ est grand.

III.8.2. Détermination de la densité de courant J :

Les valeurs de J sont calculées à partir de l’équation (III-10), qui donne la densité du Courant en fonction du courant I collecté par la sonde circulaire et de la surface moyenne de cette dernière :

$$J = \frac{I}{S_m} \tag{III-10}$$

Les **figures (III.20)**, jusqu'à **(III.23)** expose la distribution de la densité de courant dans la géométrie fil -plan, pour les distances $H=4$ cm et $H=5$ cm et pour deux pics de tensions appliquées $V_{app}=23$ kV et 26 kV, sans tension de polarisation pour le plan mis à la terre qui constitue l'électrode passive ($V_b=0$). Elle montre une distribution sous forme d'une cloche, composée de plusieurs valeurs admettant un maximum au niveau de l'endroit le plus proche du fil qui correspond à $x=0$. Puis une diminution en amplitude successive comme le cas du champ électrique en s'éloignant du centre $x=0$ et allant vers les extrémités.

III.8.2.1. Influence de la tension sur la distribution de la densité de courant J:

Dans le but de savoir l'influence de la tension sur la distribution de la densité de courant J, nous avons réalisé cette expérience en fixant les tensions $V_{app}=23$ kV et 26 kV et varier les hauteurs $H=4$ cm après $H=5$ cm.

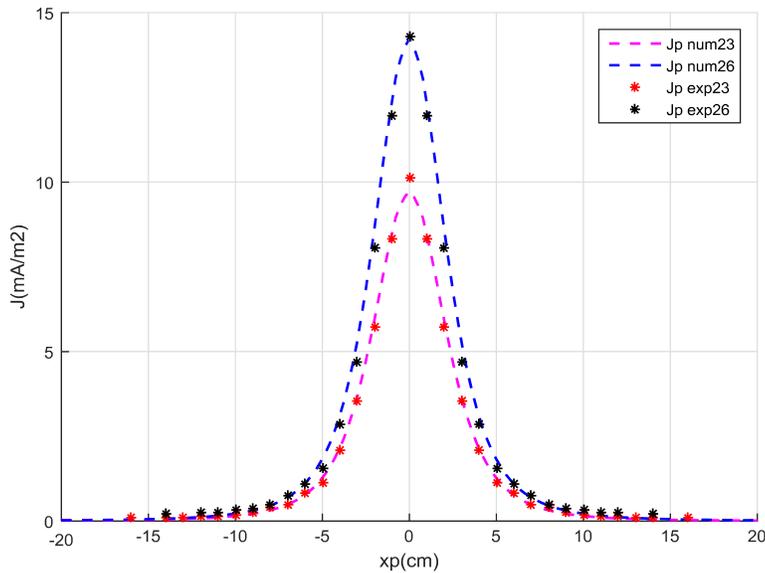


Figure (III.20) : Distribution de la densité de courant sur le plan de mesure pour la géométrie fil-plan pour $H=4$ cm et $V_{app}=23$ et 26 kV.

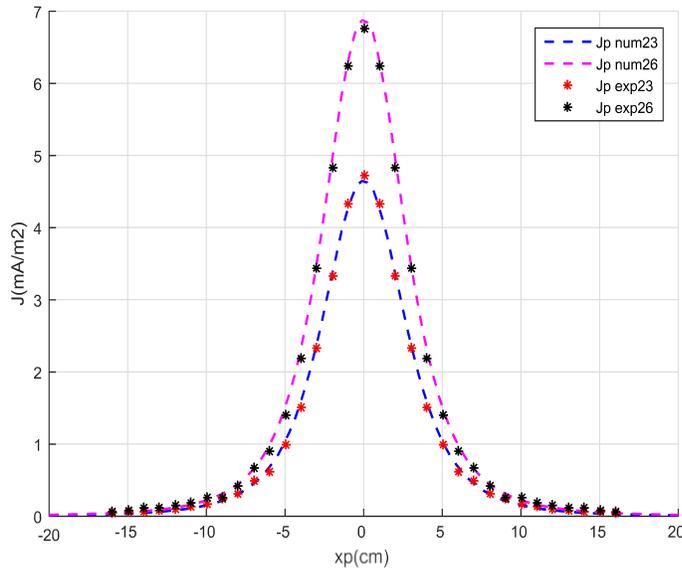


Figure (III.21) : Distribution de la densité de courant sur le plan de mesure pour la géométrie fil-plan pour $H=5$ cm et $V_{app}=23$ et 26 kV.

