

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



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

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux électriques

*Présenté par*

**TIFAOUI Djilali**

**LADJEL Amine**

Thème

## Etude de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continue

*Mémoire soutenu publiquement le 28/06/2016. Devant le jury composé de :*

**M Mohammed MEGHERBI**

Professeur, UMMTO, Président

**M M'hand MEKIOUS**

MAA, UMMTO, Encadreur

**M Salah HADDAD**

Professeur, UMMTO, Examineur

**Mme F. BITAM-MEGHERBI**

Professeure, UMMTO, Examinatrice

# *Remerciements*

*Le présent travail a été effectué sein du laboratoire "LATAGE" de L'Université MOULOUD Mammeri de Tizi Ouzou sous la Direction de Monsieur MEKIOUS M'hand, Maître Assistant-A. Nous tenons à le remercier sincèrement pour ses conseils et ses orientations qui nous ont été d'une très grande utilité dans la réalisation de ce mémoire.*

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

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Monsieur HADDAD Salah, Professeur à l'UMMTO pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Nos remerciements vont également à Madame BITAM-MEGHERBI Ferroudja, Professeur à l'UMMTO qui fait partie du jury.*

*Nous tenons à remercier l'ensemble du personnel du département de d'électrotechnique et ses étudiants ainsi que ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

## **DÉDICACES**

**CHALEUREUSEMENT JE DÉDIE CE MODESTE  
TRAVAIL À :**

**MA TRÈS CHÈRE MÈRE**

**MON PÈRE**

**MON FRÈRE ZILACENE**

**MES SŒURS SARAH SILINA ET CELIA**

**TOUTE MA FAMILLE**

**MES AMIS (E)**

**A. LADJEL.**

# DÉDICACES

CHALEUREUSEMENT JE DÉDIE CE MODESTE  
TRAVAIL À:

MA TRÈS CHÈRE MÈRE

MON PÈRE

MES FRÈRES ET MES SŒURS

TOUTE MA FAMILLE

MES AMIS (E)

DJ. TIFAÛI.

# *Sommaire*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	01
Chapitre I : généralités sur les décharges dans les gaz	
I.1 - Introduction .....	03
I.2- Notions sur les gaz.....	03
I.2.1- Libre parcours moyen.....	03
I.2.2- Théorie cinétique des gaz.....	03
I.2.3- Phénomène de collision.....	04
I.3- Les mécanismes élémentaires dans les gaz ionisés.....	05
I.3.1- Excitation atomique.....	06
I.3.2- Désexcitation.....	06
I.3.3- Ionisation par collision électronique.....	06
I.3.4- La photon ionisation.....	07
I.3.5- La recombinaison entre ions.....	07
I.3.6 - Recombinaison ion+électron.....	08
I.3.7- détachement.....	08
I.3.8- Attachement.....	09
I.3.9- mobilité des charges dans un champ électrique.....	09
I.3.10- Diffusion.....	11
I.4- Claquage diélectrique dans un gaz.....	11
I.4.1- Avalanche électronique.....	12
I.4.2- Théorie de Townsend.....	13
I.4.2.1- Mécanismes de claquage.....	13
I.4.2.2- Critère de claquage.....	13
I.4.3- Théorie du canal (Streamer).....	14
I.4.3.1- Mécanismes de claquage.....	14
I.4.3.2- Critère de claquage.....	16
I.5 - La Loi de Paschen.....	17
I.6 – Conclusion.....	18
<b>Chapitre II : Connaissances de base sur la décharge couronne</b>	

II.1- Introduction.....	19
II.2- Définition de la décharge couronne.....	19
II.3- Tension d'apparition de l'effet couronne.....	20
II.3.1- Champ électrique critique (formule de Peek).....	20
II.3.2- Tension de seuil d'apparition de l'effet couronne.....	21
II.4- Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension).....	21
II.5- Mécanisme de la décharge couronne.....	22
II.6- Paramètre influençant la décharge couronne.....	22
II.6.1-Influence des paramètres de gaz.....	22
II.6.1.1-Nature de gaz.....	22
II.6.1.2-Densité de l'air.....	23
II.6.1.3- La température.....	23
II.6.1.4- Humidité.....	23
II.6.1.5- Pression.....	24
II.6.2- Influence du type de la tension appliquée.....	24
II.6.2.1-En tension continue.....	24
II.6.2.2- En tension alternative (50 ou 60Hz).....	24
II.6.3- Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne.....	25
II.6.3.1- Décharge positive.....	25
II.6.3.2- Décharge négative.....	26
II.6.4- Influence du rayon de courbure.....	27
II.6.5- Influence de la distance inter-électrodes.....	28
II.6.6- Influence de la nature des électrodes.....	29
II.6.7- Influence de la forme des électrodes.....	29
II.6.8- Influence de l'Etat de la surface.....	30
II.7- Domaine d'application des décharges couronnes.....	31
II.7.1- Traitement des effluents gazeux.....	31
II.7.1.1- Les précipitateurs électrostatiques.....	31
II.7.1.2- Destruction des polluants.....	31
II.7.2- Traitement des surfaces.....	31
II.7.2.1- Nettoyage et érosion de surface.....	31
II.7.2.2- Modification de la chimie de surface.....	32
II.7.3- Élimination de l'électricité statique.....	32

II.8- Avantage de la décharge couronne dans le réseau.....	32
II.9- Problèmes liés aux décharges couronne.....	32
II.10- Conclusion.....	33
<b>Chapitre III : Etude expérimentale</b>	
III.1 - Introduction .....	34
III.2 - Dispositif expérimental.....	34
III.2.1 - Cellule d'essai.....	34
III.2.2 - Dispositif de mesure.....	35
III.3 – Matériaux utilisés.....	36
III.4 - Mode opératoire.....	36
<b>Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussion</b>	
IV.1-Introduction.....	37
IV.2- Décharge en polarité négative et positive de l'électrode pointe-plan.....	37
IV.3- Influence de la distance inter-électrodes.....	37
IV.3.1- Polarité négative de la pointe.....	37
IV.3.2- Polarité positive de la pointe.....	38
IV. 4- Influence du rayon de courbure de la pointe.....	40
IV.5- Effet du matériau des électrodes.....	41
IV.5.1- Polarité négative de la pointe.....	41
IV.5.2- Polarité positive de la pointe.....	44
IV.6 Conclusion.....	46
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>47</b>

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

La décharge couronne regroupe l'ensemble des phénomènes électriques qui se développent dans les intervalles gazeux soumis à des champs fortement hétérogènes et localement assez élevés pour produire une ionisation partielle du gaz.

L'inhomogénéité du champ électrique est obtenue par la configuration particulière des électrodes, l'une présentant un rayon de courbure très faible par rapport à celui de l'autre. Le champ électrique autour de l'électrode à faible rayon de courbure se trouve alors fortement amplifié. Les différentes géométries d'électrodes utilisées sont représentées par des systèmes pointe-plan, fil-cylindre, fil-plan, etc....

Si la décharge couronne a fait l'objet de nombreuses études, c'est d'abord parce qu'il s'agit d'un phénomène largement répandu dans la nature, mais également un phénomène très utilisé dans des applications industrielles en raison de la simplicité de sa mise en œuvre.

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

Globalement, les phénomènes observés durant la décharge couronne sont optiques, électriques, acoustiques et radioélectriques. 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.

La multitude des régimes de la décharge couronne a donné lieu à de nombreuses études prenant en considération l'influence des différents paramètres précédemment cités, l'influence du matériau constituant les électrodes en configuration pointe-plan sous tension continue a été aussi prise en compte.

Le travail rapporté dans ce mémoire se présente de la façon suivante :

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

L'objectif du second chapitre est une présentation générale, mais assez développée des différents aspects qui régissent les propriétés de la décharge couronne, notamment en géométrie pointe-plan, configuration qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de la présente étude.

Le troisième chapitre est réservé à une présentation du dispositif expérimental et du mode opératoire.

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

Nous terminons le présent mémoire par une conclusion générale.

# *Chapitre I*

## *Généralités sur la décharge 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 gaz le plus utilisé, d'une part pour ses bonnes qualités isolantes, d'autre part, car il est disponible en quantité et gratuitement [6].

En pratique un isolant n'est jamais parfait, car il contient toujours un certain nombre de charges libres à cause des rayonnements cosmiques, solaire et de la radioactivité naturelle, ce qui fait qu'à l'application d'un champ électrique, ces charges se déplacent, donc un courant électrique apparaît. Ce dernier dépend du champ électrique appliqué et si on dépasse un certain seuil, le gaz présentera une conductivité due à des collisions entre particules et ce phénomène se développe pour provoquer une décharge électrique, c'est ce que nous allons essayer d'expliquer dans ce premier chapitre en nous basant sur quelques phénomènes physiques et électriques [7].

## I.2- Notions sur les gaz

### I.2.1- Libre parcours moyen

Le **libre parcours moyen** (lpm)  $\lambda$  est la distance parcourue 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.

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

Avec:

N : nombre de particules pour unité de volume;

$r_1$  : diamètre de la particule bombardée;

$r_2$  : diamètre de la particule bombardante;

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

### I.2.2- 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 particule 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 la particule.

Il en résulte que pour un gaz composé de particules de masse 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.2.3- Phénomène de collision

Au cours du mouvement, les particules peuvent se rencontrer, au sens où elles se rapprochent suffisamment pour donner lieu à une modification de leurs énergies respectives (avec conservation de l'énergie totale). Si les particules n'échangent que de l'énergie cinétique de translation, on parle de **choc élastique**, c'est presque le cas de tous les atomes dans un gaz pris dans les conditions de pression et de température normales.

Si les particules échangent une partie de leurs énergie interne, on parle de **choc inélastique**, l'échange d'énergie est d'autant plus grande que les masses des particules sont voisines.

En ce qui concerne la décharge dans les gaz, les collisions non élastiques ne concernent que les électrons dits de valence qui sont impliqués dans les réactions chimiques [1].

Quel que soit le résultat de la collision, on ne peut définir que le comportement moyen d'une particule et donc seulement définir la probabilité  $p$  qu'a une particule de donner lieu à une collision d'un type donné.

Cette probabilité n'est autre que le rapport du nombre de collisions  $dn$  subi par la particule pendant un déplacement élémentaire  $dx$ . Par définition, on pose :

$$P = \frac{dn_x}{dx} = n\sigma \quad (1.3)$$

Où  $n$  est la densité de particules de gaz et  $\sigma$  la section efficace de collision relative au type de collision considéré qui, dans le cas général, dépend de la vitesse relative des deux particules en interaction [8].

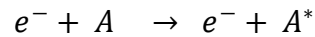
### I.3- Les mécanismes élémentaires dans les gaz ionisés

Plusieurs types d'événements modifient l'énergie interne des particules, ils font tous intervenir leurs charges électrique, dans le cas qui nous intéresse directement, les partenaires de collisions les plus importants sont les électrons, les photons et les réactions principales se résument comme suit :

- L'excitation atomique ;
- La désexcitation ;
- L'ionisation par collision électronique ;
- La photo ionisation ;
- La recombinaison entre ions ;
- Recombinaison ion- électron ;
- L'attachement électronique;
- Le détachement électronique dans un champ électrique ;
- La Diffusion.

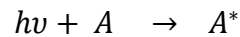
### I.3.1- Excitation atomique

Un atome neutre peut être excité soit par collision avec un électron, soit par absorption d'un photon. Dans le premier cas la réaction s'écrit :



Cette réaction n'est possible que si l'énergie cinétique de l'électron incident est au moins égale à l'énergie d'ionisation ( $eV^{*}$ ).

Dans le deuxième cas, la réaction s'écrit :



Cette réaction n'a lieu que pour une plage de fréquence très étroite centrée sur :

$$h\nu \approx eV^{*}$$

$h\nu$  : L'énergie d'un photon de fréquence  $\nu$  ( $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$  J.s est la constante de Planck).

### I.3.2- 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 :  $W_p = h\nu$  ( $A^{*} \rightarrow A + W_p$ )

### I.3.3- Ionisation par collision électronique

L'ionisation d'un gaz par les électrons libres accélérés dans un champ électrique est le processus essentiel de la formation d'ions positifs, ce phénomène est appelé processus d'avalanche. L'ionisation d'un atome par un choc électronique n'est

possible que si l'énergie cinétique de l'électron incident est au moins égale à l'énergie d'ionisation de l'atome considéré [3].

### I.3.4- La photon 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 [6]. 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  $\nu_s$  est la fréquence de seuil d'ionisation et  $\nu$  celle du photon incident. L'énergie cinétique de cet électron sera donc égale à  $h\nu - h\nu_s$ .

### I.3.5- La recombinaison entre ions

C'est les réactions par les quelles deux particules possédant des charges de signes différents échangent ces charges pour revenir à l'état neutre [6]. Ces réactions d'ionisation, libèrent une certaine énergie soit sous forme de photons ou sous forme d'énergie cinétique cédée à une molécule de gaz voisine et la recombinaison dans l'effet couronne se produit dans les régions de champ électrique faible (molécules moins énergétiques).

Pour décrire macroscopiquement les phénomènes de recombinaison, on introduit un coefficient de recombinaison  $\alpha$  ( $m^3/s$ ), soit alors :

Le taux de décroissance des charges s'exprime par la relation :

$$\frac{dn^+}{dt} = \frac{dn^-}{dt} = -\alpha \cdot n^+ \cdot n^- \quad (I.4)$$

$n^+$  : nombre de charges positives par  $m^3$ ,

$n^-$  : nombre de charges négatives par  $m^3$ ,

Pour l'air et dans les conditions normales :  $\alpha \approx 1.5 \cdot 10^{-12} m^3/s$ .

