

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou
Faculté De Génie Electrique Et Informatique
Département d'Electrotechnique



Mémoire

de fin d'études

En Vue De L'obtention Du Diplôme De Master
Professionnel

Spécialité: Electrotechnique Industrielle

Thème

**Décharge couronne : Influence du matériau
des électrodes sur la caractéristique I-V
en géométrie Pointe-Plan**

Proposé et dirigé par
Mr MEKIOUS M'Hand

Présenté par
Mr REKHIS Med Saïd
Mr CHABANE Mokrane

Promotion 2012/2013

Ce travail a été effectué aux laboratoires Haute Tension et Matériaux de l'électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à Monsieur M .MEKIOUS, pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant de nous encadrer. Sa grande qualité scientifique et son entière disponibilité ont fortement contribué à l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions vivement Monsieur M. MEGHERBI, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury chargé d'examiner ce travail. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance pour les moyens qu'il a mis à notre disposition et pour ses qualités humaines.

Nous adressons nos vifs remerciements à Madame F. BITAM-MEGHERBI, Maître de conférences A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui a bien voulu nous faire l'honneur de participer à ce jury d'examen, mais aussi pour ses encouragements et ses conseils précieux. Que notre profonde gratitude lui soit ici témoignée.

Nous sommes heureux de remercier Monsieur M. MOUDOUD, Maître de Conférences B à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui a aimablement accepté de juger ce travail. Nous lui exprimons toute notre gratitude pour nous avoir fait partager ses larges connaissances, pour sa rigueur scientifique et pour les discussions enrichissantes.

Un grand merci à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail.

Ce travail a été effectué aux laboratoires Haute Tension et Matériaux de l'électrotechnique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à Monsieur M. MEKIOUS, pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant de nous encadrer. Sa grande qualité scientifique et son entière disponibilité ont fortement contribué à l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions vivement Monsieur M. MEGHERBI, Professeur à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider le jury chargé d'examiner ce travail. Nous lui exprimons notre profonde reconnaissance pour les moyens qu'il a mis à notre disposition et pour ses qualités humaines.

Nous adressons nos vifs remerciements à Madame F. BITAM-MEGHERBI, Maître de conférences A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui a bien voulu nous faire l'honneur de participer à ce jury d'examen, mais aussi pour ses encouragements et ses conseils précieux. Que notre profonde gratitude lui soit ici témoignée.

Nous sommes heureux de remercier Monsieur M. MOUDOUD, Maître de Conférences B à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui a aimablement accepté de juger ce travail. Nous lui exprimons toute notre gratitude pour nous avoir fait partager ses larges connaissances, pour sa rigueur scientifique et pour les discussions enrichissantes.

Un grand merci à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents

Mes frères et sœurs

Mes amis (es)

Ma promotion

R.med said

Je tiens à remercier mes très chers parents pour la confiance qu'ils m'ont accordée, pour m'avoir toujours aidé à la réalisation de mes projets et pour leur soutien sans faille.

J'adresse mes vifs remerciements à mes frères et mes sœurs.

Un grand merci à tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je voudrai particulièrement remercier tous mes amis (es).

Chabane Mokrane.

Sommaire

Sommaire

| | |
|---|----|
| I. Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Généralité sur les décharges électriques dans les gaz. | |
| I.1. Introduction | 1 |
| I.2. Caractéristique courant-tension des différents types de décharge dans les gaz | 1 |
| I.3. Formation des décharges dans les gaz | 3 |
| I.4. Décharge de Townsend et critère d'auto-entretien de la décharge | 5 |
| I.5. Attachement électronique | 7 |
| I.6. Loi de Paschen | 8 |
| I.7. Conclusion | 8 |
| Chapitre II : Décharge couronne | |
| II.1. Introduction | 9 |
| II.2. Décharges couronne dans les gaz | 9 |
| II.2.1. Définitions | 9 |
| II.2.2. Configuration des décharges couronnes | 10 |
| II.3. Caractéristique courant-tension et régime de décharge couronne | 11 |
| II.4. Mécanisme de la décharge couronne | 12 |
| II.4.1. Champ électrique et topographie de la décharge | 12 |
| II.4.2. Décharge couronne positive en géométrie pointe-plan ou <i>streamers</i> | 14 |
| II.4.3. Décharge couronne négative en géométrie pointe-plan ou <i>impulsions de Trichel</i> | 14 |

| | |
|--|----|
| II.4.4. Décharge couronne en régime alternatif | 15 |
| II.4.5. Le vent ionique | 17 |
| II.5. Théorie des streamers | 17 |
| II.5.1. Critère de Meek | 18 |
| II.5.2. Critère de Raether | 18 |
| II.6. Domaine d'application des décharges couronne | 19 |
| II.6.1. Traitement des effluents gazeux | 19 |
| II.6.1.1. Les précipitateurs électrostatiques | 19 |
| II.6.1.2. Destruction des polluants | 19 |
| II.6.2. Traitement des surfaces | 19 |
| II.6.2.1. Nettoyage et érosion de surface | 19 |
| II.6.2.2. Modification de la chimie de surface | 20 |
| II.6.3. Élimination de l'électricité statique | 20 |
| II.7 Conclusion | 20 |
| Chapitre III : Dispositif expérimental | |
| III.1. Introduction | 21 |
| III.2. Dispositif expérimental | 21 |
| III.2.1. Le système pointe –plan | 22 |
| III.2.2. Dispositif de mesure | 23 |
| III.2.3. Matériaux utilisés | 23 |
| III.3. Mode opératoire | 23 |
| III.4. Conclusion | 24 |

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et discussions

| | |
|--|----|
| IV .1. Introduction | 25 |
| IV.2. Influence des paramètres électro-géométriques sur la décharge couronne | 25 |
| IV.2.1. Tension seuil d'apparition de l'effet couronne | 25 |
| IV.2.2. Effet de la tension appliquée | 27 |
| IV.2.3. Effet de la distance inter-électrodes sur la décharge couronne | 28 |
| IV.2.4. Influence du matériau des électrodes en polarité positive | 30 |
| IV.2.4.1 Influence du matériau de la pointe | 30 |
| IV.2.4.2. Influence du matériau de l'électrode plane | 31 |
| IV.5. Influence du matériau des électrodes en polarité négative | 33 |
| IV.5.1. Influence du matériau de la pointe | 33 |
| IV.5.2. Influence du matériau de l'électrode plane | 34 |
| IV.6. Conclusion | 36 |
| Conclusion générale | 36 |
| Annexes | 37 |
| Annexe I | 37 |
| Annexe II | 39 |
| Références bibliographiques | 41 |

Introduction Générale

Les décharges couronne sont des décharges électriques qui précèdent le claquage, elles se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement asymétriques qui sont soumises à des champs fortement hétérogènes et localement assez élevés pour produire une ionisation partielle du gaz. L'inhomogénéité du champ électrique est dû aux configurations particulière des électrodes, dont l'une présentant un rayon de courbure très faible par rapport à celui de l'autre [1]. Les plus utilisées sont représentées par des systèmes pointe-plan, multi pointes-plan, couteau-cylindre, fil- cylindre, cylindre-cylindre etc.... .

Beaucoup de travaux sont consacrés à l'étude du mécanisme de développement de la décharge couronne ; d'abord c'est parce qu'il s'agit d'un phénomène très répandu dans la nature, mais aussi un phénomène très utilisé dans les applications industrielles pour sa simplicité de mise en œuvre.

Malgré les effets nuisibles de la décharge couronne (pertes dans les lignes de transport d'énergie électrique HT, perturbations radioélectriques, etc...), cela n'a pas empêché son exploitation dans d'autres secteurs tels que la chimie des plasmas :

- Destruction des polluants,
- Nettoyage et érosion de surfaces,
- Modification de la chimie de surface,
- Élimination de l'électricité statique.

Dans l'ensemble, les phénomènes remarquables durant la décharge couronne sont des lumières engendrées avec des bruits. Ils dépendent d'un certain nombre de paramètres ; parmi eux, la nature de la tension appliquée à l'électrode de faible rayon de courbure, distance inter-électrodes ainsi que le matériau constituant les électrodes qui a fait l'objet de notre travail.

Nous avons jugé utile de répartir notre travail comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation générale des décharges électriques dans les gaz caractérisées par la décharge de Townsend et critère d'auto-entretien de la décharge.

Le second chapitre relate une étude approfondie des différents aspects qui régissent les caractéristiques et propriétés de la décharge couronne, particulièrement dans la configuration pointe-plan.

Le troisième chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental et des différents outils utilisés.

Le quatrième chapitre quand à lui est réservé à l'exploitation des résultats expérimentaux obtenus lors des essais effectués en tensions alternative et continue ainsi qu'une discussion de ces résultats pouvant aider à leur interprétation.

Enfin, une conclusion générale viendra achever ce mémoire.

Chapitre I

Généralités sur les décharges électriques dans les gaz

I.1. Introduction :

Les phénomènes de décharges électriques étudiés existant depuis près de deux siècles, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques [12].

Dans ce chapitre nous citons quelques théories sur les mécanismes d'initiation d'une décharge électrique dans les gaz.

I.2. Caractéristique courant-tension des différents types de décharge dans les gaz :

En fonction de la distance inter-électrodes, du matériau des électrodes et de la pression on peut distinguer plusieurs décharges qui sont classifiées par rapport à leurs caractéristiques courant-tension comme le montre la figure (I.1). La courbe supérieure correspond aux décharges en haute pression (autour de la pression atmosphérique). Par contre la courbe inférieure correspond aux décharges en basse pression ($< 1\text{mbar}$). La décharge est de type *filamentaire* en haute pression c'est pourquoi sous certaines conditions, il est bien possible d'obtenir une décharge luminescente.

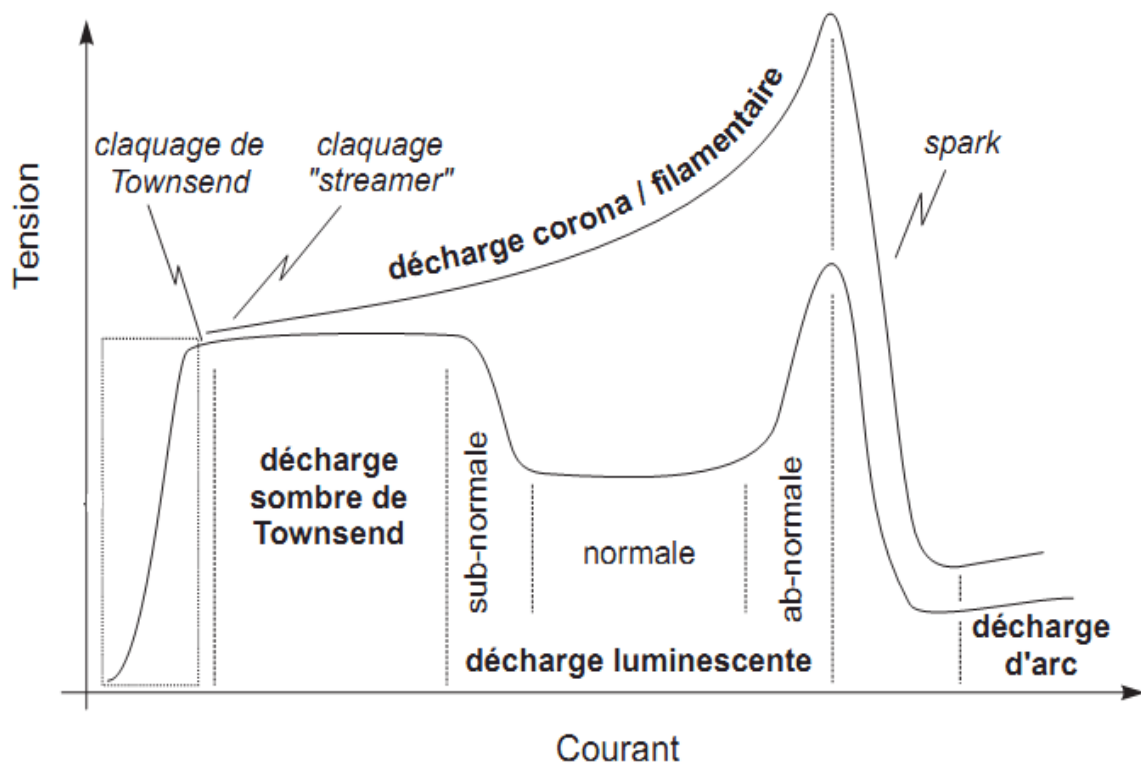


Figure I.1 : Caractéristiques courant-tension de différents types de décharges dans les gaz [11].