Interprétation :

L'analyse numérique de la densité de courant sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour les tensions $V_{app}=23$ et 26 kV. Elle montre une distribution sous forme d'une cloche, composée de plusieurs valeurs admettant un maximum au niveau de l'endroit le plus proche du fil qui correspond à $x=0$ pour $H=4$ cm $J_{exp26}=14 \text{ ma/m}^2$ et $J_{exp23}=10 \text{ ma/m}^2$ pour $H=5$ cm $J_{exp26}=6.9 \text{ ma/m}^2$ et $J_{exp23}=4.8 \text{ ma/m}^2$ et on voit que les résultats sont totalement identique entre la pratique et simulation. Puis une diminution en amplitude successive comme le cas du champ électrique en s'éloignant du centre $x=0$ et allant vers les extrémités. On remarque par ces deux figures que le courant est influençable par la tension. Plus ce dernier est important (grand), plus la densité et plus grande.

III.8.2.2. Influence de la hauteur sur la distribution de la densité de courant:

Dans le but de savoir l'influence de la hauteur sur la distribution de la densité de courant J , nous avons réalisé cette expérience en fixant les hauteurs $H=4$ cm et $H=5$ cm et varier les tensions $V_{app}=23$ kV après $V_{app}=26$ kV.

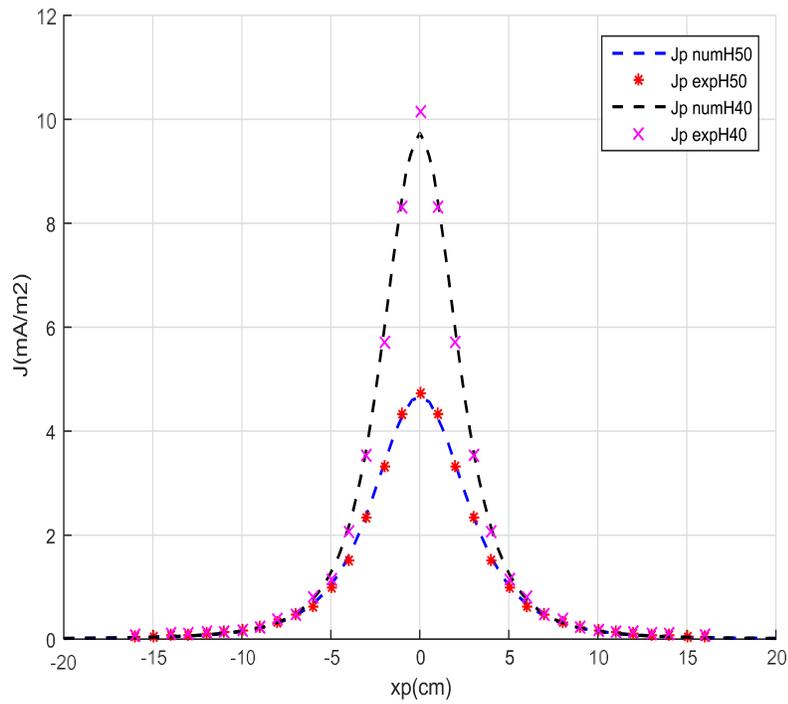


Figure (III.22): Distribution de la densité de courant J pour la géométrie fil-plan pour $H=4$ cm et $H=5$ cm pour $V_{app}=23$ kV.

