

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADIMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

**Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES**

*Présenté par*

**BEN MESLI Ouiza**  
**BOUARABA Samia**

Thème

Effet de la pression sur les caractéristiques d'une  
décharge couronne sous tension continue.

*Mémoire soutenu publiquement le 23/09/2018 devant le jury composé de :*

**M Salah HADDAD**  
Professeur, UMMTO, **Président**

**M M'hand MEKIOUS**  
MAA, UMMTO, **Encadreur**

**M Mohammed MEGHERBI**  
Professeur, UMMTO, **Examineur**

**M Mustapha MOUDOUD**  
MCA, UMMTO, **Examineur**

## **REMERCIEMENTS**

*Le présent travail a été réalisé au laboratoire haute tension de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur **MEKIOUS.M**, pour son appréciable aide, sa grande disponibilité, et ses précieux conseils.*

*Nous remercions vivement Monsieur **HADDAD.S**, Professeur à l'UMMTO pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant d'être président du jury.*

*Nos vifs remerciements vont également à Monsieur **MEGHERBI.M**, Professeur à l'UMMTO pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Nous remercions vivement Monsieur **MOUDOUD.M**, Maître de conférences A à l'UMMTO pour ses conseils et pour avoir accepté de faire partie du jury.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous **les enseignants** du département d'électrotechnique qui tout le long de notre cursus, nous ont transmis leur savoir sans réserve.*



*\*Je dédie ce modeste travail :*

A la mémoire de ma grande- mère que son âme repose en paix, et que j'aime beaucoup.

A mes très chers parents **AMAR ;SADIA** qui ont su être à mes côtés dans les moments difficile sans lesquels je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'ils m'ont procuré, fasse dieu que je puisse les honorés.

A mon cher frère **SAID** .

A ma cher sœur **NASSIMA**.

A mon très chère Fiancé **NOURREDINE**, qui a toujours été à mes côtés sans lui demander, Ses sacrifices, son soutien moral et matériel.

A la mémoire de mes grands-parents.

A mon oncle **AHMED** et ma tante **OUARDIA** que j'aime beaucoup et ses fils et ses filles.

A mon beau-père **MOHAMMED** et ma belle-mère **FATIMA**.

A ma belle-sœur **KHADIJA** et beaux-frères.

A mes meilleures amies **LAMIA ;SAIDA ;THIZIRI**.

A toute les personnes que j'aime et qui font partie de ma vie.

A Mon amie et binôme **BEN MESLI OUIZA** ainsi que sa famille.

A toute la promotion **2018**.

**SAMIA BOUARABA.**

# DEDICACES

☞ *Tout vient à point à ceux qui sait attendre, avec du temps et de la patience on réussit, on obtient ce qu'on désire.* ☞

*En vue de l'obtention du diplôme de master, je dédie ce modeste travaille en signe de respect et d'amour, on particulier à :*

*Mes chers parents pour leur amour, sacrifices et leurs soutiens durant tout mon parcours. Que dieu le tout puissant les protège.*

*Mes chers tendre sœurs 🌸 Hayat, Koura, Marie, Ikram et l'aimable Lynda 🌸 .*

*Mes chers frères 🌸 Saad, Hicham, Izyassen 🌸 .*

*Mes beaux-frères 🌸 Djamel, Samir et mon cher Rabeh 🌸 .*

*Mes belles sœurs 🌸 Razika, Farida 🌸 .*

*Aux petits anges de ma famille 🌸 Sidyas, Mazigh, Makšen, Ilyane, Aksil, Mouhamed, Ritadj et Malika 🌸 .*

*A mes chers 🌸 Abdenour, Dyhia, Massinissa, Sekoura et Youcef 🌸 pour leurs présence et encouragement, leurs patience et soutien.*

*Mes amis 🌸 Nora, Samia, Sarah, Nina, Radia, Marie, Sihem, Ouafi, Omar et smail 🌸 .*

*A tous ceux qui m'ont soutenue de près ou du loin, pour la réalisation de ce travail et toute la promotion Electrotechnique (2017/2018).*

*B. Ouiza*

## *Liste des figures*

Figure I.1 : L'état des particules dans un gaz et dans un solide .....	4
Figure I.2 : Effet de la pression dans un gaz .....	4
Figure I.3 : Le phénomène de collision électron molécule .....	6
Figure I.4 : Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour générer la décharge couronne..	14
Figure I.5 : Régimes de décharges d'une décharge électrique .....	15
Figure I.6 : L'avalanche électronique.....	17
Figure I.7 : Photographie dans une chambre .....	19
Figure I.8: Le principe de fonctionnement du streamer .....	20
Figure I.9 : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit p.d .....	23
Figure II.1 : Photographie de la décharge couronne par une caméra ICCD dans une configuration pointe-plan dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour une distance inter-électrodes de 8mm et tension appliquée de 8kV, $\rho=20 \mu\text{m}$ . a) tension continue, b) tension impulsionnelle avec $f=100\text{Hz}$ et $\tau=40\mu\text{s}$ , temps d'exposition : 10 ms.....	27
Figure II.2 : Trois exemples de configurations de réacteur couronne couramment utilisés ....	28
Figure II.3 : conducteur aérien cylindrique.....	28
Figure II.4 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter-électrode : 13 mm).....	30
Figure II.6 : Champ électrique dans l'espace inter-électrode en présence d'un diélectrique non chargé (a) et totalement chargé (b).....	32
Figure II.7 : Topographie de la décharge couronne en configuration pointe plan.....	33
Figure II.8 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne	34
Figure II.9 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes.....	35
Figure II.10 : Distribution du champ dans un système plan-plan (A) et dans un système pointe-plan(B) .....	36
Figure II.11 : Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression .....	37
Figure II.12 : Descriptif de la décharge couronne positive.....	39
Figure II.13 : Descriptif de la décharge couronne négative .....	40

Figure II.14 : Conducteur haute tension alimenté en courant alternatif.....	42
Figure II.15 : La forme de la goutte d'eau placée sur un conducteur .....	42
Figure II.15: Le parafoudre.....	44
Figure II.17 : Un filtre électrostatique.....	45
Figure II.18 : Un séparateur électrostatique.....	45
Figure III.1 : Montage expérimental .....	47
Figure III.2 : La cellule d'essais.....	48
Figure III.3 : Photos des électrodes utilisées : (a) électrode plane, (b) électrode pointue.....	49
Figure III.4 : Schéma électrique permettant de tracer une caractéristique courant-tension d'une décharge couronne pointe plan positive.....	49
Figure III.6. Ampèremètre numérique .....	50
Figure III.7 : Dispositif de mesure de la pression « Baromètre » .....	50
Figure III.8. Source de tension continue .....	51
Figure IV.1. Caractéristique I-V d'une décharge négative .....	53
Figure IV.2. Caractéristique I-V d'une décharge positive .....	54
Figure VI.3. Caractéristique I-V en polarité positive et négative de la pointe.....	55
Figure IV.5. Caractéristique I-V d'une décharge négative .....	57
Figure IV.6. Caractéristique I-V d'une décharge négative .....	57
Figure IV.7. Caractéristique I-V d'une décharge négative .....	58
Figure IV.8. Caractéristique I-V d'une décharge négative .....	58
Figure IV.9. Caractéristique I-V d'une décharge positive .....	59
Figure IV.10. Caractéristique I-V d'une décharge positive .....	60
Figure IV.11. Caractéristique I-V d'une décharge positive .....	60

**Liste des tableaux**

- Tableau I.1** : Tableau représente les paramètres caractéristiques des décharges dans les gaz.....8
- Tableau I.2** : Tableau représente les paramètres caractéristiques des décharges dans les gaz ...15

## *Liste des abréviations et symboles*

$\epsilon_0$  : Constante diélectrique ( $8.85 \cdot 10^{-12}$  f/m).

$m_p$  : La masse du proton ( $1.6725 \cdot 10^{-27}$  kg).

$q_p$  : La charge du proton ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C).

$m_e$  : La masse d'électron ( $9.1019 \cdot 10^{-31}$  kg).

$q$  : La charge d'électron ( $-1.6 \cdot 10^{-19}$  C).

$\delta$  : Nombre d'atomes/unité de volume.

$\lambda$  : (lpm) Libre parcours moyen.

$N$  : nombre des particules pour une unité de volume.

$r_1$  : Diamètre de la particule bombardé.

$r_2$  : Diamètre de la particule bombardant.

$\sigma$  : Section efficace de collision avec  $\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2$ .

$v$  : La vitesse quadratique moyenne de la particule.

$T$  : La température thermodynamique.

$K$  : Constante de Boltzmann ( $K = 31. 10^{23} J/k$ ).

$m$  : La masse de particule.

$v'$  : vitesse de  $m$  après le choc.

$V$  : vitesse de  $M$  après choc.

$e$  : Charge élémentaire d'un électron.

$V_i$  : Potentiel d'ionisation.

$W_i$  : est l'énergie qui retient l'électron dans l'orbite de l'atome.

$W_c$  : Energie cinétique  $J$ .

$\Delta W$  : Energie supplémentaire cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

$W_{ex}$  :Energie d'excitation.

$V_{ext}$  : Potentiel d'excitation.

$V_{ext}$  : Potentiel d'excitation.

$h$  : Constante de Planck (  $h = 6.625.10^{-34} J.S$  ).

$\vartheta$  : Fréquence du photon.

$W_p$  : Energie du photon.

$W_{th}$ : Energie thermique absorbée.

$\vartheta_s$  : Fréquence de seuil d'ionisation.

$D_e$  : Coefficient de diffusion électronique.

$n_e$  : Densité électronique.

$\Gamma$  : est le nombre de particules qui traversent par seconde une aire unitaire dans la direction de X.

$u$  : La vitesse de dérive cm/s.

$E$  : Le champ électrique appliqué kV/cm.

$w$  : vitesse d'agitation thermique.

$P$  : La pression atmosphérique.

$\alpha$ : Le premier coefficient d'ionisation de Townsend.

$vi$  : est la vitesse de développement d'une avalanche.

$d$  : la distance inter-électrode cm.

$U_c$  : tension de claquage kV.

$E_c$  : Du champ critique (en champ alternatif) en (kV/cm).

$r$  : Rayon du conducteur en (cm).

$\delta$  : Densité relative de l'air.

$E_0$ : Valeur de crête du champ E en conditions normales.

I : courant électrique.

$m_1$  : Coefficient qui tient de l'état de surface du conducteur.

$m_2$  : Coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs.

$U$  : Tension appliquée à la pointe.

$x$  : Distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m).

$R_e$ : Rayon de l'électrode externe (m).

$R_i$ : Rayon de l'électrode interne (m).

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

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

N<sub>2</sub> : Azote.

CO<sub>2</sub> : le dioxyde de carbone.

SF<sub>6</sub> : l'hexafluorure de soufre.

DBD : décharge à barrière électrique.

# *Sommaire*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I : Généralités sur les décharges dans les gaz**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Notion sur les gaz.....	3
I.2.1. Constitution de l'atome.....	3
I.2.2. Mouvement des particules dans le gaz.....	3
I.2.3. Pression du gaz.....	4
I.2.4. Libre parcours moyen.....	4
I.2.5. Théorie cinétique des gaz.....	5
I.2.6. Electrons primaires.....	5
I.2.7. Phénomènes de collision.....	5
I.2.7.1. Collision élastique.....	6
I.2.7.2. Collision inélastique.....	7
I.3. Processus d'ionisation et d'excitation.....	7
I.3.1. Ionisation par collision.....	8
I.3.1.1. Ionisation.....	8
I.3.1.2. Excitation.....	8
I.3.1.3. Désexcitation.....	8
I.3.1.4. Photo-ionisation.....	9
I.3.1.5. Ionisation thermique.....	9
I.3.1.6. Ionisation par les atomes métastables.....	9
I.3.2. La photo ionisation.....	10
I.3.3. Phénomènes dé-ionisants.....	10
I.3.3.1. Recombinaison.....	10
I.3.3.2. Détachement.....	10
I.3.4. Diffusion.....	10
I.3.5. Mobilité des charges dans un champ électrique.....	11
I.4. Phénomènes de décharges dans les gaz.....	12
I.5. Généralités sur les décharges électriques.....	12
I.5.1. Les décharges luminescentes (décharges « glow »).....	13
I.5.2. Les décharges couronne.....	13
I.5.3. Les décharges à barrière diélectriques.....	14
I.6. Régimes de décharge dans un gaz.....	15

I.7. Caractéristique du Claquage dans les gaz .....	16
I.7.1. Avalanche électronique (décharge Townsend) .....	16
I.7.2. Théorie du canal (Streamer) .....	18
I.7.2.1. Streamers positifs .....	20
I.7.2.2. Streamers négatifs .....	21
I.8. La loi de Paschen .....	23
I.8.1. Interprétation de la courbe de Paschen : (pd constante) .....	23
I.9. Conclusion .....	24

## **Chapitre II : Etude de la décharge couronne**

II.1. Introduction .....	25
II.2. Définition de la décharge de couronne .....	25
II.2.1. Conditions d'apparition .....	26
II.3. Etude spectroscopique de la décharge couronne dans une configuration pointe-plan .....	27
II.3.1. Généralités .....	27
II.3.2. Différentes géométries d'électrodes .....	27
II.4. Tension d'apparition de l'effet couronne .....	28
II.4.1. Calcul du champ critique (formule de Peek) .....	28
II.4.2. Tension de seuil d'apparition de l'effet couronne .....	29
II.5. Propriétés spécifiques aux décharges couronne .....	29
II.5.1. Caractéristique courant-tension et régimes de décharge .....	29
II.5.1.1. Champ électrique et topographie de la décharge .....	30
II.6. Mécanisme de décharge couronne géométrie pointe-plan .....	33
II.7. Paramètres influençant la décharge couronne .....	33
II.7.1. Facteurs géométriques .....	33
II.7.1.1. Rayon de la courbure .....	33
II.7.1.2. Distance inter-électrodes .....	33
II.7.1.3. La nature des électrodes .....	34
II.7.1.4. La forme d'électrodes .....	35
II.7.1.5. Etat de surface .....	35
II.7.2. Les facteurs physico-chimiques .....	35
II.7.2.1. La densité de l'air .....	35
II.7.2.2. La température .....	36
II.7.2.3. L'humidité .....	36
II.7.2.4. La pression .....	36
II.7.3. Facteurs électriques .....	37
II.7.3.1. Influence du type de la tension appliquée .....	37

II.7.3.2. Effet de polarité sur le processus de développement de la décharge couronne ..	38
II.8. Phénomènes induits par la décharge couronne .....	40
II.8.1. Effets électromagnétiques .....	40
II.8.2. Effet chimique.....	40
II.9. Pertes couronne dans les réseaux.....	41
II.9.1. Nature des pertes.....	41
II.9. Les applications industrielles de la décharge de couronne .....	42
II.10. Avantages de la décharge couronne dans un réseau .....	43
II.10.1. Parafoudre .....	43
II.10.2. Neutralisation .....	44
II.10.3. Filtre électrostatique.....	44
II.10.4. Séparateur électrostatique .....	44
II.11. Problèmes liés aux décharges couronne .....	45
II.12. Conclusion .....	46

### **Chapitre III : Etude expérimentale**

III.1. Introduction .....	47
III.2. Description du montage expérimental.....	47
III.3. Dispositif expérimental .....	47
III.4. Cellule d'essai .....	48
III.5. Dispositif de mesure.....	49
III.6. Autres matériels utilisés .....	49
III.7. Matériaux utilisés .....	51
III.8. Mode opératoire .....	51
III.9. Principe et configuration de la décharge .....	51
III.10. Conclusion.....	52

### **Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussions**

IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Influence de la distance inter-électrodes .....	53
VI.2.1. En polarité négative de la pointe .....	53
IV.2.2. En polarité positive de la pointe .....	54
IV.2.3. Influence de la polarité de la pointe .....	55
IV.3. Effet de la pression.....	56
IV.3.1. En polarité négative de la pointe .....	56

IV.3.2. En polarité positive de la pointe .....	58
IV.4. Conclusion .....	61
<b>Conclusion générale</b> .....	62

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Une des conséquences indésirable du transport de l'énergie électrique à de hauts niveaux de tension est l'apparition de l'effet couronne. Ce phénomène se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse qui apparait autour des conducteurs de la ligne entourés par l'air, lorsque ceux-ci sont portés à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique dépasse le seuil d'apparition de l'effet couronne.

La décharge couronne se produit principalement sur les conducteurs de lignes, mais aussi sur les parties métalliques aigues reliées à la haute tension, telles que l'isolateur, surtout par le temps humide.

La décharge couronne s'est initialement révélée par ses effets nuisibles (pertes dans les lignes de transport d'énergie HT, perturbation radioélectrique, etc...), mais rapidement, on a su en tirer profit. Elle trouve ses applications dans de nombreux domaines tels que la chimie des plasmas.

Les phénomènes observés durant la décharge couronne sont optiques, électriques et radioélectrique. Ils dépendent d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels on peut citer.

- Les paramètres électriques : nature et polarité de tension appliquée à l'électrode de faible rayon de courbure ;
- Les paramètres physiques : nature, pression et température du gaz constituant l'espace inter-électrodes ;
- Les paramètres géométriques : forme et dimensions des électrodes ainsi que la distance séparant ces dernières.

L'étude faite dans le présent mémoire se fixe pour but de comprendre l'effet de la pression sur la décharge couronne. Pour cela, nous avons jugé utile de répartir notre travail en quatre chapitres.

Le chapitre premier est consacré aux mécanismes de décharge dans le gaz qui sont interprétés sur la base de deux modèles : les décharges de Townsend et les décharges par streamers.

Une présentation assez développée sur les différents aspects qui régissent les propriétés de la décharge couronne, en géométrie pointe-plan fera l'objet de deuxième chapitre.

Le troisième chapitre présentera la méthodologie et le dispositif expérimental utilisés dans ces investigations. Les équipements de test seront présentés dans une première section, alors qu'une seconde sera consacré aux paramètres expérimentaux.

Le quatrième chapitre est réservé à la présentation des résultats expérimentaux obtenus, leur discussion et leur interprétation.

Nous terminerons par une conclusion générale.

# *Chapitre I : Généralités sur les décharges dans les gaz*

## I.1. Introduction

Les gaz constituent un des éléments de base de l'isolation à haute tension des matériels électriques. L'air est le plus disponible, le plus utilisé et par-dessus le marché il est gratuit, il a une constante diélectrique  $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} \text{ f/m}$ .

Dans les gaz, le nombre d'électrons libres et d'ions qui sont créés de manière naturelle est très faible par exemple dans l'atmosphère terrestre le nombre des paires électron/ion générées par le rayonnement naturel est presque  $10^7$  par mètre cube et par seconde et à l'état permanent la concentration en ions est de l'ordre de  $10^9$  par mètre cube, dans ces conditions, l'application d'un champ électrique, au-dessous d'une valeur critique induit un très faible courant. En pratique l'air se comporte donc comme un isolant (résistivité électrique de presque  $10^3 \Omega.m$ ). A partir d'une valeur critique du champ électrique (champ disruptif) l'air s'ionise fortement et présentera une conductivité entre particules et ce phénomène se développe pour provoquer une décharge électrique, c'est ce que nous allons essayer d'expliquer dans ce première chapitre en nous basant sur quelques phénomènes physiques et électriques.

## I.2. Notion sur les gaz

### I.2.1. Constitution de l'atome

Le noyau renferme :

- Des protons :  $m_p = 1.6725. 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $q_p = 1.6 * 10^{-19} \text{ C}$
- Des neutrons :  $m_p = 1.6748. 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $q = 0 \text{ C}$

Les électrons gravitent autour du noyau :

$$m_e = 9.1019. 10^{-31} \text{ kg} ; q = -1.6. 10^{-19} \text{ C}$$

A l'état fondamental, l'atome est neutre :

- S'il libère un électron il devient un ion positif :  $A - 1 e \rightarrow A^+$
- S'il gagne un électron devient un ion négatif :  $A + 1 e \rightarrow A^-$

**Remarque** : Le photon est un quantum d'énergie (au repos  $m=0$  ;  $q=0$ ) [1].

### I.2.2. Mouvement des particules dans le gaz

Le mouvement des particules dans le gaz est libre, contrairement au solide qui est masse compacte car les particules sont reliées entre elles par des liaisons cristallines fortes [1].