Sur la figure (I.1), on distingue les quatre régimes de la décharge qui sont les suivants :

- La décharge sombre de Townsend : caractérisée par un courant très faible ($\sim 10^{-8}$ A)
- La décharge luminescente (*glow*) : beaucoup plus utilisée dans les procédés industriels, généralement à basse pression ($< \text{mbar}$) à faible courant ($\sim 10^{-2}$ A) et moyenne tension (1kV). Comme pour la décharge de Townsend, les électrons sont émis par impacts ioniques à la cathode.
- La décharge couronne ou filamentaire : rencontrée généralement à pression atmosphérique, courant faible ($\sim 10^{-6}$ A). Elle se développe localement sous un champ électrique non uniforme.
- La décharge d'arc : caractérisée par un fort courant (> 100 A), une faible tension (< 100 V) et une émission lumineuse très intense. Dans ce type de décharge les électrons sont émis par un procédé thermo-ionique dû au chauffage de la cathode.

A l'enclenchement de ces décharges on distingue trois types de claquages figurant sur la figure (I.1), le claquage de type de Townsend, le claquage de type streamer et le claquage de type spark (étincelle).

I.3. Formation des décharges dans les gaz :

La formation des décharges dans les gaz est due à un transfert d'énergie entre un électron accéléré par un champ électrique et les molécules neutre du gaz, et on distingue deux types de collisions :

Collisions élastiques : ces collisions préservent l'énergie interne du système, seule la vitesse des atomes qui est accélérée

Collisions inélastiques : dans ce genre de collisions, l'énergie interne des molécules change. Si l'énergie cinétique de la collision est suffisante, un électron peut lors de cette collision ioniser ou exciter la molécule neutre rencontrée.

Le tableau suivant présente les collisions produites par des électrons (les plus communes), dans une décharge électrique (A et B sont deux atomes du gaz).

| Nom de la collision électronique | |
|----------------------------------|--|
| Ionisation | $e + A \rightarrow A^+ + 2e$ |
| Excitation | $e + A \rightarrow e + A^* \rightarrow e + A + h\nu$ |
| Ionisation « Penning » | $e + A^* \rightarrow 2e + A^+$ |
| Collision élastique | $e + A \rightarrow e + A$ |
| Dissociation | $e + AB \rightarrow e + A + B$ |
| Ionisation dissociative | $e + AB \rightarrow 2e + A^+ + B$ |
| Attachement dissociatif | $e + AB \rightarrow A \cdot + B$ |
| Recombinaison | $e + A^+ + B \rightarrow A + B$ |

Tableau I.1 : Collisions induites par un électron dans un plasma de décharge [14].

Pour obtenir une description plus formelle de ces processus, il est intéressant de déterminer le nombre de chocs que subira l'électron par unité de temps. Nous supposons que la distribution de vitesse des molécules du gaz obéit à la loi de Maxwell-Boltzmann. Si l'on admet que l'électron se déplace à une vitesse moyenne v pendant un temps δt , il parcourt alors la distance $v \cdot \delta t$ et balaie un domaine d'espace de volume $\sigma \cdot v \cdot \delta t$, dont σ représentant la section efficace (*Annexe I*) de collision entre l'électron et une molécule. Le nombre de collisions est donc égal à :

$$\sigma \cdot v \cdot \delta t \cdot N \quad (\text{I.1})$$

N : étant la densité du gaz en nombre de molécules par unité de volume

Le nombre de collisions par unité de temps se déduit de l'expression précédente :

$$n = \sigma \cdot v \cdot N \quad (\text{I.2})$$

La notion de libre parcours moyen, qui représente la distance moyenne que peut parcourir un électron entre deux chocs successifs, découle naturellement de la relation (I.2) :

$$\lambda = \frac{v \cdot \delta t}{n \cdot \delta t} = \frac{1}{\sigma \cdot N} \quad (\text{I.3})$$

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 (*Annexe I*). La capacité de réagir du milieu gazeux dépendra donc des paramètres suivants [2] :

- Composition du gaz introduit : la section efficace σ varie en fonction de la nature du gaz et de son niveau d'excitation électronique (pour des molécules dans leur état fondamental, nous avons par exemple $\sigma_{N_2} = 0.43$, $\sigma_{CO_2} = 0.52$,
 $\sigma_{C_6H_6} = 0.88$)
- Pression et température du gaz introduit.
- Tension appliquée (responsable de l'intensité du champ électrique).
- Géométrie des électrodes (responsable de la forme des lignes de champ).

I.4. Décharge de Townsend et critère d'auto-entretien de la décharge :

Historiquement, la création d'une décharge entre deux électrodes planes dans une enceinte où la pression est de l'ordre du Torr a été initiée par Townsend. La figure (I.2) est le dispositif académique utilisé pour l'obtention de décharges basse pression.

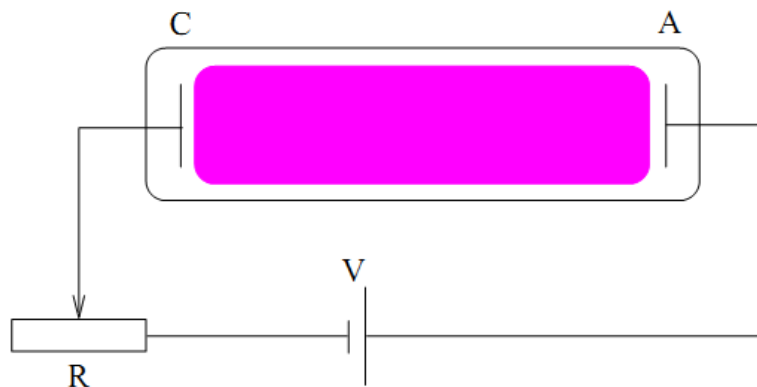
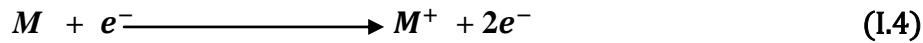


Figure I.2 : Configuration pour l'étude des décharges basse pression [13].

L'énergie cinétique d'un électron détermine sa capacité à exciter ou à dissocier les molécules des milieux gazeux. L'énergie acquise par un électron placé entre deux électrodes dépend de son libre parcours moyen (*Annexe I*) et du champ électrique auquel il est soumis ($E=V/d$ dans le cas d'un

champ uniforme, V étant la différence de potentiel appliquée entre les électrodes tandis que d représente la distance inter-électrodes). L'obtention d'un nombre d'électrons suffisant pour exciter le gaz de façon significative, exige un mécanisme de multiplication. Si l'énergie d'un électron est supérieure à l'énergie d'ionisation d'une molécule M , alors un choc inélastique est susceptible de libérer un électron.



Les deux électrons obtenus par ionisation sont alors accélérés par le champ électrique et peuvent à leur tour ioniser de nouvelles molécules. Afin de traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation, Townsend a proposé en 1914 l'introduction d'un coefficient d'ionisation α (appelé premier *coefficient de Townsend*). Ce coefficient dépend du champ réduit (E/N), N désignant la densité du gaz) et son inverse ($1/\alpha$) représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de ($e^{\alpha d}$) électrons au niveau de l'anode. Ce processus appelé *avalanche électronique*. La relation de Townsend s'écrit alors [1,12]:

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha d} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

I : Courant (A)

I_0 : Courant initial dû aux électrons primaires (A)

d : distance inter-électrodes (m)

α : premier coefficient de Townsend (m^{-1})

En dehors de ce qui a été proposé par Townsend, des électrons secondaires peuvent être émis par impact d'ions positifs M^+ sur la cathode ou par impact de photons (émis par désexcitation radiative après impact électronique) sur la cathode ou les molécules proches :



La probabilité de produire des électrons secondaires se traduit par l'introduction d'un autre coefficient γ appelé second coefficient de Townsend. Le critère d'auto-entretien de la décharge (nombre adimensionnel) s'écrit alors [9]:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (\text{I.7})$$

I.5. Attachement électronique :

Comme ce mécanisme est consommateur d'électrons (*Annexe I*), il est compétitif du mécanisme d'ionisation. Pour prendre en compte ce phénomène, il convient alors d'introduire dans la relation de Townsend une probabilité d'attachement électronique η (l'attachement est le phénomène de recombinaisons de particules lorsqu'un ion positif rencontre un électron ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent) :

$$I = I_0 \cdot e^{(\alpha - \eta)d} \quad (\text{I.8})$$

Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit donc [3]:

$$\gamma \cdot (e^{(\alpha - \eta)d} - 1) = 1 \quad (\text{I.9})$$

On a

$$M = \gamma \cdot (e^{(\alpha - \eta)d} - 1) \quad (\text{I.10})$$

Alors :

$$M \begin{cases} < 1 & \text{la décharge est non auto entretenue} \\ \geq 1 & \text{la décharge est auto entretenue} \end{cases} \quad (\text{I.11})$$

Lorsque le champ appliqué n'est pas uniforme, le coefficient α n'est pas constant et le critère d'auto-entretien s'exprime dans ce cas par la relation suivante :

$$M = \gamma \cdot \int_0^d \alpha \exp \left[\int_0^d (\alpha - \eta) dx \right] dx \quad (\text{I.12})$$

I.6. Loi de Paschen :

Pour qu'une décharge se déclenche, il faut qu'elle soit alimentée par une tension minimale qui s'appelle tension de claquage, cette dernière est reliée à la loi de Paschen. Cette loi est représentée par la courbe caractéristique $U_c=f(p.d)$ où p : pression du gaz, d : distance inter-électrodes. La courbe dépend aussi de la nature du gaz :

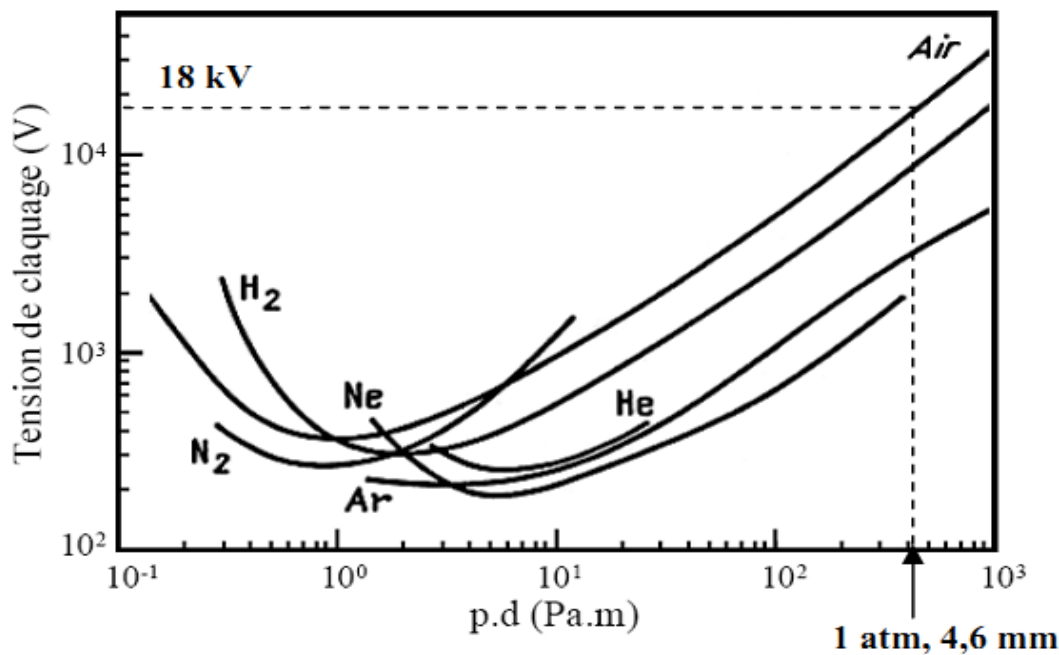


Figure I.3 : Tension de claquage pour différents gaz en fonction du produit $p.d$ [5]

D'après cette figure on constate que pour un gaz à pression atmosphérique ($P=1,013.10^5$ Pa), les courbes passent par un minimum pour une distance inter électrodes d'environ $10\mu\text{m}$ soit le produit $P*d=0,5$ à 5 Pa.m cela voudrait dire que pour la production de décharges à pression atmosphérique pour $d \geq 1\text{mm}$ la tension de claquage est une fonction proportionnelle à la distance inter-électrodes. [4]

I.7.Conclusion :

Ce premier chapitre a fait l'objet d'une étude générale sur les décharges électriques dans les gaz. Le phénomène reste assez complexe malgré les grandes avancées faites sur la décharge électrique dans les gaz, Ceci est dû à plusieurs facteurs (la nature et la pression du gaz, le type de tension appliquée, la forme des électrodes) dont dépendent l'initiation et le développement des décharges.

Chapitre II

Décharges couronne

II.1. Introduction :

De nos jours les *décharges couronne* sont de plus en plus utilisées dans l'industrie [2]. Ces décharges sont des décharges électriques pré-disruptives qui se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement asymétriques [3], qui peuvent conduire à la création des *plasmas froids*.

II.2. Décharges couronne dans les gaz :

II.2.1. Définitions :

Les plasmas sont désignés comme étant le quatrième état de la matière faisant suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz. Le terme *plasma* a été introduit pour la première fois en 1923 par les physiciens Américains Irving Langmuir et Levi Tonks. Il servait à désigner dans les tubes à décharge certaines régions équipotentiellles contenant un gaz ionisé électriquement neutre.