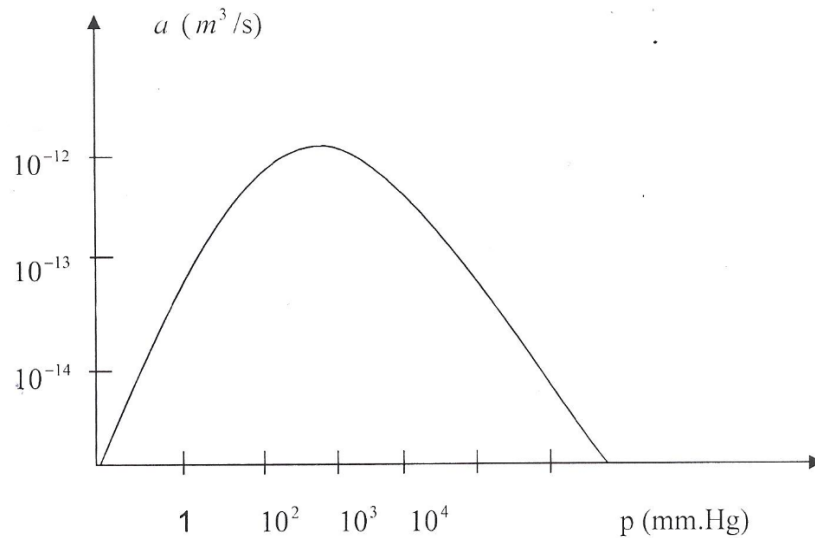


Figure I.1 : Coefficient de recombinaison ion-ion en fonction de la pression [6].

### I.3.6 – Recombinaison ion+électron

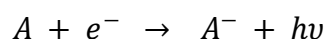
Lorsque un électron se recombine avec un ion positif pour redonner un atome neutre, la réaction libère une énergie égale à l'énergie d'ionisation, sous forme d'un photon. Si l'électron incident possède une énergie électrique  $E_c$ , l'énergie du photon créé aura pour valeur :

$$h\nu = E_c + eV_i$$

Le spectre émis est continu, limité en basses fréquences par  $E_c = 0$ , les photons émis peuvent à leur tour ioniser le gaz à une certaine distance, ce qui expliquerait le développement des streamers, ce sont essentiellement des photons ultra violet. Cependant, en ce qui concerne l'effet couronne, cette réaction (recombinaison ion+électron) joue un rôle très secondaire dans la disparition des électrons libres

### I.3.7- Attachement

Quand un électron s'attache à un atome pour former un ion négatif ;



L'attachement se produit pour des champs assez faibles. Les particules neutres (atomes et molécules) favorisent l'attachement des électrons.

L'attachement correspond à une diminution d'électrons dans le gaz ; par analogie avec l'augmentation d'électrons par ionisation ( $\alpha$ ), on écrit :

$$\frac{d\eta}{\eta} = -\eta dx \quad (I.5)$$

Avec  $\eta$  coefficient d'attachement.

### I.3.8- Détachement

C'est le processus inverse du précédent : un ion négatif perd son électron supplémentaire, 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 [6].

### I.3.9- Mobilité des charges dans un champ électrique

En présence d'un champ électrique, les électrons et les ions sont accélérés 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 être bien plus grande pour les électrons [1] .

En définissant la mobilité comme :

$$\mu = \frac{u}{E} \quad (I.6)$$

où  $u$  est la vitesse de dérive et  $E$  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 :

$$\frac{D}{\mu} = \frac{KT}{e} \quad (\text{I.7})$$

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 [4].

Si les particules chargées ont une énergie comparable à celle fournie par l'agitation thermique aux molécules neutres [1], on montre que :

$$U = \left[ \frac{e\lambda}{mw} \right] E \quad (\text{I.8})$$

U : vitesse de dérive,

$\lambda$  : libre parcours moyen,

w : vitesse d'agitation thermique d'où :

$$\mu = \left[ \frac{e\lambda}{mw} \right] \quad (\text{I.9})$$

A la température donnée,  $\left[ \frac{e}{mw} \right]$  est constante et il apparaît que  $u$  est en fonction de la quantité  $\lambda E$  (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).

### I.3.10- Diffusion

Le mécanisme de diffusion d'un gaz apparaît dès qu'il existe une différence de concentration entre deux points voisins [7].

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

$$\Gamma = -D \frac{\partial n}{\partial x} \quad (\text{I.10})$$

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 [1] :

$$\vec{j} = -n_e \mu \vec{E} - D_e \overrightarrow{\text{grad}} n_e \quad (\text{I.11})$$

$D_e$ : coefficient de diffusion électronique.

$n_e$ : densité électronique.

Les résultats établis pour les électrons peuvent s'adapter aux ions, alors l'équation générale de diffusion est [7].

$$\frac{\partial n}{\partial x} = D \nabla^2 n \quad (\text{I.12})$$

### I.4- Claquage diélectrique dans un gaz

Un gaz est théoriquement un isolant parfait puisqu'il ne contient que des atomes ou des molécules neutres. Pour que l'initiation de la décharge disruptive se produise, il faut qu'au moins une particule chargée dite *particule germe*, généralement un électron, soit présent dans ce gaz. Dès lors que cet électron est créé, il est accéléré par le champ électrique appliqué et entre en collision avec les molécules neutres du gaz. Quand le champ est suffisant, cette charge, entre deux chocs, prend assez d'énergie pour ioniser une molécule et créer d'autres charges libres qui à leurs tours peuvent ioniser d'autres molécules. C'est l'effet d'avalanche électronique. Plusieurs avalanches peuvent ainsi être créées dans le gaz. Ces dernières peuvent conduire au claquage électrique suivant deux mécanismes : le mécanisme de Townsend

ou le mécanisme du canal (Streamer en anglo-saxon) en fonction de plusieurs Paramètres tels que la distribution du champ électrique entre les électrodes, l'intensité de ce champ, la forme de la tension appliquée, le taux d'humidité, etc...

#### I.4.1- Avalanche électronique

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 par des ultraviolets 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 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. C'est ce phénomène, qui provoque un accroissement exponentiel de la densité de charge électronique lorsqu'on s'éloigne de l'électrode. Le claquage à donc lieu, fait du phénomène d'avalanche ceci est montré voir la figure I.2.

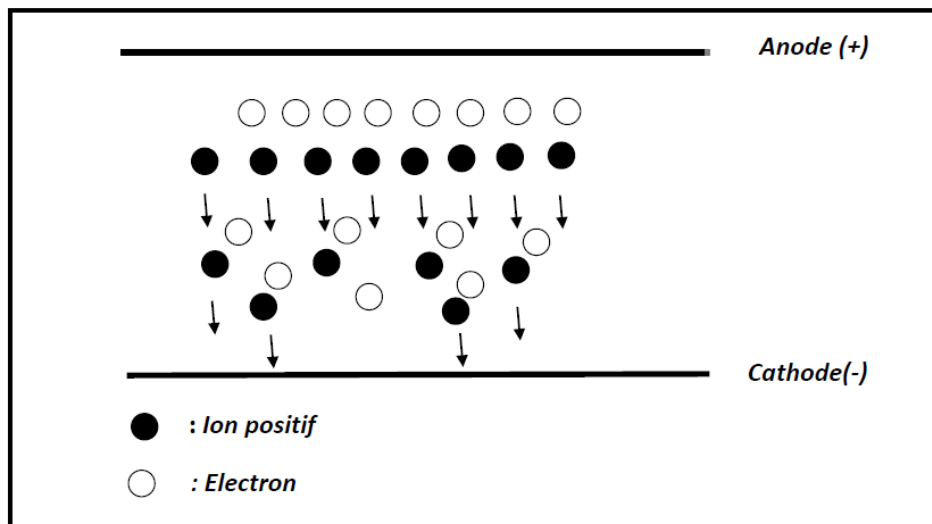


Figure I.2 : Avalanche électronique.

Cette avalanche peut être étudiée quantitativement à partir de la connaissance de coefficient d'ionisation de Townsend. A qui 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 on a :

$$\alpha = AP \exp(-BP/E) \quad (I.13)$$

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

P : pression atmosphérique.

E : champ électrique appliqué.

## I.4.2- Théorie de Townsend

### I.4.2.1- Mécanismes de claquage

Dans la théorie de Townsend, les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent *arracher* des électrons par bombardement de la cathode qui vont venir renforcer l'avalanche. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important. L'avalanche s'auto entretient et le claquage se produit même si la tension n'est plus appliquée.

On définit le coefficient  $\gamma$  appelé *coefficient d'émission secondaire ou second coefficient de Townsend* qui représente le nombre d'électrons arrachés à la cathode par un ion positif. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz.

### I.4.2.2- Critère de claquage

L'équation générale de Townsend reliant le courant d'avalanche I au courant initial  $I_0$  en champ non uniforme est :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1 + \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx}{1 - \gamma \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx} \quad (I.14)$$

où  $d$  est la distance inter-électrodes en mm,  $\alpha$  le coefficient d'ionisation,  $\gamma$  le coefficient d'émissions secondaires et  $\eta$  le coefficient d'attachement. Ce dernier caractérise la propriété qu'ont certains gaz à *capturer* des électrons (gaz dits électronégatifs).

Dans ce cas, le critère de claquage est :

$$\gamma \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx = 1 \quad (\text{I.15})$$

Pour un champ uniforme, ce critère devient :

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha - \eta} [\exp(\alpha - \eta) d - 1] = 1 \quad (\text{I.16})$$

Pour un champ uniforme et un gaz non électronégatif, le critère devient :

$$\gamma [\exp(\alpha d) - 1] = 1 \quad (\text{I.17})$$

Dans le cas de distances inter-électrodes de plus d'un centimètre et des pressions proches de la pression atmosphérique, la théorie de Townsend ne peut pas expliquer les temps de développement de la décharge mesurés ( $10^{-9}$  à  $10^{-7}$  s) [5]. Ces temps étant beaucoup plus courts que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode. Cette théorie ne peut également pas expliquer le fait que la tension de claquage ne dépende pas du matériau de la cathode qui doit intervenir par l'intermédiaire du coefficient d'émissions secondaires  $\gamma$ .

### I.4.3- Théorie du canal (Streamer)

#### I.4.3.1- Mécanismes de claquage

Dans la théorie du Streamer, la présence d'une seule avalanche de taille suffisamment importante peut provoquer le claquage par l'intermédiaire d'un canal de plasma appelé Streamer. Les mécanismes de base de cette théorie sont :

- La création d'une avalanche primaire du type Townsend engendrée par un électron germe ;

- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la première avalanche ;
- La photo ionisation du gaz à la tête de l'avalanche ;
- La transition avalanche-Streamer lorsque le champ de charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué.

L'avalanche primaire peut prendre naissance en un point quelconque de l'intervalle inter électrodes pour une valeur critique du champ électrique. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. En effet, dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode (électrode positive) alors que de l'autre côté, les ions positifs restent immobiles (la mobilité des électrons est 100 à 1000 fois supérieure à celle des ions). Le champ devient alors non uniforme et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice. Le champ électrique sur les flancs de l'avalanche quant à lui, diminue. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ  $10^8$  électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur les pôles.

Dans l'avalanche, les électrons et les ions se recombinent en partie. L'énergie rayonnée peut provoquer la photo ionisation des particules de gaz se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'avalanche. Les électrons nouvellement créés peuvent, si le champ local est suffisamment intense, conduire par chocs ionisants, à la naissance de nouvelles avalanches dites secondaires qui vont créer à leurs tours une charge d'espace positive à l'avant de la première. Ces avalanches secondaires jouent le rôle de facteur d'entretien et la décharge devient autonome.

Chaque avalanche se développe pour son propre compte et de façon très rapide. La première n'a pas fini de croître que déjà toute une chaîne se crée. Alors que les électrons se déplacent vers l'anode, la chaîne semble progresser vers la cathode. La progression de cette chaîne est très rapide du fait que les phénomènes se transplantent par rayonnement lumineux et non par migration d'électrons et d'ions. L'ionisation se fait donc sans l'intervention de la cathode. La décharge prend alors la forme d'un canal dans la direction de l'axe des électrodes. Son développement dépend de la répartition du champ électrique.

D'autre part, lors de collisions élastiques (non ionisantes) avec les particules neutres du gaz, les charges leur transmettent une partie de leurs énergies cinétiques. Il

en résulte une augmentation de la température du gaz. Tant que celle-ci est inférieure à celle nécessaire à l'ionisation thermique, elle n'aura aucune influence sur le développement de la décharge. C'est le cas dans le développement du type Streamer.

Le champ électrique extérieur nécessaire à l'entretien du streamer est inférieur à celui conditionnant l'ionisation par collisions. Pour l'air, par exemple, le champ moyen du Streamer se développant à partir de l'anode est d'environ  $0,5 \cdot 10^6$  V/m et de  $1,5 \cdot 10^6$  V/m lorsque celui-ci se développe à partir de la cathode alors que le champ critique est d'environ  $3 \cdot 10^6$  V/m (dans les conditions normales de pression et de température).

Dans le cas d'intervalles inter-électrodes importants ( $> 1$  m pour l'air à pression atmosphérique), la décharge en forme de Streamer se transforme lors de son passage vers l'autre électrode en une forme de décharge appelée Leader. L'augmentation du nombre de porteurs de charges à l'intérieur du Streamer en même temps que sa propagation peut accroître la température du gaz jusqu'à une valeur favorisant l'ionisation thermique.

L'intensité du champ électrique nécessaire au maintien de cette forme de décharges est plus faible que celle du Streamer ; ce champ décroît avec la longueur du Leader.

#### I.4.3.2- Critère de claquage

Plusieurs critères ont été proposés pour caractériser le claquage selon le mécanisme du streamer.

Meek et Loeb [11], ont déterminé l'équation suivante pour la rupture d'un intervalle en champ non uniforme :

$$\alpha_x \exp \left[ \int_0^x \alpha dx \right] = K E_x \left( \frac{\alpha}{p} \right) \quad (\text{I.18})$$

L'indice  $x$  se rapporte à la position du front de l'avalanche.  $\alpha$  est le coefficient d'ionisation.  $x$  représente la longueur critique de l'avalanche ;  $K$  est une constante caractéristique du gaz.  $E$  est le champ électrique et  $p$  est la masse volumique du gaz.