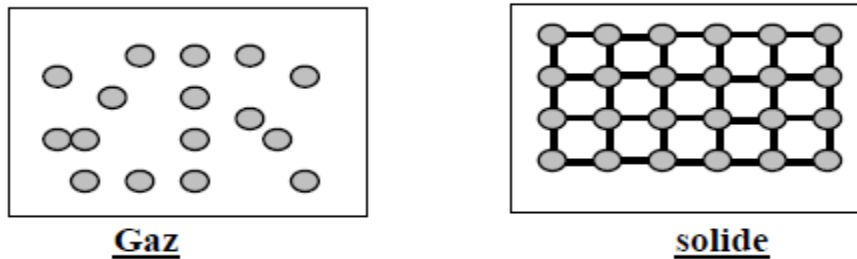


Figure I.1 : L'état des particules dans un gaz et dans un solide [1].

### I.2.3. Pression du gaz

La pression  $p$  est proportionnelle à la densité atomique  $\delta$ .

$\delta$  : Nombre d'atomes/unité de volume

$\lambda$  : Libre parcours moyen ( $l_{p.m}$ ) qui est la distance séparant deux particules voisines [1].

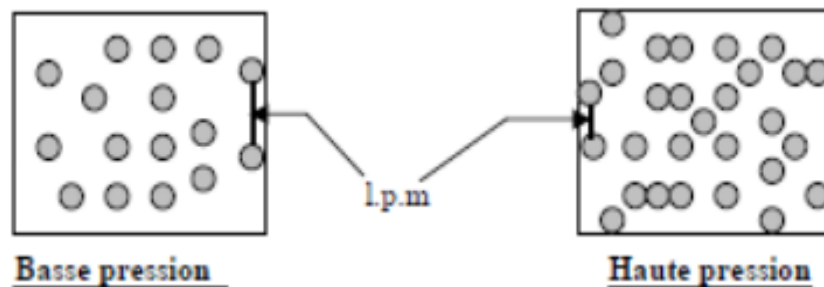


Figure I.2 : Effet de la pression dans un gaz [1].

### I.2.4. Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen ( $l_{p.m}$ ) est la distance moyenne que peut parcourir un électron entre deux chocs successifs. C'est une quantité aléatoire et sa valeur moyenne dépend de la concentration des particules ou de la densité du gaz. Cette notion est intéressante car si l'électron accéléré par le champ électrique acquiert une énergie cinétique suffisante, il pourra alors ioniser ou exciter la molécule neutre rencontrée.

$$\lambda = \frac{1}{N\pi(r_1 + r_2)^2} = \frac{1}{N\sigma} \quad (I.1)$$

Avec :

$N$  : nombre des particules pour une unité de volume ;

$r_1$  : Diamètre de la particule bombardé ;

$r_2$  : Diamètre de la particule bombardant ;

$\sigma$  : Section efficace de collision avec  $\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2$ .

### I.2.5. Théorie cinétique des gaz

A l'équilibre, et en l'absence de forces extérieures, un gaz est constitué d'un ensemble de particules uniformément réparties, dont les vitesses n'ont aucune direction privilégiée. L'énergie de chaque peut être stockée sous différentes formes, énergie de translation dans le cas d'un atome, énergie de rotation et de vibration dans le cas d'une molécule.

Dans le cas simple d'un atome en translation, son énergie est définie à partir des composantes cartésiennes de la vitesse ; d'où elle est égale à :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}KT \quad (I.2)$$

Où :

$v$  : La vitesse quadratique moyenne de la particule ;

$T$  : La température thermodynamique ;

$K$  : Constante de Boltzmann ( $K = 31.10^{23} J/k$ ) ;

$m$  : La masse de particule.

Il en résulte que pour un gaz composé de particules de masses différentes mais à température uniforme, les plus rapides et aussi les plus légères, en particulier les électrons sont animés de vitesses très supérieures à celles des atomes ou des ions lourds.

### I.2.6. Electrons primaires

Il est tout à fait bien connu qu'aucune décharge électrique ne peut s'initier dans un gaz sans la présence d'au moins un électron dans le volume de gaz couvrant l'espace inter-électrodes. Ces électrons, présents au tout début de la décharge sont communément appelés électrons germes ou encore électrons primaires. Ils permettent d'initier la première avalanche électronique sans laquelle aucun type de décharge ne peut prendre forme encore moins se maintenir. Ils peuvent être produits par radiation cosmique, par les sources naturelles d'ionisation, par les charges résiduelles issues des décharges précédentes ou encore par détachement des ions négatifs par effet de champ [2].

### I.2.7. Phénomènes de collision

L'activation du gaz par la décharge se produit par des processus de collision électrons molécules de type élastiques ou inélastiques. On distingue alors les collisions élastiques et les collisions inélastiques.

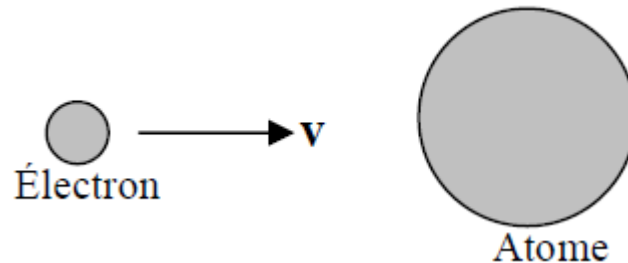


Figure I.3 : Le phénomène de collision électron molécule [1].

#### I.2.7.1. Collision élastique

Les collisions élastiques consistent en un transfert de quantité de mouvement sans modification de la distribution de leur énergie interne mais qui se traduit par une élévation de la température des espèces gazeuses, donc seulement le transfert de l'énergie cinétique.

Lors de chocs élastiques, l'électron garde pratiquement toute son énergie et, n'en cède qu'une très faible part collision aux autres particules. Les électrons possèdent donc une énergie supérieure à celle des ions et des molécules neutres. Comme l'électron conserve pratiquement toute son énergie cinétique après un choc élastique, il sera d'une grande importance pour les chocs non élastiques qui se produisent dans le mécanisme de claquage des gaz.

On considère une boucle de masse  $m$  qui entre en collision avec une autre boucle de masse  $M$ .

Soient :

$v$  : vitesse de  $m$  avant le choc ;

$v'$  : vitesse de  $m$  après le choc ;

$V$  : vitesse de  $M$  après choc.

- Principe de conservation de l'énergie cinétique  $W_c$  :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV^2 \quad (I.3)$$

- Principe de conservation de la quantité de mouvement :

$$mv = mv' + MV \quad (I.4)$$

A partir de l'équation (I.3) et (I.4) on obtient :

$$\frac{v'}{v} = \frac{M - m}{M + m} \quad (I.5)$$

a) Si  $M \cong m$  : collision entre un atome et un ion :

$v' \cong 0 \Rightarrow$  La particule incidente perd son énergie cinétique.

b) Si  $M \gg m$  ; entre un atome et un électron :

$v' \cong v \Rightarrow$  La particule incidente conserve son énergie cinétique

### I.2.7.2. Collision inélastique

Dans les chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change. L'énergie de la particule incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau excité plus haut ou soit ionisée. Les chocs inélastiques sont donc la source d'un nombre important de réaction physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz.

Autrement dit au moment de la collision, si l'énergie cinétique de l'électron incident est suffisamment grande, l'atome libère un électron et devient ionisé (ionisation par collision).

## I.3. Processus d'ionisation et d'excitation

Les électrons dans un conducteur sont libre, dès qu'on applique un champ électrique aussi faible, ils se détachent de l'atome et se déplacent avec un champ par contre dans un isolant, les électrons sont liés et ne se détachent que si on leur fournit une énergie suffisamment grande supérieur à l'énergie d'ionisation de l'atome.

**Remarque** : l'énergie d'ionisation  $W_i$  est l'énergie qui retient l'électron dans l'orbite de l'atome.

$$W_i = eV_i \quad (I.6)$$

Avec :

$e$  : Charge élémentaire d'un électron ;

$V_i$  : Potentiel d'ionisation.

On donne ci-dessous les énergies d'ionisations de quelques molécules [1].

Molécules	$W_i$ (eV)
CO <sub>2</sub>	13.7
N <sub>2</sub>	15.5
O <sub>2</sub>	12.2
H <sub>2</sub>	15.4
H <sub>2</sub> O	12.6

**Tableau I.1 :** Les énergies d'ionisations de quelques molécules [1].

### I.3.1. Ionisation par collision

#### I.3.1.1. Ionisation

Sous l'action du champ électrique  $E$ , l'électron qui se déplace avec une énergie cinétique  $W_c$  entre en collision avec l'atome :

$$W_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (I.7)$$

Avec :

$m$  : Masse de la particule ;

$v$  : vitesse de la particule.

Si  $W_c \gg W_i \Rightarrow$  ionisation de l'atome



Avec :

$$\Delta W = W_c - W_i \quad (I.9)$$

$\Delta W$  : Energie supplémentaire cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz [1].

#### I.3.1.2. Excitation

Un atome excité  $A^*$  est un atome qui a absorbé et emmagasiné une énergie. Cela se produit lorsque l'énergie cinétique est légèrement inférieure à  $W_i$  [1].

Si  $W_c$  est légèrement inférieur à  $W_i \Rightarrow$  excitation de l'atome.



Chaque type de gaz possède une valeur de l'énergie d'excitation  $W_{ex}$

$$W_{ex} = eV_{ext} \quad (I.11)$$

$V_{ext}$  : Potentiel d'excitation.

### I.3.1.3. Désexcitation

Les processus de désexcitation peuvent se produire spontanément, lorsque l'électron d'un atome excité revient sur son orbite fondamentale. La perte d'énergie est compensée par l'émission d'un photon ayant une énergie égale au potentiel de désexcitation

Après un temps très bref (entre  $10^{-7}$  et  $10^{-10}$  s), l'énergie est restituée au gaz sous forme d'un photon d'énergie  $W_p = h\nu(A^* \rightarrow A + W_p)$  [3].

Avec :

$h$  : Constante de Planck ( $h = 6.625 \cdot 10^{-34} \text{ J.S}$ ).

$\nu$  : Fréquence du photon.

### I.3.1.4. Photo-ionisation

L'atome absorbe l'énergie d'un photon  $W_p$ .

- Si  $W_p \geq W_i \Rightarrow$  photo-ionisation



Avec :

$$\Delta W = W_p - W_i$$

$\Delta W$  : L'énergie cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

- Si  $W_p$  légèrement inférieure à  $W_i \Rightarrow$  photo-excitation.



### I.3.1.5. Ionisation thermique

Lorsqu'un gaz est porté à une température élevée ( $> 1500 \text{ °K}$ ), l'atome est ionisé grâce à l'énergie thermique absorbée.

- Si  $W_{th} \geq W_i \Rightarrow$  ionisation



Avec  $\Delta W = W_{th} - W_i$  cédée à l'électron libéré

- Si  $W_{th}$  légèrement inférieure à  $W_i \Rightarrow$  excitation



L'ionisation thermique est rencontrée surtout dans les gaz à haute pression. Dans ce cas, l'ionisation ne se produit pas au cours d'un seul choc, mais est le résultat d'excitations successives ; en effet, la forte densité des particules rend la fréquence des chocs élevée. Le

temps moyen entre deux chocs successifs est inférieur à la durée de vie de l'atome excité, si bien les excitations se cumulent pour arriver à la valeur d'ionisation [1].

### I.3.1.6. Ionisation par les atomes métastables

Un métastable  $A^m$  est un atome excité qui garde assez longtemps l'énergie absorbée (de l'ordre de 1s). Lors de la rencontre avec un atome B, il peut se produire un transfert d'énergie qui permettra l'ionisation de ce dernier.



C'est le processus le moins fréquent [1].

### I.3.2. La photo ionisation

Pour qu'un processus d'ionisation puisse se produire lors de l'absorption d'un électron par une particule gazeuse, il faut que l'énergie du photon incident soit au moins égale à l'énergie d'ionisation de la particule considérée. La réaction est beaucoup moins sélective que la réaction de photon-excitation car l'électron éjecté peut emporter l'excédent d'énergie sous forme d'énergie cinétique, si  $\vartheta_s$  est fréquence de seuil d'ionisation et  $\vartheta$  celle du photon incident. L'énergie cinétique de cet électron sera donc égale à  $h\vartheta - h\vartheta_s$  [3].

### I.3.3. Phénomènes dé-ionisants

#### I.3.3.1. Recombinaison

La recombinaison est le phénomène d'attachement de particules lorsqu'un ion positif rencontre un électron ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent [4].

#### I.3.3.2. Détachement

C'est le phénomène qui se produit lorsqu'un ion négatif perd son électron supplémentaire [4], l'énergie nécessaire pour provoquer le détachement est relativement faible mais il faut un champ électrique dépassant 68 kV/cm à température et pression normales ce qui veut dire dans le phénomène d'effet couronne ce processus ne joue qu'un rôle négligeable [3].

### I.3.4. Diffusion

Le mécanisme de diffusion d'un gaz apparaît dès qu'il existe une différence de concentration entre deux points voisins.

Si un gradient de concentration  $\frac{\partial n}{\partial x}$  existe suivant une direction  $x$ , un flux de particule va s'établir vers la zone ayant la plus faible concentration, suivant la relation :

$$\Gamma = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (I.17)$$

Où  $\Gamma$  est le nombre de particules qui traversent par seconde une aire unitaire dans la direction de  $X$  (le flux dans la direction  $x$ ),  $D$  est appelé coefficient de diffusion. Le coefficient de diffusion électronique  $D_e$  s'introduit en écrivant le flux d'électrons.

$$\vec{j} = -n_e \mu \vec{E} - D_e \overrightarrow{\text{grad}} n_e \quad (I.18)$$

$D_e$  : Coefficient de diffusion électronique.

$n_e$  : Densité électronique.

Les résultats établis pour les électrons peuvent s'adapter aux ions [3].

### I.3.5. Mobilité des charges dans un champ électrique

En présence d'un champ électrique, les électrons et ions donc accélèrent le long des lignes de champ vers l'anode et la cathode. Cette accélération est interrompue par les collisions avec les molécules de gaz, ce qui limite la vitesse moyenne maximale que l'on peut obtenir. Cette vitesse moyenne est appelée la *vitesse de dérive* de la charge et elle se superpose au mouvement normal.

En comparaison avec la vitesse thermique, la vitesse de dérive est lente pour les ions, mais peut être bien plus grande pour les électrons.

On définissant la mobilité comme :

$$\mu = \frac{u}{E} \quad (I.19)$$

Où :

$u$  : La vitesse de dérive,

$E$  : Le champ électrique appliqué.

Cette mobilité est constante pour les ions, mais dépend fortement de  $E$  pour les électrons. Des vitesses de l'ordre de plusieurs fois  $10^6$  cm/s sont atteintes facilement, ce gain en vitesse va aussi influencer les taux de diffusion, car les électrons n'auront plus de vitesse thermique.

On peut relier la mobilité au coefficient de diffusion par la relation connue sous le nom de relation d'Einstein :

$$\frac{D}{\mu} = \frac{KT}{e} \quad (I.20)$$

$D$  : Coefficient de diffusion.

Si l'énergie moyenne des électrons est supérieure à l'énergie thermique, alors le terme  $KT$  doit être remplacé par cette nouvelle énergie. La constante d'énergie de diffusion augmente alors et les électrons vont se disperser sur une distance plus grande.

Si les particules chargées ont une énergie comparable à celle fournie par l'agitation thermique aux molécules neutres, on montre que :

$$u = \left[ \frac{e\lambda}{mw} \right] \quad (I.21)$$

$u$  : vitesse de dérive,

$\lambda$  : Libre parcouru moyen,

$w$  : vitesse d'agitation thermique.

A la température donnée,  $\langle \frac{e}{mw} \rangle$  est constante et il apparaît que  $u$  est en fonction de la densité ( $\lambda E$  donc de  $E/P$ ), qui représente l'énergie moyenne acquise par une particule chargée entre deux chocs consécutifs sous l'effet d'un champ appliqué.

Les relations précédentes indiquant une relation linéaire entre  $u$  et  $E/P$  ont cependant une validité limitée en fonction de  $E/P$  car elles supposent que les particules chargées ont une vitesse de dérive faible devant la vitesse d'agitation thermique du gaz.

Pour des champs électriques élevés, cette condition est rapidement mise en défaut. Leur faible masse les empêche de transmettre par collision l'énergie acquise sous l'effet de champ électrique. Il en résulte une mobilité beaucoup plus grande pour les électrons que pour les ions ( $\mu$  est environ 100 fois plus grand) [3].

#### I.4. Phénomènes de décharges dans les gaz

Le gaz le plus abondant et le plus utilisé de tout temps dans l'isolation électrique (lignes aériennes, électrostatique...) est l'air. Cependant, d'autres gaz tels que l'azote ( $N_2$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et surtout l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) connaissent, depuis plus de trois décennies, un succès grandissant dans le domaine des systèmes haute tension (postes blindés, câbles à isolation gazeuse, ...). Leur utilisation a permis d'améliorer la fiabilité des systèmes et d'en réduire leurs poids et dimensions.

Sous l'effet d'agents ionisants naturels ou artificiels, les gaz peuvent perdre leurs propriétés diélectriques et devenir plus ou moins conducteurs. Cette perte de propriétés (ionisation) se traduit par la dissociation de molécules neutres en électrons et en ions. En présence d'un champ électrique entre les électrodes (planes et parallèles), le mouvement

provoqué par les porteurs de charges (en augmentation) donne naissance à un courant dit "courant de décharges". La variation de ce courant en fonction de la tension (caractéristique courant - tension) a été étudiée pour la première fois par Townsend. En absence de champ électrique, il existe un équilibre dans lequel le taux de production d'électrons et d'ions positifs est compensé. Il convient toutefois de noter que la présence d'un champ dans l'espace inter-électrodes peut donner lieu, selon le niveau de tension appliquée aux électrodes, à une décharge de type non autonome ou autonome [5].

## **I.5. Généralités sur les décharges électriques**

Les plasmas de décharges réalisés au laboratoire et utilisés pour des applications technologiques sont des milieux faiblement ionisés contenant des électrons libres, des ions positifs et éventuellement des ions négatifs. Selon les valeurs de températures et/ou de degré d'ionisation ces plasmas peuvent être classés en deux grandes catégories : les plasmas thermiques et les plasmas non thermiques hors équilibre.

Selon les techniques utilisées pour les générer, la tension appliquée et la géométrie des électrodes, les plasmas hors équilibre se présentent sous différentes formes telles que la décharge luminescente, couronne ou encore les décharges à barrière diélectrique (DBD) [6].

### **I.5.1. Les décharges luminescentes (décharges « glow »)**

Les décharges luminescentes sont le plus souvent générées à basse pression (inférieure à 10 torrs) entre deux électrodes planes avec des tensions d'alimentation d'une centaine de Volts tandis que l'intensité varie de  $10^{-4}$  à  $10^{-1}$  Ampère. Ces décharges peuvent aussi être obtenues à pression atmosphérique avec d'autres géométries de réacteur. Les tensions d'alimentation sont alors beaucoup plus importantes (plusieurs kV).

Le régime de décharge luminescente, notamment utilisé dans les tubes d'éclairage (tubes néon, tubes fluorescent), est aussi employé pour le traitement de polluants comme les COV (Corps Organiques Volatils) comme les chlorofluorocarbones et le méthane ou les  $\text{NO}_x$ . Ces décharges sont caractérisées par un plasma homogène. A basse pression, la technique permet l'utilisation de faibles champs électriques (de l'ordre de 10 V/cm) mais ne doit pas occulter le problème de la limitation du débit massique du gaz à traiter [7].