Ainsi, le plasma est défini comme étant un gaz ionisé qui est obtenu en fournissant de l'énergie à la matière sous forme de chaleur ou par adjonction d'un champ électrique ou magnétique, le plasma occupe 99% de notre univers.

Selon leur *densité électronique* n_e (nombre d'électrons par unité de volume), leur *température électronique* T_e ainsi leur *longueur de Debye* λ_D (Annexe I), on distingue deux types de plasmas [4] :

- *Les plasmas thermiques* : ils sont dits plasmas à équilibre thermodynamique car les ions, les électrons et les molécules ont des températures sensiblement identiques et qui sont proches de celle du gaz (5000° K à 50 000° K).

- *Les plasmas froids* : ils sont caractérisés par leur état hors équilibre thermodynamique car la température électronique (de 1000° K à 10 000° K) est supérieure à celle du gaz ambiant (généralement inférieure à 500° K).

Ces derniers peuvent être formés par des décharges couronne. Celles-ci sont bien adaptées à la formation des plasmas froids car elles permettent en effet une localisation et une distribution en énergie des espèces (électrons, molécules ou ions) [3].

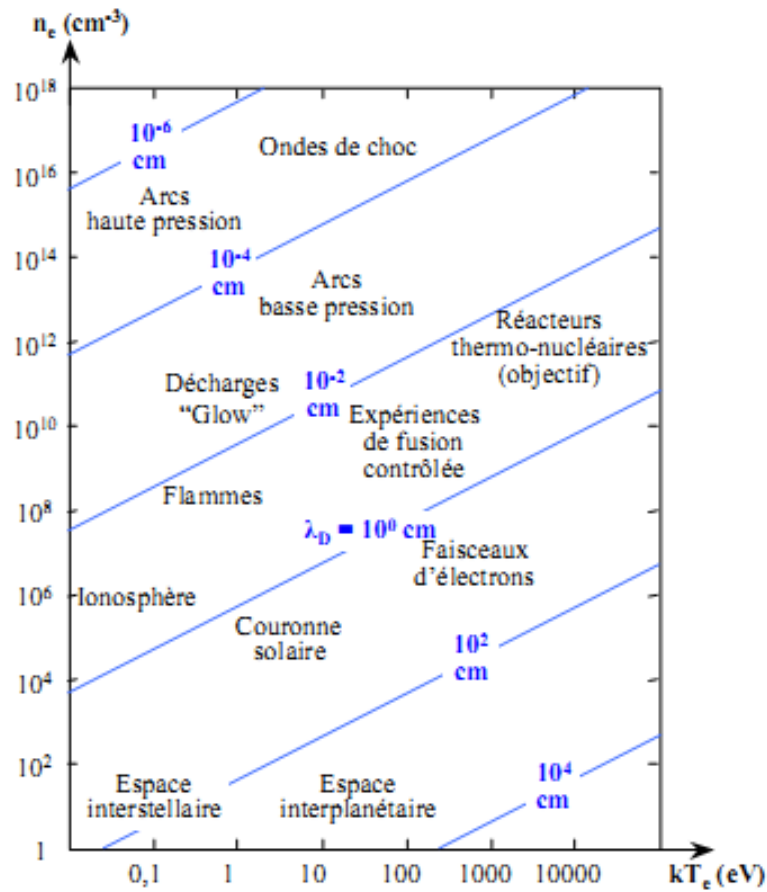


Figure II.1 : Différentiation des plasmas en fonction de la densité électronique n_e , l'énergie électronique kT_e et la longueur de Debye λ_D [3].

II.2.2. Configuration des décharges couronne :

Les décharges couronne sont des décharges électriques qui précèdent le claquage, elles se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement assymétriques. Les principales configurations des systèmes d'électrodes les plus utilisés sont [3]:

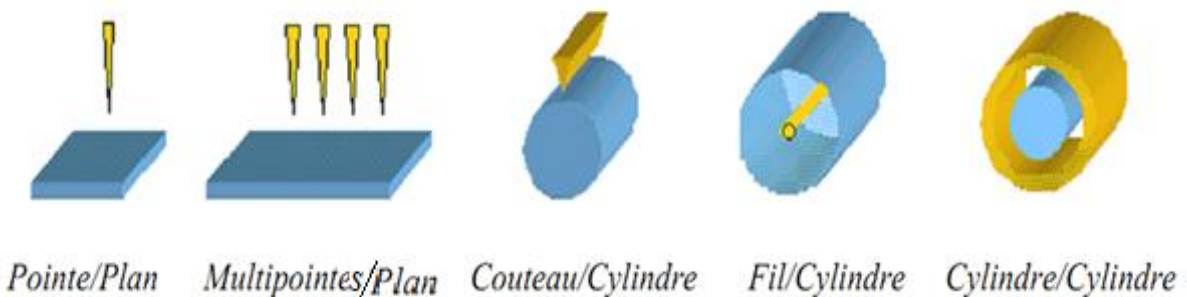


Figure II.2: Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production de décharges couronne [3].

Grâce à cette dissymétrie, le champ électrique entre les deux électrodes est hétérogène, ce qui permet aux décharges couronne de s'appliquer à des milieux gazeux variés et à des pressions allant de quelques centaines de Pascals à quelques atmosphères. C'est pourquoi les décharges couronne ont pour avantage d'être faciles à produire dans de bonnes conditions de stabilité et de reproductibilité.

La haute tension qui est appliquée 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 et donc d'obtenir sans passage à l'arc des électrons de haute énergie [3].

II.3. Caractéristique courant-tension et régime de décharge couronne :

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.3).

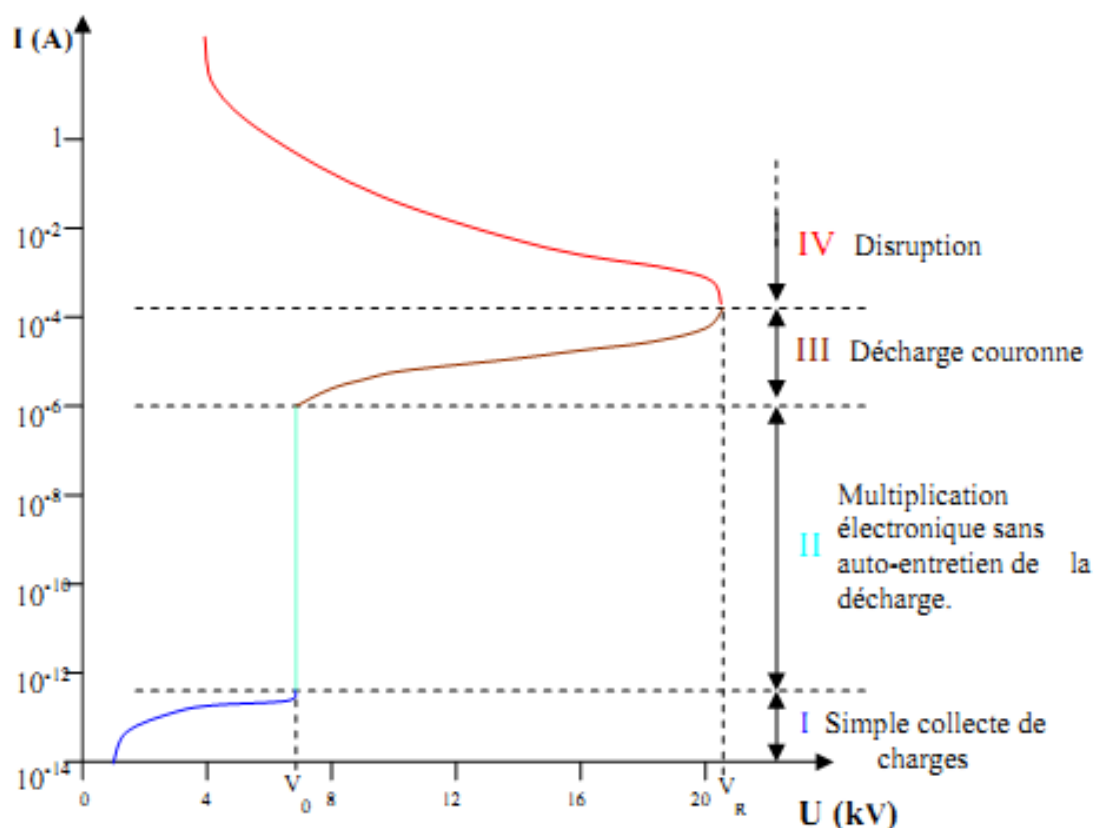


Figure II.3 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter-électrodes: 13 mm) [1,5].

Régime I : Dans le cas où le courant est très faible ($\leq 10^{-12}$ A/cm⁻²) dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou du rayonnement cosmique, le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électrique [1, 5,7].

Régime II : La décharge est qualifiée de *non autonome* car elle dépend du processus d'ionisation externe pour donner naissance aux électrons germes mais se produit à partir d'une tension seuil V_0 . Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.

Régime III : Dans ce régime, la décharge seule suffit à l'ionisation du gaz. C'est pourquoi la décharge est *auto-entretenu*, c'est le régime de la décharge couronne où il y a apparition des *streamers*.

Régime IV : La température du canal augmente fortement à partir d'une tension appliquée V_R , aussi les courants de décharge deviennent très importants car toute l'énergie passe par le même canal dans l'espace inter-électrodes.

II.4. Mécanismes de la décharge couronne :

II.4.1. Champ électrique et topographie de la décharge :

Les décharges couronne sont établies entre une électrode dite *active* et une électrode *passive* (électrode reliée à la terre), ces décharges sont faiblement lumineuses. L'électrode active est l'électrode présentant un faible rayon de courbure qui peut être une pointe ou un fil à laquelle on va appliquer un haut potentiel électrique, tandis que l'électrode passive est dans la plupart des cas un plan. On obtient alors une décharge couronne volumique [7,12].

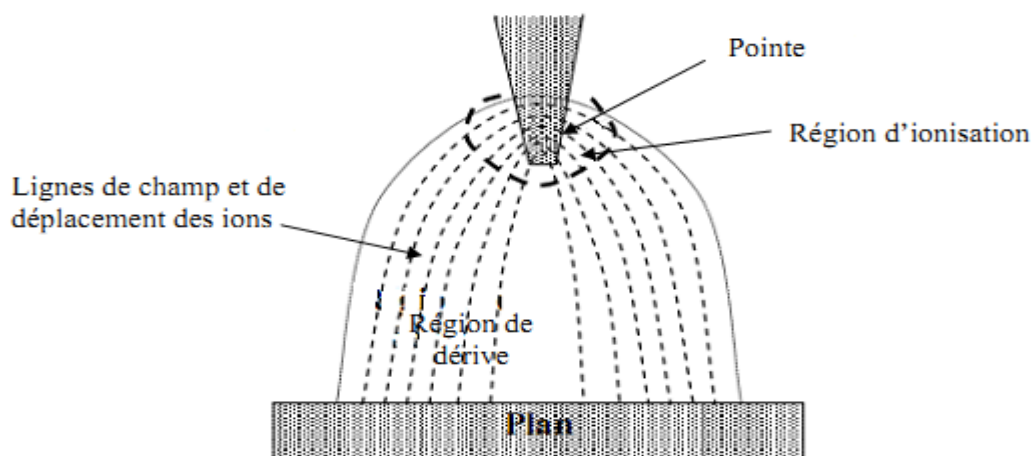


Figure II.4: Configuration pointe-plan [12].

La dissymétrie des décharges a pour principale conséquence la création d'un champ électrique inhomogène (non uniforme) dans l'intervalle gazeux.

- En géométrie pointe hyperbolique-plan (**Hartmann**) [1,8], a proposé l'expression :

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln \frac{2d+r}{r}} \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

$E(x)$: champ électrique (V /m)

V : tension appliquée à la pointe (V)

x : distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m)

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

d : distance inter-électrodes (m)

- En géométrie coaxiale (**Lacoste**) [3], a proposé l'expression suivante :

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R_e}{R_i}} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$E(r)$: 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)

La décharge couronne peut être positive comme elle peut être négative et elle dépend de la polarité du potentiel à laquelle l'électrode active est portée.

II.4.2. Décharge couronne positive en géométrie pointe-plan ou *streamers* :

Ce modèle de décharge a été proposé par Townsend en 1915. Dans ce modèle, l'électron présent au voisinage de la pointe est accéléré vers celle-ci par le champ électrique. La présence de cet électron est expliquée par la photo-ionisation d'une molécule du gaz par le rayonnement cosmique. Cet électron, accéléré vers la pointe, subit lors de son trajet des collisions ionisantes, produisant une avalanche d'électrons attirés eux aussi vers la pointe [3,5]. Après le ramassage de l'anode de ces électrons, ils laissent dans leur chemin une zone de charges d'espace positive (Figure II.5).