Reather a proposé une relation semblable [13] :

$$\int_0^x \alpha dx = k \quad (\text{I.19})$$

Où  $k$  est une constante du gaz. Pour l'air atmosphérique, elle est voisine de 20.

Pedersen [14], a proposé la relation suivante pour l'air :

$$\alpha_x \exp \left[ \int_0^x \alpha dx \right] = G(x, \rho) \quad (\text{I.120})$$

Où  $G(x, \rho)$  est une fonction de la longueur critique de l'avalanche et de la masse volumique du gaz.

Pour le SF<sub>6</sub>, il a proposé la relation suivante :

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = 18 \quad (\text{I.21})$$

On conclue que "*le modèle du Streamer*" est important d'un point de vue quantitatif puisqu'il permet de connaître la probabilité conditionnant le mécanisme de décharges pour les grandes valeurs du produit (p.d). Malheureusement, à cause du grand nombre de phénomènes qui interviennent, l'obtention de résultats qualitatifs sur la base de ce mécanisme est pratiquement impossible [5]. Les considérations théoriques doivent être complétées par des résultats expérimentaux, permettant d'établir des relations quantitatives nécessaires à la conception de systèmes d'isolation".

### I.5 - La Loi de Paschen

Paschen a établi une loi empirique de comportement des gaz. Sa loi énonce, que la tension disruptive d'un gaz qui représente la tension à partir de laquelle une décharge est observée, entre deux électrodes parallèles dépend de la valeur du produit de la pression du gaz avec la distance inter-électrodes (Figure I.3).

La relation s'écrit comme suit :  $V_s = f(p, d)$ .

Le mécanisme proposé par Townsend permet d'expliquer de manière théorique la loi empirique de Paschen décrivant la tension nécessaire à l'apparition d'une décharge disruptive en fonction du produit (p.d), l'équation est :

$$V_s = \frac{B.p.d}{\ln(A.p.d) - \ln(\ln(1 + \frac{1}{\gamma}))} \quad (I.22)$$

Les constantes A et B, qui dépendent du gaz, peuvent être déterminées à partir du premier coefficient d'ionisation  $\alpha$  donné par l'expression suivante :

$$\alpha = A \exp(-Bp/E) \quad (I.23)$$

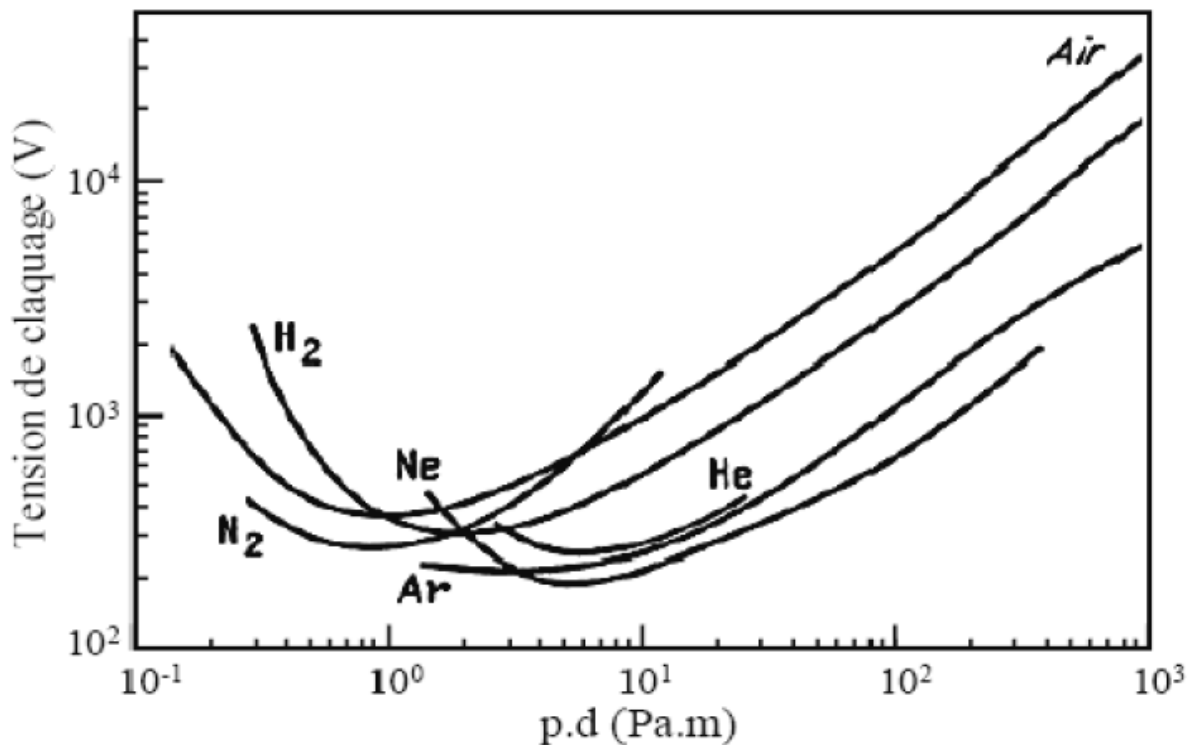


Figure I.3 : Loi de Paschen pour différents gaz [8]

Les travaux de Coliatene montrent que la tension minimale (minimum de Paschen) d'initiation d'une décharge dans l'air en champ uniforme reste inchangée ( $\approx 320V$ ) quelle que soit l'augmentation de la température. Cela signifie que ce minimum est universel [19].

## I.6- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'exposer les différents processus élémentaires liés aux phénomènes de décharges électriques dans les gaz pour mieux comprendre celui de la décharge couronne qui fera l'objet du chapitre qui va suivre.

## *Chapitre II*

### *Connaissances de base sur la décharge couronne*

## II.1- Introduction

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 apparaît autour des conducteurs de la ligne, lorsque ceux-ci sont portés à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique dépasse le seuil d'apparition de l'effet de couronne.

Il existe toujours dans certain nombre de paires d'ions positifs -électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par la radioactivité naturelle. Lorsque ces électrons sont soumis à l'action d'un champ électrique, ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent (ionisation par choc). Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules, et ainsi de suite : le processus prend une allure d'avalanche. Pour que celle-ci puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ électrique ait une valeur suffisante. Ce chapitre fait l'objet d'une recherche bibliographique sur le phénomène d'effet couronne et les paramètres influençant cette dernière.

## II.2- Définition de la décharge couronne

L'effet couronne est lié à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un Intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères.

La décharge couronne se manifeste dans les conditions naturelles. Elle apparaît sous forme d'une gaine lumineuse 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. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [2], [9].

Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment fort, le fluide s'ionise autour de ce point et devient conducteur. En particulier, si un objet chargé possède des pointes ou des coins, le champ électrique y sera plus important qu'ailleurs (c'est le pouvoir des pointes), c'est là en général, que se produira une décharge couronne . Ce phénomène tendra à se stabiliser de lui-même puisque la région ionisée devenant conductrice,

la pointe aura apparemment tendance à disparaître. Les particules chargées se dissipent alors sous l'effet de la force électrique et se neutralisent au contact d'un objet de charge inverse.

Les décharges couronne se produisent donc en général autour d'une électrode du grand rayon de courbure (un défaut du conducteur formant une pointe par exemple) tel que le champ électrique à ses environs soit suffisamment important pour permettre la formation d'une couche d'air ionisé, et une autre de rayon de courbure faible (une plaque métallique ou la terre).

## II.3- Tension d'apparition de l'effet couronne

### II.3.1- Champ électrique critique (formule de Peek)

Pour évaluer le seuil de l'effet couronne à la surface de l'anode, Peek, en s'inspirant de la théorie de Townsend proposée en 1920, a suggéré pour la première fois une loi empirique établie en géométrie cylindrique dans l'air ambiant, et en tension alternative. Cette équation est appelée depuis la loi de Peek [12].

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$E_0 = 30 \text{ kV/cm}$  : Valeur de crête du champ électrique en conditions normales.

$r$  : Rayon du conducteur en cm.

$m_1$  : Coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur (l'irrégularité géométrique du conducteur).

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

$\delta$  : Densité de l'air.

$$\delta = \frac{P}{P_0} \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (\text{II. 2})$$

$P_0 = 760 \text{ mm Hg}$ ,  $t_0 = 25^\circ\text{C}$

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 [10].

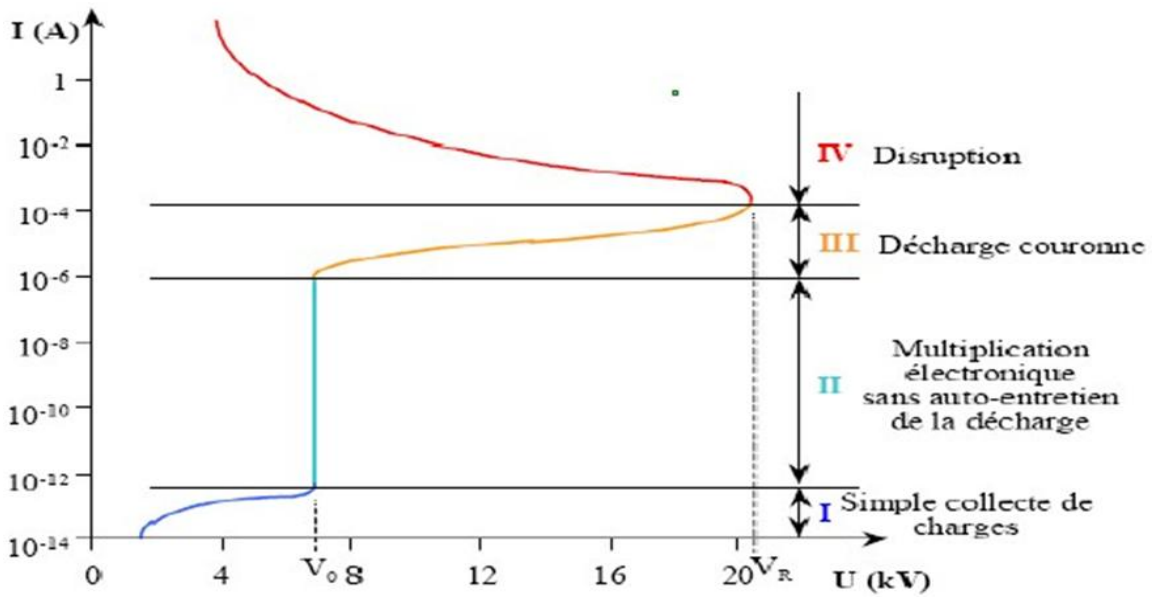
**II.3.2- Tension de seuil d’apparition de l’effet couronne**

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), ainsi on aura :

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) r \text{Ln} \left( \frac{2h}{r} \right) \tag{II.3}$$

**II.4- Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)**

La figure II.1 décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne.



*Figure II.1: Caractéristique courant-tension d’une décharge couronne dans l’air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan).*

- Le premier régime : consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l’impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l’espace inter électrodes.

- Le second régime : qui se produit à partir d'une tension seuil  $V_0$ , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge, la décharge est qualifiée de non autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.
- Le troisième régime : l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs. La décharge est autoentretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards, appelés aussi streamers, qui sont responsables de la composante impulsionnelle du courant.
- Le quatrième régime : 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 est atteint, le milieu passe à l'état de plasma thermique.

## II.5- Mécanisme de la décharge couronne

Les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [1], [15] :

- 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 est 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.

## II.6- Paramètres influençant la décharge couronne

### II.6.1- Influence des paramètres de gaz

#### II.6.1.1- Nature de gaz

Les gaz les plus utilisés en haute tension sont :

- **Les gaz atomique** : ce sont des gaz utilisés dans certains systèmes isolants fermes. Ils ont une rigidité diélectrique légèrement inférieure à celle de l'air.

- **Les gaz électronégatifs :** Les gaz électronégatifs sont ionisés difficilement, il ont plutôt tendance à capter des électrons libres. De ce fait, le développement d'une avalanche électronique nécessite un champ électrique élevé. Ce qui explique que la rigidité diélectrique d'un gaz électronégatif est plus élevée que celle d'un gaz électropositif. L'existence d'une section efficace d'attachement élevée diminue par l'intermédiaire du coefficient effectif d'ionisation  $\alpha$  l'amplification de l'avalanche initial et par la suite, la probabilité de claquage

Un certain nombre de gaz électronégatifs ne comportent pas d'atomes halogènes par exemple l'oxygène (et donc l'air), le dioxyde de carbone et l'oxyde d'azote. Par suite du caractère d'électronégatif de la vapeur d'eau, l'air humide est fortement électronégatif que l'air sec et possède par conséquent une rigidité diélectrique plus élevée (du moins pour des pressions de l'ordre de la pression atmosphérique). La forte rigidité diélectrique de la plupart des composantes halogènes est due, au premier lieu, au fait que ces gaz électronégatifs

#### II.6.1.2- Densité de l'air

Il est bien connu que les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air (Formule II.2) influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

#### II.6.1.3- La température

A pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue quand la température augmente, ce qui favorise la décharge couronne. Au-delà d'une certaine température (1500 °C), le champ électrique subit une grande déformation qui est due à la distorsion des électrodes.

#### II.6.1.4- Humidité

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante et grande surtout dans le cas où le champ électrique est uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête du streamer, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo ionisation [26]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des

tensions toujours plus basse pour 90% que pour 5% d'humidité relative [22]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de la décharge augmente.

#### II.6.1.5- Pression

L'effet de pression est proportionnel à la tension d'amorçage, et inversement proportionnel au courant.

#### II.6.2- Influence du type de la tension appliquée

L'existence ou non du streamer est liée à l'amplitude du champ électrique dans l'intervalle, donc de la tension appliquée aux bornes de l'intervalle, d'air en l'occurrence.

La forme de la tension appliquée est donc importante pour décrire le déclenchement du streamer. Elle peut être continue, alternative ou une rampe.