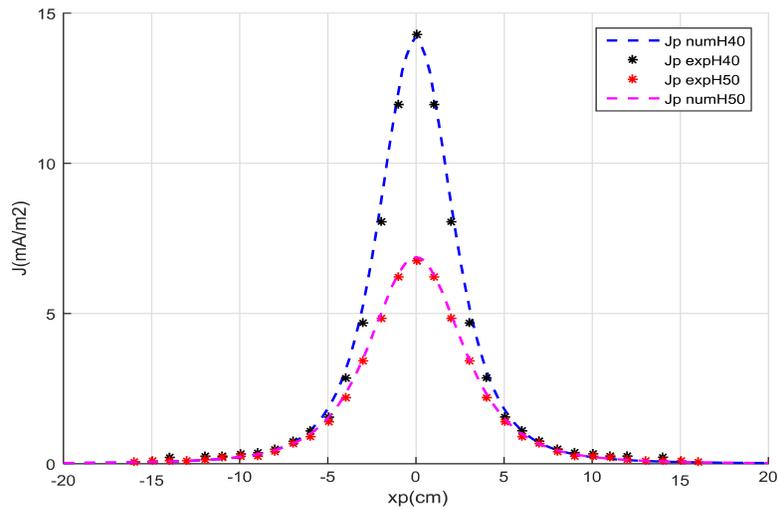


Figure (III.23): Distribution de la densité de courant J pour la géométrie fil-plan pour $H=4$ cm et $H=5$ cm pour $V_{app}=26$ kV.

Interprétation :

L'analyse numérique de la densité de courant sur le plan de mesure en géométrie fil-plan pour les hauteurs $H=4$ cm et $H=5$ cm. Elle montre une distribution sous forme d'une cloche, composée de plusieurs valeurs admettant un maximum au niveau de l'endroit le plus proche du fil qui correspond à $x=0$, pour $V_{app}=23$ kV $J_{exp4}=10$ ma/m² et $J_{exp5}=4.5$ ma/m² et pour $V_{app}=26$ kV $J_{exp4}=14$ ma/m² et $J_{exp5}=7$ ma/m² lorsque on compare les valeurs de la densité de courant au-dessous de voisinage ($x=0$). On voit une grande différence ce derniers signifie que la valeur de la densité pour $H=4$ cm est plus grand par rapport à $H=5$ cm. On conclut que le courant est influençable par la hauteur plus ce derniers est important (court), plus la densité et plus grande.

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié la distribution du champ électrique E et de la densité de courant J de la décharge couronne produite par une configuration fil-plan.

Par la suite, nous avons réalisé un programme de simulation par Comsol Multiphysics 5.4, en y intégrant notre système d'équations. Ce programme tient compte de la méthode des éléments finies et consiste à trouver les valeurs de E et de J de façon itérative jusqu'à ce que la condition sur le champ électrique au niveau de la périphérie du fil soit satisfaite.

Lors de notre simulation, l'hypothèse de Deutsch n'a pas été prise en considération. Elle fausse les résultats et conduit à un mauvais dimensionnement lors des conceptions technologiques. Par contre l'hypothèse de Kaptzov a été adoptée et posée comme condition d'arrêt pour la procédure itérative de résolution. Vers la fin de cette partie, une étude comparative des résultats de simulation et ceux d'expérimentation y a été mise en œuvre, ce qui vérifie que tous les résultats obtenus sont satisfaisants, même s'il y a des erreurs de calcul, qui sont négligeables par rapport aux résultats numériques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de ce présent travail est consacré à l'étude de la décharge couronne mono polaire dans l'air à la pression et température atmosphérique. Il est constitué principalement de trois chapitres. Le premier chapitre constitue l'étude théorique de la décharge couronne. On y a introduit quelques connaissances bibliographie de bases pour connaître les théories et les constatations nécessaires qui gravitent autour de ce phénomène. Le deuxième chapitre est en réalité modèle mathématique de la décharge couronne on l'a commencé par la formulation mathématique du problème couplé champ électrique –densité de courant et on a expliqué ses étapes de résolution. Le dernier chapitre présente la partie expérimentale et simulation numérique de la décharge couronne on a expliqué aussi de manière brève notre programme de simulation. Puis, on a comparé les résultats de simulation avec ceux de la partie expérimentale.

L'étude expérimentale a été menée au laboratoire de la haute tension de l'université de Bejaia. En utilisant un dispositif fil-plan construit au cours de cette année. La technologie de mesure utilisée été celle de la sonde polarisée de Tassicker qui a donc été mise en place sur la configuration fil-plan. Les mesures que nous avons effectuées sont les courants récoltés par la sonde polarisée pour différentes tensions de polarisation du plan de mesure, qui sont par la suite, transcrit dans un code de calcul sous Matlab pour avoir le champ électrique, la densité de courant de la décharge couronne continue positive au niveau du plan.