### I.5.2. Les décharges couronne

Les décharges couronnes sont des décharges électriques pré-disruptives qui se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement asymétriques. Parmi les configurations très variées de systèmes d'électrodes utilisés, les plus courantes sont les systèmes pointe-plan, multipointes-plan, couteau-cylindre, fil-cylindre ou cylindre-cylindre. La distance inter-électrodes est habituellement inférieure au centimètre.



**Figure I.4 :** Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour générer la décharge couronne [7].

Du fait de cette dissymétrie, le champ entre les deux électrodes est hétérogène. Les décharges couronne peuvent s'appliquer à des milieux gazeux variés à des pressions allant de quelques centaines de Pascals à quelques atmosphères. En revanche, à ces mêmes pressions, les plasmas de gaz rares exempts d'impuretés évolueront pratiquement instantanément en arc.

En outre, les décharges couronnes ont pour avantage d'être faciles à produire dans de bonnes conditions de stabilité et de reproductibilité. Suivant les applications envisagées, la haute tension, qui est généralement appliquée à l'électrode active, peut être pulsée, alternative ou continue de polarité positive ou négative. L'utilisation d'une alimentation pulsée permet de générer de forts courants pendant des temps très courts (typiquement 500 A pendant 100 ns) et donc d'obtenir, sans passage à l'arc, des électrons de haute énergie, adaptés au traitement de certains polluants. Les tensions de travail habituellement utilisées varient de quelques kilovolts à une trentaine de kilovolts environ tandis que les puissances dépassent rarement quelques kilowatts.

De nombreuses applications des décharges couronne ont vu le jour pour le traitement des effluents gazeux, notamment dans le cas des COV (méthane acétaldéhyde, CFC, du  $CO_2$ , des  $NO_x$  ou du  $SO_2$ ). Les géométries de réacteur permettant d'obtenir simultanément plusieurs décharges (système multi-impulsionnel) semblent les plus adaptées puisqu'elles autorisent des débits de gaz à traiter plus importants [7].

### I.5.3. Les décharges à barrière diélectriques

La décharge à barrière diélectrique, ou ce qu'on appelle aussi la décharge silencieuse, combine le large volume d'excitation de la décharge *glow* avec les caractéristiques haute pression de la couronne. Dans ce type de décharges, un diélectrique couvre l'une des électrodes. La surface entière de l'électrode devient effective pour les réactions chimiques. La DBD est initiée en chaque point du gap. Les charges ainsi cumulées sur le diélectrique forment un champ électrique qui s'oppose au champ appliqué et permet d'interrompre le courant pendant quelques nanosecondes. La durée du pulse de courant dépend de la pression, des propriétés du gaz ainsi que de la nature du matériau diélectrique [6].

	Décharge Glow	Décharge Couronne	DBD ou décharge silencieuse
Pression	10 mbar- 1 bar	1 bar	1 bar
Champ électrique E	10 V/cm	0,5 – 10 kV/cm	0,1 – 100 kV/cm
Champ électrique réduit (E/P)	50 Td	2 – 200 Td	1 – 500 Td

*Tableau I.2 : Paramètres caractéristiques des décharges dans les gaz [6]*

### I.6. Régimes de décharge dans un gaz

Un gaz soumis à une décharge de laboratoire, peut se trouver dans différents régimes de fonctionnement. Afin d'identifier ces régimes, nous considérons une décharge de type continue, nous connectons à une source de tension continue, deux électrodes (anode et cathode) séparées par le gaz (à basse pression et confiné) qui sera ionisé [6]. Les décharges obtenues dans le dispositif de Townsend peuvent être analysées en examinant la courbe caractéristique  $V(I)$  qui lui est associée. Quatre régimes de décharges peuvent être obtenus dans ce type de systèmes (Figure I.5) :

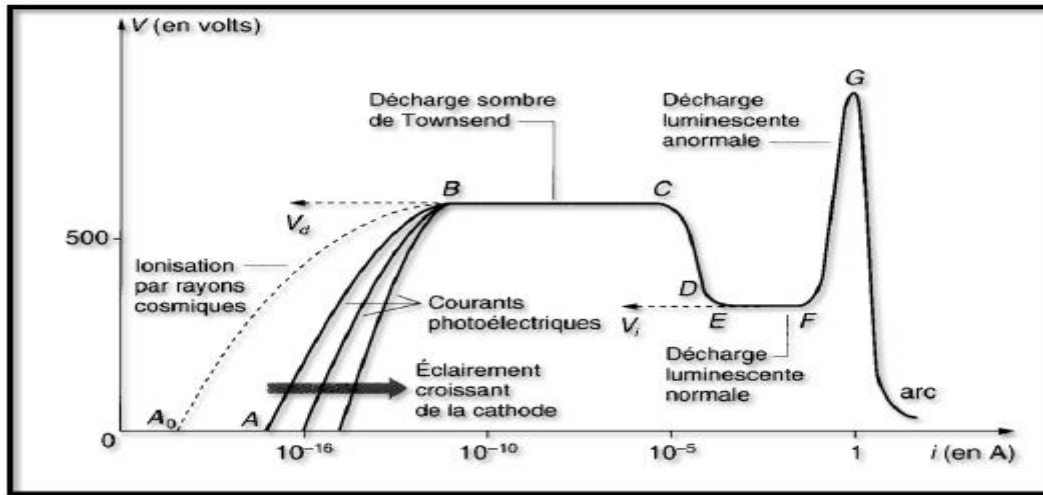


Figure I.5 : Régimes de décharges d'une décharge électrique [6].

- **Le premier régime** : correspond aux décharges non autonomes. La décharge ne peut exister qu'en présence d'un moyen extérieur, souvent une source lumineuse, assurant la production d'électrons primaires à la cathode par effet photoélectrique.
- **Le second régime** : correspond à ce que l'on appelle les *décharges de Townsend*. Il est caractérisé par une croissance quasi-verticale du courant pour une valeur de tension appelée tension disruptive. Cette croissance correspond au passage d'un régime où la multiplication des électrons est principalement gouvernée par l'ionisation par impact d'électrons sur les molécules du gaz à un régime où l'essentiel de la multiplication est assurée par l'augmentation du flux d'électrons extraits par bombardement ionique de la cathode. Dans le régime de Townsend, la charge d'espace générée par le plasma est faible et le champ électrique reste égal au champ Laplacien.
- **Le troisième régime** : correspond aux *décharges luminescentes*. Dans le cas des basses pressions considérées, ces décharges sont également généralement entretenues par un mécanisme de type Townsend. La grande différence qu'elles présentent avec les décharges dites de Townsend réside dans le fait que c'est le champ de charge d'espace et non pas le champ Laplacien qui gouverne la dynamique des espèces chargées.
- **Le quatrième régime** : correspond au régime d'arc. Celui-ci est caractérisé par une très faible tension de maintien (quelques dizaines de volts), de fortes densités de courant et un échauffement important de la décharge dont la température peut facilement atteindre plusieurs milliers de Kelvin. Le maintien du régime d'arc est

également gouverné par des processus élémentaires à la cathode. Ces processus très complexes sont cependant différents de ceux rencontrés dans le cas des décharges luminescentes. On cite souvent des effets comme l'effet thermoïonique, l'émission de champ, etc... Le maintien d'un régime d'arc impose également de fortes contraintes sur l'alimentation électrique qui doit pouvoir assurer la circulation de courants forts.

## I.7. Caractéristique du Claquage dans les gaz

Les Claquages électriques, visibles à l'œil nu par l'étincelle ou la décharge produite correspond au moment où le champ électrique dépasse la valeur seuil nécessaire à l'amorçage de la décharge. Les mécanismes de claquage dans les gaz sont principalement :

- le mécanisme de l'avalanche.
- le mécanisme du Streamer [8].

### I.7.1. Avalanche électronique (décharge Townsend)

Si on considère un gaz contenu entre deux électrodes, il peut exister dans ce gaz en l'absence de tout champ électrique appliqué, un certain nombre de charges créés par des mécanismes naturels, tels que rayonnement ultraviolet ou radioactivité, soit par des mécanismes artificiels, par exemple en bombardant ultraviolet pour en extraire des électrons. Si un champ électrique est appliqué, les électrons sont suffisamment accélérés par le champ pour produire d'autres électrons par les collisions, qui à leur tour acquièrent par le champ électrique assez d'énergie pour ioniser d'autres atomes, et ainsi de suite, et le nombre d'électrons libres continuera à augmenter comme ils continuent à se déplacer sous l'action du champ électrique [3]. C'est ce phénomène, qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique lorsqu'on s'éloigne de l'électrode. Le claquage a donc lieu fait du phénomène d'avalanche ceci est montré sur figure (I.6).

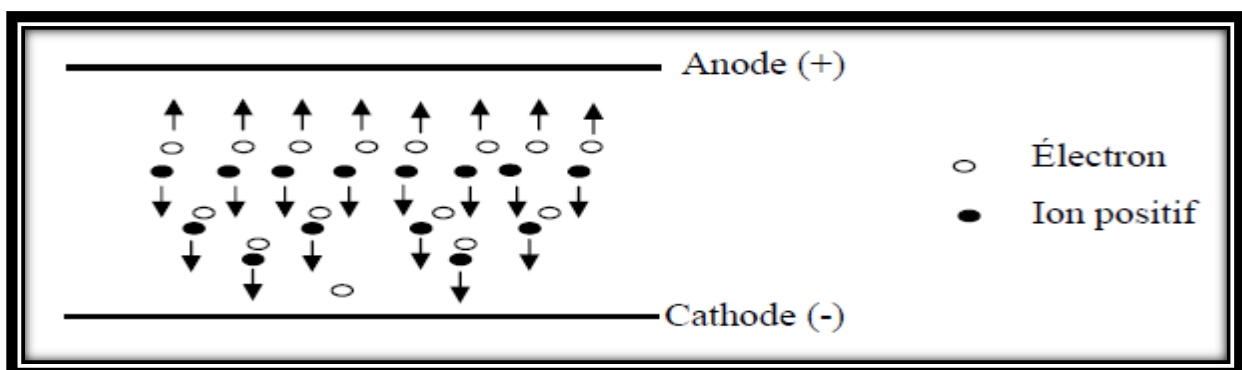


Figure I.6 : L'avalanche électronique [8]

Cette avalanche peut être étudiée quantitativement à partir de la connaissance du coefficient d'ionisation de Townsend.

$\alpha$  : représente le nombre d'électrons (ou ions positifs) créés par un électron par élément de longueur le long d'une ligne de force du champ appliqué. Une expression empirique exploitable considère que l'énergie thermique des électrons est acquise par le travail du champ électrique sur une distance de l'ordre du libre parcours moyen. Or ce dernier est inversement proportionnel à la pression. Donc, en introduisant les constantes A et B déterminées expérimentalement [6] on a :

$$\alpha = APe^{\left(-\frac{BP}{E}\right)} \quad (I.21)$$

P : La pression atmosphérique ;

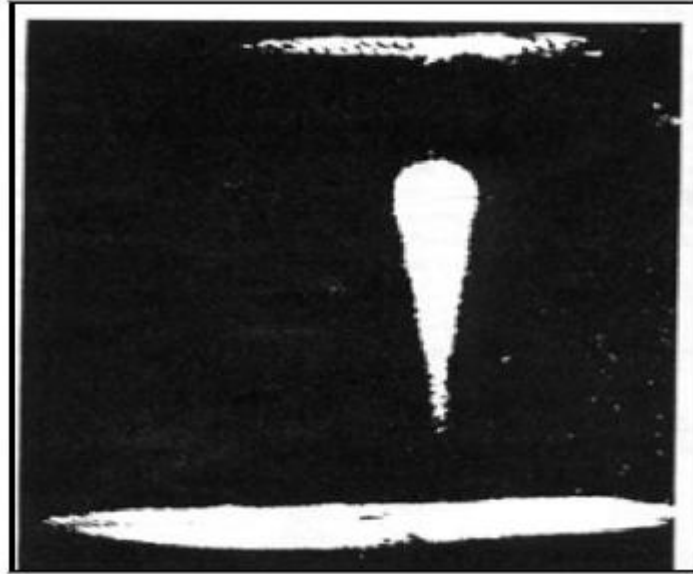
E : Le champ électrique appliqué ;

$\alpha$  : Le premier coefficient d'ionisation de Townsend.

### I.7.2. Théorie du canal (Streamer)

La théorie sur les streamers a été développée suite aux travaux de Loeb, Meek et Raether en 1940. Les nombreuses expériences menées par les groupes de Raether [9] sur des décharges planes et de Loeb sur les décharges couronnes ont mis en évidence en l'occurrence, avant la phase de claquage (formation d'une étincelle), de pulses de courant ayant des durées largement inférieures au temps caractéristique de dérive des électrons et des ions. Ces pulses de courant durent en général moins d'une centaine de nanosecondes, ont des intensités de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de milliampères et sont accompagnés d'une émission lumineuse moins intense que celle caractérisant les étincelles. Cette émission dessine un canal ayant un rayon de l'ordre d'une centaine de microns qu'on appellera micro-décharge. Dans le cas de décharges couronnes fortement asymétriques, ces phénomènes lumineux ont également été observés dans des zones où le champ Laplacien est quasi-nul. La présence de ces pulses indique l'occurrence d'un phénomène permettant d'entretenir une ionisation importante même en absence de champ électrique Laplacien significatif. Cette ionisation ne pouvait donc être entretenue que par un champ de charge d'espace. Le problème qui se posait dès lors concernait la source de la charge d'espace. La réponse à cette question a été encore une fois amenée par les expérimentateurs. Ces derniers ont en effet clairement montré soit par des analyses de courant, des visualisations en chambre de Wilson (Figure I.7) ou à l'aide de diagnostics par caméra streak que la production de ces micro-décharges était toujours précédée par la formation et le

développement d'avalanches. Dans le cas d'électrodes fortement asymétriques, ces phénomènes d'avalanche avaient lieu au voisinage de l'électrode à forte courbure où le champ Laplacien est significatif.



*Figure I.7 : Photographie dans une chambre [9]*

A partir de ces observations il a été possible de proposer un autre mécanisme de claquage dans les décharges à haute pression. Le scénario stipule que le claquage commence d'abord par la formation d'une avalanche. Celle-ci va se développer jusqu'à ce que son champ de charge d'espace devienne plus important que le champ Laplacien. A partir de cet instant c'est le champ de charge d'espace qui pilote la dynamique de la décharge. On obtient une onde d'ionisation qui se propage sous l'effet de son propre champ de charge d'espace. C'est cette onde d'ionisation qu'on appelle streamer [10]. Un nombre important de travaux ont ensuite été menés pour bien caractériser la transition avalanche-streamer. Il s'agissait notamment de définir le niveau à partir duquel une avalanche devenait assez importante pour donner lieu à la formation d'un streamer. Des modèles semi-analytiques associés à des mesures de tailles d'avalanche ont montré que ceci avait lieu à partir du moment où l'avalanche contenait entre  $10^8$  et  $10^9$  ions [10].

Comme la propagation d'un streamer ne dépend que de son propre champ de charge d'espace, elle peut a priori avoir lieu vers la cathode ou vers l'anode. Cette possibilité permet de distinguer deux types de streamers : les streamers anodiques et les streamers cathodiques.

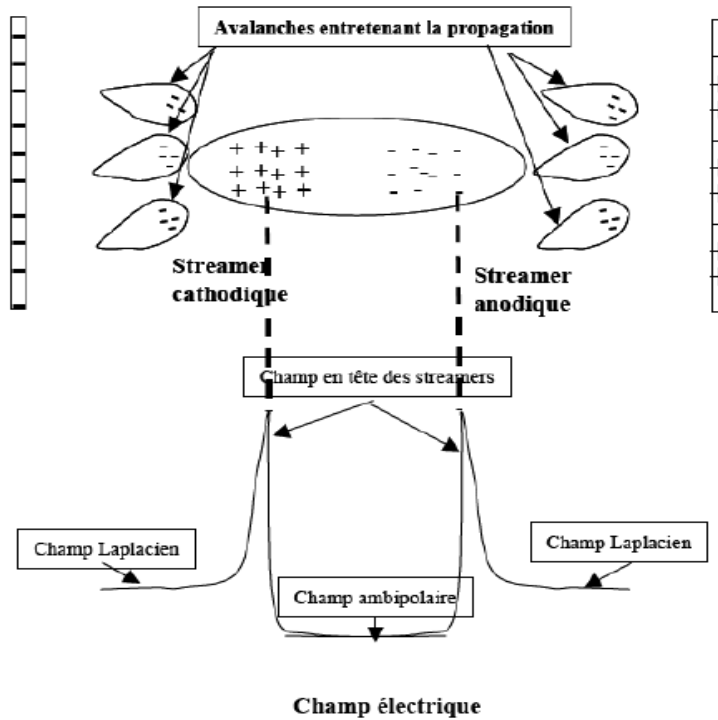


Figure I.8 : Le principe de fonctionnement du streamer [6]

### I.7.2.1. Streamers positifs

La théorie du streamer a été initialement formulée séparément par Reather et par Meek & Loeb dès 1953. Elle permet d'expliquer le fait que le temps d'instauration de l'arc soit inférieur au temps de transit des électrons de la cathode vers l'anode. Ce temps est bien inférieur au temps nécessaire au claquage selon le modèle de Townsend (imposé dans ce cas par le transit des ions positifs vers la cathode sous l'action du champ électrique). De plus, dans un intervalle pointe-plan, le champ appliqué est intense seulement au voisinage de l'anode, ainsi une ionisation loin de la pointe n'est explicable que par une distorsion du champ par des charges d'espace.

Une avalanche primaire amène la présence d'une charge d'espace positive (en raison de l'immobilité des cations par rapport aux électrons) près de l'anode et une injection d'électrons par l'électrode positive lorsque la tête de l'avalanche atteint celle-ci.

Cette charge d'espace entraîne une distorsion du champ électrique qui se traduit par une augmentation du champ entre elle et la cathode et un abaissement de celui-ci entre elle et l'anode. Des électrons secondaires, positionnés dans ce renforcement du champ, vont pouvoir à leur tour créer des avalanches dites avalanches secondaires.

Les électrons de ces avalanches vont neutraliser, en totalité ou en partie, la charge d'espace positive initiale et abandonner plus en avant une nouvelle charge d'espace positive [19]. Tant que les avalanches successives créent une charge d'espace amenant devant elle un champ suffisant, le processus précédent se répète. Tout se passe comme si une charge positive se déplaçait vers la cathode avec une vitesse appelée vitesse de streamer supérieure d'un ordre de grandeur à la vitesse de dérive des électrons vers l'anode [11].

### I.7.2.2. Streamers négatifs

Les streamers positifs et négatifs se développent tour à tour à partir d'un stem spatial. Les streamers négatifs apparaissent sous forme de filaments singuliers et leur vitesse de propagation est du même ordre que celle des streamers positifs. Reather [12] d'une part, puis Loeb et Meek [13] d'autre part ont développé des théories permettant de décrire les streamers négatifs, en admettant que le niveau de tension appliquée permet le développement d'une avalanche électronique dans une région de l'intervalle. Celle-ci est dirigée vers l'anode et sa tête constituée par une charge d'espace électronique. Cette charge d'espace peut être suffisamment importante pour que le champ électrique qu'elle crée ne soit plus négligeable devant le champ géométrique. L'augmentation locale du champ électrique local peut conduire à la formation d'avalanches secondaires en aval des têtes d'avalanches primaires si toutefois il existe un électron germe dans cette région. Il est suggéré que des mécanismes de photo-ionisation associés aux avalanches contribuent à la création de nouvelles charges d'espace qui permettront au processus de se répéter localement. L'avalanche électronique est alors transformée en streamers. Pour expliquer la formation d'un canal de streamers négatifs, Loeb admet l'existence de streamers "rétrogrades" dirigés des avalanches secondaires vers les avalanches primaires dans la région occupée par les ions positifs créés par l'avalanche secondaire. Suite à cette théorie et à diverses études expérimentales, Suzuki [14] propose de différencier deux types de streamers. Si l'on considère que  $v_i$  est la vitesse de développement d'une avalanche et  $v_{i+1}$  la vitesse de développement de l'avalanche suivante, deux cas peuvent apparaître :

- $v_{i+1}$  est plus grande que  $v_i$  : le streamer négatif n'est qu'une succession d'avalanches ne permettant pas la formation d'un canal ionisé ou filament de streamer. Il a été montré que, sur un intervalle de taille réduite, si ce streamer négatif atteint le plan, il n'apparaît aucun phénomène anodique pouvant produire l'amorçage de l'intervalle. Ce type de streamer est appelé "fast streamer".