##### II.6.2.1- 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, S'il atteint le plan, un court-circuit limité par le circuit extérieure prend place. Si le champ n'est pas suffisant pour que le streamer traverse tout l'intervalle inter-électrodes, la partie passive a pour effet de réduire le champ au voisinage de l'électrode privant tout phénomène d'ionisation. Les processus de recombinaison, de 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.

##### II.6.2.2- En tension alternative (50 ou 60 Hz)

Les processus sont identique, car la fréquence appliquée est inférieure à celle des streamer. La fréquence de répétition des couronnes est du domaine de l'audible. C'est précisément les bourdonnements que l'on entend sur les lignes HT. Dans ce cas, les streamer se développent autour du câble HT et on parle de *décharge couronne*.

### II.6.3- Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure [16]. Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon, d'une décharge couronne négative. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente. La décharge couronne négative se produit beaucoup plus qu'une décharge couronne positive par contre la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative [1], [17].

Pour la décharge couronne négative, l'avalanche électronique prend naissance autour de la pointe et se dirige vers l'électrode plane. Par contre en polarité positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense. De plus la décharge couronne apparaît à des tensions plus faibles en pointe négative qu'en pointe positive. Mais la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité négative. Du point de vue de l'isolation, les décharges couronne positives sont plus néfastes que celles des couronnes négatives.

L'intensité lumineuse et la longueur des streamers sont beaucoup plus faibles qu'en polarité positive [1].

De plus le champ seuil de l'effet couronne est légèrement plus petit en tension positive qu'en tension négative et les pertes sont plus élevées en polarité négative qu'en polarité positive [18]. La décharge positive présente un grand intérêt dans la mesure où elle constitue la contrainte la plus sévère pour un intervalle du point de vue isolation. Les décharges négatives sont en effet de structure très complexe. Il faut pratiquement une tension d'environ deux fois plus forte que dans le cas de la décharge positive pour obtenir l'amorçage [21].

#### II.6.3.1- Décharge 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

Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé à la Figure II.2. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces

de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ( $< 30 \text{ kV/cm}$  dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs [24], est appelée *région de dérive*.

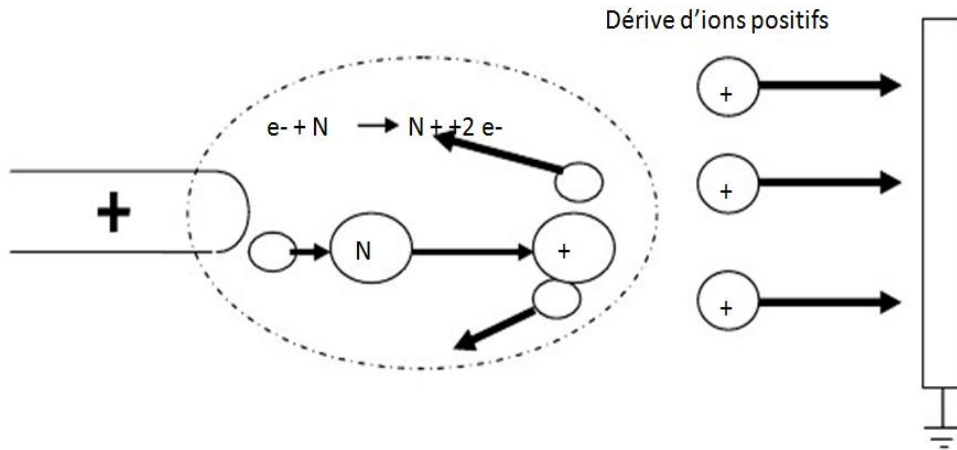


Figure II.2 : Descriptif de la décharge positive [30].

Pour cette décharge, il y'a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode. D'après les modélisations de [25], la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de  $2 \times 10^5 \text{ m/s}$ ) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires.

Goldman [19] indique qu'un courant positif de  $50 \mu\text{A}$  se décomposerait en un courant unipolaire continu de  $20 \mu\text{A}$ , distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à  $30 \mu\text{A}$  percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz.

### II.6.3.2- Décharge 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 Sigmund [20] expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (Figure II.3). Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers la plaque. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc.

Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode.

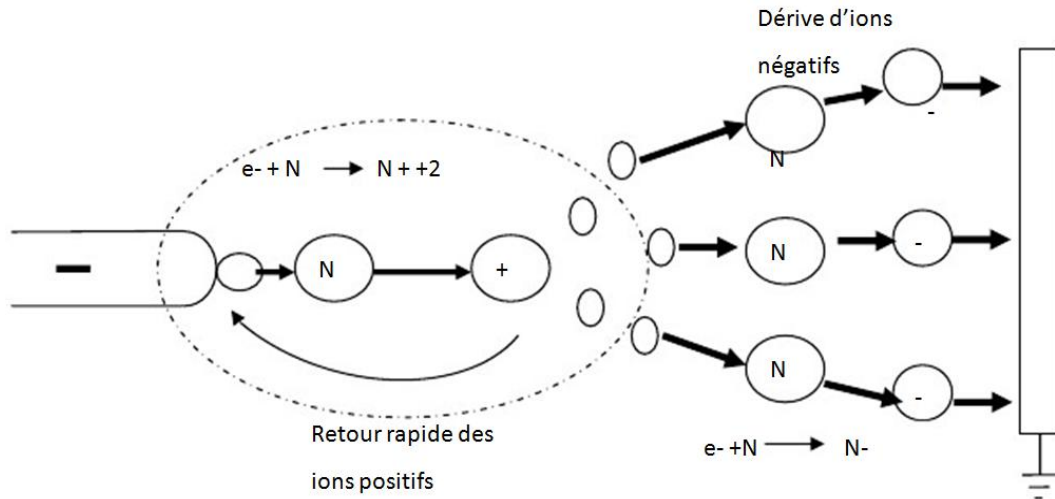


Figure II.3: Descriptif de la décharge couronne négative [29].

**II.6.4- Influence du rayon de courbure**

La figure II.4 montre que les courbes obtenues en tension continue dans les deux polarités pour différents rayons de courbures de la pointe. Une augmentation du rayon de courbure a pour conséquence une augmentation de la tension d'apparition de l'effet couronne.

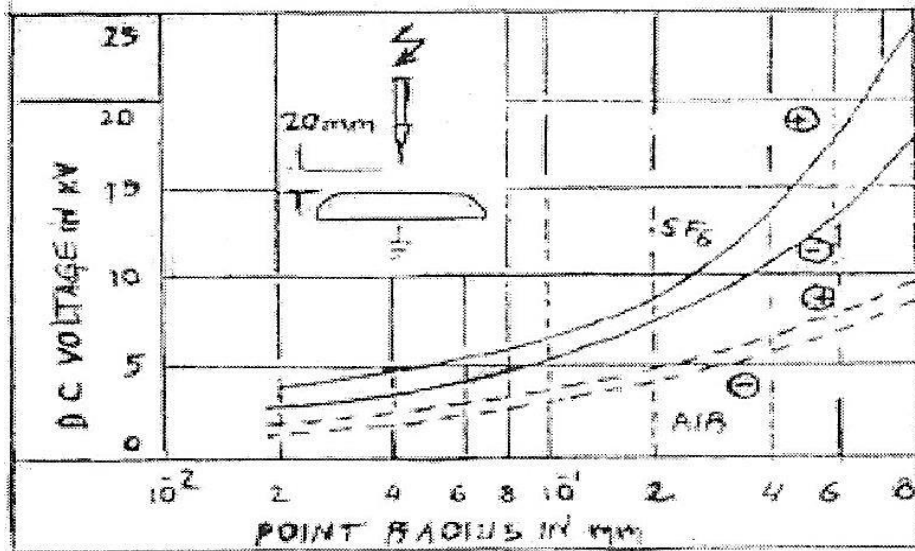


Figure II.4 : Influence de rayon de courbure.

II.6.5- Influence de la distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la figure II.5. Il apparaît clairement que le courant est plus important et croit 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 [22].

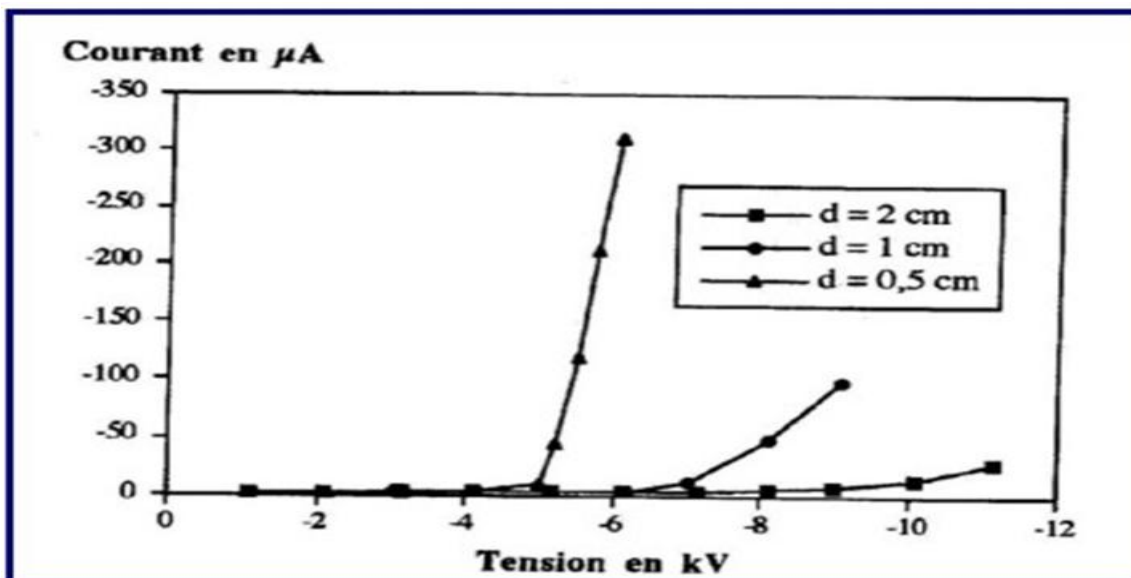


Figure II.5 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [22].

### II.6.6- Influence de la nature des électrodes

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium et acier) sur la figure II.6.

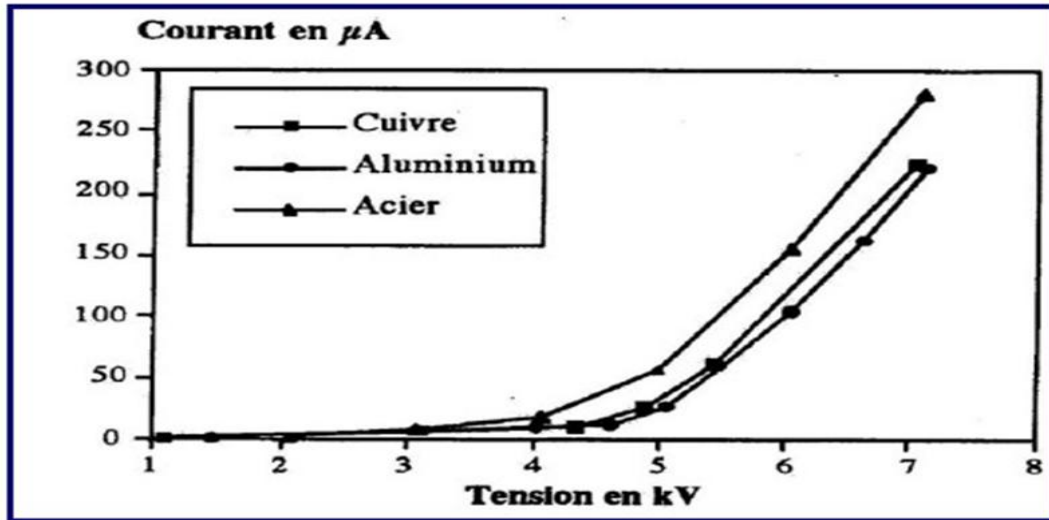


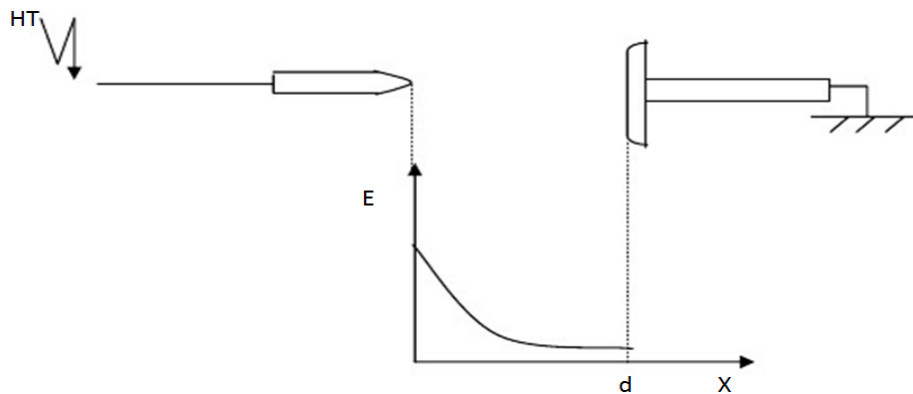
Figure II.6 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes [22].

### II.6.7- Influence de la forme d'électrodes

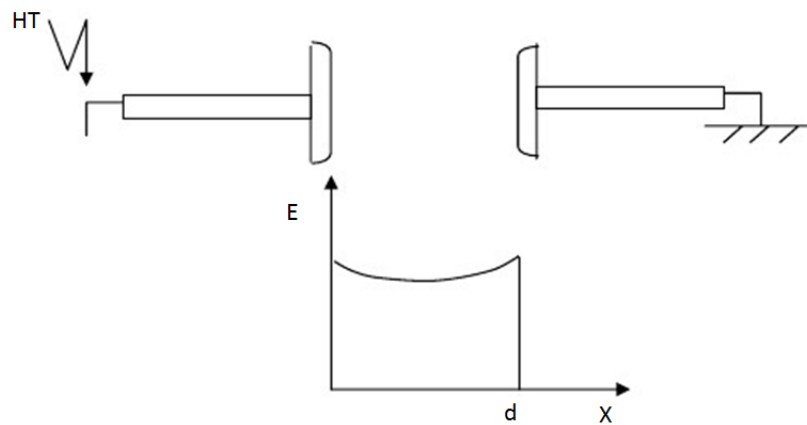
Dans les systèmes d'électrodes utilisées, la distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode, avant amorçage de la décharge, dépend de la configuration géométrique des électrodes.