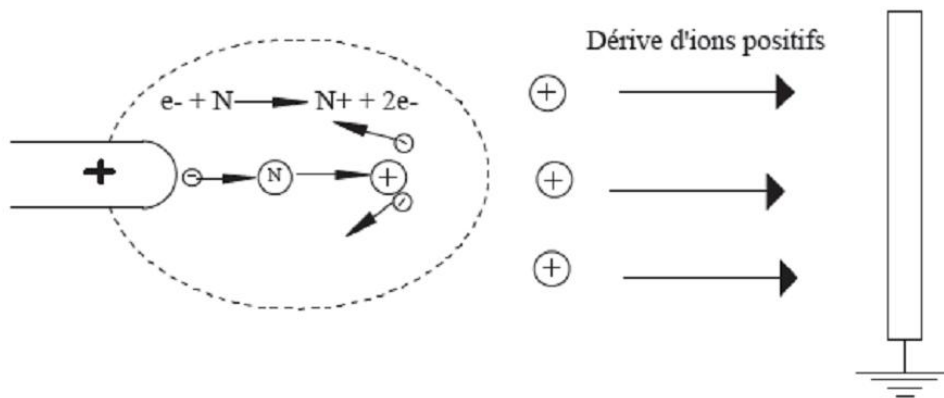


Figure II.5 : Descriptif de la décharge couronne positive [7].

Pour cette décharge, il y a avancement de streamers, qui se propagent en quelque sorte comme une extension de l'anode. Ce qui voudrait dire que la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer 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 [7].

II.4.3. Décharge couronne négative en géométrie pointe-plan ou *impulsions de Trichel* :

La décharge couronne négative se produit quand la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours production d'électrons par photo-ionisation. Une fois que le champ a atteint la valeur critique, il y aura apparition d'une région de forte ionisation autour de la pointe, dont l'apparition des impulsions dites de Trichel. Elles constituent les premiers phénomènes d'ionisation visibles

près de la cathode, elles ont la même amplitude, de très courte durée et apparaissent à des intervalles réguliers sous la forme d'un cône lumineux [4].

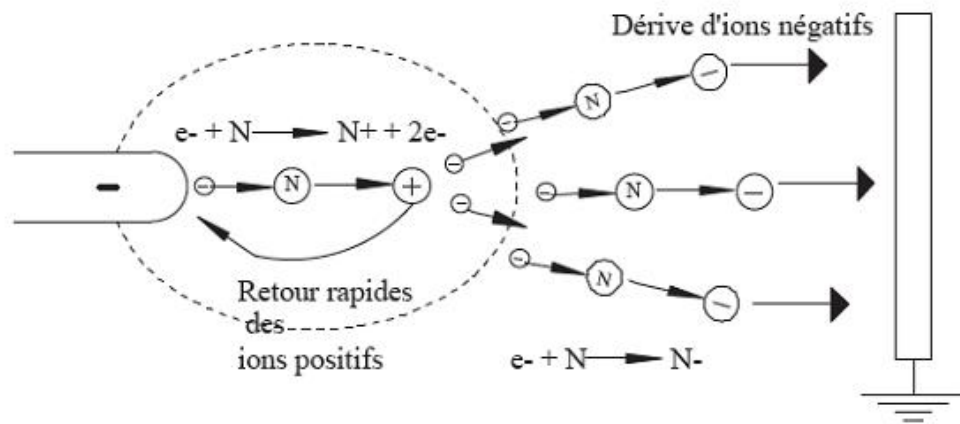


Figure II.6 : Descriptif de la décharge couronne négative [5].

II.4.4. Décharge couronne en régime alternatif :

L'application d'un champ alternatif au gaz influe sur le comportement du système qui dépend de la distance inter-électrodes d_{\max} et la fréquence d'alimentation électrique donnée par la relation suivante :

$$d_{\max} = \frac{\mu E_{\max}}{2\pi f} \quad (\text{II.3})$$

Où :

f : fréquence du champ alternatif

μ : mobilité des ions (*Annexe I*)

E_{\max} : amplitude maximale du champ

Lorsque la distance inter-électrodes est inférieure à la distance d_{\max} , on observe les mêmes modes de décharges que dans le cas du courant continu. Pour les distances supérieures à d_{\max} , il y a accumulation de charges d'espace. En effet pour les grandes distances, les ions positifs n'ont pas le temps d'être évacués pendant l'alternance positive, leur présence autour de la pointe augmente le

champ électrique existant. Par conséquent, le mode de décharge suivant a lieu à une tension appliquée plus faible [3,6].

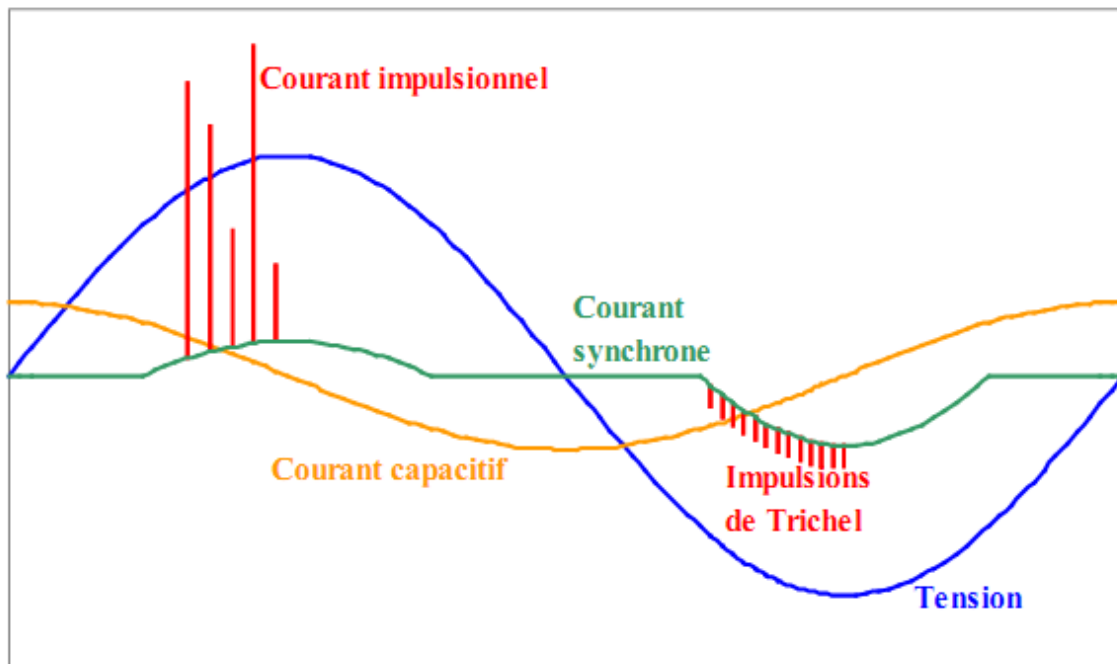


Figure II.7 : Différentes composantes du courant en alternatif en géométrie pointe-plan à la pression atmosphérique [3].

De la figure (II.7), il apparaît clairement trois composantes du courant [8].

- Un courant capacitif : dû à l'intervalle gazeux entre les électrodes qui jouent le rôle d'un condensateur.
- Un courant synchrone, continu et en phase avec la tension appliquée.
- Un courant impulsif, somme des impulsions streamer pour les alternances positives et des impulsions de Trichel lors des alternances négatives [6].

II.4.5. Le vent ionique :

Le vent ionique est créé sous l'action de la décharge où de nombreuses espèces chargées (ions positifs, ions négatifs ou électrons) sont elles aussi créées dans l'espace inter-électrodes, accélérées par le champ électrique et entraînées vers la cathode pour les ions positifs, vers l'anode pour les ions négatifs et les électrons. En chemin, elles percutent d'autres molécules auxquelles elles transmettent une partie de leur quantité de mouvement. Le caractère impulsionnel de la décharge agit sur l'écoulement comme une série d'ondes de pressions dont la fréquence est identique à celle des pulses. La vitesse du vent ionique dépend de la distance inter-électrodes et du courant de la décharge [3,8].

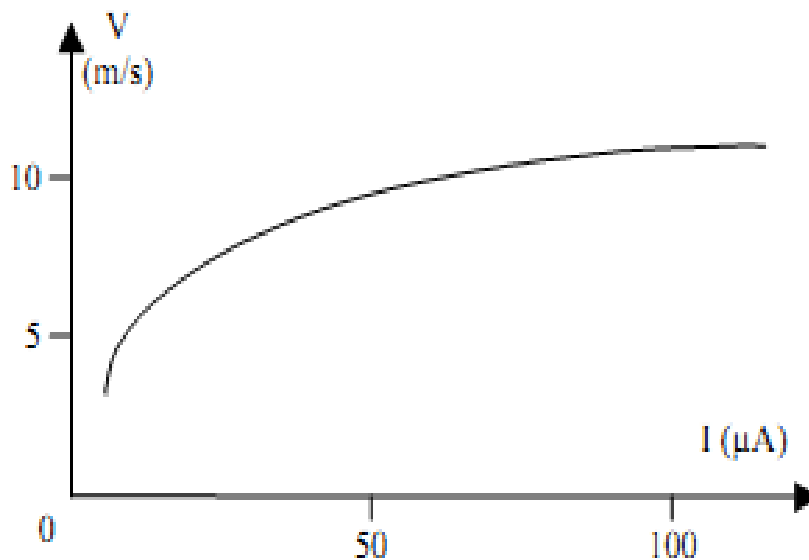


Figure II.8 : Variation de la vitesse du vent électrique en fonction du courant de décharge
(tension= 3,8 KV, $d=4mm$, rayon de la courbure de la pointe= $50\mu m$) [3]

II.5. Théorie des streamers :

Dans certains cas des mesures de temps de formation de la décharge se sont révélés, incompatibles avec les mécanismes suggérés par Townsend. Fletcher en particulier avec ces travaux a étayé cette assertion. Ce dernier, en imposant brutalement une surtension entre deux électrodes planes dans l'air, a observé l'existence d'un temps de formation si court que même les électrons n'ont pas le temps de traverser l'espace inter-électrodes. Ce phénomène a été analysé théoriquement par Loeb, Meek et Raether.

Dans certains cas, il a été observé que la décharge se manifeste par la formation de filaments lumineux se propageant entre les électrodes. Ce processus désigne le nom du streamer (*dard*).

II.5.1. Critère de Meek :

L'évolution avalanche-streamer n'est pas spontanée et ne se produit pas toujours. Pour cela, des considérations théoriques sur les conditions de cette évolution ont été effectuées par : (Loeb, Kip,...).

Ces considérations restaient cependant qualitatives. Elles se fondaient, en particulier, sur la déformation axiale des lignes de champ par la charge d'espace positive laissée par l'avalanche électronique.

Alors Meek a expliqué que la déformation n'est pas seulement axiale, mais aussi radiale, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction du champ appliqué. Or la photo ionisation du gaz à proximité de la tête du streamer est 'un facteur essentiel de sa propagation. Ces photoélectrons sont donc, non seulement accélérés, mais encore ramenés à la tête du streamer [12].

Le principe de base de formation d'un streamer qui a été conclue par ces considérations est le suivant : « Pour que les photoélectrons, attirés par la charge d'espace positive forment une avalanche de taille suffisante pour créer un streamer, il faut que le champ de cette charge d'espace soit du même ordre de grandeur que le champ appliqué ».

II.5.2. Critère de Raether :

Reather a pu établir un critère empirique basé principalement sur le fait que l'avalanche devait atteindre une taille critique pour que l'évolution avalanche-streamer puisse avoir lieu. Ce critère s'écrit dans le cas d'un champ non uniforme simplement comme suite :

$$\int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx = \log (\eta_c) \quad (\text{II.4})$$

Où :

x_c : représente la distance critique

η_c : le nombre critique d'électrons produits par l'avalanche. En général, ce nombre est de 10^8 .

II.6. Domaines d'application des décharges couronne:

II.6.1. Traitement des effluents gazeux :

II.6.1.1. 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 qui 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 [2].

II.6.1.2. 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.6.2. 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.6.2.1. 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 organiques de surface par un effet de *combustion froide* contrôlée qui est plus économique et plus protecteur pour l'environnement .

II.6.2.2. 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.6.3. 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 [2].

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté de manière générale les différents phénomènes qui sont associés à la décharge couronne, comme les mécanismes de développement de l'avalanche électronique, la propagation des décharges (streamers, impulsions de Trichel) selon la nature de la tension appliquée et enfin ses domaines d'applications.

Chapitre III

Dispositif expérimental

III.1. Introduction :

Ce chapitre a pour objet la description du dispositif expérimental. Une fois la description du dispositif expérimental réalisée, nous détaillerons les différents outils pour la mesure du courant moyen de la décharge couronne.

III.2. Dispositif expérimental :

Les expériences sont effectuées dans les laboratoires de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou.

Les essais sous tension alternative (50Hz) sont effectués au Laboratoire Haute Tension avec une source allant de 0 à 100 kV_{eff}.

Par contre, les essais en continu, ont eu lieu au Laboratoire de Matériaux d'Electrotechnique avec une source (0-65 kV-10mA).