- $vi+I$  est suffisamment faible pour que les électrons de l'avalanche précédente notée  $i$  puissent se développer dans la région de l'avalanche  $i+I$  : un canal ionisé peut alors se former. Dans ce cas le potentiel de pointe engendrée par ce canal peut se reporter à l'extrémité du streamer et participer à la propagation de la décharge. Il s'agit alors de "low streamer".

Il a été constaté par la plupart des auteurs ayant travaillé sur les décharges négatives que, d'une façon générale, les mécanismes de propagation de la décharge négative conduisent à une "descente" de charges négatives dans l'intervalle. Lors d'une étude sur les impulsions de couronne en polarité négative, Klewe *et al* [15] ont montré expérimentalement qu'une grande partie de la charge créée par la couronne est localisée vers des régions où le champ électrique décroît ; le champ électrique nécessaire à la propagation des streamers provient essentiellement de la charge électronique créée par les têtes d'avalanche.

Les premiers phénomènes de la décharge négative correspondent à l'apparition des streamers négatifs. Ensuite, une deuxième "vague" de streamers négatifs caractérisée par des paramètres (dimension, vitesse de propagation, amplitude des impulsions de courant) d'un ordre de grandeur nettement plus important, survient quelle que soit la rapidité de l'onde.

Cette dernière correspond à des phénomènes observés qui ne peuvent pas être expliqués par les théories classiques du développement du streamer négatif. En effet, les observations sur les clichés de convertisseur d'images [16] ont montré que la courbe formée par la trace de streamers, lors de la deuxième vague, présente un point d'inflexion montrant ainsi une accélération au cours de leur propagation. Il a été constaté l'existence de décharges dirigées vers la cathode laissant supposer la création d'une charge d'espace localisée dans l'intervalle.

La structure de la décharge consécutive à la deuxième vague, est décrite comme un canal cylindrique épais et lumineux dont l'extrémité présente des filaments fins et longs. Enfin, les clichés de la strioscopie montrent qu'à la suite de la deuxième vague, il apparaît à la cathode, des éléments de décharge "chaude" ainsi qu'une ou plusieurs zones "chaudes" plus en aval dans l'intervalle.

En dépit des différences entre les streamers de première et de deuxième couronnes, un comportement typique relatif à la phase de début de la décharge négative, a été observé.

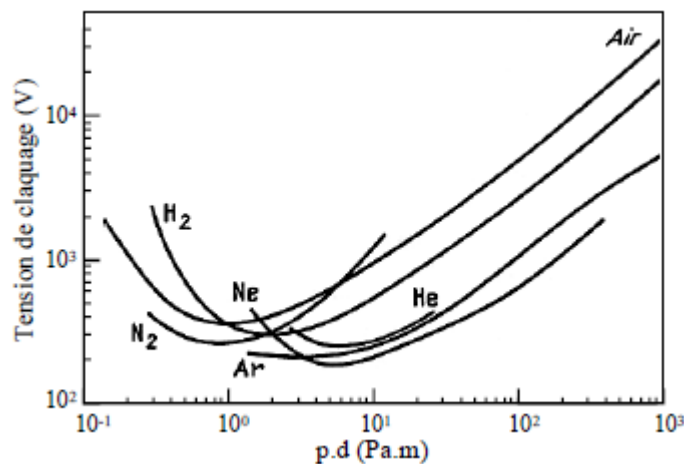
Lorsque la tension atteint puis dépasse le niveau de tension de seuil très tôt, une première vague de streamers négatifs est émise. Si ces streamers sont assimilés aux "fast streamers" définis par Suzuki, il n'apparaît pas de filaments de streamers permettant le report du potentiel de cathode plus en aval dans l'intervalle et la portée de cette première vague est limitée à une faible distance. La charge d'espace, résultant de la formation des avalanches successives,

entraîne une diminution locale du champ électrique dans un proche voisinage de la pointe empêchant tout phénomène nouveau de se produire. Si la différence de potentiel appliquée dans l'intervalle continue à croître, le champ électrique au voisinage de la pointe redevient suffisant et une deuxième vague de streamers négatifs peut se développer depuis la cathode. Ces derniers sont des "slow streamers" du type filamenteux tels que Suzuki les spécifiait, permettant ainsi le report du potentiel de l'électrode sur ses extrémités. Les streamers négatifs se développent donc en aval, pour autant que les conditions de propagation soient remplies.

### I.8. La loi de Paschen

La tension d'alimentation minimale pour déclencher la décharge est appelée tension de claquage. Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension de claquage à la pression du gaz et de la distance inter-électrodes : la loi de Paschen.

Cette loi est habituellement représentée par la courbe caractéristique  $U_c = f(p, d)$ , où  $p$  est la pression et  $d$  la distance inter-électrode, et dépend de la nature du gaz introduit.



*Figure I.9 : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit  $p.d$  [15]*

Nous pouvons constater que pour un gaz à pression atmosphérique ( $p = 1,013.105$  Pa), les courbes passent par un minimum pour une distance inter électrode d'environ  $10 \mu m$  ( $p.d = 0,5$  à  $5$  environ). Cela signifie que, pour la production de décharges à pression atmosphérique dans des conditions d'utilisation usuelles ( $d \geq 1$  mm), la tension de claquage est une fonction croissante de la distance inter-électrode.

### I.8.1. Interprétation de la courbe de Paschen : (d constante)

**Région 1** :  $U_c$  diminue en fonction de la pression P.

Quand la pression augmente, la densité atomique augmente ; Il y a plus de particules et donc plus d'ionisation par collision.

Le gaz devient plus conducteur et le claquage plus facile  $\Rightarrow U_c$  diminue.

**Région 2** :  $U_c$  augmente avec la pression P.

Quand la pression augmente encore plus, malgré que la probabilité d'ionisation par collision augmente, le libre parcours moyen  $\lambda$  est tellement petit que l'énergie de l'électron  $w = \int qE dr = qE\lambda$  nécessaire à l'ionisation des atomes devient insuffisante. Il y a peu d'ionisation et le claquage devient difficile  $\Rightarrow U_c$  augmente

**Déduction** : selon la loi de *Paschen*, il est plus recommandé d'utiliser les gaz à haute pression (et quelquefois à très basse pression) dans les appareillages HT, condensateurs, câbles...la validité expérimentale de la loi de *Paschen* est vérifiée aux faibles distances jusqu'à 0.1mm et des pressions jusqu'à 10 atmosphères.

## I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents processus liés aux décharges électriques dans les gaz afin de comprendre les différentes décharges électriques telles que les décharges couronne qui fera l'objet de notre étude.

## *Chapitre II : Etude de la décharge couronne*

## II.1. Introduction

En haute tension, lors de transport de l'énergie électrique un phénomène apparaît c'est l'effet de couronne. L'effet de couronne est à l'origine d'interférences radiophoniques et télévisuelles, de bruits audibles, de pertes électriques importantes et de vibration mécaniques. Il se manifeste sous forme d'une gaine lumineuse qui apparaît autour des conducteurs de la ligne, lorsque ceux-ci sont portés à une tension suffisamment élevée pour que le champ dépasse le seuil d'apparition de l'effet couronne.

Lorsqu'on utilise des conducteurs de plus gros diamètre, comme ceux qui équipent les lignes aériennes, on constate que la ligne lumineuse évolue en décharge discrètes que les spécialistes ont coutume d'appeler « aigrettes » ou « effluves » [1]

Des électrons libres existent dans l'air, créés par rayonnements cosmiques ou dus à la l'ionisation naturelle par les substances radioactives dans la terre. Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour ioniser une molécule et créer d'autres charges libres qui à leur tour peuvent ioniser d'autres molécules ; on parle alors d'avalanche électronique. Plusieurs avalanches peuvent être créées dans le gaz, ces dernières peuvent conduire au claquage électrique suivant deux mécanismes le mécanisme de *Townsend* ou le mécanisme de *Streamer*. Les ions et les électrons créés pendant la décharge se déplaceront selon leur polarité et influenceront à leur tour le champ électrique. La décharge prend la forme d'une lueur de forme variée selon le type et l'intensité de la tension appliquée, le courant de décharge dépend des mêmes paramètres.

Comme l'effet couronne dépend du champ électrique, son apparition est étroitement liée à la tension appliquée aux électrodes du système et à la géométrie de ces mêmes électrodes. Les caractéristiques diélectriques du milieu séparant les électrodes sont aussi à considérer.

## II.2. Définition de la décharge de couronne

L'effet couronne est un phénomène de décharge électrique partielle entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur. Il apparaît dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique à des pressions atmosphériques.

La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelle avant l'apparition de l'arc électrique sous forme d'un gain lumineux qui apparaît autour des conducteurs entourés

par l'air, lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation de l'air et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension.

On appelle effet de couronne, toutes les décharges pré-disruptives apparaissant dans une zone où le champ électrique est intense. Ces décharges se manifestent par des bruits audibles et des lueurs diverses. L'effet de couronne a été l'objet de nombreux travaux qui ont permis de comprendre les principes fondamentaux impliqués et les conséquences du phénomène dans le domaine du transport de l'énergie électrique.

### **II.2.1. Conditions d'apparition**

Dans un champ électrique intense, l'excitation des particules du gaz ambiant peut devenir suffisamment élevée pour ioniser ce même gaz dans une région donnée. Les électrons libres, accélérés par le champ électrique intense, sont à la base de ce processus.

Lorsque leur énergie dépasse l'énergie d'ionisation des molécules du gaz, les collisions entre les électrons libres et les molécules du gaz entraînent l'ionisation de ces dernières. De nouveaux électrons sont produits et soumis au même champ. Lors de l'ionisation, des photons hautement énergétiques sont aussi produits. Ils peuvent aussi contribuer à une réaction en chaîne appelée avalanche de Townsend. Le développement d'avalanches successives produit la décharge couronne. Les ions et les électrons créés pendant la décharge se déplaceront selon leur polarité et influenceront à leur tour le champ électrique.

On appelle ces groupes de charges en mouvement "charges d'espace". La décharge prend la forme d'une lueur de forme variée selon le type et l'intensité de la tension appliquée. Le courant de décharge dépend des mêmes paramètres.

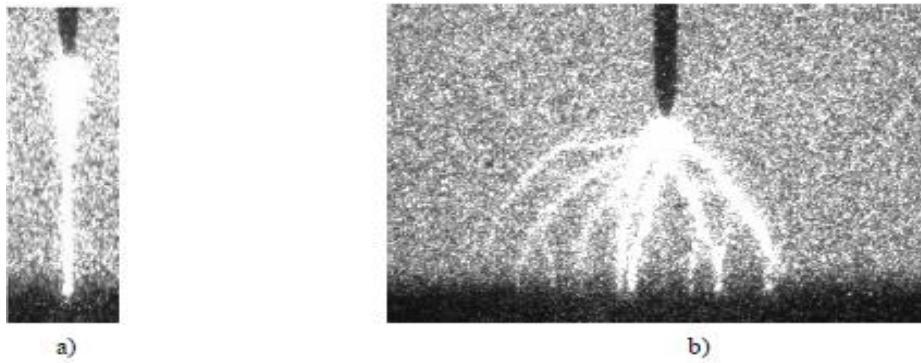
Comme l'effet de couronne dépend du champ électrique, son apparition est étroitement liée à la tension appliquée aux électrodes du système et à la géométrie de ces mêmes électrodes. Les caractéristiques diélectriques du milieu séparant les électrodes sont aussi à considérer. Il existe un champ électrique critique d'apparition de l'effet de couronne selon le milieu [50].

## **II.3. Etude spectroscopique de la décharge couronne dans une configuration pointe-plan**

### **II.3.1. Généralités**

Ce paragraphe est consacré à l'étude et l'analyse de la lumière émise par la décharge

couronne dans notre configuration pointe positive-plan dans l'air synthétique à la pression atmosphérique.

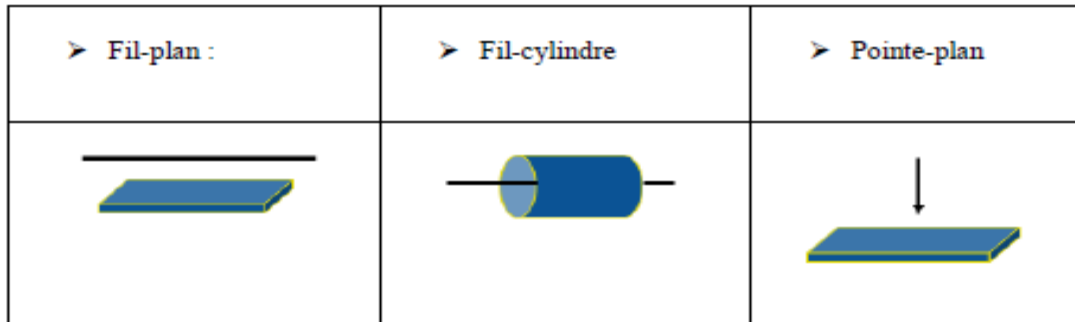


**Figure II.1** : Photographie de la décharge couronne par une caméra ICCD dans une configuration pointe-plan dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour une distance inter-électrodes de 8mm et tension appliquée de 8kV,  $p=20 \mu\text{m}$ . a) tension continue, b) tension impulsionnelle avec  $f=100\text{Hz}$  et  $\tau=40\mu\text{s}$ , temps d'exposition : 10 ms [ ]

La décharge couronne se voit à travers le développement d'une lueur lumineuse (s'étirant de la pointe vers le plan), qui est représentative de la dynamique du streamer dans notre espace inter-électrodes. Naturellement, le nombre de lueurs qui se déplacent est différent d'un régime de tension à l'autre car comme c'est déjà souligné dans le cas d'une tension continue, on observe un seul streamer qui se déplace de la pointe vers le plan, alors que dans le régime de tension impulsionnelle, ce sont plusieurs streamers qui se déplacent simultanément en direction de la cathode (Figure II.1). Durant la propagation du streamer dans l'espace inter-électrodes, due à la présence d'électrons énergétiques surtout, dans le front de la décharge, des espèces excitées sur différents niveaux d'énergie sont formés. La désexcitation radiative de certaines molécules est à l'origine des lueurs lumineuses précédemment évoquées.

### II.3.2. Différentes géométries d'électrodes

La décharge couronne apparaît entre deux électrodes asymétriques. Ce type de décharge se caractérise par un champ fortement inhomogène et intense au voisinage de l'électrode de petite dimension. Les configurations courantes de réacteur plasma à décharge couronne, qui varient en fonction des applications, correspondent aux géométries d'électrodes suivantes (Figure II.2) [12]:



*Figure II.2 : Trois exemples de configurations de réacteur couronne couramment utilisés [12]*

## II.4. Tension d'apparition de l'effet couronne

### II.4.1. Calcul du champ critique (formule de Peek)

Pour déterminer le champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un conducteur cylindrique, on emploie généralement la formule de *Peek*, qui est la plus connue [1]. Elle a pour expression :

$$E_c = 31\delta \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (II.1)$$

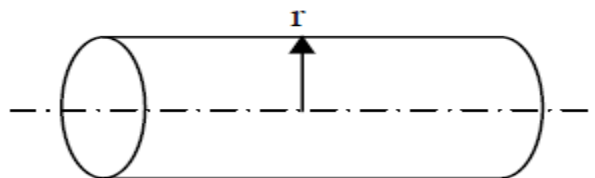
Avec :

$E_c$  : Valeur de crête du champ critique (en champ alternatif) en (kV/cm).

$r$  : Rayon du conducteur en (cm).

$\delta$  : Densité relative de l'air  $\left( \delta = \frac{3,92\rho}{273+t} \right)$ , ( $\delta = 1$  pour  $\rho = 76$  cm Hg et  $t = 25C^0$ )

Le terme  $\left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right)$  : est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur. Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur.



*Figure II.3 : Conducteur aérien cylindrique*

L'état de surface du conducteur est très important : la relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies.

La rugosité superficielle diminue le champ critique ; on tient compte de cette influence en attribuant au conducteur un coefficient expérimental  $m \leq 1$ , appelé coefficient d'état de surface. Le champ critique  $E_0$  d'un conducteur non poli s'exprime alors sous la forme :

$$E_0 = m * E_c \quad (II.2)$$

Et

$$m = m_1 * m_2 \quad (II.3)$$

Avec

$E_0$ : Valeur de crête du champ E en conditions normales.

$m_1$  : Coefficient qui tient de l'état de surface du conducteur.

$m_2$  : Coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs souvent le produit ( $m_1 * m_2$ ) est remplacé par un seul coefficient «  $m$  ».

Ainsi, le tournage d'un conducteur de ligne aérienne introduit un coefficient d'état de surface de l'ordre de 0,9.

#### II.4.2. Tension de seuil d'apparition de l'effet couronne

Il est plus intéressant de connaître  $U_c$ , (tension d'apparition de l'effet couronne) que  $E_c$  (champ critique d'apparition de l'effet couronne) [2], ainsi on aura :

$$U_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) r \ln \left( \frac{2h}{r} \right) \quad (II.4)$$

### II.5. Propriétés spécifiques aux décharges couronne

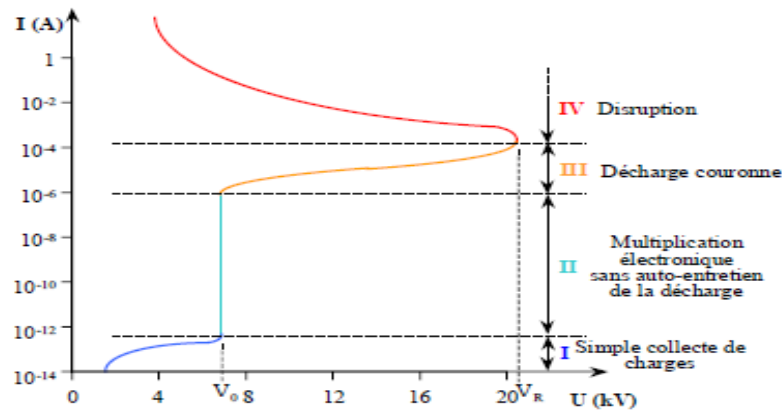
#### II.5.1. Caractéristique courant-tension et régimes de décharge

La caractérisation courant-tension de la décharge couronne est obtenue en faisant croître la tension appliquée à l'intervalle gazeux. Différents régimes de décharge sont alors parcourus (Figure II.4).

Le premier régime (I) consiste à 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-électrode.

Le second régime (II), qui se produit à partir d'une tension seuil  $V_0$ , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge. La décharge est qualifiée de non-autonome car elle dépend de

processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.



**Figure II.4 :** Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter-électrode : 13 mm) [4]

Pour le troisième régime (III), l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs : la décharge est auto-entretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards (aussi appelés "streamers") responsables de la composante impulsionnelle du courant.

Au-delà d'une tension appliquée  $V_r$ , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit  $E/N$  est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique.

Le régime d'arc (IV) est atteint, le milieu passe de l'état de plasma hors équilibre à l'état de plasma thermique.