En champ non homogène, comme c'est le cas en géométrie pointe-plan Figure II.7, la décharge couronne présente une zone de stabilité. Ce type de décharge est caractérisé par une tension seuil  $U_c$  de son apparition est une tension  $U_d$  de sa transition vers l'arc électrique.

Par contre, en champ homogène figure II.8, dès son apparition, la décharge transite rapidement vers l'arc électrique, autrement dit, la décharge couronne est inexistante et les tensions  $U_c$  et  $U_d$  sont confondues [23].



*Figure II.7 : Distribution du champ dans un système pointe-plan.*



*Figure II.8 : Distribution du champ dans un système plan-plan.*

### II.6.8- Influence d'Etat de la 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 tournage, 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.

## **II.7- Domaine d'application des décharges couronnes**

### **II.7.1- Traitement des effluents gazeux**

#### **II.7.1.1- Les précipitateurs électrostatiques**

Les premières applications des plasmas froids ont été les précipitateurs électrostatiques, qui utilisent des décharges couronne appliquées aux traitements des effluents gazeux contenant des poussières. On peut les trouver à la sortie des gaz des centrales thermoélectriques, des cimenteries, etc. Ils sont aussi utilisés pour améliorer la qualité de l'air intérieur d'un local (ioniseur d'air).

L'ioniseur émet des électrons, ces électrons vont aller s'attacher aux gros ions positifs (pollution) pour former des particules neutres. Ces dernières vont acquérir des charges négatives en quantités suffisantes pour devenir des gros ions négatifs. Ces gros ions négatifs vont ensuite se repousser mutuellement pour aller (attraction électrique) à la surface conductrice (donc de décharge) qui sont les sols et les murs.

#### **II.7.1.2- Destruction des polluants**

Ces dix dernières années, les milieux scientifiques et industriels s'intéressent à la possibilité d'utiliser les plasmas froids pour détruire les polluants et non pas les piéger, en exploitant la réactivité chimique des radicaux et espèces engendrés au sein du plasma, pour transformer les molécules polluantes en molécules inoffensives, les résidus obtenus peuvent être parfois valorisables. Les polluants visés actuellement sont essentiellement les oxydes de soufre et d'azote.

### **II.7.2- Traitement des surfaces**

La micro-électronique est le premier secteur à avoir utilisé les plasmas froids produits par décharge couronne pour la fabrication des circuits intégrés et des circuits imprimés, grâce à leurs caractéristiques et leurs qualités intrinsèques, les plasmas froids se diffusent dans d'autres secteurs comme la métallurgie et la mécanique (durcissement superficiel et protection anticorrosion des pièces et outillages).

#### **II.7.2.1- Nettoyage et érosion de surface**

Cela comprend les opérations de nettoyage, décapage, de préparation de surface avant dépôt et de gravure. Pour nettoyer une pièce couverte d'huile et de particules, on commence

par chasser le plus gros mécaniquement avec l'air comprimé ou de l'eau, puis éliminer la fine couche d'huile résiduelle à l'aide d'un plasma froid à l'oxygène, qui va volatiliser les polluants organique de surface par un effet de combustion froid contrôlée qui est plus économique et plus protecteur pour l'environnement.

### **II.7.2.2- Modification de la chimie de surface**

La modification de la chimie de surface peut être la fonctionnalisation, le greffage, le dopage par implantation et diffusion ou stérilisation ; c'est à l'aide de plasmas froids que sont réalisées un grand nombre de membranes polymères.

### **II.7.3- Élimination de l'électricité statique**

Dans l'industrie l'électricité statique est la source de dysfonctionnements gênants, car elle provoque des décharges néfastes aux dispositifs électroniques ou des collages de poussière sur des produits souhaités purs, c'est pourquoi la société Valitec a développé un système utilisant l'injection supersonique d'ions afin d'éliminer l'électricité statique dans de gros débits de production [28].

## **II.8- Avantage de la décharge couronne dans un réseau**

Quand le champ superficiel dépasse le seuil critique, les charges créées par effet couronne éliminent par neutralisation une partie des charges du conducteur. Ceci provoque la diminution du champ superficiel et du potentiel du conducteur. On dit que l'effet couronne est un régulateur de tension. Donc la décharge couronne amortit les surtensions sur les lignes surtout les surtensions dues à la foudre. Lorsque l'effet couronne se produit autour du conducteur dans l'air environnant celui-ci acquiert une grande conductivité et le diamètre du conducteur tend à augmenter, ce qui paradoxalement réduit le champ électrique. Des calculs récents effectués sur des modèles simulés d'une ligne de 220 kV soumise à une onde de choc 1,2/50  $\mu$ s simulant une surtension atmosphérique, l'atténuation de la surtension atteint 60% quand on s'éloigne de 7 km du point d'impact de cette surtension.

## **II.9 – Problèmes liés aux décharges couronne**

Les décharges couronnes peuvent produire des bruits audibles et des perturbations sur les fréquences radio, en particulier à proximité des lignes à haute tension. Elles représentent

également une perte de puissance. Enfin, les réactions qu'elles provoquent dans l'atmosphère pourraient avoir un impact sur la santé. C'est pourquoi les installations de transport d'énergie sont conçues pour minimiser la formation des décharges couronne.

Les décharges de couronne sont particulièrement à éviter dans :

- Les installations de transmission électrique où elles provoquent une perte d'énergie et du bruit ;
- La plupart des équipements électriques : transformateurs, machines électriques (aussi bien générateurs que moteurs), etc. où elles endommagent progressivement les isolants amenant à une détérioration prématurée dans équipements ;
- Toutes les situations nécessitant une tension importante mais où la production d'ozone doit être minimale.

## **II.10 - Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté de manière bibliographique les différents phénomènes qui sont associés à la décharge couronne, comme la tension d'apparition de l'effet couronne, les paramètres influençant sur ce dernier et ses domaines d'applications.

# *Chapitre III*

## *Etude expérimentale*



### III.1- Introduction

La plupart des travaux ont porté sur l'étude des mécanismes de développement et les régimes de la décharge couronne afin de caractériser ses paramètres électriques, ils sont établis dans l'air à la pression atmosphérique ou en atmosphère. Le but essentiel de ce travail est l'étude de l'effet des paramètres électro géométriques de la nature des électrodes métalliques sur les caractéristiques de la décharge couronne en géométrie pointe-plan sous tension continue.

### III.2- Dispositif expérimental

Les expériences sont effectuées au Laboratoire de Matériaux 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 et d'un dispositif de mesure.

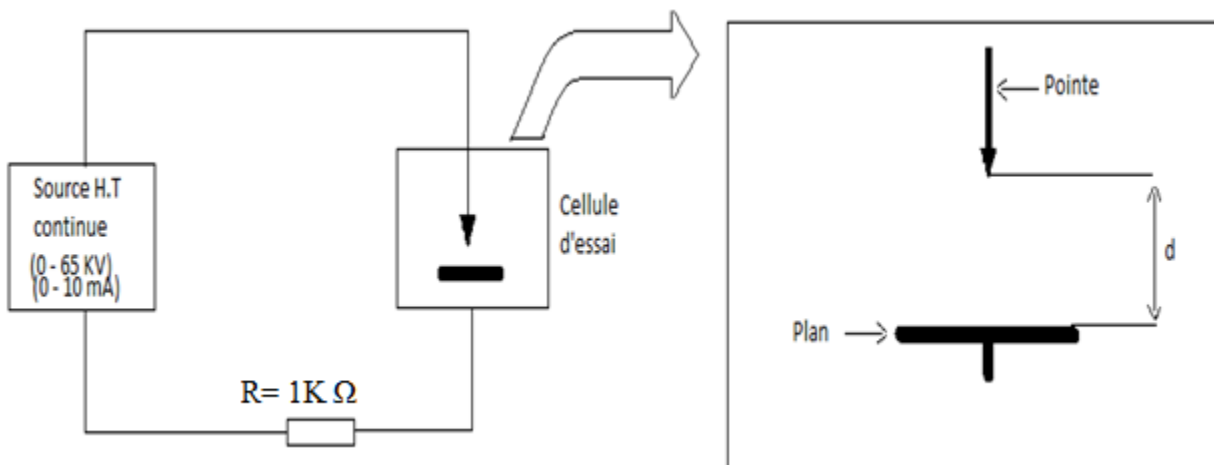
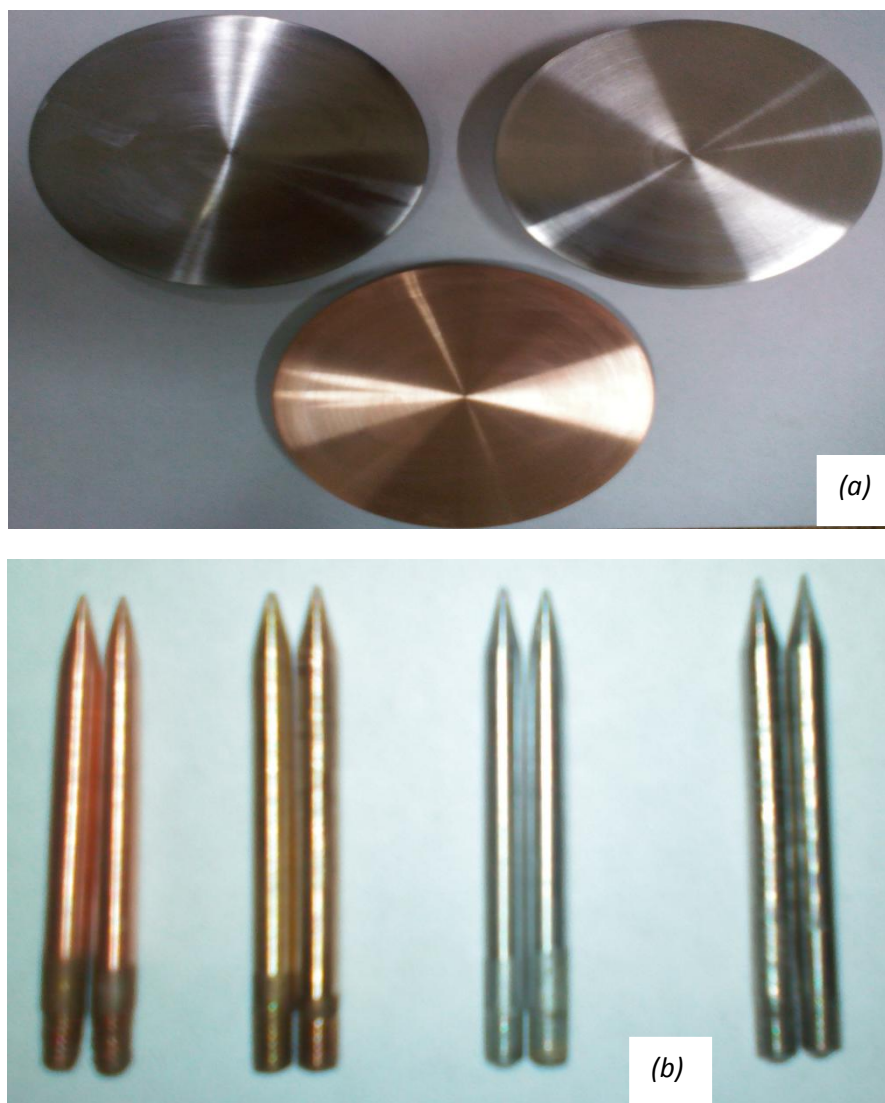


Figure III.1 : Dispositif expérimental.

#### III.2.1- Cellule d'essai

La cellule d'essai est constituée de deux électrodes, l'une pointue et l'autre plane. L'électrode plane est un disque circulaire de 100 mm de diamètre et de 4 mm d'épaisseur. L'électrode pointue est une tige cylindrique de 45 mm de longueur, avec un angle d'ouverture de 30° présentant différents rayons de courbure (Figure III.2).



**Figure III.2** : Photos des électrodes utilisées

(a) Plans en acier, aluminium et cuivre

(b) Pointes en cuivre, bronze, aluminium et acier

### III.2.2- Dispositif de mesure

Dans le cadre de travail, nous nous sommes intéressés à la caractéristique courant-tension en régime de décharge couronne. La tension appliquée est mesurée à travers une sonde de rapport 1000; par contre le courant mesuré est le rapport de la tension appliquée  $U$  sur une résistance  $R$  ( $\Omega$ ).

### **III.3- Matériaux utilisés**

Lors de nos expériences, nous avons utilisé des électrodes de matériaux différents. Les plans sont en cuivre, en acier et en aluminium, les pointes sont cuivre, en acier, en aluminium et en bronze.

### **III.4- 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.

L'ensemble des essais sont réalisés dans les mêmes conditions atmosphériques (pression, température et humidité).

## *Chapitre IV*

### *Résultats expérimentaux et discussion*



## IV.1-Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux de la décharge couronne dans un intervalle d'air en polarité positive et négative de la pointe. Les expériences ont été réalisées dans les conditions normales de pression et de température sous une tension continue pouvant varier de 0 à 65 KV.

## IV.2- Décharge en polarité négative et positive de l'électrode pointe-plan

Dans les deux polarités de la pointe, nous avons effectué quatre séries d'essais en vue de mettre en évidence l'effet de certains paramètres électro géométriques (distance inter-électrodes, rayon de courbure de la pointe et matériau des électrodes passive et active.

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

La seconde consiste à étudier l'influence du rayon de courbure de la pointe.

La troisième série consiste à mettre en évidence l'effet du matériau de l'électrode active.