Le dispositif expérimental est composé d'un système d'électrodes pointe-plan, une résistance de mesure de 100 k Ω et un multimètre comme le montre la figure suivante :

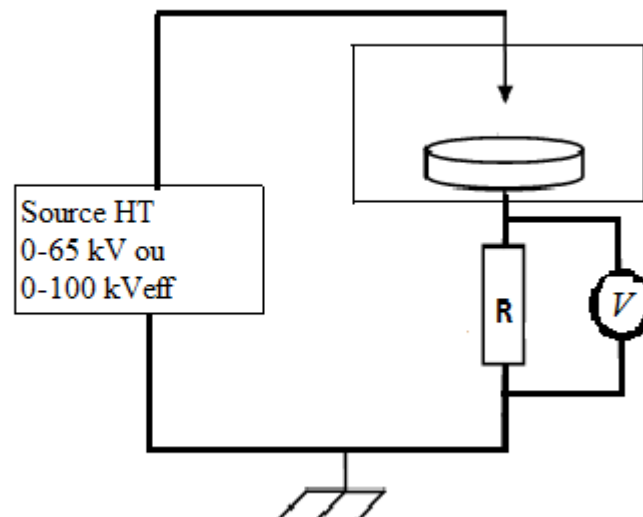


Figure III.1: Dispositif expérimental utilisé.

III.2.1. Le système pointe –plan :

Le système d'électrodes choisi permet d'obtenir des décharges couronne, c'est un système « pointe – plan » adapté pour faire varier aisément la distance inter-électrodes. Les électrodes sont interchangeables.

Les pointes utilisées pour nos essais sont des tiges cylindriques de 4 mm de diamètre terminées par une pointe conique ayant un angle d'ouverture de 30° , les rayons de courbure des pointes varient entre 30 et 32 μm (figure III.2).

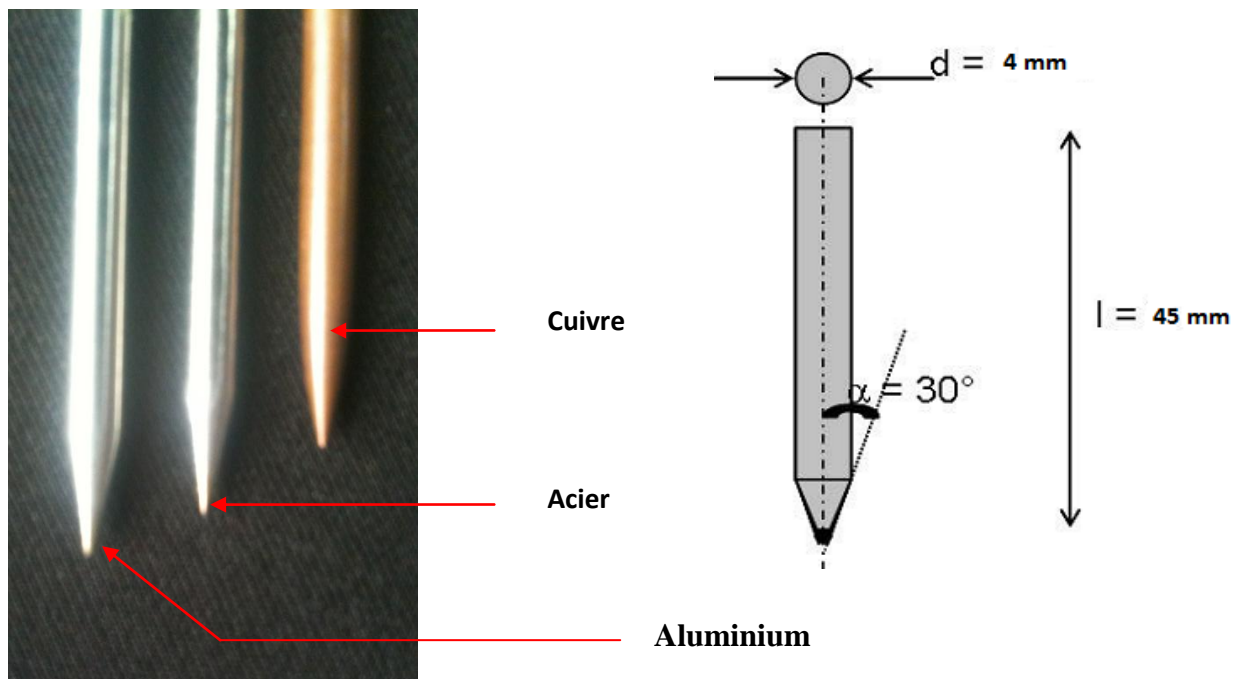


Figure III.2 : Photographie et dimensions des pointes utilisées.

Les plans sont des disques circulaires à bords arrondis de 10 cm de diamètre et 4 mm d'épaisseur figure (III3).

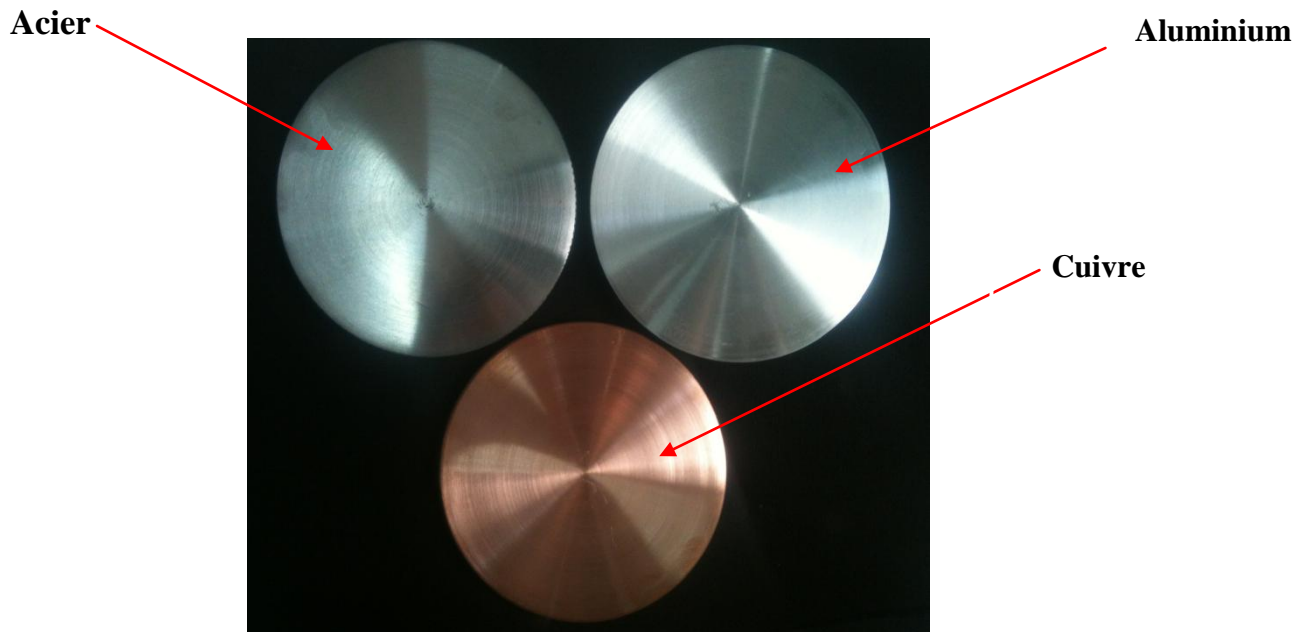


Figure III.3 : Photographie des plans utilisés.

III.2.2. Dispositif de mesure :

La mesure du courant moyen est obtenue par la mesure de la tension aux bornes d'une résistance de $100\text{ k}\Omega$ à l'aide d'un multimètre, la tension appliquée est mesurée à l'aide d'un voltmètre via un diviseur de tension de rapport 1000 pour la source alternative. Pour la source continue, la tension est lue sur l'afficheur.

III.2.3. Matériaux utilisé :

Les matériaux des électrodes (pointes et plans) sont :

- l'acier,
- le cuivre,
- l'aluminium.

III.3. Mode opératoire :

Dans le but d'éviter toute modification ou dégradation des électrodes (corrosion par exemple), nous avons bien veillé à les nettoyer à l'alcool avant et après chaque essai puis attendre

qu'elles sèchent. Afin de réduire les effets liés à la pression, température, l'humidité, les expériences sont réalisées dans la même journée.

Les résultats que nous présenterons au chapitre IV, représentent une moyenne de ceux obtenus après plusieurs essais.

III.4.Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la description du dispositif expérimental de la décharge couronne sous les deux régimes de tensions continue et alternative.

L'étude électrique, qui fera l'objet du chapitre suivant, portera sur la mesure du courant moyen de la décharge en fonction de la tension appliquée en fixant la distance inter-électrodes.

Chapitre IV

Résultats expérimentaux et discussions

IV .1. Introduction :

Ce chapitre est consacré aux résultats expérimentaux de la caractéristique I-V de la décharge couronne dans une configuration pointe-plan sous les deux régimes de tension continue et alternative.

IV.2 : Influence des paramètres électro-géométriques sur la décharge couronne :

Les essais sont réalisés dans les conditions normales de pression et de température. Deux sources de tension sont utilisées :

- Une source de tension continue (0-65 kV)
- Une source de tension alternative (0-100 kV_{eff})

IV.2.1 Tension seuil d'apparition de l'effet couronne : La tension seuil d'apparition de l'effet couronne est représenté dans les figures IV.1 à IV.3.

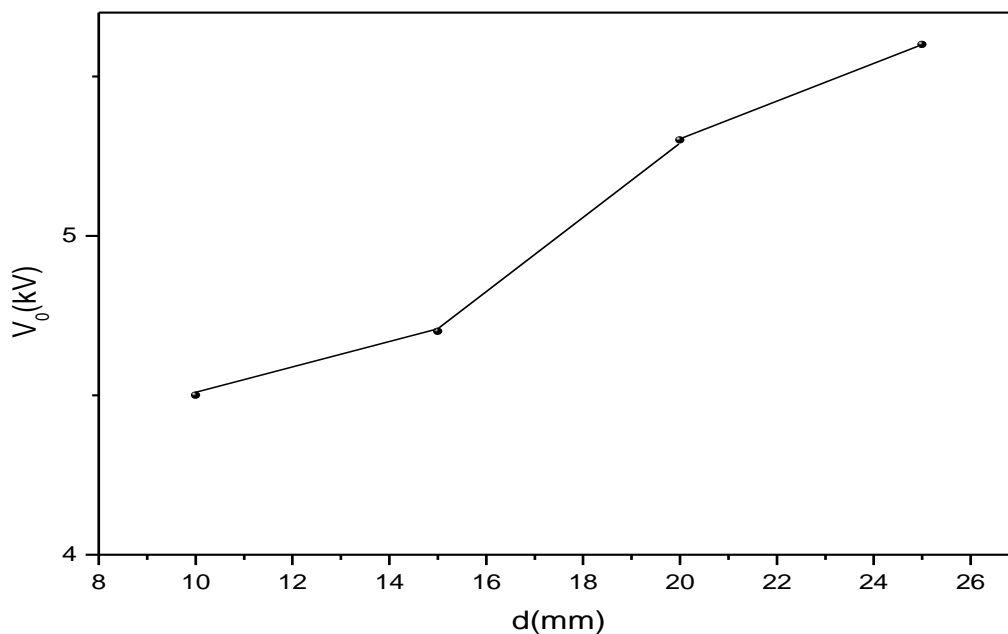


Figure IV.1 : Tension seuil d'apparition de l'effet couronne en polarité positive en fonction de la distance inter-électrodes (électrodes en aluminium).

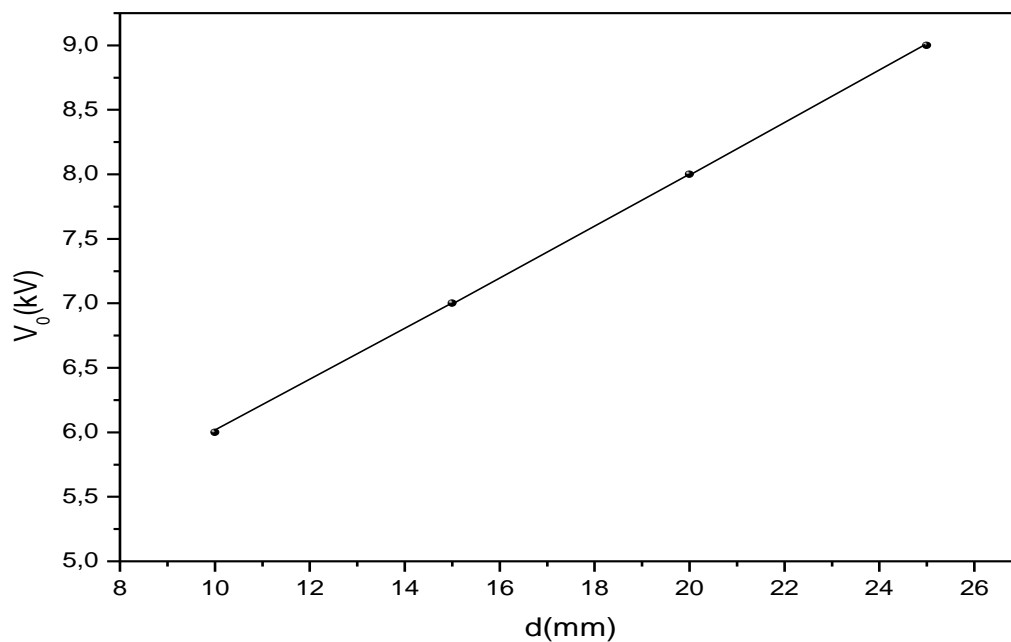


Figure IV.2 : Tension seuil d'apparition de l'effet couronne en polarité négative en fonction de la distance inter-électrodes (électrodes en aluminium).