### I.5.1.1. Champ électrique et topographie de la décharge

La dissymétrie des électrodes entraîne la non-homogénéité du champ électrique. Parmi les configurations les plus étudiées, nous retrouvons les configurations pointe-plan et coaxiales (cylindre-cylindre ou fil-cylindre). La distribution spatiale du champ électrique est donnée par les deux relations suivantes :

En géométrie pointe hyperbolique-plan :

$$E(x) = \frac{U}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln \frac{2d+r}{r}} \quad (II.5)$$

Avec :

$E(x)$ : Champ électrique (V/m),

$U$  : Tension appliquée à la pointe,

$x$  : Distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m),

$r$ : Rayon de courbure de la pointe à son extrémité (m),

$d$  : Distance inter-électrode (m).

En géométrie coaxiale :

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R_e}{R_i}} \quad (II.6)$$

Avec :

$E(x)$ : Champ électrique (V/m),

$U$  : Tension appliquée à l'électrode centrale,

$r$  : Distance radiale du point considéré (m),

$R_e$ : Rayon de l'électrode externe (m),

$R_i$ : Rayon de l'électrode interne (m).

Des simulations ont été effectuées en configuration pointe-plan pour déterminer le champ électrique dans l'espace inter-électrodes avant ou après passage du streamer [5], pour des petites distances inter-électrodes [6] ou en présence d'un diélectrique chargé ou non[7].

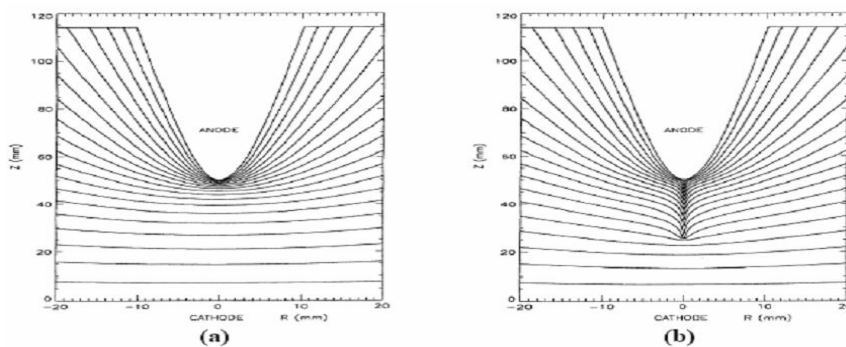
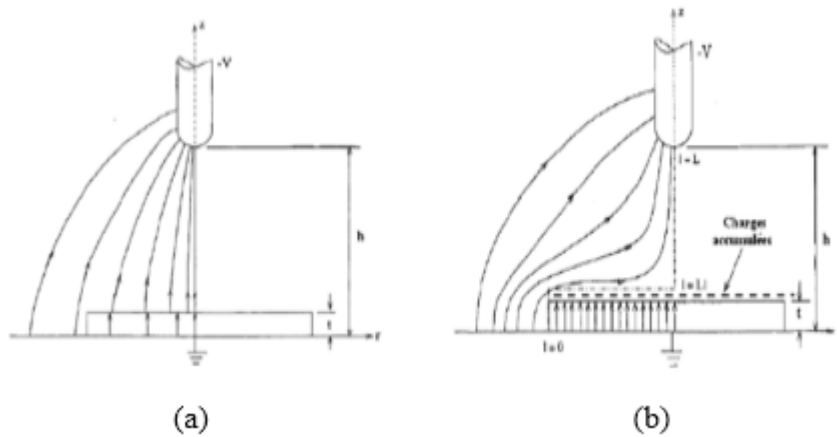
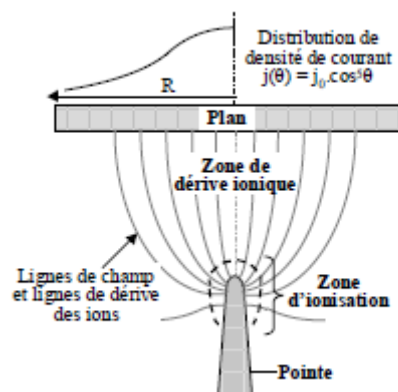


Figure II.5 : Lignes équipotentielles avant (a) et 10  $\mu$ s après (b) passage du streamer [ ].



**Figure II.6 :** Champ électrique dans l'espace inter-électrode en présence d'un diélectrique non chargé (a) et totalement chargé (b) [7]

Dans le cas d'une géométrie pointe-plan, le champ intense qui règne à proximité de l'électrode active ( $10^{-19} < E/N < 10^{-17} \text{ V.m}^2$ ) permet l'ionisation du gaz. Les ions présents dans cette zone peuvent être positifs ou négatifs. Au-delà de cette région se trouve une zone de dérive ionique où le champ électrique est trop faible pour permettre les réactions d'ionisation ( $10^{-21} < E/N < 10^{-19} \text{ V.m}^2$ ). Des ions négatifs sont alors formés par attachement électronique. Ils sont ensuite entraînés le long des lignes de champ et réagissent avec les molécules rencontrées. La zone de dérive ionique, électriquement passive, est le siège d'une intense activité physico-chimique (dispersion des espèces par le vent électrique, réactions radicalaires...). A l'interface entre la zone d'ionisation et la zone de dérive ionique, la consommation d'électrons par attachement électronique égale leur libération par impact électronique : les coefficients  $\alpha$  et  $\eta$  sont alors égaux.



**Figure II.7 :** Topographie de la décharge couronne en configuration pointe- plan [4]

## II.6. Mécanisme de décharge couronne géométrie pointe-plan

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [39], [40] :

- 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 la 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.

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. La décharge est classiquement établie entre une pointe à laquelle on va appliquer un haut potentiel électrique et une plaque.

## II.7. Paramètres influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [41]. On distingue trois facteurs essentiels :

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

### II.7.1. Facteurs géométriques

#### II.7.1.1. Rayon de la courbure

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

#### II.7.1.2. Distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la figure II.8. Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes [42].

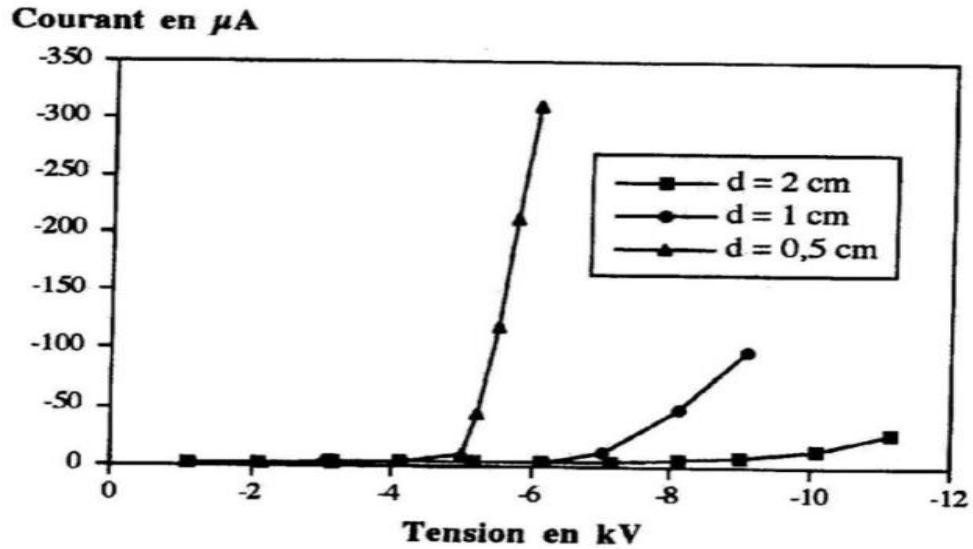


Figure II.8 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne en polarité négative [42]

### II.7.1.3. La nature des électrodes

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

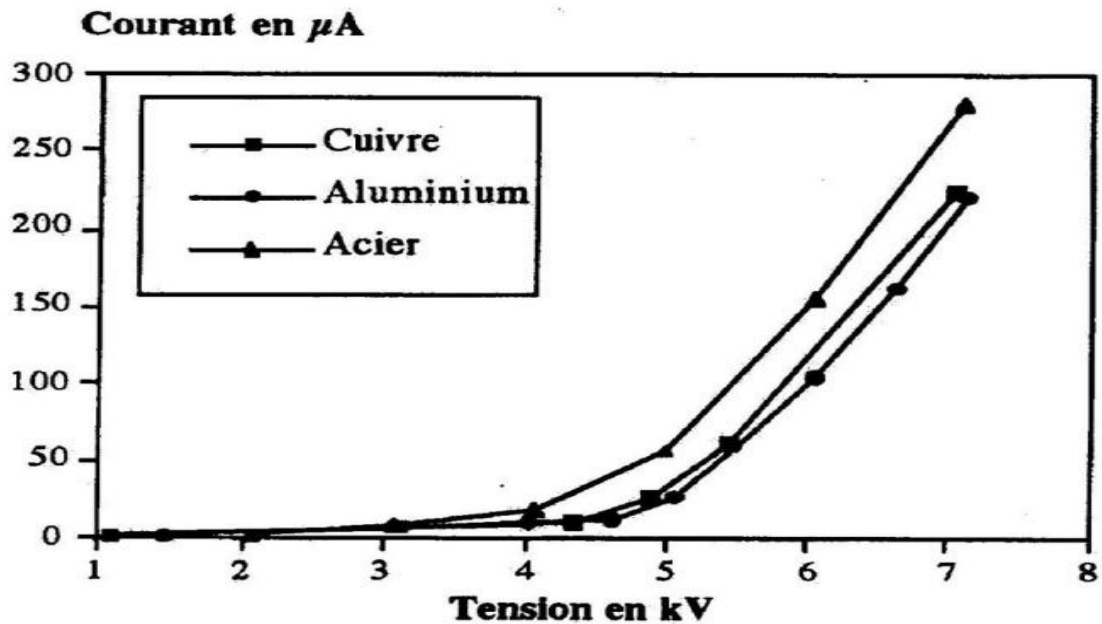
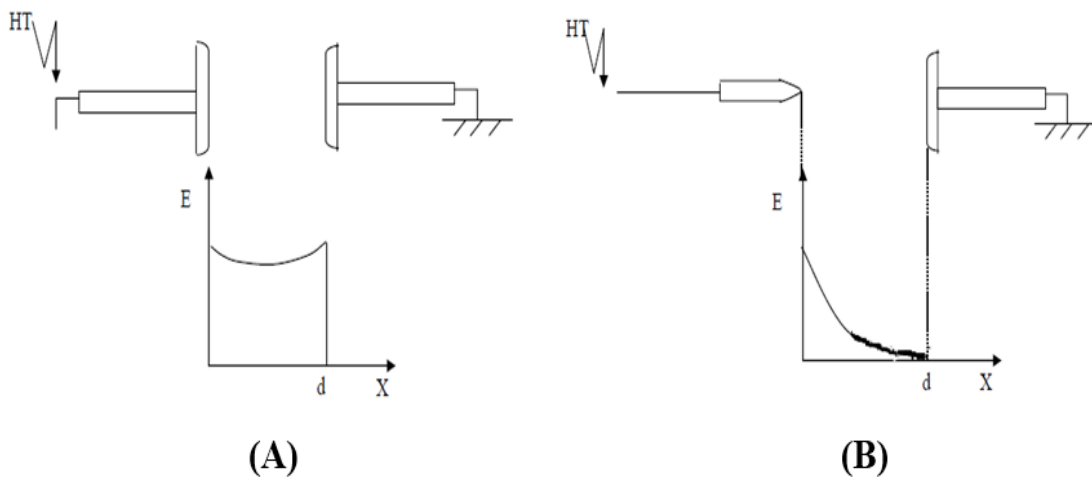


Figure II.9 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes en polarité positive [42]

#### II.7.1.4. La forme d'électrodes

Dans les systèmes d'électrodes utilisées, la distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode, avant amorçage de la décharge, dépend de la configuration géométrique des électrodes. En champ homogène figure (II.10A), dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique, autrement dit, la décharge couronne est inexistante et les tensions  $U$  et  $U_d$  sont confondues.

Par contre, en champ non homogène, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan figure (II.10B), la décharge couronne présente une zone de stabilité. Ce type de décharge est caractérisé par une tension seuil  $U$  de son apparition et une tension  $U_d$  de sa transition vers l'arc électrique [43].



*Figure II.10 : Distribution du champ dans un système plan-plan (A) et dans un système pointe-plan(B)*

#### II.7.1.5. Etat de surface

L'état de surface des conducteurs est un paramètre important par le fait que, plus il se dégrade plus les pertes augmentent et plus le champ perturbateur est élevé. Parmi les facteurs de dégradation, la pollution végétale ou industrielle, voir suintement en surface de graisse de toronnage, jouent un rôle important, mais malheureusement difficilement maîtrisable. Plus encore, la pluie, en raison des aspérités que constituent les gouttes d'eau suspendues aux conducteurs, multiplie le nombre d'aigrettes génératrices de l'effet couronne [47].

## II.7.2. Les facteurs physico-chimiques

### II.7.2.1. La densité de l'air

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

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

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (II.7)$$

Avec :

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

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

### II.7.2.2. La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [43].

### II.7.2.3. L'humidité

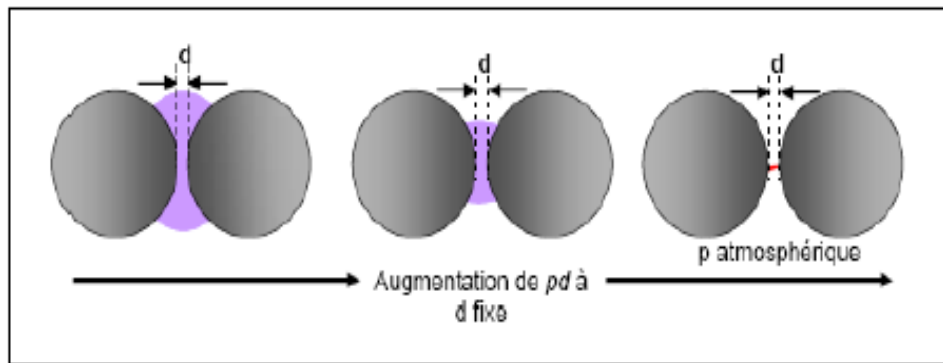
L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante, surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation [44]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [42]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

### II.7.2.4. La pression

Une augmentation de la pression du gaz s'accompagne en général d'une augmentation de la tension d'apparition de l'effet couronne et de la tension de claquage. Une exception importante à cette règle se manifeste avec les gaz électronégatifs. Dans ce cas, la tension de claquage passe d'abord par un maximum, puis décroît jusqu'à une certaine valeur critique de la pression pour laquelle elle devient égale à la tension d'apparition de l'effet couronne. Au-

dessus de cette pression critique, la tension croît à nouveau et le claquage se produit avec l'apparition de l'effet couronne, il est immédiatement suivi par le claquage.

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 (II.11) montre l'effet de la pression sur la décharge.



**Figure II.11 :** Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [45]

### II.7.3. Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative.

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [46].

#### II.7.3.1. Influence du type de la tension appliquée

##### a) En tension continue

On peut définir un niveau de tension minimum qui correspond à l'apparition du premier streamer. Si ce niveau est appliqué ou même dépassé, un streamer se développe. S'il atteint le plan un court-circuit limité par le circuit extérieur prend place. Si le champ n'est pas suffisant pour que le streamer traverse tout l'intervalle inter-électrode, la partie « passive » a pour effet de réduire le champ au voisinage de l'électrode privant tout phénomène d'ionisation. Les processus de recombinaison, dérive et de diffusion vont dégager petit à petit le voisinage de la pointe. Le champ électrique augmente et les conditions d'initiation

d'avalanche et de streamer réapparaissent. Le résultat est une succession de petites décharges streamer à fréquence régulière dépendant du niveau de tension.

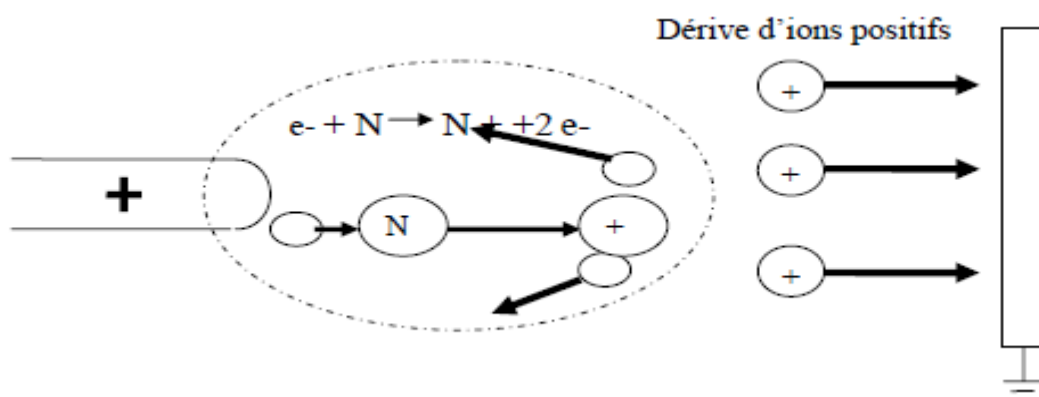
### *b) En tension alternative*

Tous les modes de décharge couronne en tension continue peuvent apparaître dans le mode de tension alternative. Les alternances positives et négatives peuvent donner lieu à leurs modes de décharge respectifs. Cependant ; il faut considérer le temps d'évacuation des charges d'espace formées pendant une alternance pour prévoir les modes qui seront possibles pendant l'alternance suivante. La distance entre les électrodes ainsi que le gradient de tension déterminent le temps de migration des ions et par le fait même leur effet sur les décharges. Si les ions n'ont pas le temps d'être évacués avant le changement de polarité de la tension appliquée, ceux-ci réduiront le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante, donc pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continue.

### **II.7.3.2. Effet de polarité sur le processus de développement de la décharge couronne**

#### *a) Cas d'une pointe positive*

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (le pointillé sur la Figure II.12) [16].



*Figure II.12 : Descriptif de la décharge couronne positive*

Le phénomène est plus complexe dans ce cas parce que la zone du champ électrique intense n'est pas juxtaposée à 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 très 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 des 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 (Figure II.12).

### b) Cas d'une pointe 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 l'anode (Figure II.13) [16].

Des électrons sont extraits de la 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 [13].

Un nuage 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 avons vu la formation disparaît [16].

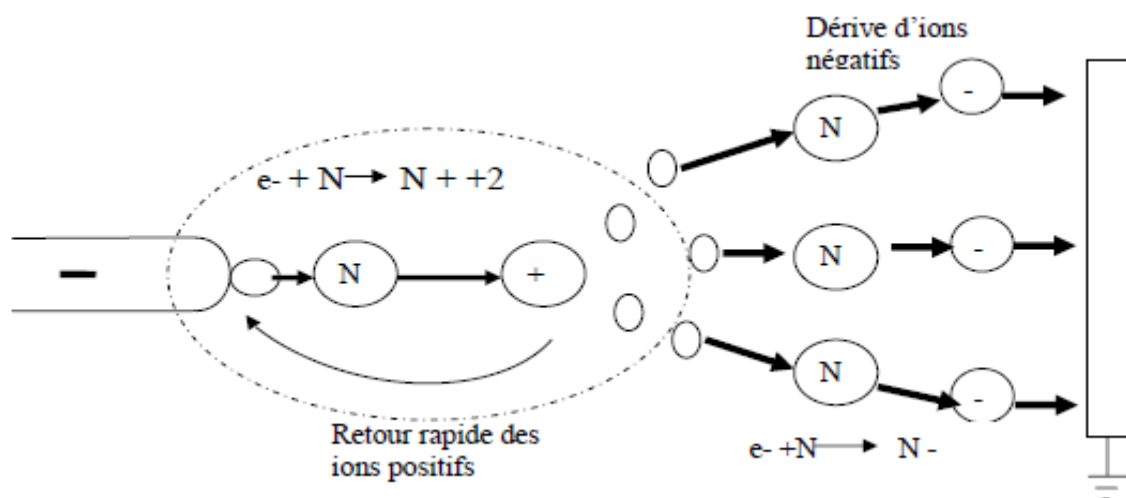


Figure II.13 : Descriptif de la décharge couronne négative

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 (Figure II.13).