Enfin, une dernière série a pour but de mettre en évidence l'effet du matériau de l'électrode passive.

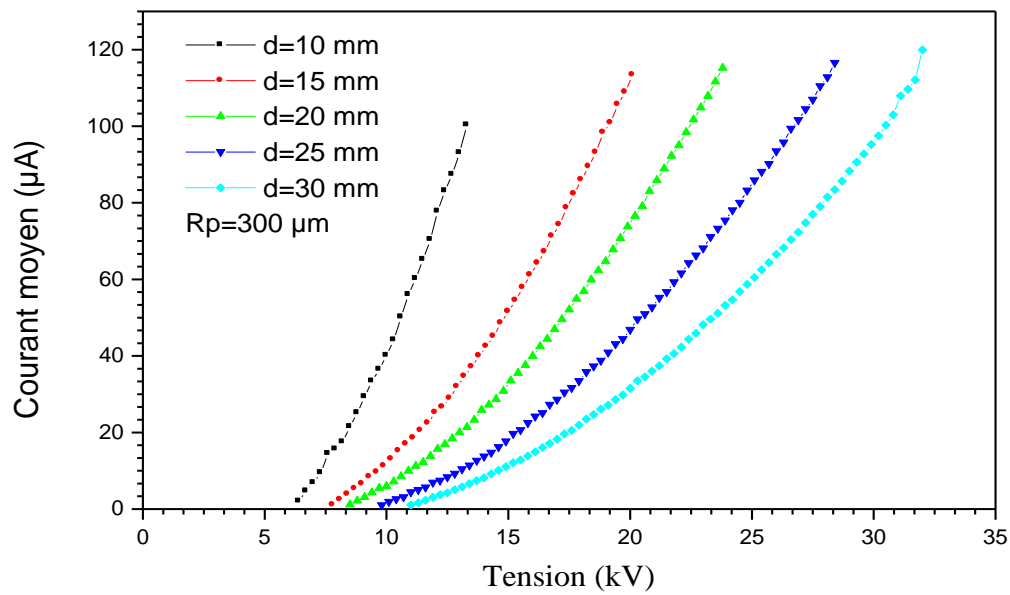
## IV.3- Influence de la distance inter-électrodes

La première série d'essais consiste à faire varier la distance inter-électrodes de 10 à 30 mm par pas de 5 mm, et ce dans les deux polarités de la pointe, d'abord en polarité négative puis en polarité positive de la pointe.

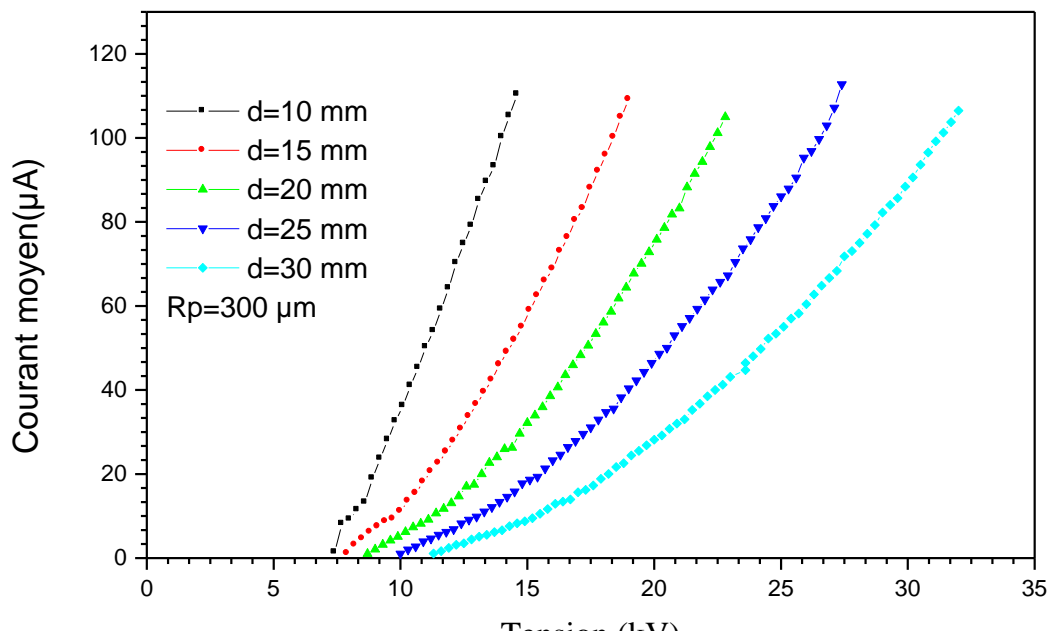
### IV.3.1- Polarité négative de la pointe

Les figures (IV.1) et (IV.2) montrent l'effet de la distance inter-électrodes en polarité négative. Dans la première, la configuration est une pointe en cuivre de rayon  $R_p = 300 \mu\text{m}$ . Dans la seconde courbe, le plan est en aluminium. Plus la distance inter-électrodes augmente, plus la tension appliquée pour le même courant augmente.

Nous remarquons aussi 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.



**Figure IV.1 :** Caractéristique I-V d'une décharge négative : Pointe en cuivre et plan en cuivre.

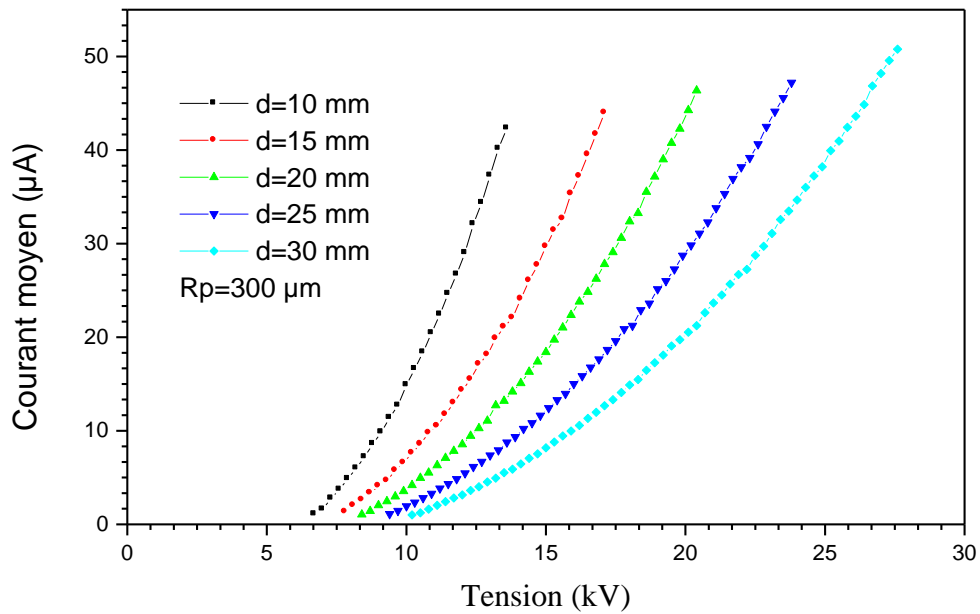


**Figure IV.2 :** Caractéristique I-V d'une décharge négative : Pointe en cuivre et plan en aluminium.

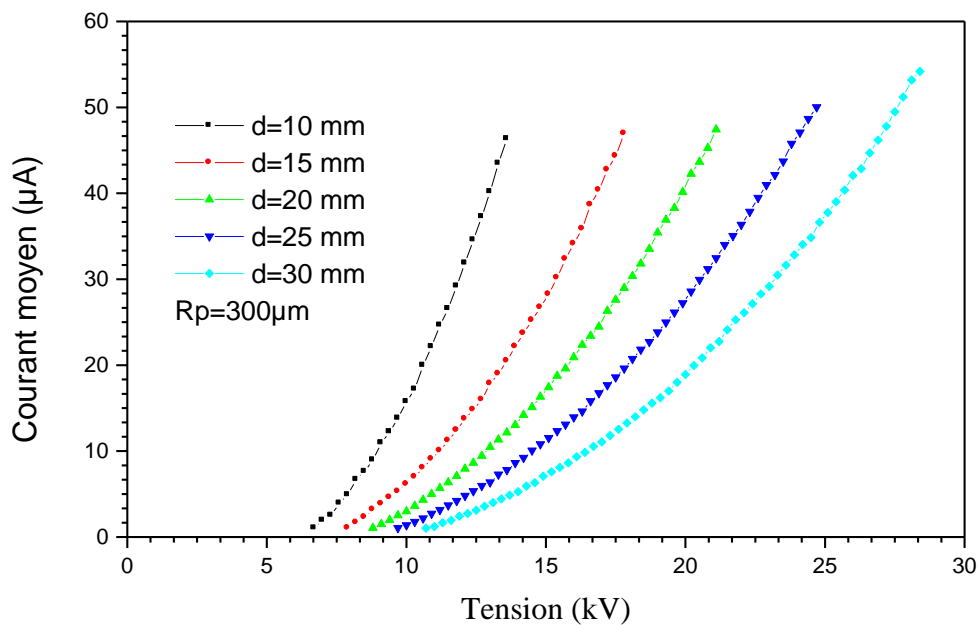
### IV.3.2- Polarité positive de la pointe

Les figures (IV.3) et (IV.4) représentent les résultats obtenus avec une pointe en cuivre couplée aux plans respectivement en cuivre et en aluminium. Le courant moyen

est représenté dans ce cas pour les distances inter-électrodes variant de 10 à 30 mm. En observant ces figures, il apparaît clairement que le courant moyen est plus important et augmente rapidement avec la tension appliquée pour des faibles distances.



**Figure IV.3 :** Caractéristique I-V d'une décharge positive: Pointe et plan en cuivre.

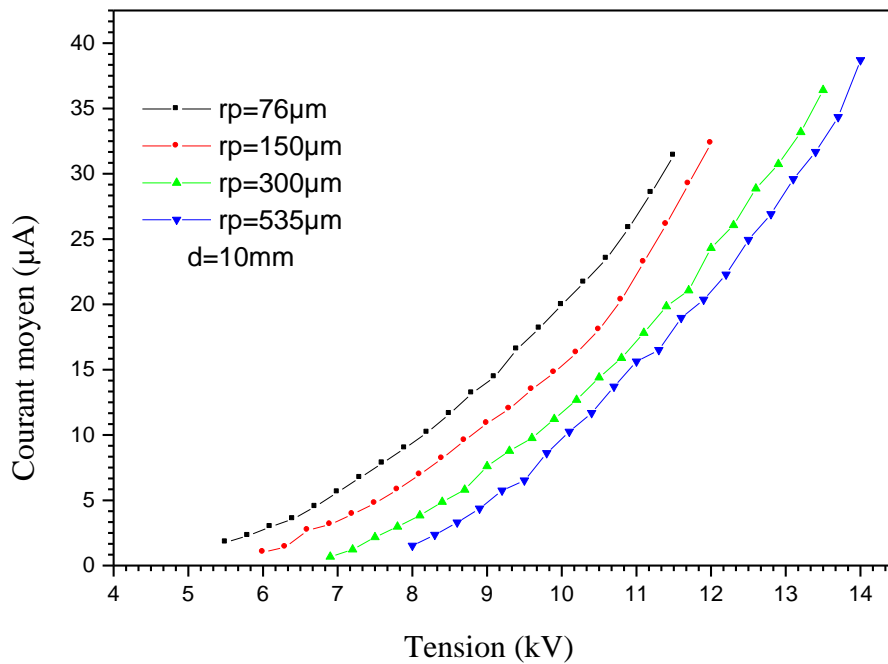


**Figure IV.4:** Caractéristique I-V d'une décharge positive: Pointe en cuivre et plan en aluminium.

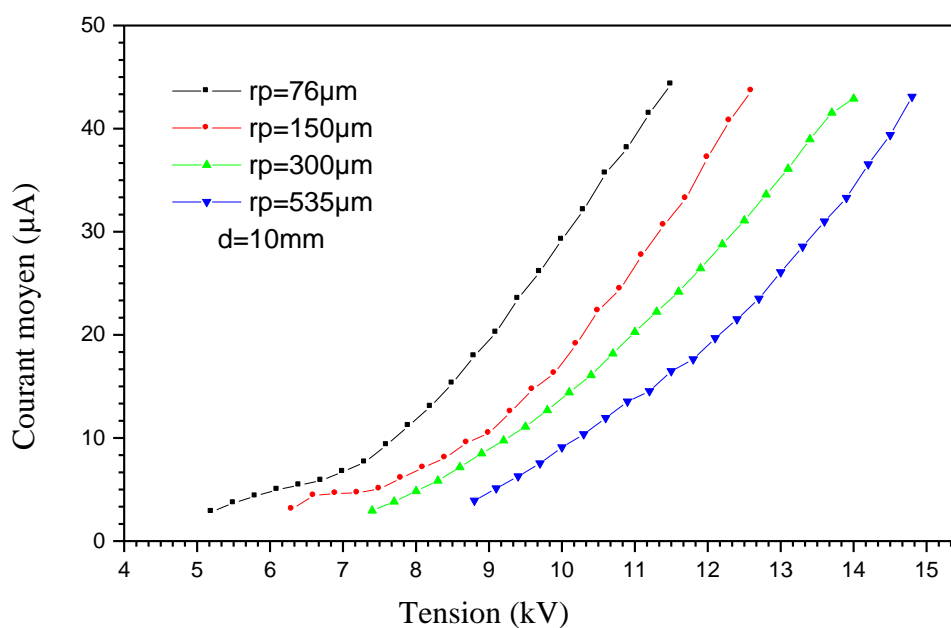
#### IV.4- Influence du rayon de courbure de la pointe

Les figures (IV.5) à (IV.7) représentent la caractéristique I-V pour des pointes en cuivre avec des rayons de courbures différents.

En polarité positive de la pointe, on voit clairement l'effet du rayon de courbure de la pointe.