Durant la troisième tâche de notre travail, nous avons développé un code numérique basé sur la méthode des éléments finies et conçu sous environnement Comsol Multiphysique 5.4, en vue de résoudre la problématique champ électrique –densité de courant de la décharge couronne, pour déterminer les distributions des différents paramètres électriques de la décharge dans l'espace inter-électrode.

Les distributions du champ électrique et de la densité de courant sur l'électrode plane présentent toutes un même profil (Cloche). En effet, les valeurs les plus élevées sont relevées sous le conducteur actif. En s'éloignant du centre $x = 0$, ces valeurs tendent vers l'annulation. Ces valeurs sont fortement influencées par les tensions appliquées et les hauteurs. Plus la hauteur de l'électrode active par rapport au plan de mesure est petite plus les paramètres de la décharge sont imposants.

Le programme informatique mis en œuvre permet de calculer différents paramètres électrique (champ électrique, densité de courant, etc...) sur le plan de décharge couronne. Il permet également de visualiser les différentes distributions des paramètres précités dans tous l'espace inter-électrodes, en tenant compte des conditions atmosphérique et des coordonnées géométrique du système à étudier. Les simulations effectuées montrent qu'il existe un bon accord entre les résultats expérimentaux et les prédictions théoriques.

Références bibliographiques

Bibliographie

Bibliographie

- [1] R. Farhi, C. Morel, G. Chéron «Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité». INRS, ED638, Octobre 2006.
- [2] M. Handala. Mohand-Amokrane «Étude de la décharge de surface sous tension Alternative 50 Hz : effet sur une interface isolante air/solide». Thèse de doctorat d'Etat, UMM T.O, décembre 2007.
- [3] Julien. Jarrige «Étude expérimentale des décharges électriques impulsionnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, février 2008.
- [4] Gueller-B Veverka-A « Les processus impulsionnels dans les machines électriques », ENERGUIYA, Moscou, 1976.
- [5] Myriam. Hamel, B.SC.A. «Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne». Thèse de doctorat de l'Université du Québec à Chicoutimi, 1991.
- [6] Daill. Guillaume. FOURNAUD. Benoît «Décharges couronne application et Modélisation». Énergétique industrielle ESIP 2004/2005.
- [7] Carl. Potvin «Comportement et effet de la charge d'espace sur les mécanismes des vibrations induites par effet de couronne». Mémoire d'ingénieur de l'université de Québec, mars 2000.
- [8] Brahim. Benamar «La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en Poussières de bois : étude expérimentale et numérique». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [9] Hamoumeche. K «Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une Décharge couronne en géométrie pointe-plan». Mémoire de magister, UMMTO, décembre 2009.
- [10] G.N Alelsandrov, « les décharges de couronne dans les lignes de transport d'énergie », 1964.
- [11] R. Farhi, C. Morel, G. Chéron «Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité». INRS, ED638, Octobre 2006.
- [12] Myriam. Hamel, B.SC.A. «Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne». Thèse de doctorat de l'Université du Québec à Chicoutimi, 1991.

Bibliographie

- [13] Myriam. Hamel, B.S.C.A. «Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne». Thèse de doctorat de l'Université du Québec à Chicoutimi, 1991.
- [14] Brahim. Benamar «La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [15] Brahim. Benamar «La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [16] Alyen. Abahazem «Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz». Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III – Paul Sabatier Décembre 2009.
- [17] Ibrahima. Ndiaye «Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace». Mémoire d'ingénieur, université Québec, mai 2003.
- [18] Lê Vinh HOANG «Comparaison des rendements énergétiques de dégradation de trois composés organiques par plusieurs procédés d'oxydation avancés en milieu aqueux». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, avril 2009.
- [19] Stéphan. Eymerie «Etude expérimentale des décharges atmosphériques générées par impulsions nanosecondes : application aux traitements des particules de suie Diesel». Thèse de doctorat de l'université de Rouen, avril 2003.
- [20] F.Bitam-Megherbi «Etude d'une isolation combinée huile/papier isolant Approche non destructive». Thèse de doctorat d'état en électrotechnique. UMM, T-O, décembre 2007.
- [21] Hamoumeche.K «Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan». Mémoire de magister, UMMTO, décembre 2009.
- [22] Jérôme JOLIBOIS «Étude et développement d'un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique-Application au contrôle d'écoulement sur profil d'aile». Thèse de doctorat de l'université de Poitier, décembre 2008.
- [23] M.Aguet et M.Lanoz et Nasser al «Traité d'électricité : Haute Tension», vol XXII 2ème édition 2004.