## **II.8. Phénomènes induits par la décharge couronne**

De nombreuses réactions autres que des réactions d'ionisation ont lieu au sein du gaz : dissociation, recombinaison, excitation moléculaire, excitation électronique, etc...

Les différentes espèces ainsi produites vont se distinguer par leur charge, leur masse, leur vitesse et leur énergie, mais aussi par leur nature et leur état d'énergie interne.

### **II.8.1. Effets électromagnétiques**

Ces effets se traduisent par les perturbations radiophoniques et les pertes d'énergie dans les lignes de transport. Celui-ci est lié aux courants à haute fréquence circulant dans les conducteurs. Les perturbations dues aux lignes aériennes à haute tension au-dessus de «1kV» peuvent être produites sur une très large bande de fréquence par :

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

Le phénomène d'effet couronne est à l'origine des pertes sur les lignes de transport d'énergie électrique, à cause du processus de l'ionisation par choc. Les charges des deux signes augmentent et celles de même polarité avec la polarité du conducteur s'éloignent de ce dernier. Le déplacement de ces charges sous l'action du champ électrique crée un courant de couronne qui est beaucoup plus grand que le courant de fuite dans les lignes. Les pertes liées à ce courant de couronne peuvent avoir des valeurs comparatives avec les pertes sur les résistances des lignes en cas des courants de service. [48], [49].

Les mesures effectuées sur les lignes expérimentales montrent que les pertes par effet couronne apparaissent à des tensions inférieures à la tension critique, celle qu'on appelle les pertes en régime localisé. Lors des tensions supérieures à la tension critique, les charges d'espace propagées sont en quantités suffisantes pour former une couronne autour du conducteur et dans ce cas on les appelle les pertes en régime généralisé.

### II.8.2. Effet chimique

Nous assistons, suivant la polarité de la décharge, à la naissance de certaines espèces chimiques dérivées du gaz ambiant, par exemple dans le cas de l'air, à la naissance d'autres d'oxydes d'azote ( $NO$ ,  $NO_2$ ), de radicaux ( $HO$ ) et ( $HO_2$ ) ainsi que l'ozone ( $O_3$ ) qui est un gaz instable, pouvant dégrader beaucoup de matières [39].

## II.9. Pertes couronne dans les réseaux

### II.9.1. Nature des pertes

Soit un conducteur HT alimenté en courant alternatif.

- Alternance positive : le conducteur attire les charges négatives et repousse les charges positives. Tout se passe comme si le conducteur émet des ions positifs.
- Alternance négative : le conducteur attire les charges positives et repousse les charges négatives. Tout se passe comme si le conducteur émet des ions négatifs.

Le mouvement des ions provoque une dissipation d'énergie par échauffement suite au frottement avec les atomes de l'air. Cette énergie qui est prélevée du réseau représente les pertes couronne. Les pertes sont dues à un courant dans le plasma formant la couronne autour du conducteur, dont l'ordre de grandeur est environ  $\Delta P \cong 100 \text{ kW/km}$  [54].

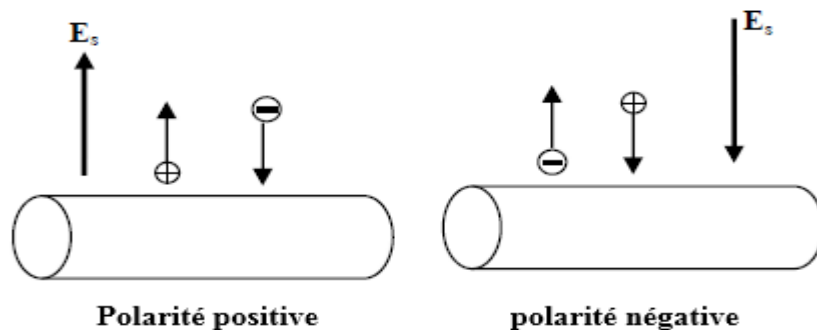


Figure II.14 : Conducteur haute tension alimenté en courant alternatif

### II.9.2. Influence de la pluie

Les gouttes sur la surface du conducteur forment de véritables pointes qui rendent l'effet couronne beaucoup plus intense et les pertes considérables.

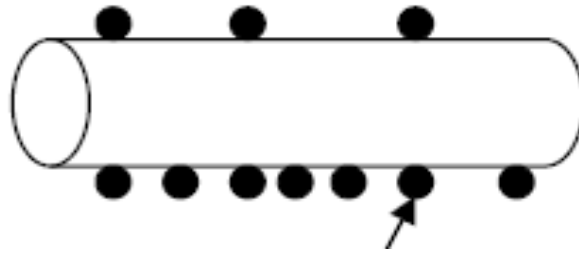


Figure II.15 : La forme de la goutte d'eau placée sur un conducteur

**Remarques :**

- Les lignes haute tension sont conçues de telle façon que l'effet couronne ne devrait pas poser de problèmes par temps sec ; c'est lorsque le temps est pluvieux qu'il devient vraiment gênant.
- Lorsque la pluie est forte, elle provoque au contraire le lavage du conducteur.
- Le temps améliore l'état de surface du conducteur, car une bonne partie des aspérités est brûlée au fur et à mesure par la décharge elle-même.
- Les pertes sont plus grandes pour un conducteur neuf car la graisse favorise l'accumulation des différentes particules [54]

## II.9. Les applications industrielles de la décharge de couronne

Les applications de la décharge couronne actuellement les plus répondues sur un plan industriel sont soit des applications chimiques, soit des applications qualifiées à tort d'électrostatiques.

En ce qui concerne les applications chimiques, celles qui connaissent déjà un grand développement industriel concernant sur tous des procédés de fabrications ou de traitement. Elles utilisent, de façon plus ou moins spécifique suivant les cas, les différents types de particules réactives formées par la décharge dans les gaz plasmagènes, à savoir :

- Des espèces chargées, ions à énergie cinétique négligeable de la décharge diffuse ou ions énergétiques des composantes filamenteuses de la décharge
- Des espèces réactives non chargées, se présentant sous la forme de fragments moléculaires (atomes et radicaux) ou espèces excitées (principalement par excitation vibrationnelle ou électronique).

- Des photons issus de réactions d'activation du milieu gazeux

La principale utilisation de la décharge couronne comme procédé de fabrication concerne la synthèse de l'ozone, elle est présentée ci-après. Elle met profit le grand pouvoir de dissociation de la décharge couronne, permettant de fabriquer de l'ozone à partir d'un fort taux de production d'oxygène ou de l'air sec. Les procédés de traitement par décharge de couronne s'appliquent en premier lieu au traitement superficiel de matière plasmatisée, notamment par oxydation de surface. Elles sont alors aptes à subir des opérations, telles que l'impression ou le collage, qui nécessitent des qualités de mouillabilité améliorées. Un traitement des matières plasmatisées par fluoration de surface diminue au contraire la mouillabilité, par exemple dans le but d'imperméabilisation. Ce type de traitement a déjà fait l'objet de développements, mais ces traitements ont plutôt été fondés sur l'utilisation de décharges micro-ondes pour des traitements superficiels de pièces présentant des profils très tourmentés. La décharge couronne permet de réaliser des équipements fiables et à coût réduit. Un avantage spécifique réside dans le fonctionnement à pressions faibles. Les applications dites électrostatiques, utilisent exclusivement les ions de la décharge, tantôt comme source de charges, tantôt comme source de transport de particules pour des procédés :

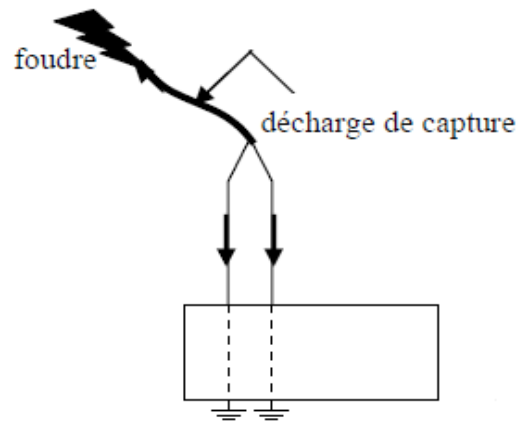
- De dépôt de charges (photocopie)
- De neutralisation de charges (prévention d'incendies d'explosion)
- D'entraînement de particules (dépoussiérage, peinture, tri de particules).

Par contre, l'utilisation de la décharge couronne à des fins de diagnostic s'ouvre sur un domaine d'application encore peu exploré. L'idée n'est cependant pas nouvelle ; en sont témoins les compteurs Geiger- Muller, qui ont été longtemps utilisés pour la détection de particules ionisantes dans les domaines de radioactivité et de la physique nucléaire et dont le fonctionnement tirait profit du grand pouvoir de multiplication électronique de la décharge qui peut lui faire jouer un rôle d'amplificateur de courant.

## **II.10. Avantages de la décharge couronne dans un réseau**

### **II.10.1. Parafoudre**

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 parafoudre (Figure II.16)].



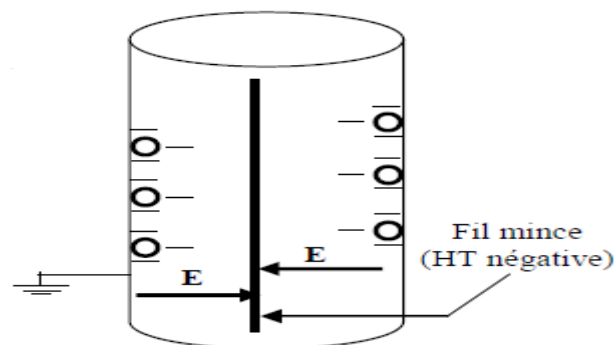
*Figure II.16 : Le parafoudre [54]*

### II.10.2. Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques [54].

### II.10.3. Filtre électrostatique

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir [54]. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (Figure II.17).



*Figure II.17 : Un filtre électrostatique [54]*

### II.10.4. Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative [54].

Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (Figure II.18).

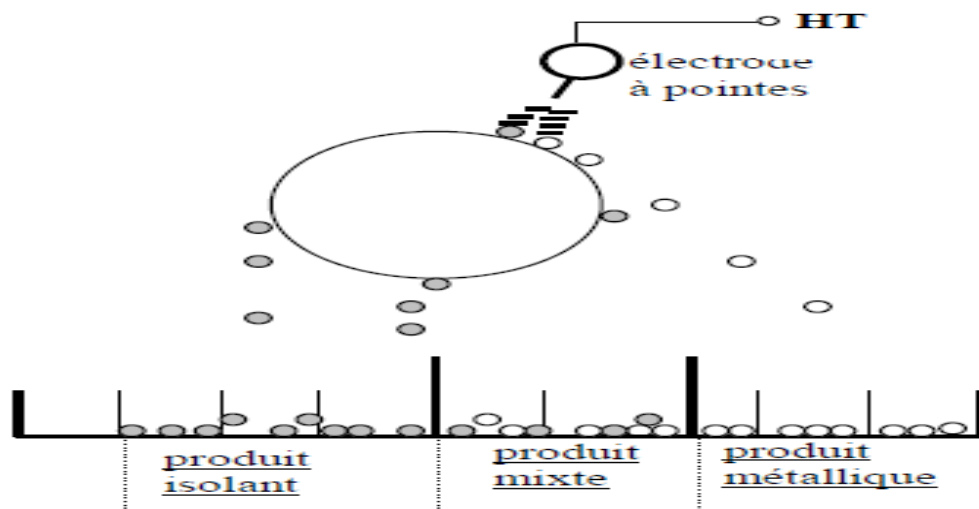


Figure II.18 : Un séparateur électrostatique [54]

### II.11. Problèmes liés aux décharges couronne

Au niveau du transport de l'énergie électrique, l'effet de couronne est la source de pertes électriques, d'interférences radiophoniques et télévisuelles, de bruits audibles, de la détérioration de l'état de surface des composants et de vibrations mécaniques. De plus, les sous-produits de l'effet de couronne dans les milieux isolants de certains disjoncteurs (SF6) et transformateurs (huile), diminuent leur pureté et leurs propriétés isolantes. Minimiser l'effet de couronne demeure un défi de taille dans la conception des composants hautes tensions. Les décharges électriques dans l'air génèrent aussi de l'ozone, qui est un gaz irritant.

Les décharges de couronne sont particulièrement [50] :

- Les installations de transmissions électriques où elles provoquent une perte d'énergie et de bruit ;
- La plupart des équipements électriques : transformateurs machines électriques (aussi bien générateurs que moteurs...etc.). où elles endommagent

progressivement les isolants amènent à une détérioration prématurée dans équipements ;

- Toutes les situations nécessitent une tension importante mais où la production d'ozone doit être minimale.

## **II.12. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons pu voir le mécanisme de création de la décharge couronne dans un espace gazeux séparent deux électrodes de forme pointe-plan.

La décharge couronne se manifeste lorsque la tension de seuil de son apparition est dépassé, d'autre part on a cité les différents paramètres influençant cette décharge tel que les facteurs géométriques, électriques et les facteurs physico-chimiques comme la densité de l'air, la température, l'humidité et la pression qui fera l'objet de notre étude expérimental dans le chapitre suivant.

# *Chapitre III : Etude expérimentale*

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'étude expérimentale dans le but d'étudier l'influence de certains paramètres (la polarité de la pointe, la distance inter-électrodes  $d$  et principalement la pression  $P$ ) sur les caractéristiques de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continue.

Cette étude expérimentale nous permettra de tracer la caractéristique courant-tension de la décharge couronne.

### III.2. Description du montage expérimental

Le montage utilisé pour l'étude de l'effet de la pression sur les décharges couronnes est principalement constitué d'une source à haute tension continue de tension maximale de 65 kV et d'un tube de décharge comprenant un système pointe-plan. Ce tube est relié à une pompe à vide qui sert à varier la pression ambiante de 0 à 3 bars.



*Figure III.1 : Montage expérimental*

### III.3. Dispositif expérimental

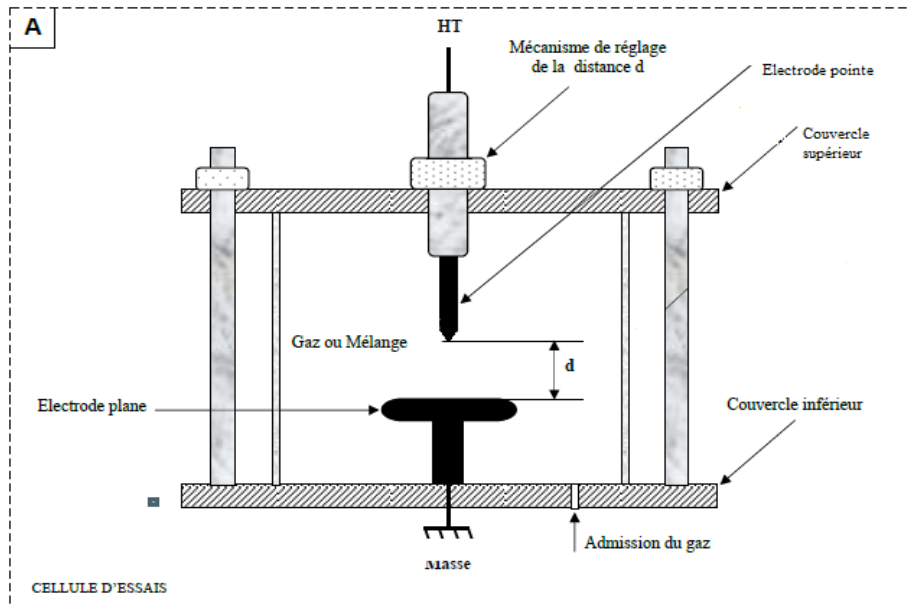
Les expériences sont effectuées au laboratoire de haute tension de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Le dispositif expérimental est composé d'une source haute tension continue variant de 0 à 65 kV, d'un système d'électrodes pointe-plan d'un dispositif de mesure, d'une pompe à vide et d'un tube de décharge.

### III.4. Cellule d'essai

La cellule d'essai dans notre étude c'est un tube de décharge qui est constitué de deux électrodes l'une pointue et l'autre plane.

L'électrode plane est un disque circulaire en acier de 100 mm de diamètre et de 4 mm d'épaisseur.

L'électrode pointue est une tige cylindrique en acier de 45 mm de longueur, avec un angle d'ouverture de 30°.



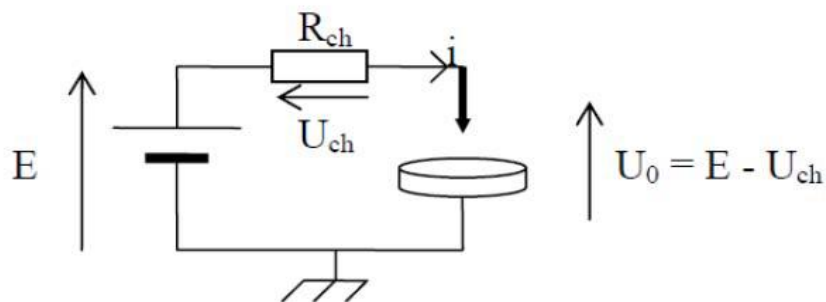
*Figure III.2 : La cellule d'essais pour une polarité positive*



*Figure III.3 : Photos des électrodes utilisées :(a) électrode plane, (b) électrode pointue*

### III.5. Dispositif de mesure

Afin d'évaluer les paramètres à l'étude, un système d'observation a été mise en place pour mesurer les courants moyens de décharge correspondant aux différentes tensions appliquées et cela se fait en insérant une résistance entre le tube de décharge et la mise à la terre, il est possible d'évaluer le courant de décharge. La loi d'Ohm nous permet d'obtenir directement le courant de décharge à partir de la valeur de la résistance et de la tension à ses bornes. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé une résistance de charge de  $1\text{ k}\Omega$  qui permet le limiter le courant.



*Figure III.4 : Schéma électrique permettant de tracer une caractéristique courant-tension d'une décharge couronne pointe plan positive.*

### III.6. Autres matériels utilisés

#### ➤ Mesure du courant moyen

Le courant moyen de la décharge est mesuré par un voltmètre numérique, branché aux bornes d'une résistance.



*Figure III.6. Voltmètre numérique*

➤ **Mesure de la pression**

La pression mesurée est donnée en hPa



*Figure III.7 : Dispositif de mesure de la pression « Baromètre »*

➤ **Source de tension continue :**

La source de tension utilisée donne une tension allant 0 à 65 kV



*Figure III.8. Source de tension continue*

➤ **Pompe à vide :**

La pompe à vide (figure III.9) est alimentée sous une tension de 220 V, elle est utilisée pour vider l'air de l'intérieur du tube de décharge, permettant ainsi une variation de la pression.



*Figure III.9. La pompe à vide*

### **III.7. Matériaux utilisés**

Lors de nos essais nous avons utilisé que des électrodes en acier

### **III.8. Mode opératoire**

Dans le but d'éviter toute modification ou altération des électrodes, celles-ci sont nettoyées avant et après chaque essai avec l'acétone afin de réduire les effets liés aux conditions de pression, de température et d'humidité.

### **III.9. Principe et configuration de la décharge**

La décharge est établie sur une surface isolante, diélectrique, entre deux électrodes disposées de part. Ces électrodes sont, dans notre cas, une pointe et un plan en acier. Lors des expériences, nous avons fait varier la distance  $d$  prise entre les électrodes de 10 à 25 mm. Comme plusieurs configurations de décharge ont été employées, tous ces paramètres (la polarité de la pointe, la valeur de  $d$  et la pression) seront précisées au fur et à mesure de la présentation des résultats.

Pour obtenir la décharge, on applique une haute tension continue entre les deux électrodes, l'une d'entre elles étant reliée à la terre.

Lorsque la haute tension est appliquée, un plasma de couleur bleutée se forme à la surface du diélectrique sur la pointe. Il s'étend à l'extrémité d'une électrode vers l'extrémité

la plus éloignée de l'électrode opposée et est réparti de façon assez homogène le long des électrodes.