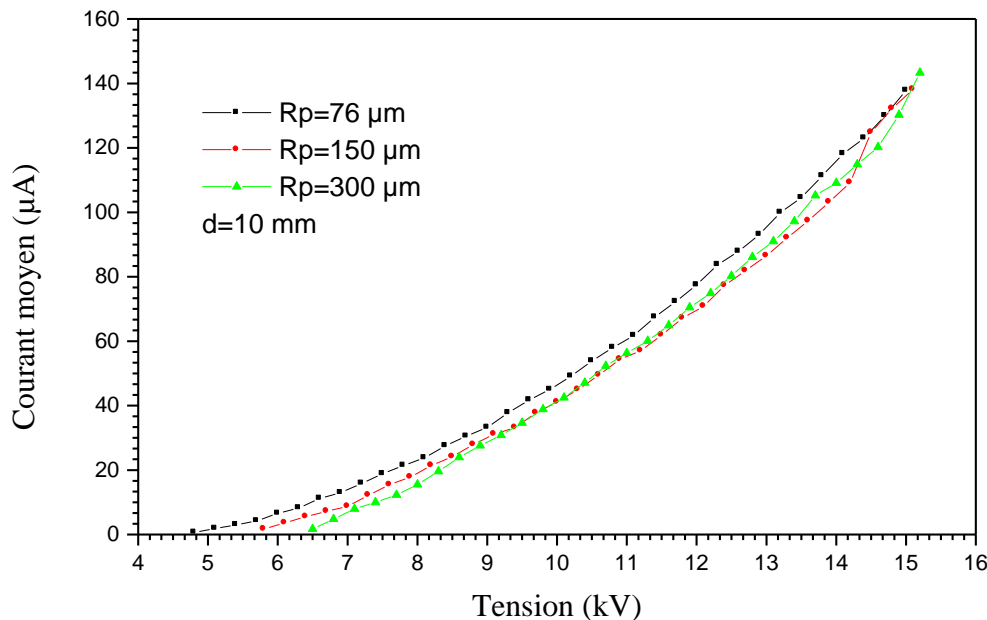


**Figure IV.5:** Caractéristique I-V d'une décharge positive: Pointe en cuivre et plan en acier.



**Figure IV.6:** Caractéristique I-V d'une décharge positive: Pointe et plan en cuivre

Par contre en polarité négative (Figure IV.7), l'effet du rayon de courbure de la pointe est moindre, pour ne pas dire inexistant, cela peut s'expliquer par le fait que la pointe dans ce cas joue le rôle d'anode.



*Figure IV.7: Caractéristique I-V d'une décharge négative : Pointe en cuivre et plan en acier.*

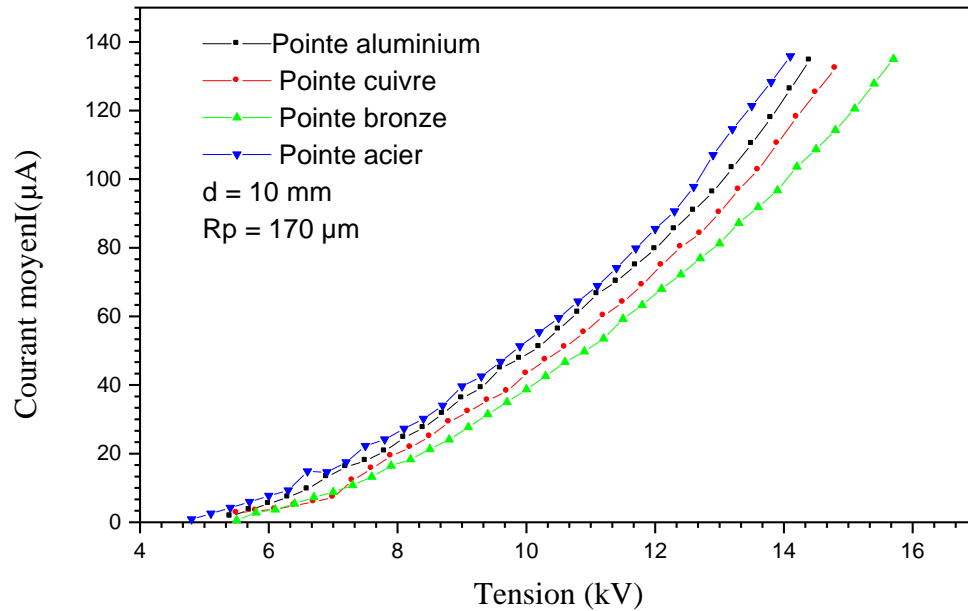
## IV.5- Effet du matériau des électrodes

Un ensemble d'essais a été réalisé dans le but de voir l'effet du matériau des électrodes passive et active. Une série de tests est faite en changeant le matériau de la pointe et une autre, pour une pointe donnée, on change le matériau de l'électrode plane.

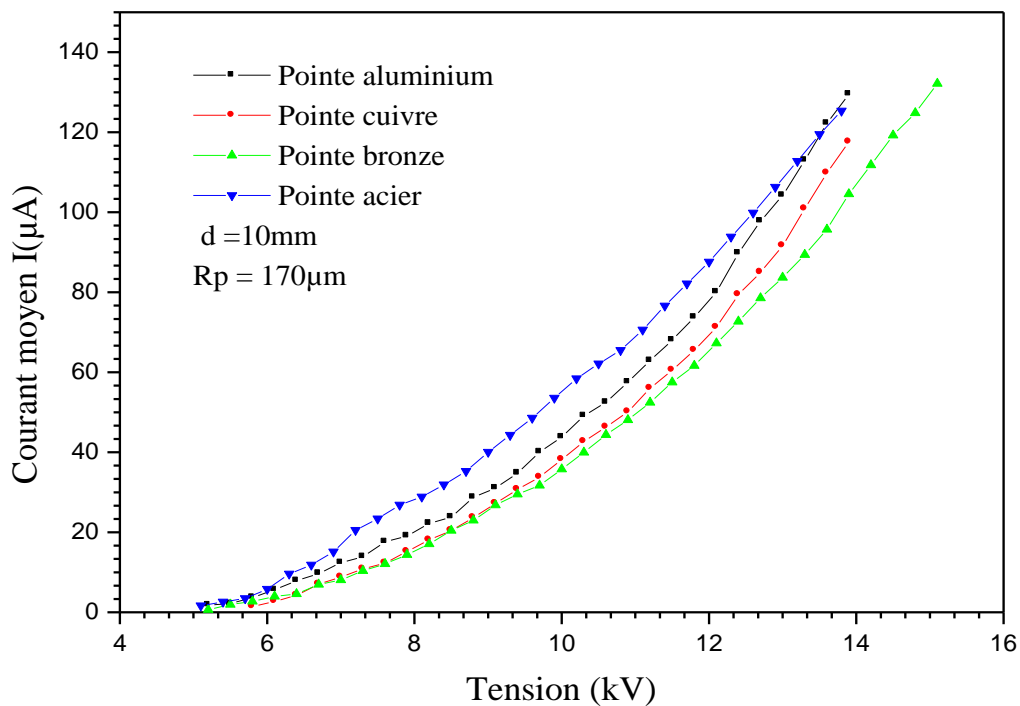
### IV.5.1- Polarité négative de la pointe

Dans cette polarité, les figures (IV.8) et (IV.9) montrent l'évolution du courant moyen avec la tension appliquée pour des pointes en cuivre, aluminium, bronze et en acier pour une distance de 10 mm et pour différents matériaux de l'électrode plane à savoir le cuivre et l'acier. De ce résultat, on voit que la caractéristique I-V est de forme parabolique ainsi que le courant de la pointe en aluminium est plus intense par rapport aux autres pointes (cuivre et bronze) et ce pour les différents matériaux du plans (cuivre et acier). Cela peut s'expliquer par le travail de sortie de l'aluminium qui est

plus petit que celui du cuivre, de ce fait il est plus facile d'arracher un électron à l'aluminium qu'au cuivre.

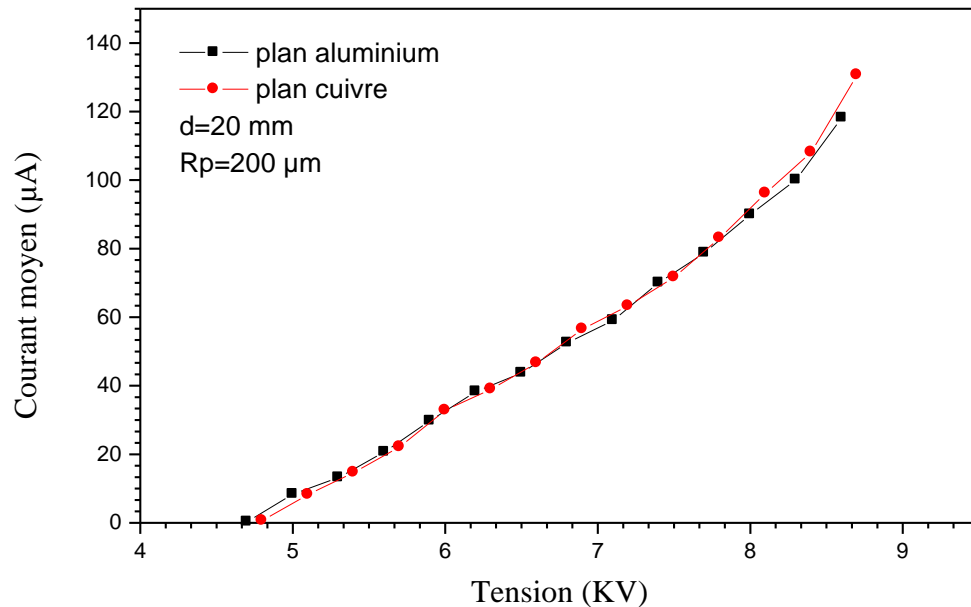


*Figure IV.8: Caractéristique I-V d'une décharge négative : Plan en acier*

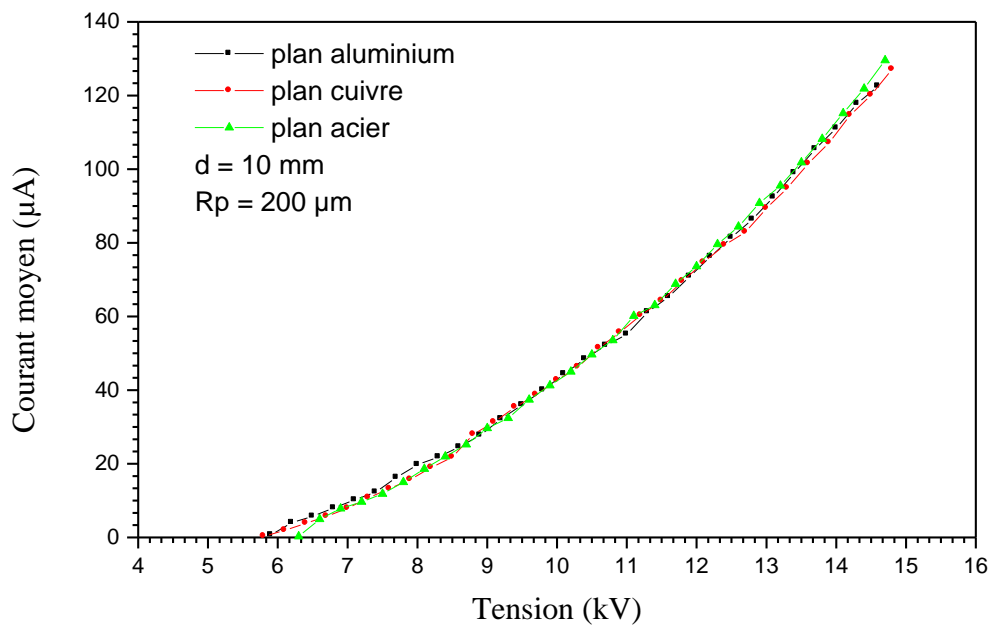


*Figure IV.8: Caractéristique I-V d'une décharge négative : Plan en cuivre*

Les figures (IV.9) et (IV.10) représentent la caractéristique I-V d'une pointe en acier avec des plans en cuivre, aluminium et acier pour les distances inter-électrodes de 8 et 10 mm. Il est montré clairement qu'en polarité négative de la pointe, le matériau du plan n'a pratiquement aucun effet.