Bibliographie

- [24] anne-Marie Pointu « décharge électrique ». Technique de l'ingénieur, D322.1980.
- [25] Jean-Loup Delcroix « gaz ionisés et plasmas ». Technique de l'ingénieur, D320.1980
- [26] A.Labergue « étude décharge électrique dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas. Application au control de décollement et d'écoulement ». Thèse de doctorat de l'université de Poitier, novembre 2005.
- [27] J. Delacroix, A. bers « physique des plasmas ». Paris, inter édition/CNRS Edition1993.
- [28] C. Tendero, C. Texier, P.Trissant, J. Desmaisou, P. Leprine « Atmospherie pressure plasmas : A.review ». Spectrochimica Acta, Part B, 2005.
- [29] Les renardières, « L'amorçage des grands intervalles d'air en polarité positive » Conférence internationale des grands réseaux, 1977.
- [30] Ibrahima Ndiaye, « Les propriétés diélectriques de l'air 6 DIG 967 » ; Université de Chicoutimi du Québec, Département des sciences appliquées, Revue des modèles mathématiques de décharge dans l'air, 2003.
- [31] I. W. Mcallister, G.C grichton, and E. Bregnsbo «experimental study on the onset of positive corona ice atmospheric». J, Appl Physic 50 (11), 6791-6805, 1979.
- [32] F.W. Peek « diélectrique phenomena in light-voltage engineering». 3rd Mc Graw-Hill, New York, 1929.
- [33] Zibin. LU « Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharge électrique de type filamentaire ». Thèse e doctorat de l'universite PARIS VI, décembre 1991.
- [34] K. allegraud « décharge a barrière diélectrique de surface : physique et procède ». Thèse de doctorat, école polytechnique, 2009.
- [35] R. papoular, « phénomène électrique dans les gaz ».
- [36] L.B. Loeb, 1947, fundamental processes of electrical discharge in Gases, John Wiley sons, INC ,new york.
- [37] J.K.Meek , 1940, Phys . Rev, vol. 57, pp. 722-728.
- [38] E. Badareu , I. popescu , 1984 , « Gaz ionise : décharge électrique dans les gaz » Edition DUNOD , paris.
- [39] H.Reather , 1941, zeit .phys, vol. 117, PP. 394-524.

Bibliographie

- [40] E.Nasser , 1971 , fundamentals of gaseous Ionization and plasma electronics, Wiley edition , New york.
- [41] B.KHADDOUR, « modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée », thèse de doctorat de l'INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble), (2006).
- [42] J.Chang , Phil A.Lawless, and T. Yamamoto « corona Décharge processes » , IEEE Transaction on plasmas science , vol 19 , n°6 , p. 1152-1166 ,(1991).
- [43] J.JOLIBOIS « Etude et développement d'un actionneur plasma à déchargé à barrière diélectrique-application au contrôle d'écoulement sur profil d'aile ».Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, décembre 2008.
- [44] Flavien. Koliatene « contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III-Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.
- [45] D. Dubois « réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III-Paul Sabatier, le 20 septembre 2006.
- [46] M. Handala « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz : une interface isolante air/solide », thèse de doctorat UMMT.O, décembre 2007.
- [47] H. Yala, A. Kasdi, Y. zebboudj, « measurement of current and electric field distributions beneath a positive DC wire-to-plane corona » European physic journal applied, vol21, pp 45-52, 2003.
- [48] L. Dascalescu, « An introduction to ionized gases, theory and applications », livre pp 65-67 Toyohashi University of Technology, Japon1993.
- [49] J.F. Loiseau, J. Batina, F.Noël, R. Peyrous, « Hydro-dynamical simulation of the electricwind generated by successive streamers in a pointe-to-plan reactor », J. Phys. D: Appl; Phys. Vol. 35, pp 1020-1031. 2002.
- [50] Ait Said Hakim, «Influence de l'humidité sur la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique d'aérosols », thèse de doctorat, de l'université de Bejaia, 2015/2016.
- [51] Sayah H, Brahami m, Bendaoud A &Rahli M (2004) "Vibrations éoliennes des câbles aériens", La 1re Conférence Nationale sur l'Electrotechnique et ses Applications, Sidi Bel-Abbès, Algérie, Mai 2004.