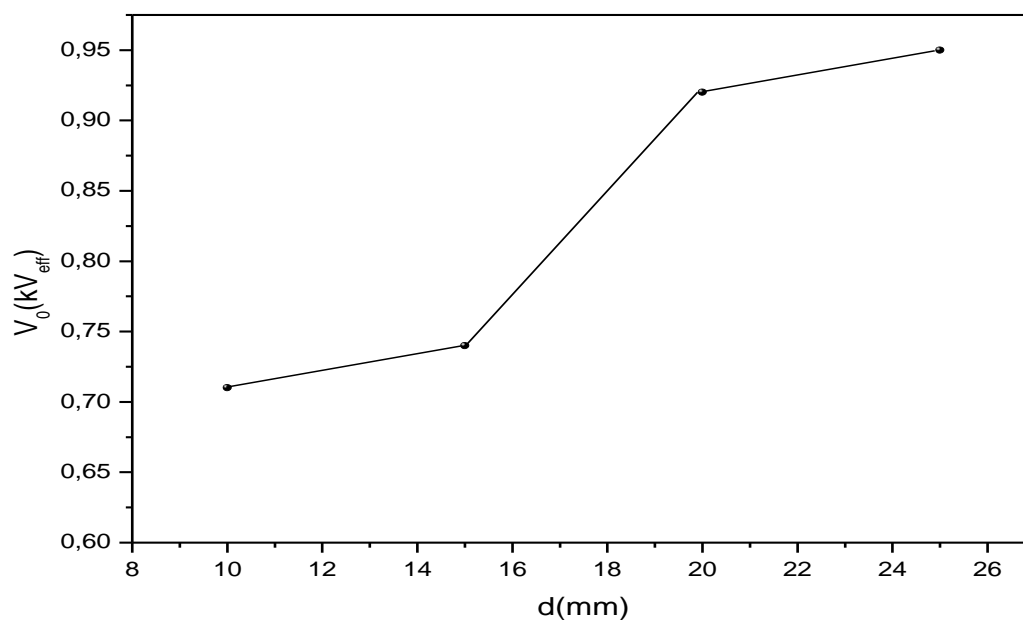


Figure IV.3 : Tension seuil d'apparition de l'effet couronne en tension alternative en fonction de la distance inter-électrodes (électrodes en aluminium).

Le seuil d'apparition de l'effet couronne apparait pour de faibles valeurs de la tension dans le cas de petite distance inter-électrodes, il croit avec la distance inter-électrodes.

IV.2.2.Effet de la tension appliquée : Les figures IV.4 et IV.5 montrent l'influence de la tension appliquée sur la décharge couronne.

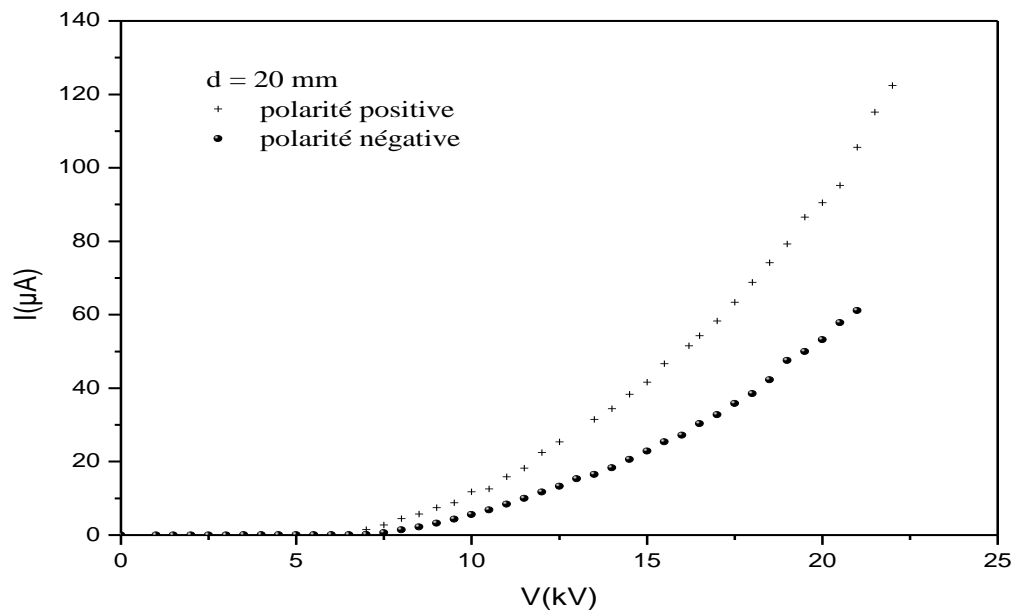


Figure IV.4 : Influence de la polarité en tension continue sur la décharge couronne.

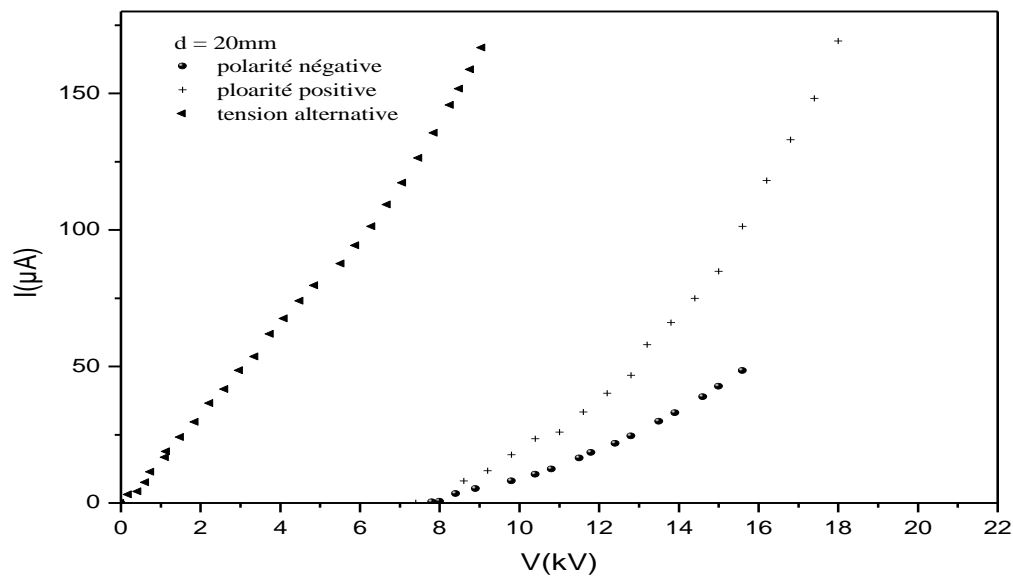


Figure IV.5 : Influence de la nature de la tension appliquée sur la décharge couronne.

De l'examen de ces deux courbes, il apparaît clairement que la tension appliquée alternative, continue (polarité positive et négative) influe sur la décharge couronne.

IV.2.3. Effet de la distance inter-électrodes sur la décharge couronne :

Les figures (IV.6), (IV.7) et (IV.8) montrent l'évolution du courant avec la tension appliquée pour des distances inter électrodes de 10, 15, 20 et 25mm, pour une pointe en aluminium et un plan en aluminium.

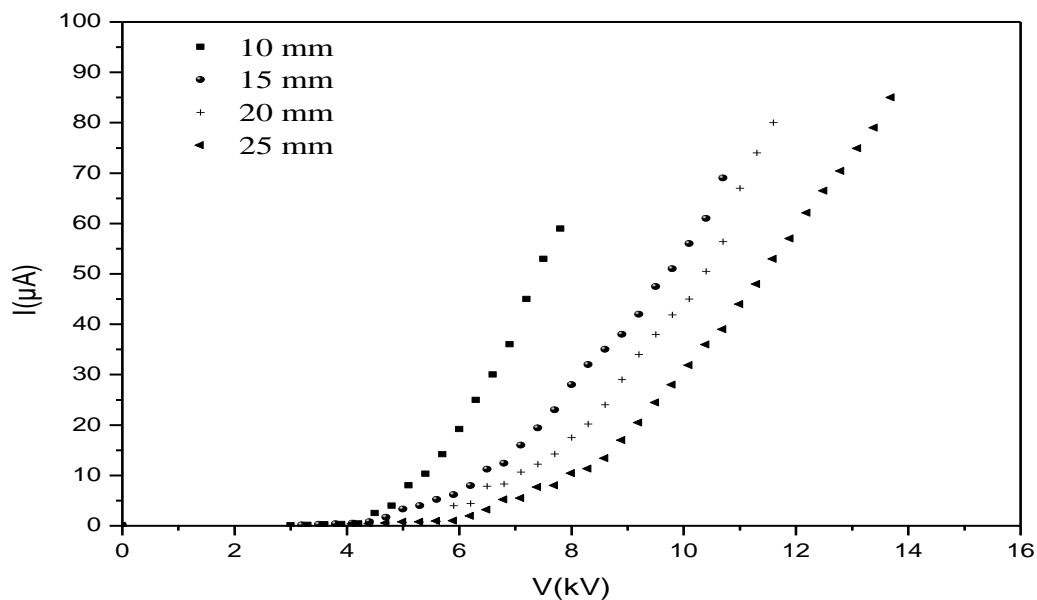


Figure IV.6 : Influence de la distance inter-électrodes en polarité positive de la pointe (électrodes en aluminium).

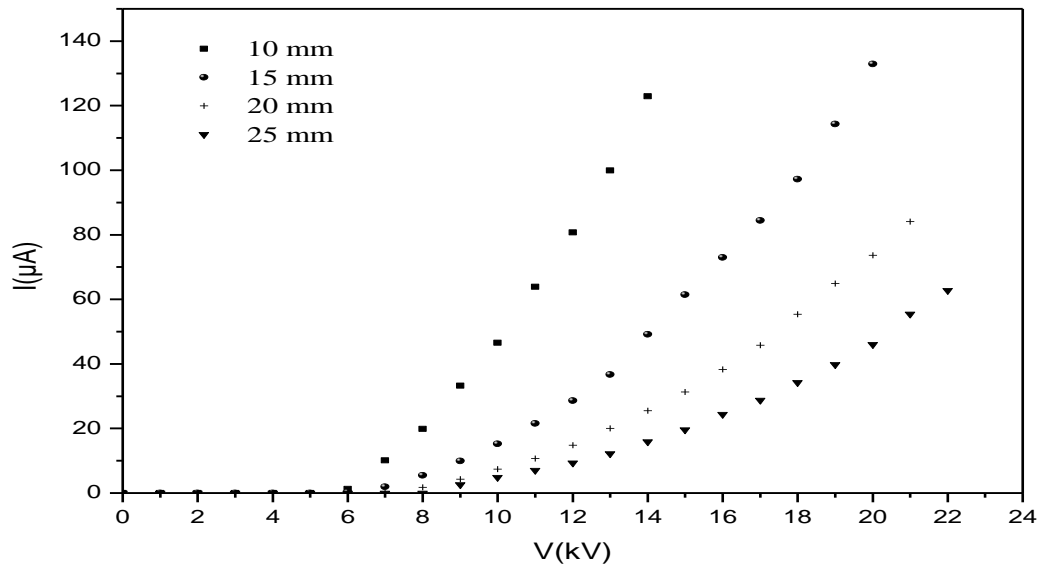


Figure IV.7 : Influence de la distance inter-électrodes en polarité négative de la pointe (électrodes en aluminium).