**Figure IV.9 :** Caractéristique I-V d'une décharge négative : Pointe en acier.

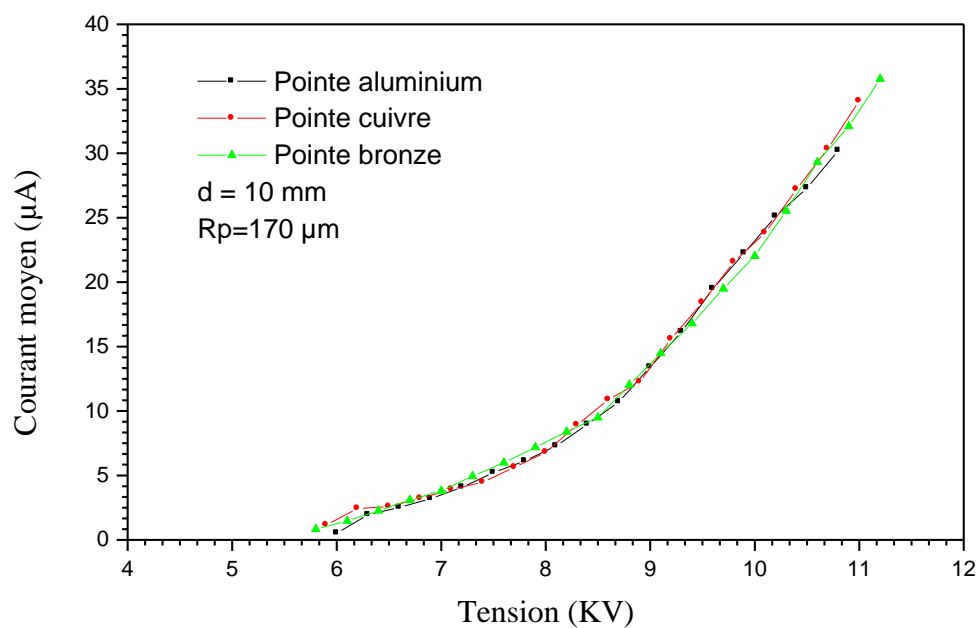


**Figure IV.10 :** Caractéristique I-V d'une décharge négative : Pointe en acier.

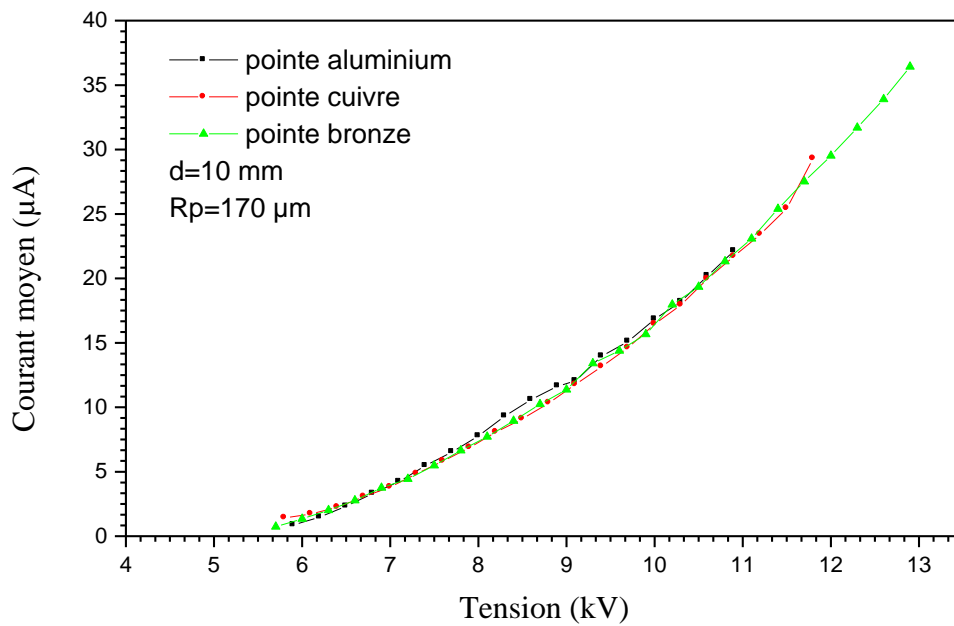
### IV.5.1- Polarité positive de la pointe

Comme pour la polarité négative de la pointe, nous avons réalisé deux séries de tests. Dans un premier temps, pour un plan donné, nous avons utilisé trois pointes (aluminium, cuivre et acier) ayant pratiquement le même rayon de courbure  $R_p = 170 \mu\text{m}$ . les résultats obtenus sont consignés dans les figures(IV.11) et (IV.12).

On voit clairement que dans ce cas, le matériau de la pointe n'a pratiquement pas d'effet sur la caractéristique I-V en régime de décharge couronne.

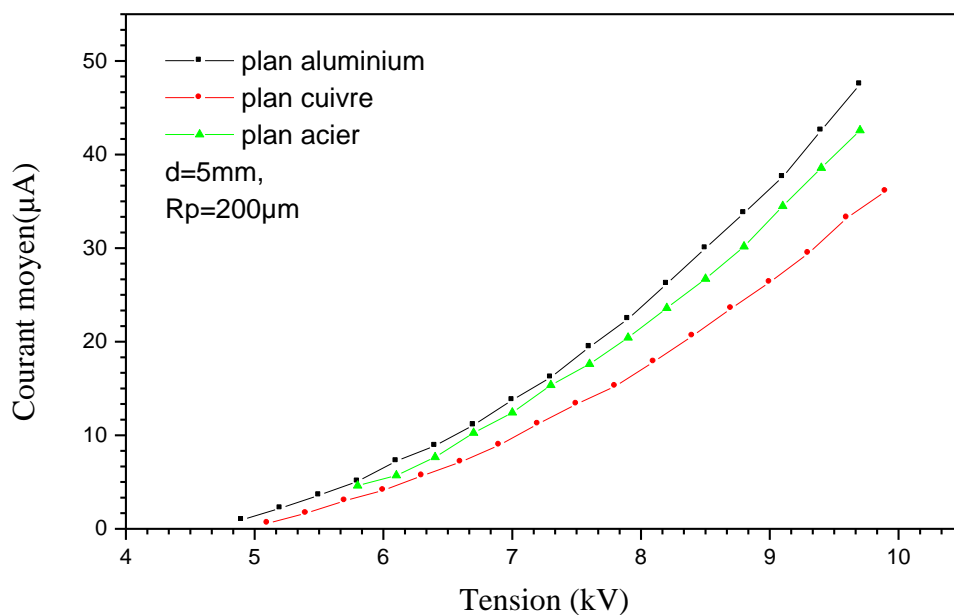


*Figure IV.11 : Caractéristique I-V d'une décharge positive: Plan en acier.*

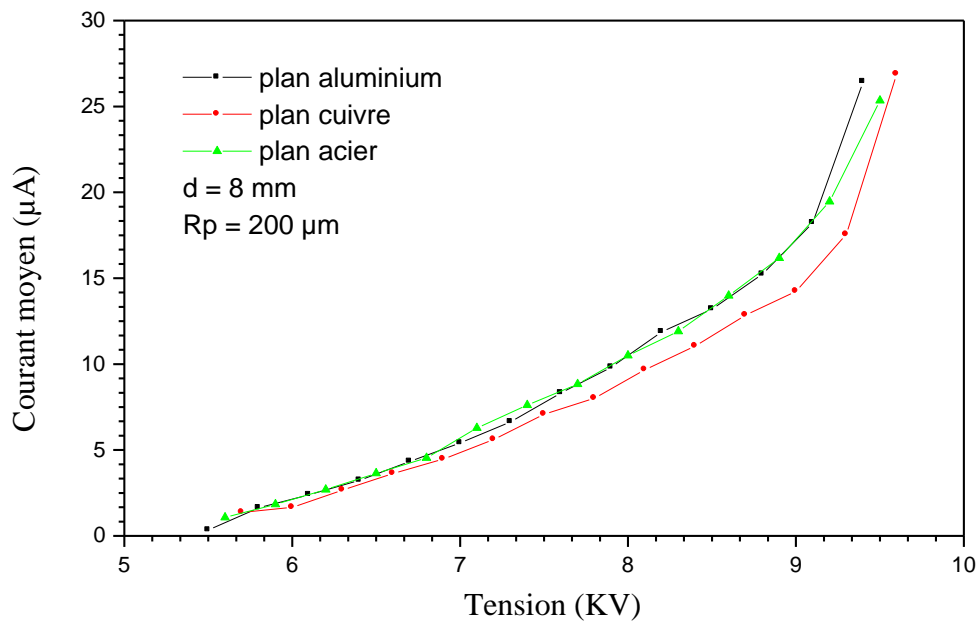


*Figure IV.12 : Caractéristique I-V d'une décharge positive: Plan en cuivre.*

Dans un second temps, pour une pointe donnée, nous avons utilisé trois plans (aluminium, cuivre et acier), les résultats obtenus sont consignés dans les figures (IV.13) et (IV.14).



*Figure IV.13 : Caractéristique I-V d'une décharge positive: Pointe en acier.*



*Figure IV.14 : Caractéristique I-V d'une décharge positive: Pointe en acier.*

D'après ces figures, on voit que le matériau de l'électrode plane influence la caractéristique I-V.

## IV.6 Conclusion

D'après ces essais nous pouvons résumer ces résultats comme suit :

- En polarité négative de la pointe, le matériau influant sur la caractéristique I-V est celui de la pointe ;
- En polarité positive, le matériau qui a une influence est celui du plan.

En d'autres termes, l'influence du matériau est celle de l'électrode jouant le rôle de cathode.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

Dans le travail, nous avons essayé de faire une étude assez détaillée sur la décharge couronne pour un système d'électrode pointe-plan dans un intervalle d'air et voir son effet en se basant sur une étude théorique suivie d'un certains nombres d'essais pour confirmer ce qui a été écrit dans la théorie.

Les résultats obtenus lors des différents essais ont permis d'expliquer l'influence de certains paramètres comme : le matériau de la pointe, le matériau de l'électrode plane, la distance inter-électrodes et en fin le rayon de courbure de la pointe.

Ces essais ont été réalisés dans les deux polarités de la pointe

Nous pouvons émettre les 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.

Quelque soit la polarité de la tension appliquée à l'électrode de faible rayon de courbure, le matériau d'électrode joue un rôle important sur les caractéristiques de la décharge couronne par l'intermédiaire du travail de sortie des électrons du matériau considéré.

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

## *Références bibliographiques*

- [1] **Bourek Yacine**, “ *Détermination des conditions d’ionisation caractérisant le seuil de claquage de l’air par la logique floue* ”, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [2] **R.Farhi, C.Morel, G.Chéron**, “ *Matières plastiques et adjuvant hygiène et sécurité* ”, CNRS, ED 638, 2006.
- [3] **M.Bouhanic, M.El-Koucha**, “ *Contribution à l’étude d’une isolation composée barrière /air sous tension alternative 50 Hz* ”, Mémoire d’ingénieur, UMMTO, 1994.
- [4] **L.Khelloul, F.Meziane**, “ *Influence de la barrière diélectrique sur une décharge couronne en géométrie pointe-plan* ”, Mémoire d’ingénieur, UMMTO, 2006.
- [5] **A. Rein**, “ *Mécanismes et critères de la rupture diélectrique dans les gaz. Mesure des grandeurs caractéristiques de la décharge. Etude bibliographique* ”, ELECTRA N°32, janvier 1974, pp. 43-60.
- [6] **C.Gary, M.Moureau**, “ *L’effet de couronne en tension alternative* ”, Edition EYROLLES, 1976.
- [7] **G.Le Roy, C. Gary**, “ *Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions* ”, Edition EYROLLES, 1984.
- [8] **G.Daill , B.Fournaud**, “ *Décharge couronne, application et modélisation* ”, Projet utilisation rationnelle de l’énergie, Ecole supérieur d’ingénieur de Poitiers, 2005.
- [9] **D.Saad**, “ *Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques* ”, Mémoire de Magister, UMMTO, 2011.
- [10] **H.YALA**, “ *Calcul numérique du champ électrique en géométrie fil-cylindre et fil-plan lors de la décharge couronne positive dans l’air* ”, Thèse doctorat de l’Université Paris VI octobre 1988.
- [11] **J.M Meek, J.D Craggs**, “ *Electrical breakdown of gases* ”, The International Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, 1953.
- [12] **D.V.Razeving**, “ *Technique de la haute tension* ”, Energya, Mousco, 1976.
- [13] **H. Raether, Butterwords**, “ *Electron avalanches and breakdown in gases* ”, London : Butterworths, 1964. - 200 p.

- [14] **A. Pedersen**, “*Criteria of spark breakdown in sulphur hexafluoride*”, IEEE Trans. On Power Appar. Syst pp. 2043-48, 1970.
- [15] **Zibin lu**, “*Etude des mécanismes de dégradation de polymères par décharge électrique de type filamentaire*”, Thèse de Doctorat de l’université de paris VI, 1991.
- [16] **J.Koller, V.Krina, J.Pichal, L.Aubrecht**, “*Corona discharge light emission et electric field intensity comparison*”, CZ echoslovak journal of physics, vol.54, 2004.
- [17] **Junhong. Chen et Jane H. Davidson**, “*Model of the negative DC corona plasma : comparison to the positive DC corona plasma*”, Plasma chemistry and plasma processing, March 2003, Volume 23, Issue 1, pp 83–102
- [18] **Yall B.SC.A**, “*Contribution à l’étude de l’influence de décharge de couronne sur la perte de volume d’une aspérité de glace porté à un potentiel élevé*”, Thèse pour l’obtention de la maîtrise en ressources et système. Québec, Avril 1993.
- [19] **Goldman M ,Goldman A, Sigmond R.S**, “*The corona discharge , its properties and specific uses*”, Pure & Appi. Chem., Vol. 57, No. 9, pp. 1353—1362, 1985. Printed in Great Britain.
- [20] **Goldman M, Sigmond R.S**, “*Corona and insulation, IEEE Trans* ”,ISSN .0018-9367 avril 1982.France.
- [21] **Issauf Fofana**, “*Modélisation de la décharge positive dans les grandes intervalles d’air*”, Thèse de doctorat, l’école centrale de Lyon novembre 1996.
- [22] **M.panaget**, “*Etude en laboratoire des effets physico-chimique induites par les pertes électriques des lignes de transport à haute tension*”, Thèse de doctorat de l’université pierre et Marie curie 1997.
- [23] **M. NEDJAR**, “*Acte de la deuxième conférence nationale sur la haute tension*”, Université de TIZI OUZOU 1997.
- [24] **Lacoste A, Pai D, Laux C**, “*Ion wind effect in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air*”, AIAA Paper n°2004-0354, Reno.2004.

- [25] **Loiseau J F, Batina J, Noel F, Peyrous R**, “*Hydro dynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a Pointe-plan reactor*”, J. Phys.D: appl. phys. Vol 35, pp 1020-1031.
- [26] **G.N.Adelsandrov, G.M Rigeikov, O.V Cherbatchev**, “*Modélisation de la caractéristique de courant alternatif*”, Recueil de l’institut polytechnique de saint Petersburg, la série de la technique de la haute tension. 1958.
- [27] **M.Mekious**, “*Influence du mâtereau d’électrode sur une décharge couronne en géométrie pointe-plan*”, Thèse de Magister, université de Tizi Ouzou.2001.
- [28] **D. Guillaume et F. Benoît**, “*Décharge couronne, application et modélisation, Energie industrielle*”, Rapport de stage de l’école supérieure d’ingénieurs de Poitiers, 2004/2005.
- [29] **K. Hocine**, “*Influence de l’effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension*”, Mémoire de magister de l’UMMTO.
- [30] **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.