### **III.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude expérimentale afin d'étudier l'influence de quelques paramètres sur la caractéristique courant-tension de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous une tension continue.

*Chapitre IV : Résultats  
expérimentaux et discussions*

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des essais effectués dans le chapitre précédent sur la décharge couronne dans un intervalle d'air en polarité positive et négative de la pointe sous tension continue.

Nous commencerons par les résultats des essais effectués sur l'influence de la distance inter-électrodes. Dans la deuxième partie, Nous exposerons les résultats des essais effectués sur l'influence de la pression sur la décharge couronne.

## IV.2. Influence de la distance inter-électrodes

Un ensemble d'essais a été réalisé dans le but de voir l'effet de la distance inter-électrodes sur la caractéristique courant-tension. Une série de tests est faite en variant la distance de 10 à 25 mm avec un pas de 5 mm pour les deux polarités de la pointe, d'abord en polarité négative puis en polarité positive.

### IV.2.1. En polarité négative de la pointe

La figure (IV.1) montre la variation du courant moyen en fonction de la tension appliquée pour différentes distances inter-électrodes allant de 10 à 25 mm.

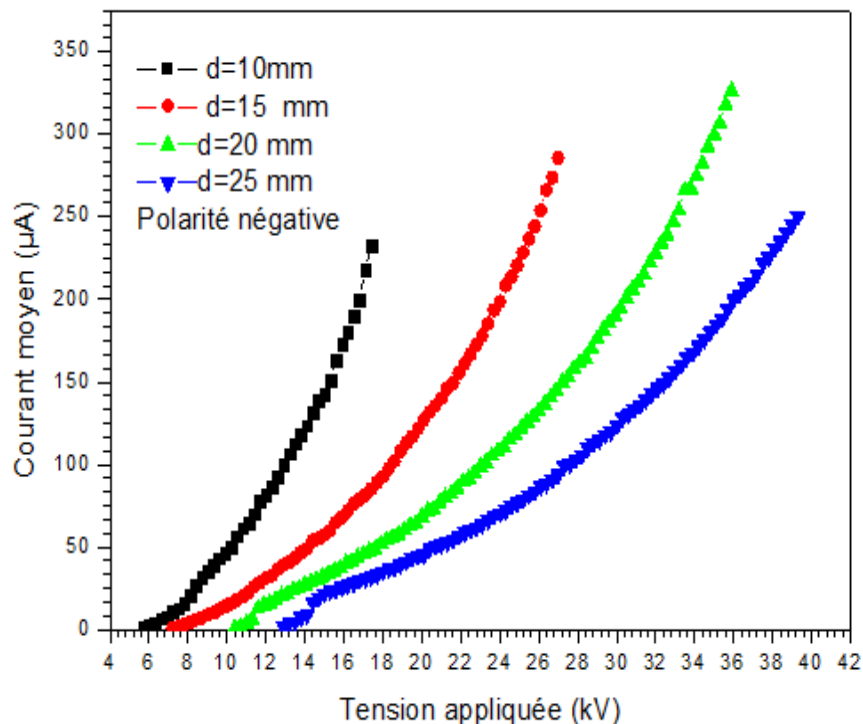


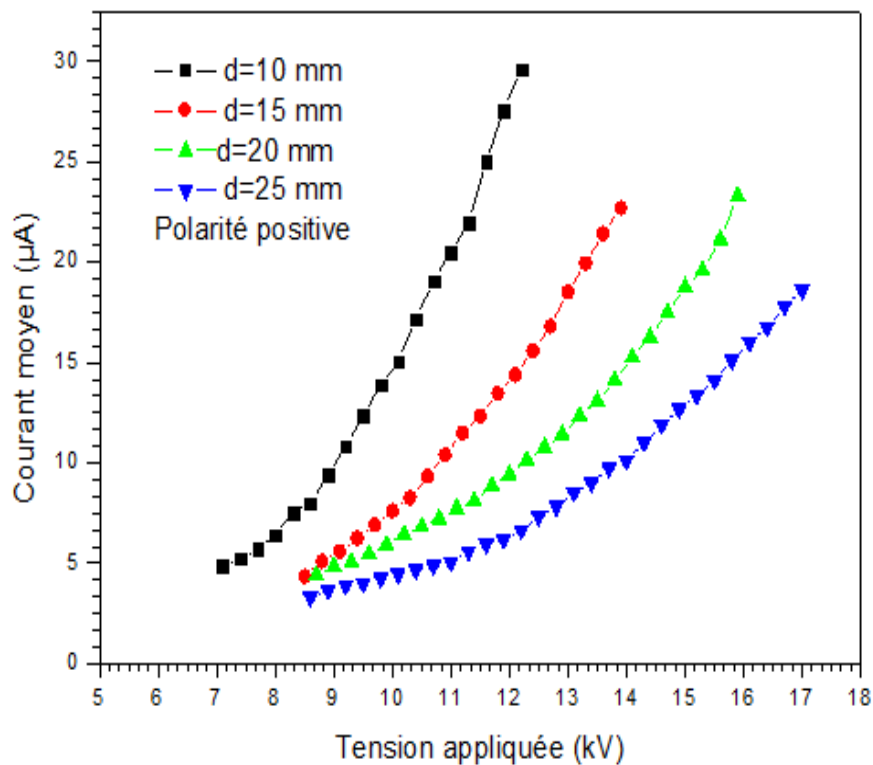
Figure IV.1. Caractéristique I-V d'une décharge négative

Nous observons sur la figure (IV.1), comme prévu que lorsque la distance inter-électrodes diminue le courant moyen de la décharge augmente (pour une tension fixe), également comme prévu, le courant moyen de décharge augmente lorsque la tension appliquée augmente (pour une distance inter-électrodes fixe).

Aussi on remarque que le seuil d'apparition de l'effet couronne est d'autant plus faible que la distance est réduite, ce qui nous apparaît d'ailleurs prévisible.

#### IV.2.2. En polarité positive de la pointe

La figure (IV.2) représente les résultats obtenus avec la pointe en acier couplé au plan en acier, le courant moyen de la décharge est représenté dans ce cas pour les distances inter-électrodes.



*Figure IV.2. Caractéristique I-V d'une décharge positive*

En observant cette configuration, il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour des faibles distances inter-électrodes.

De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faibles distances inter-électrodes.

### IV.2.3. Influence de la polarité de la pointe

Les figures (IV.3) et (IV.4) représentent la caractéristique courant-tension en polarité positive et en polarité négative pour les distances inter-électrodes de 10 et 15 mm.

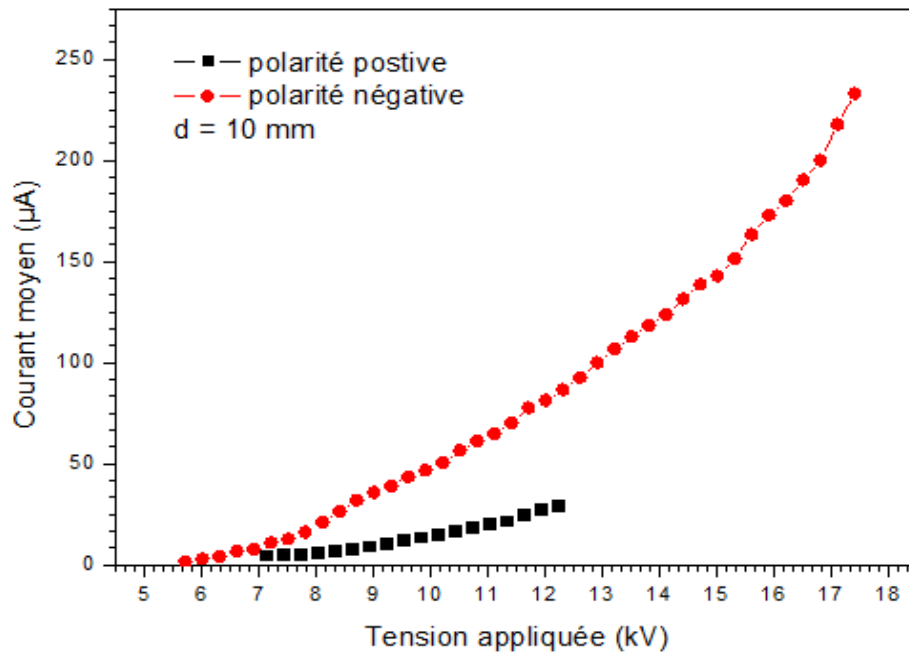


Figure IV.3. Caractéristique I-V dans les deux polarités de la pointe

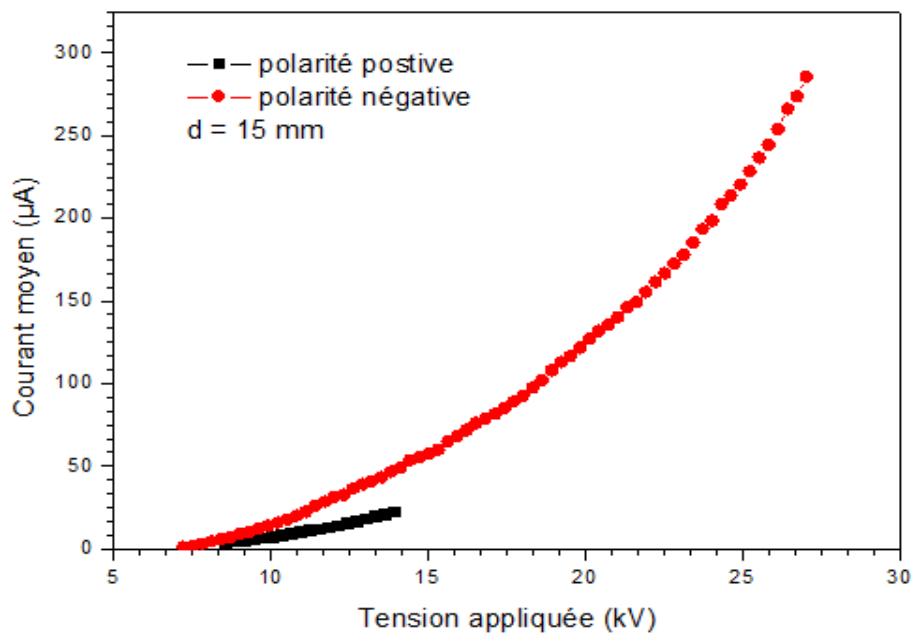


Figure IV.4. Caractéristique I-V dans les deux polarités de la pointe

D'après les figures (IV.3) et (IV.4), on remarque que pour une tension et une distance fixe le courant mesuré est plus grand quand la polarité de la tension appliquée est négative, cela est dû au fait que la décharge couronne positive survient avant la décharge négative.

Ainsi on remarque qu'à chaque fois on augmente la distance inter-électrode la tension seuil de l'apparition de l'effet couronne devient importante, et le courant moyen diminue c'est que veut dire le streamer est moins intense pour les grandes distances inter-électrodes. Aussi, les décharges sont moins puissantes en polarité positive qu'en polarité négative.

### IV.3.Effet de la pression

Un ensemble d'essai a été réalisé dans le but de voir l'effet de pression sur la décharge couronne. Une série de tests est faite en changeant la pression du gaz (air) à l'intérieur du tube de décharge.

#### IV.3.1. En polarité négative de la pointe

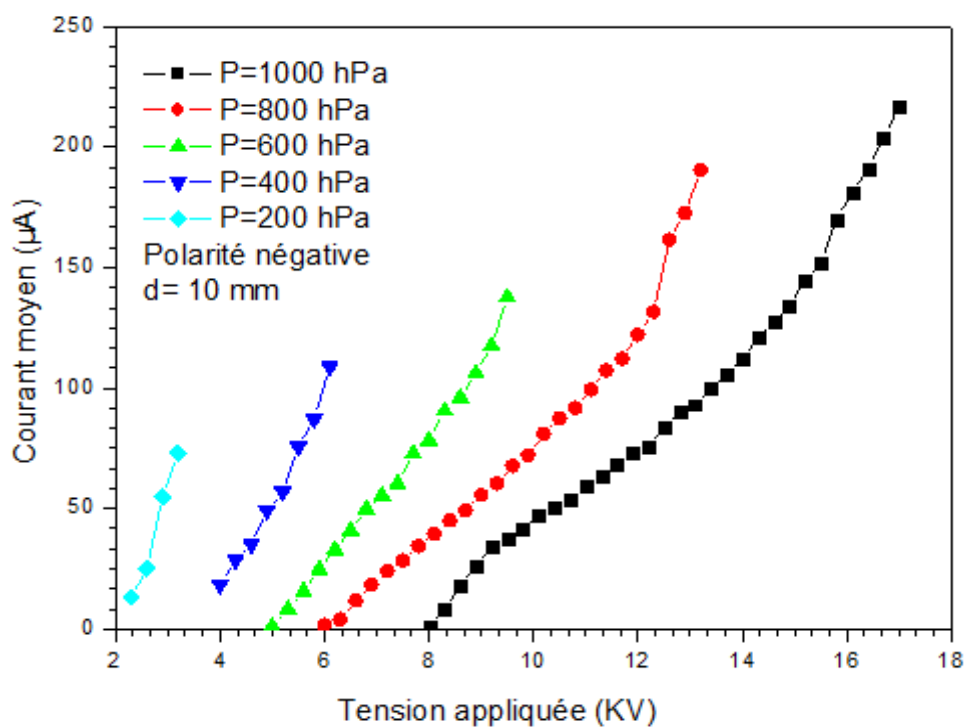


Figure IV.5. Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions

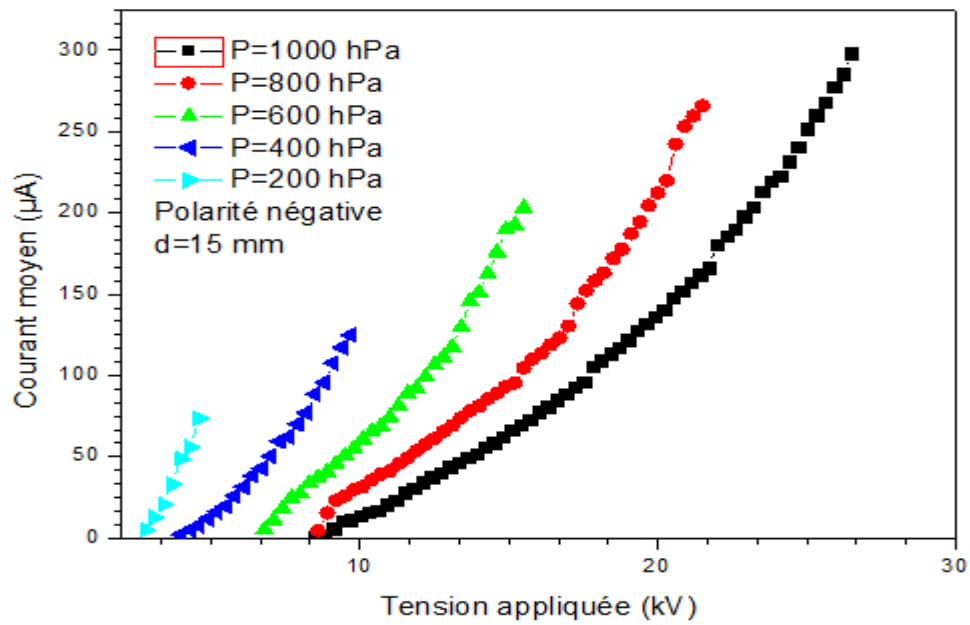


Figure IV.6. Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions

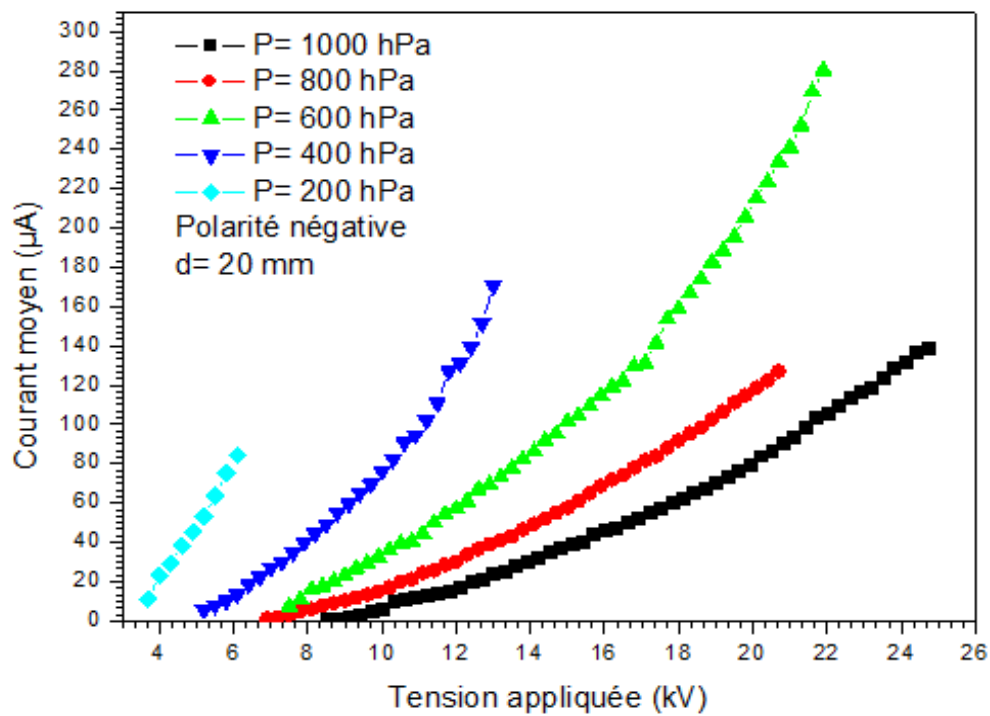
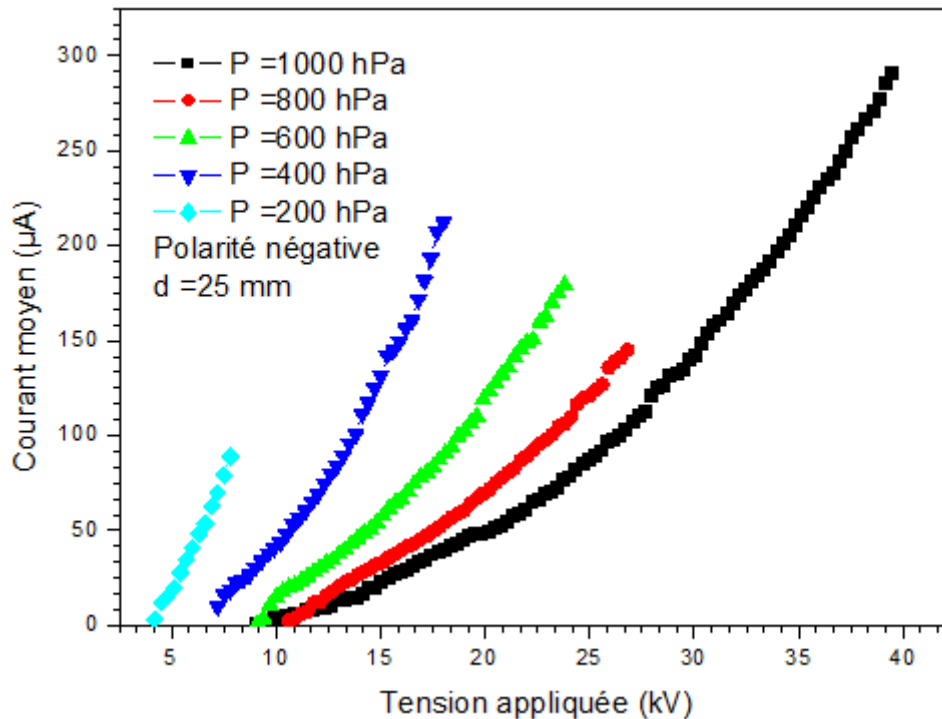


Figure IV.7. Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions



*Figure IV.8. Caractéristique I-V d'une décharge négative pour différentes pressions*

Les figures (IV.5), (IV.6), (IV.7) et (IV.8) représentent les caractéristiques courant-tension d'une décharge négative, ces dernières montrent l'évolution du courant moyen en fonction de la tension appliquée pour une distance inter-électrodes  $d$  donnée. La tension de claquage augmente avec l'augmentation de la pression cela peut être exprimé par la diminution du libre parcours moyen. Ce qui explique l'isolation de l'air est meilleur pour des hautes pressions et pour des grands intervalles d'air.