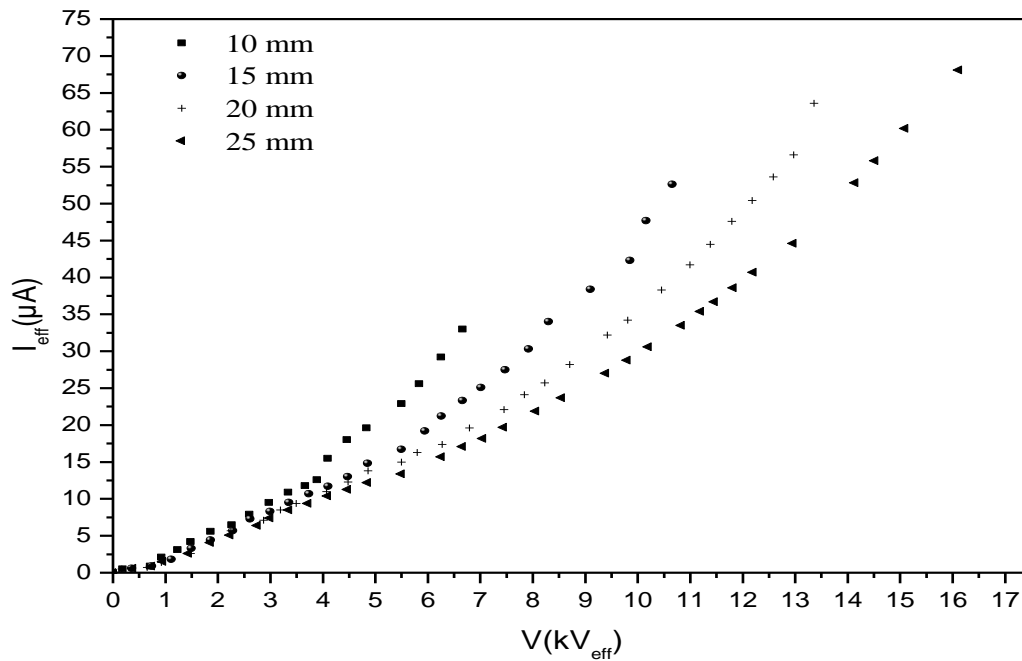


Figure IV.8 : Influence de la distance inter-électrodes en tension alternative (électrodes en aluminium).

D'après ces résultats, on voit clairement que l'allure des courbes est de type parabolique. On les examinant, on constate que le courant est plus important et croit rapidement avec la tension pour de faibles distances.

IV.2.4. Influence du matériau des électrodes en polarité positive :

IV.2.4.1 Influence du matériau de la pointe :

Pour un plan en acier et en aluminium, des pointes respectivement en aluminium, acier, cuivre ayant un rayon de courbure de $32\mu\text{m}$ et pour différentes distances inter-électrodes, nous avons regroupé les résultats sur les figures IV.9 et IV.10. On voit clairement que les courbes sont confondues, ce qui voudrait probablement signifier que le matériau de la pointe n'a pas d'influence sur la décharge couronne en polarité positive.

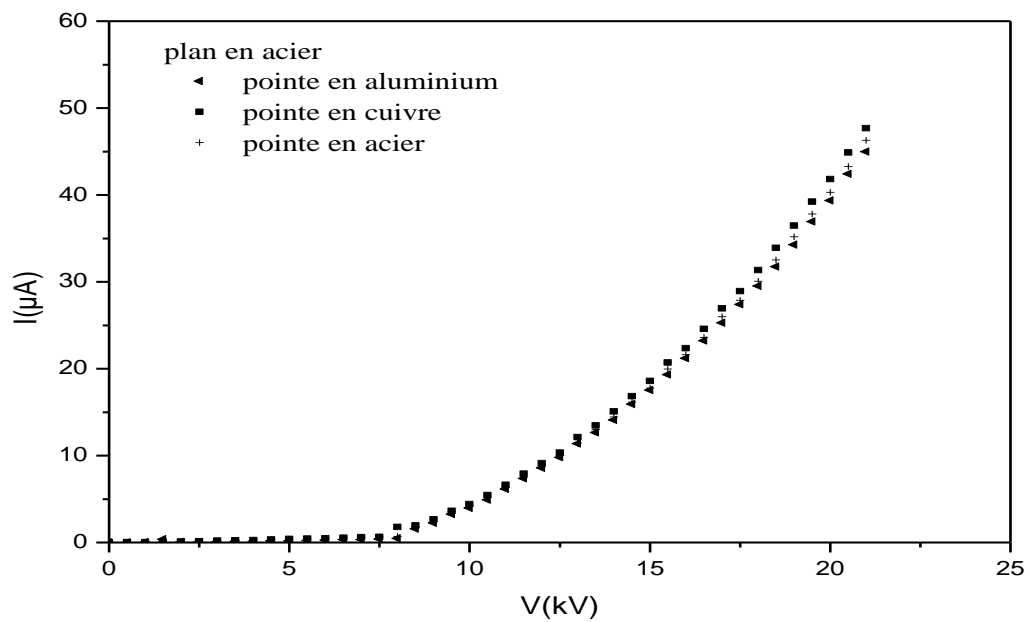


Figure IV.9 : Influence du matériau de la pointe en polarité positive ($d=20\text{mm}$).

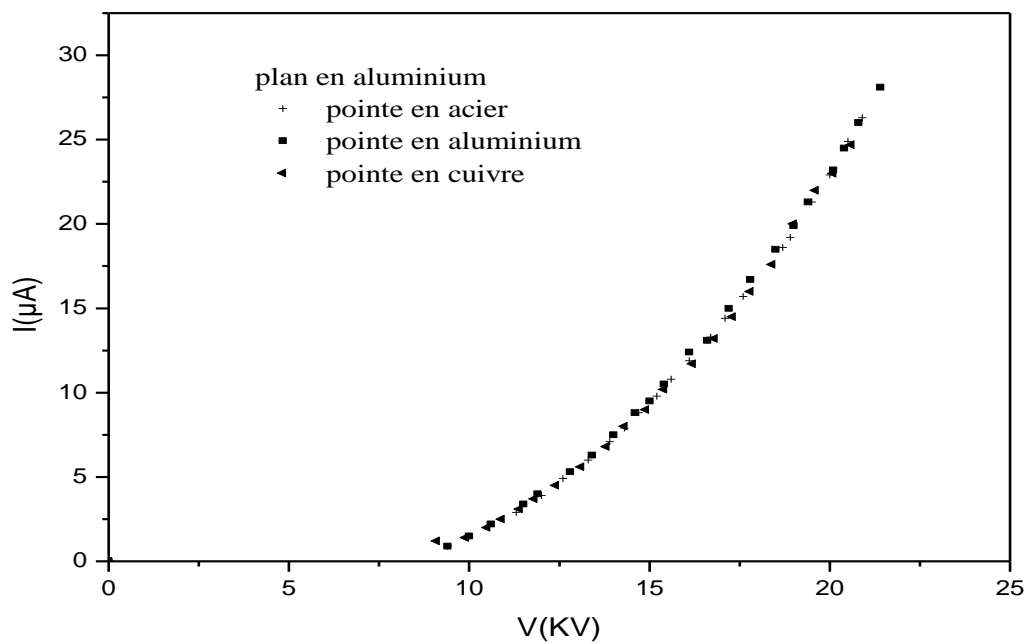


Figure IV.10 : Influence du matériau de la pointe en polarité positive ($d=25\text{mm}$).

IV.2.4.2. Influence du matériau de l'électrode plane :

Pour une pointe en aluminium et des plans respectivement en aluminium et en cuivre, nous avons choisi de représenter les résultats obtenus pour des distances inter-électrodes de 10 et 15 mm (figures IV.11 et IV.12).

Nous constatons que le courant est plus grand avec un plan en aluminium que pour un plan en cuivre. Cela pourrait trouver une explication peut être du fait que le plan jouant le rôle de cathode, les électrons sont plus facilement libérés par l'aluminium caractérisé par un travail de sortie (*Annexe II*) plus faible qui est de 4,28 eV contrairement à celui du cuivre qui est de 4,65eV

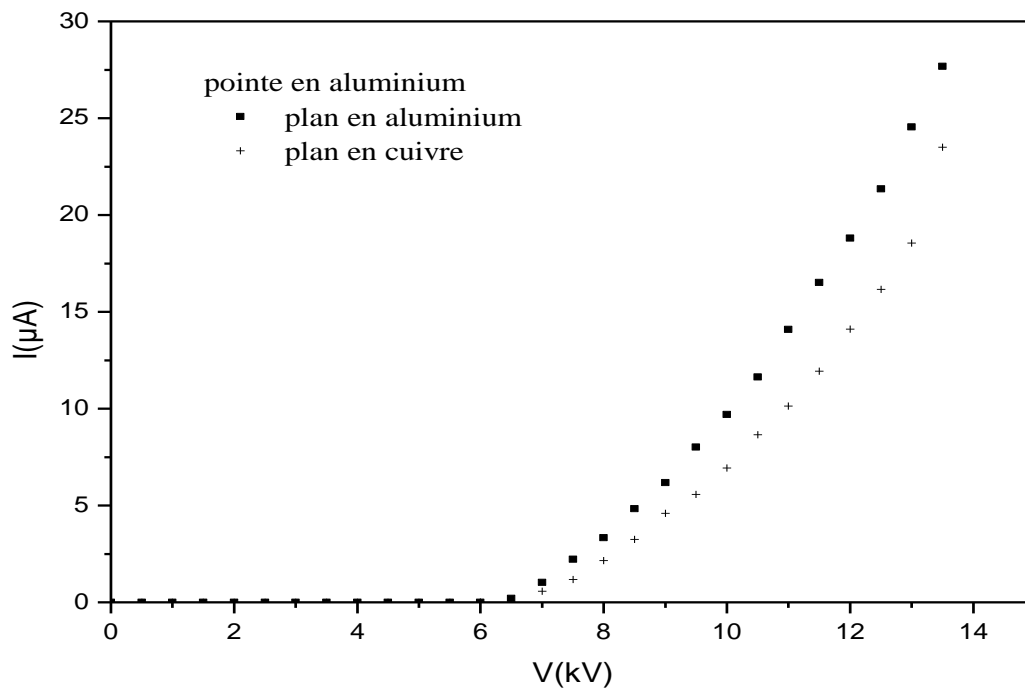


Figure IV.11 : Influence du matériau de l'électrode plane en polarité positive (15mm).

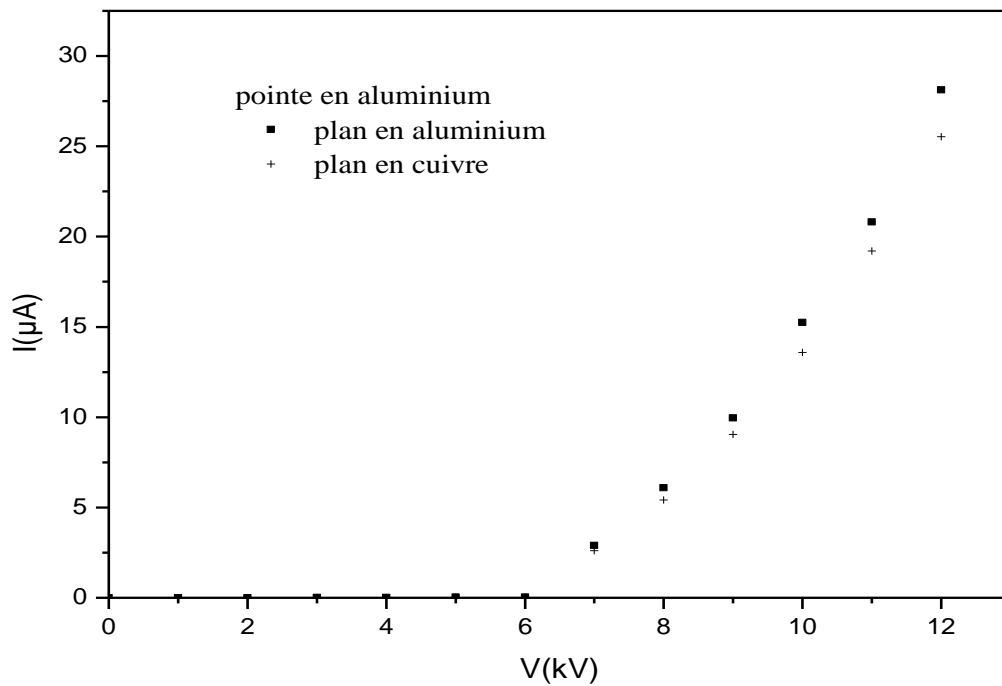


Figure IV.12 : Influence du matériau de l'électrode plane en polarité positive (10mm).

IV.5. Influence du matériau des électrodes en polarité négative :

Afin de voir et pouvoir constater si le matériau des électrodes a de l'influence sur la caractéristique I-V de décharge couronne, comme pour la polarité positive, nous avons fait une série d'essais.

IV.5.1. Influence du matériau de la pointe :

Dans ce cas de figure, nous changeons le matériau de la pointe. Nous avons pris le cas d'un plan en aluminium, des pointes en aluminium et cuivre. Les résultats sont consignés sur les figures IV.13 et IV.14.

Il ressort de l'examen de ces deux figures, qu'en plus de l'allure parabolique de la caractéristique I-V, l'intensité du courant est légèrement plus importante dans le cas de la pointe en aluminium.