Bibliographie

- [52] M.Farzaneh, "Effects of the intensity of precipitation and transverse wind on the corona induced vibration of HV conductors", IEEE, Vol. 7, No. 2, April 1992.
- [53] Gourbi, Abdelkader (2008) Mécanisme des vibrations induites par effet de couronne Université Djillali Liabes de Sidi bel Abbes - Magister 2008.
- [54] Carl Potvin, " Comportement et effet de la charge d'espace sur le mécanisme des vibrations induites par effet de couronne ", Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, université de Chicoutimi, Canada, mars 2000.
- [55] Farzaneh M & Teisseyre Y (1988), "Mechanical vibration of HV conductors induced by corona: roles of the space charge and ionic wind", IEEE, VOL, 3, 3 July 1988.
- [56] Myriam Hamel, "Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne", Mémoire comme exigence partielle de La maîtrise en ingénierie, université de Chicoutimi Canada, août 1991.
- [57] Y. Zebboudj, G. Hartmann, « Current and electric field measurements in coaxial system during the positive DC corona in humid air », Eur. Phys. J. AP 7, pp, 167-176, 1999.
- [58] Y. Sunaga, 1978, Study Committee IEE Japan , ED-79-15.
- [59] W. Janischewskyj , G.Gela , 1979, IEEE.trans. Power Appl. And systems, Vol.98, PP. 1000-1012.
- [60] W. Janischewskyj , G.Gela , 1980, IEEE. Meeting at Montréal, PP. 1-3.
- [61] T. Takuma, T. Ikeda, T. Kawamoto, 1987, IEEE trans. power. Deliv, vol .2, pp.189-198.
- [62] T.Takuma, T. Ikeda, T. Kawamoto, 1981, IEEE Trans. Power Appl .and systems ,VOL.100,PP . 4802-4810.
- [63] M. Abdel-Salam , M.foughali , S. Abdel-Sattan , 1983 , IEEE Trans. Elect .Ins ,Vol.18 ,PP . 110-119.
- [64] M.Aboelsaad, L.Shafai, M.Rashwan, 1989, IEE Proc., Vol. A-136, PP. 79-86.
- [65] R. I. Waters, T. E. Richard, W. B. Stark, 1972, IEE Conf .Publ, Vol. 90, PP.188-190 .
- [66] M. Abdel-Salam, Z.Al-Hamouz, 1994, IEE Proc., Sci . Meas. Technol., Vol.141,PP.369-378.
- [67] Z.Al-Hmouz, 1998,Elect .Power Syst .,Res ., Vol . 48, PP. 57-63.