### IV.3.2. En polarité positive de la pointe

Dans cette polarité, les figures (IV.9), (IV.10), (IV.11) et (IV.12) montrent l'évolution du courant moyen avec la tension pour des pressions de 200hPa, 400hPa, 600hPa, 800hPa et 1000hPa, et pour de différentes distances inter-électrodes.

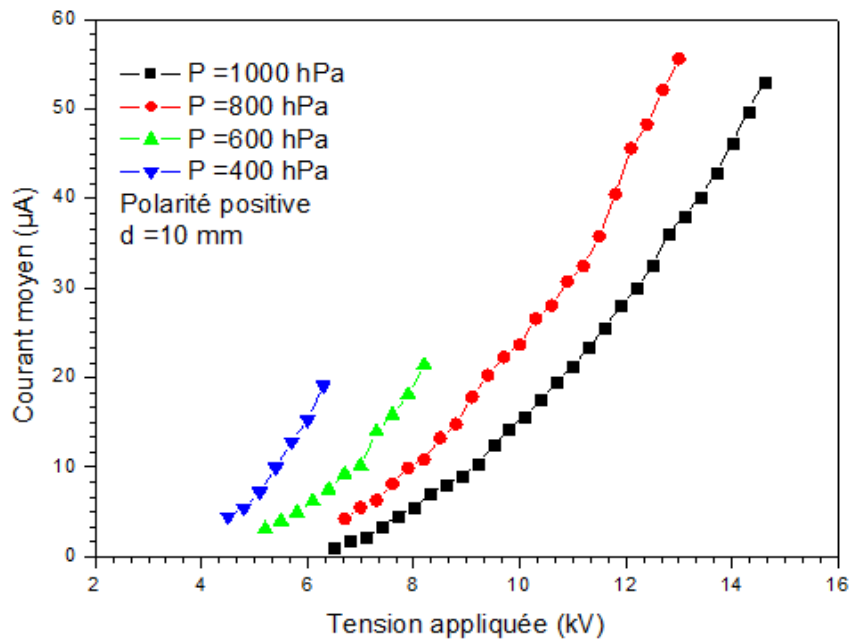


Figure IV.9. Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions

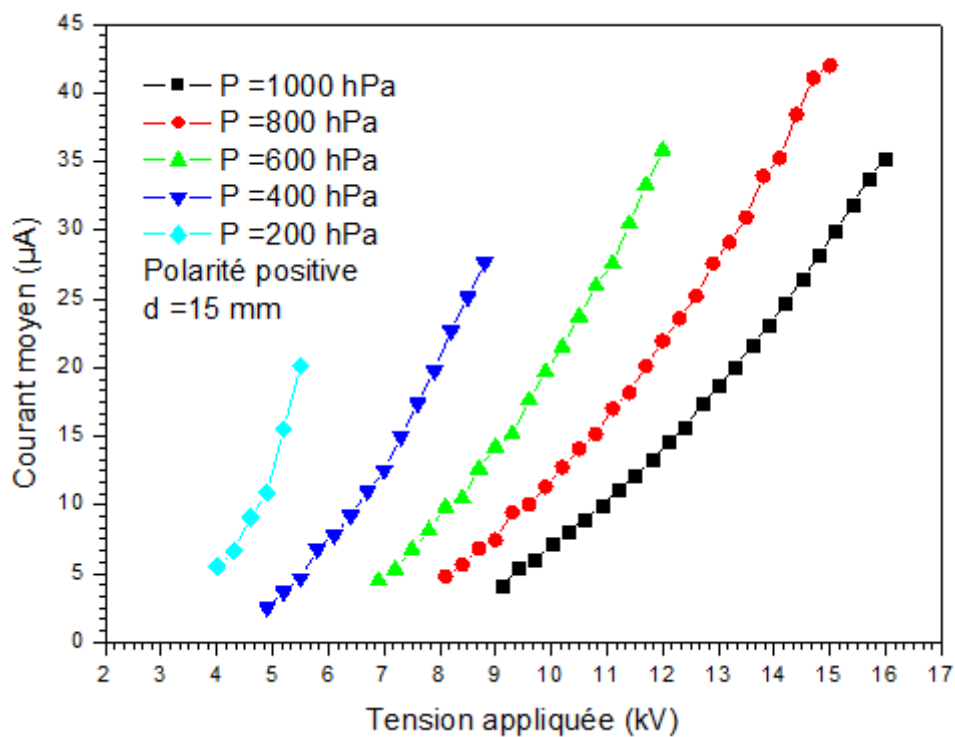


Figure IV.10. Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions

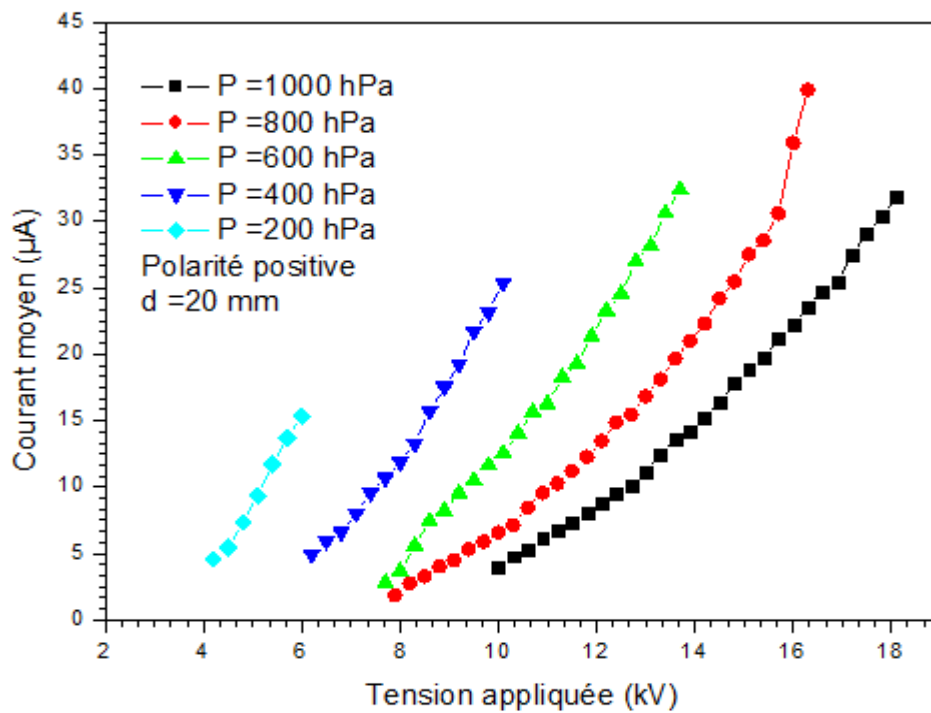


Figure IV.11. Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions

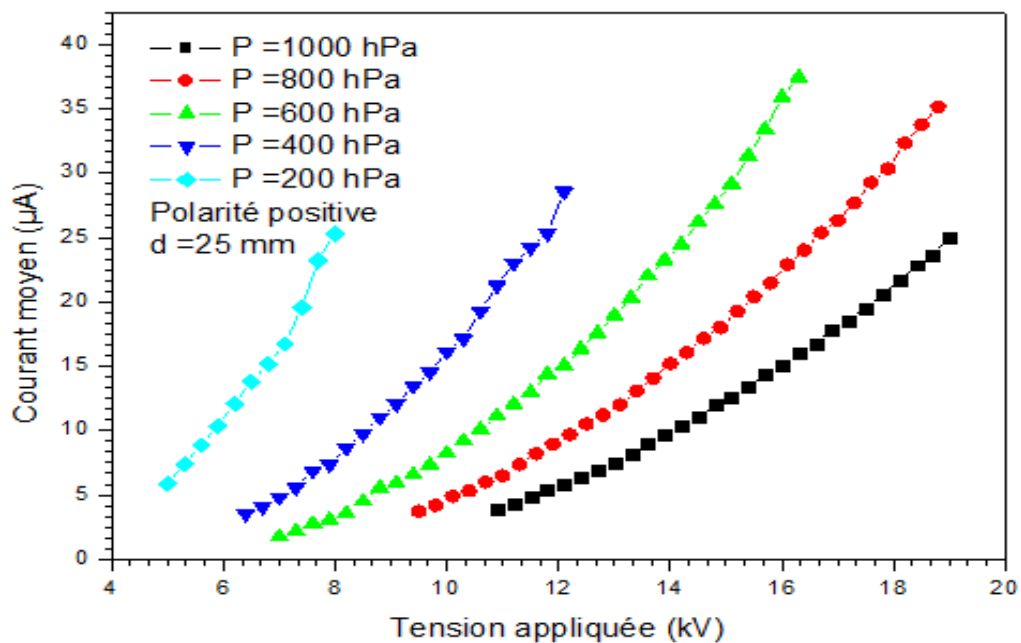


Figure IV.12. Caractéristique I-V d'une décharge positive pour différentes pressions

A partir des figures (IV.9), (IV.10), (IV.11) et (IV.12), on voit que la caractéristique (I-V) est de forme parabolique, ainsi que pour une pression de 1000 hPa et une distance de 25mm, le courant est faible par rapport aux autres pressions et pour les différentes distances. On constate que le courant moyen est inversement proportionnel à la pression ainsi que la distance inter-électrodes.

Une augmentation de la pression du gaz s'accompagne en général d'une augmentation de la tension d'apparition de l'effet couronne.

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, deux essais ont été effectués pour chaque polarité de la pointe, afin de mettre en évidence l'effet de certains paramètres (tels que la distance inter-électrodes et la pression) sur la caractéristique courant tension en régime de décharge.

La première série d'essais consiste à mettre en évidence l'influence de la distance inter-électrodes sur la caractéristique courant-tension.

La seconde a pour but de mettre en évidence l'influence de la pression sur la caractéristique courant-tension.

D'après les différentes expériences effectuées, on a constaté que les décharges couronne sont plus intenses dans les polarités négatives de la pointe. De plus, le courant moyen est inversement proportionnel aux paramètres pression et distance inter-électrodes.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons essayé de faire une étude assez détaillée sur la décharge couronne pour un système pointe-plan dans un intervalle d'air, et d'approfondir la compréhension des mécanismes de décharge dans les gaz, ainsi sur l'influence de la pression et de la distance inter-électrodes sur la caractéristique courant-tension en polarités positive et négative de la pointe.

La recherche bibliographique sur la décharge couronne dans les petits intervalles d'air nous a permis de voir que l'évolution du claquage électrique est caractérisé par deux mécanismes fondamentaux : la décharge de Townsend et l'évolution des avalanches électriques (Streamers).

Les résultats obtenus lors des différents essais ont permis d'expliquer l'influence de certain paramètres comme : l'influence de la distance inter-électrodes et l'influence de la pression du gaz.

Il est clair qu'une augmentation de la distance inter-électrodes s'accompagne avec une diminution du courant moyen parce que le champ électrique devient moins intense lorsqu'on s'éloigne de la pointe. Ainsi que La tension de claquage augmente avec l'augmentation de la pression cela peut être exprimé par la diminution du libre parcours moyen. Ce qui explique l'isolation de l'air est meilleur pour des hautes pressions et pour des grands intervalles d'air.

Ces essais ont été réalisés dans les deux polarités de la pointe : polarité négative et polarité positive.

La série d'essai nous a permis de recueillir les principales conclusions suivantes :

- ✓ L'intensité du courant est inversement proportionnelle à la distance inter-électrodes et croit rapidement avec la tension appliquée pour les faibles distances inter-électrodes.
- ✓ L'intensité du courant est inversement proportionnelle à la pression du gaz et croit rapidement avec la tension appliquée pour des faibles pressions.

En augmentant la distance inter-électrodes et la pression, la mobilité ionique diminue ce qui veut dire que la région de dérive ionique devient importante donc le champ électrique devient de plus en plus faible.

# *Références bibliographiques*

## **Résumé**

La décharge couronne est l'un des phénomènes électriques qui peut être observée lorsqu'une électrode est amenée à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique excède le seuil pour lequel des décharges pré disruptives apparaissent.

Dans ce mémoire, nous avons effectué une étude expérimentale à l'aide d'un tube de décharge comprenant un système pointe-plan. Cette décharge est faite dans un intervalle d'air sous tension continue en polarité positive et négative de la pointe, pour mettre en évidence l'effet de certains paramètres tels que la distance inter-électrodes et la pression, sur la caractéristique courant-tension en régime de décharge.

Les résultats obtenus montrent bien que le facteur de la pression et celui de la distance inter-électrodes influent considérablement sur la décharge couronne et modifie la caractéristique du streamer. On a constaté que le courant moyen est inversement proportionnel à la pression ainsi que la distance inter-électrodes, et que l'augmentation de la pression du gaz s'accompagne en général d'une augmentation de la tension d'apparition de l'effet couronne. De plus, on peut dire que les déchargés sont plus intense dans les polarités négatives.

## **Abstract**

The corona discharge is one of the electrical phenomena that can be observed when an electrode is brought to a sufficiently high voltage for the electric field to exceed the threshold for which pre-disruptive discharges occur.

In this thesis, we carried out an experimental study using a discharge tube comprising a tip-plane system. This discharge is made in an air gap in positive and negative polarity of the DC voltage tip, to highlight the effect of certain parameters such as the inter-electrode distance and the pressure, on the current-voltage characteristic in discharge scheme.

The results obtained clearly show that the factor of the pressure and that of the inter-electrode distance have a considerable influence on the corona discharge and modify the characteristic of the streamer. It has been found that the average current is inversely proportional to the pressure as well as the inter-electrode distance, and that the increase of the gas pressure is generally accompanied by an increase in the voltage of appearance of the effect crowned. Moreover, it can be said that discharges are more intense in negative polarities.

- [1] **A. Tilmantine**, “*Technique de la haute tension*”, Polycopié de cours Université Djillali Liabès, 2010.
- [2] **D. Saad**, “*Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolants et les surfaces métalliques*”, Mémoire Magister, UMMTO, 2011.
- [3] **D. Tifaoui, A. Ladjel**, “*Etude de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continue*”, Mémoire de Master, UMMTO, 2016.
- [4] **A. Labergue**, “*Etude de décharges électriques dans l’air pour le développement d’actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d’écoulements*”, Thèse de Doctorat de l’Université de Poitiers, 2002.
- [5] **M. Coulibaly**, “*Etude de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continue*”, Thèse de Doctorat de l’Ecole Centrale de Lyon, 2009.
- [6] **F.Z. Bouchlaghem**, “*L’influence du transfert d’énergie sur le dynamique de mélange gazeux*”, Mémoire d’Ingénieur à l’université de Tlemcen, octobre 2010.
- [7] **A. Vincent**, “*Conception et simulation d’un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d’azote dans des effluents marqué par un isotope*”, Thèse de Doctorat de l’université Paris VI, Décembre 2002.
- [8] **Y. Bourek**, “*Détermination des condition d’ionisation caractérisant le seuil de claquage de l’air par la logique floue*”, Mémoire de Magister de l’Université de Batna, 2005.
- [9] **S.L. Yao, E.Suzuki, N. Meng and A. Nakayama**, “*A high-efficiency reactor for the pulsed plasma conversion of methane*”, Plasma Chem. Plasma Processing, Vol.22, N°2, pp.225-237, 2002.
- [10] **C. Liu, A.Marafee, B. Hill, G. Xu, R. Mallinson and L. Lobban**, “*Oxydative coupling of methane with AC and DC corona-discharge reactor*”, Ind. Eng. Chem. Res., Vol.35, pp.3295-3301, 1996.
- [11] **Flavien. Koliatene**, “*Contribution à l’étude de l’existence des décharges dans lessystèmes de l’avionique*”, Thèse de Doctorat de l’université de Toulouse III, janvier 2009.
- [12] **C.Gary, G.Le Roy, B.Hutzler, J.Lalot J. and C.Dubanton**, “*Les propriétés diélectriques de l’air et les très haute tensions*”, Collection de la DER d’EDF, N° 51, Edition Eyrolles, 1984.
- [13] **J. M. Meek, J. D Craggs**, “*Electrical breakdown of gases*”, Ed.Wiley, 1978.
- [14] **T.Suzuki**, “*Transition from primary streamer to the arc in positive point-to plane corona*”, J. Appl. Phys., vol. 42, pp.3766-77, 1971.
- [15] **R. C. Klewe, R.T. Waters and B. Jones**, “*Breakdown phenomena in long air gaps under switching impulse conditions*”, Review of models of breakdown IEEE Summer Meeting, paper 74-CH 0910 PWR, 1974.
- [16] **Groupe des Renardières**, “*L’amorçage en polarité négative des grands intervalles d’air aux Renardières*”, Electra N° 74, 1981.

- [17] **E. Kuffel and M. Abdoullah**, “*High voltage engineering*”, Library of Congress Catalog Card N° 72-85501, First édition, 1970.
- [18] **C. Potvin**, “*Comportement et effet de la charge d'espace sur le mécanisme des vibrations induites par l'effet de couronne*”, Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Mars 2000.
- [19] **L.khelloul, F.Meziane**, “*Influence de la barrière diélectrique sur une décharge couronne en géométrie pointe-plan*”, Mémoire d'Ingénieur d'état, UMMTO, 2006.
- [20] **R. Farhi, C. Morel and G. Chéron**, “*Matières plastiques et adjuvant hygiène et sécurité*”, INRS, ED638, Octobre 2006.
- [21] **Z.LU**, “*Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharges électriques de type filamentaire*”, Thèse de Doctorat de l'université Paris VI, Décembre 1991.
- [22] **M.Rezzouga, A.Tilmatine, R.Gouri, K.Medles, L.Dascalescu**, “*Experimental modeling of high-voltage corona discharge using design of experiments*”, Front. Electr. Electron. Eng, 2(2) : 139-143, China, 2007.
- [23] **M.P. Panaget**, “*Etude en laboratoire des effets physico-chimiques induits par les pertes électriques des lignes de transport à haute tension*”, Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, 1997.
- [24] **H. Kadi**, “*Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension*”, Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [25] **C.Gary**, “*Effet couronne sur les réseaux électriques aériens*”, Techniques de l'Ingénieur, D4440.
- [26] **G.N.Adelsandrov, G.M Rigeikov and O.V Cherbatchev**, “*Modélisation de la caractéristique de couronne de courant alternatif*”, Recueil de l'institut polytechnique de Saint Petersburg, Série de la technique de la haute tension, 1958.
- [27] **C.Gary**, “*Effet couronne en tension alternative*”, Techniques de l'Ingénieur, Tome 1 D640.
- [28] **C. Marteau, M. Haidara, A. Denat**, “*Dispositif d'étude des décharges électriques*”, Revue de Physique Appliquée. Vol. 24, pp.597-606, 1989.
- [29] **A. M. Pointu, J. Perrin, J. Jolly**, “*Plasmas Froids de Décharge-Propriétés électriques*”, Techniques de l'ingénieur, Traité de Génie Électrique. D 2830-2-15, 1996.
- [30] **V.M. Blok**, “*Réseaux électriques*”, Moskou, Bischaya Chkola, 1986.
- [31] **G.N Alelsandrov**, “*Les décharges de couronne dans les lignes de transport d'énergie*”, 1964.
- [32] **I. Ndiaye**, “*Initiation et développement des décharges couronnées sur une surface de glace*”, Mémoire de maîtrise de l'Université du Québec à Chicoutomi, 2003.