Bibliographie

- [68] J. L. Davis and J. F. Hoburg, "Wire-duct precipitator field and charge computation using finite element and characteristics methods", *J. Electrostat.*, vol. 14, pp. 187-199, 1983.
- [69] J. L. Davis and J. F. Hoburg, "HVDC Transmission Line Computations Using Finite Element and Characteristic Methods", *J. Electrostat.*, vol. 18, pp. 1-22, 1986.
- [70] M.Abdel-salam, Z.Al-Hamouz, 1993, *J.Phys. D: Appl. Phys.*, Vo. 125, PP. 1551-1555.
- [71] W. Deutsch, "Über die dichtevertelung unipolarer ionenstrome", *Ann. Phys.*, vol. 408, no. 5, pp. 588-612, 1933.
- [72] V. I. Popkov, "On the Theory of Unipolar DC Corona", *Elektrichestvo*, vol. 1093, no. 1, pp. 33-48, 1949.
- [73] R. S. Sigmond, "The unipolar corona space charge flow problem", *J. Electrostatics*, vol. 18, pp. 249-272, 1986.
- [74] H. Wintle, "Unipolar wire-to-plane corona: accuracy of simple approximations", *J. Electrostatics*, vol. 28, pp. 149-159, 1992.
- [75] N. A. Kaptzov, *Elektricheskie laxieniaa v Gazach i Vakuume*, Moscow:OCIZ, pp. 587-630, 1947.
- [76] Y. Zebboudj, G. Hartmann, 1999, *Eur. Phys. J. Appl.*, vol. 7, pp. 167-176.
- [77] Ray W.CLOUGH ET Edward L.WILSON. Early finite Element Research, Berkeley,USA.
- [78] A.Kasdi, 2007, « Etude théorique et expérimentale de la décharge couronne bipolaire », thèse de doctorat, Uni, A .Mira de Bejaia, Algérie.
- [79] McDonald, J.R., Smith, W. B. et Spencer. "A [90] model for calculating electrical conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices". *Journal Applied Physics* Vol. 48(6) (1978), pp. 2231-2243.
- [80] J. L. Davis and J. F. Hoburg, "Wire-duct precipitator field and charge computation using finite element and characteristics methods", *J. Electrostat.*, vol. 14, pp. 187-199, 1983.
- [81] J. L. Davis and J. F. Hoburg, "HVDC Transmission Line Computations Using Finite Element and Characteristic Methods", *J. Electrostat.*, vol. 18, pp. 1-22, 1986.
- [82] R. S. Sigmon, 1986, *J. Electrostat.*, Vol.18,PP. 249-272.
- [83] J. E. Jones, "A Theoretical Explanation of the Laws of Warburg and Sigmond", *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol. 453 (1960), pp. 1033-1052 (1997).
- [84] X. Deng, K. Adamik, 1999, *IEEE Trans. Ind . Appl.* Vol. 35, PP. 767-773.
- [85] Feynmann,, 1979, cours de physique de feynmann, *Électromagnétisme* 1,interEdition.
- [86] Fred Gardial, 1979, *Traite d'électricité* Vol .III, *Électromagnétisme*, Éditions Georgie.
- [87] A.Kasdi, 2007, « Études théorique et expérimentale de la décharge couronne bipolaire », thèse de Doctorat, Uni. A.Mira de Bejaïa, Algérie.
- [88] O.J.Tassickers , 1974, *Proc. IEE*, 121, n⁰ 03 , pp. 213-220.

Bibliographie

- [89] M. Aissou, 2013, Thèse de Doctorat, Université A. Mira de Bejaia, Algérie.
- [90] Y. Zebboudj, 1988, Thèse de Doctorat, Uni. Paris VI.
- [91] A. Bouziane, G.Hartmann, k. Hidaka, M. C. Taplamaciaglu, R. T. Waters, 1994, IEE Proc., Vol. 141, PP. 111-117.
- [92] A. Bouziane, G.Hartmann, J. E. Jones, Y. Zebboudj, 1988, I.C.G.D.A. IX Venesia, Italy, pp. 527-530.
- [93] A. Bouziane, k. Hidaka, J. E. Jones, A. R. Rowlands, M. C. Taplamaciaglu, R. T. Waters 1994, part.1 IEE Proc., Sci., Meas. Technol., Vol. 141, PP. 197-204.
- [94] A. Bouziane, k. Hidaka, J. E. Jones, A. R. Rowlands, M. C. Taplamaciaglu, R. T. Waters 1994, part.2 IEE Proc., Sci., Meas. Technol., Vol. 141, PP. 205-214.
- [95] R. Ikene, 1997, Thèse de Magister, Uni. A. Mira de Bejaia, Algérie.
- [96] Y. Zebboudj, R. Ikene, Positive corona inception in HVDC configurations under variable air density and humidity conditions, EPJ-Applied Physics, Vol. 10 N° 3, June 2000, pp. 211 – 218.
- [97] Y. Zebboudj, R. Ikene and G. Hartmann, Linear-geometry electric-field probe for DC corona measurements and application for field distribution in wire-to-plane geometry, EPJ-Applied Physics, Vol. 6 N° 2, May 1999, pp. 195 – 203.
- [98] Y. Zebboudj, "Measurements of the current and electric field distributions beneath a positive DC wire-to-plane corona using a linear biased probe", Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol.147, No.2, pp. 74-80, 2000.
- [99] R. Ikene, 1997, Thèse de Magister, Uni. A. Mira de Bejaia, Algérie.
- [100] M. Abdel-Salam, "Influence of humidity on charge density and electric field in electrostatic precipitators", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 25, pp. 1318-1322, 1992.