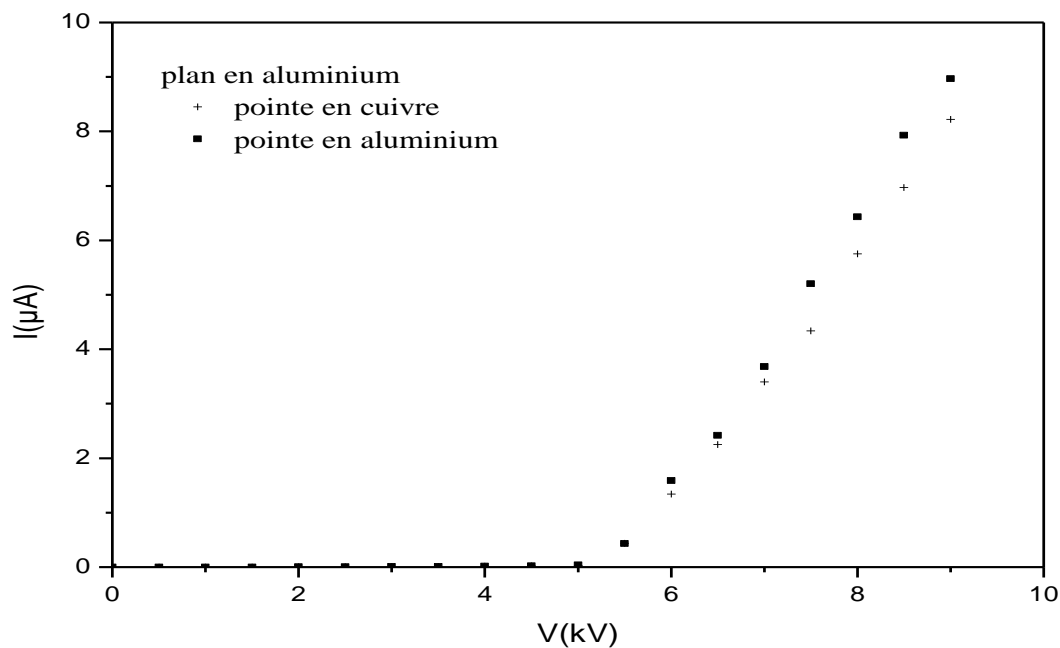


Figure IV.13: Influence du matériau de la pointe en polarité négative ($d=6\text{mm}$).

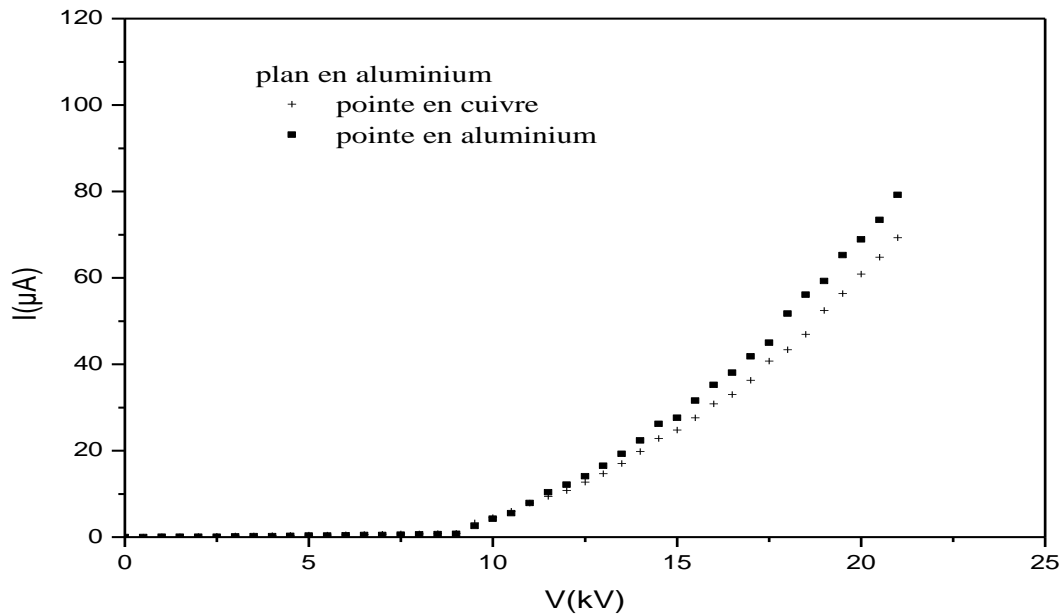


Figure IV.14 : Influence du matériau de la pointe en polarité négative ($d=20\text{mm}$).

IV.5.2. Influence du matériau de l'électrode plane:

Enfin, pour terminer la série d'essais sur l'influence du matériau des électrodes, nous avons tracé la caractéristique I-V pour savoir s'il y a une éventuelle influence du matériau de l'électrode plane sur la décharge couronne en polarité négative. Les résultats obtenus sont consignés sur les figures IV.15 et IV.16.

Il apparaît clairement que les courbes sont confondues, ce qui voudrait dire que le matériau du plan en polarité négative n'a pas d'influence sur la décharge couronne.

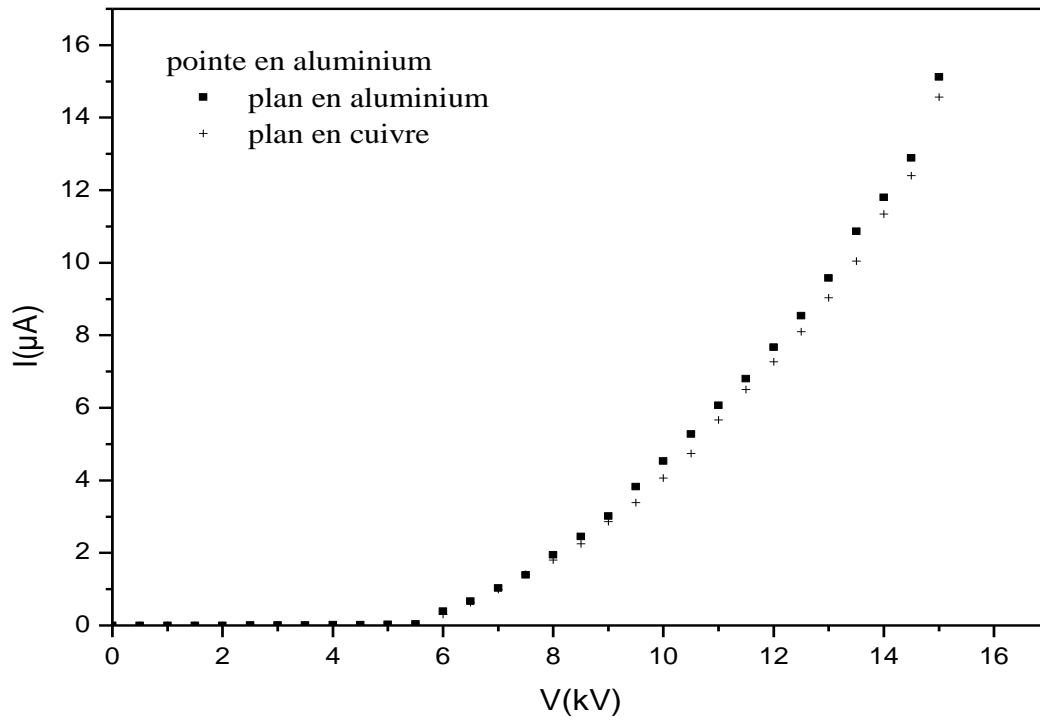


Figure IV.15 : Influence du matériau de l'électrode plane en polarité négative ($d=10\text{mm}$).

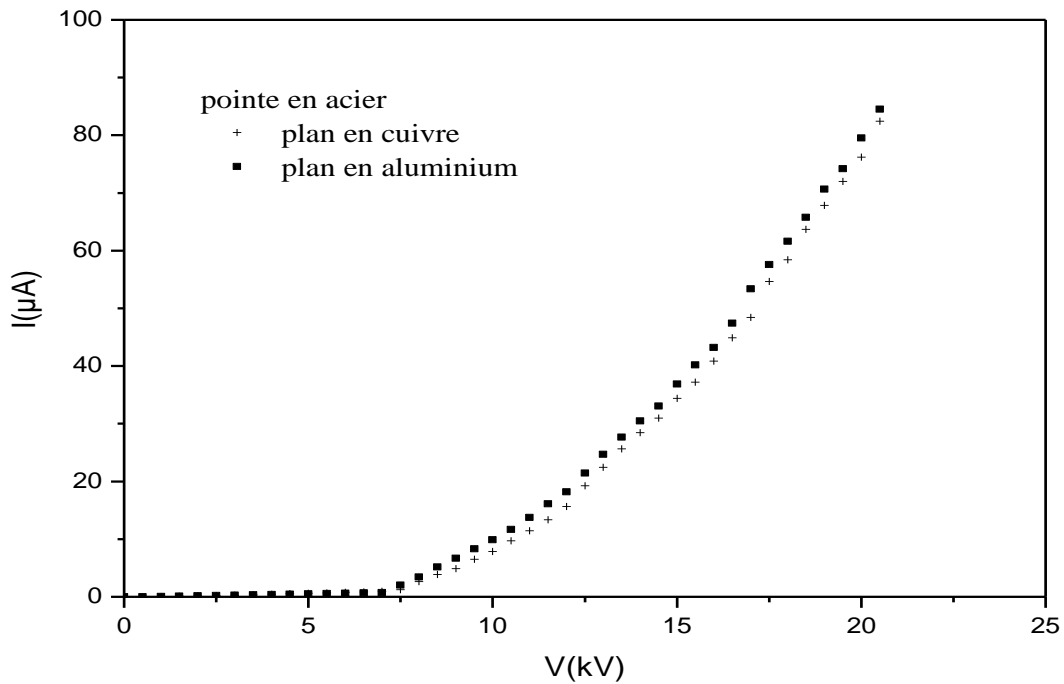


Figure IV.16 : Influence du matériau de l'électrode plane en polarité négative ($d=20\text{mm}$).

IV.6.Conclusion :

A la fin de ce chapitre, nous pouvons conclure, que le seuil d'apparition de l'effet couronne apparait pour de faibles valeurs de tension dans le cas de petites distances inter-électrodes et croît avec ces dernières, la nature de la tension appliquée y joue un rôle aussi. L'essentiel du travail étant consacré à l'influence du matériau des électrodes, nous avons vu qu'il y a un effet prononcé du matériau du plan en polarité positive alors qu'en polarité négative, l'effet est au niveau de la pointe.

Conclusion Générale

Ce travail a été réalisé dans les Laboratoires respectivement de matériaux d'Electrotechnique et de Haute Tension. Nous avons pu effectuer des travaux théorique et pratique sur la décharge couronne dans les gaz.

L'étude théorique s'est reposée sur les généralités concernant les décharges couronne comme les streamers en polarité positive, les impulsions de Trichel en polarité négative et la superposition des deux en tension alternative. Pour ce qui est de l'étude expérimentale, elle est faite en géométrie pointe-plan sous deux types de tension (continue et alternative).

Des résultats obtenus, nous avons pu confirmer l'influence de certains paramètres sur la décharge couronne, comme rapporté dans la littérature à savoir : la distance inter électrodes, la tension seuil ainsi que la nature de la tension appliquée. Pour ce qui est de l'effet du matériau des électrodes peu d'études ont été faites, nous avons pu confirmer que celui-ci a une influence sur la caractéristique I-V de la décharge couronne.

Nous pouvons résumer l'essentiel de notre étude comme suit :

- En polarité positive de la pointe, l'effet est au niveau de l'électrode plane,
- En polarité négative de la pointe, l'effet est au niveau de l'électrode de faible rayon de courbure, donc de la pointe.

En résumé, nous pourrions dire que l'effet du matériau sur la caractéristique I-V est localisé au niveau de *l'électrode passive*.

Ce travail nous a permis d'améliorer nos connaissances dans le domaine de la Haute tension et en particulier dans le cas des décharges couronne.

Annexes

Annexe I : Mécanisme moléculaire

1. Le libre parcours moyen (l.p.m) λ : est la distance moyenne parcourue par une particule d'un gaz sans subir de collisions.

Dans le cas d'une décharge gazeuse, le gaz consiste souvent en majorité de particules neutres avec une faible proportion d'ions et d'électrons. Les ions de masse et de dimensions analogues à celles des neutres, sont considérés comme étant de même type que ces derniers. Avec cette hypothèse, on peut écrire le l.p.m des électrons :

$$\lambda_e = \frac{4}{\pi n d^2} \quad n \text{ et } d \text{ se rapportant aux ions et aux neutres.}$$

2. Section efficace : le nombre de collisions subies par une particule par unité de longueur de son parcours est égal à l'inverse de son l.p.m.

$$Q = n \sigma \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \sigma = \pi d^2 & \text{pour une molécule, un atome ou un ion} \\ \sigma = \frac{\pi d^2}{4} & \text{pour un électron} \end{cases}$$

σ : est la section efficace de la particule

$Q = n \sigma$: est la section efficace totale par unité de volume

3. Longueur de Debye λ_D :

$$\lambda_D = \left(\frac{2\varepsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Avec :

ε_0 : la permittivité du vide ($8,84 \times 10^{-12}$ F/m)

e : la charge élémentaire d'un électron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

T_e : température électronique

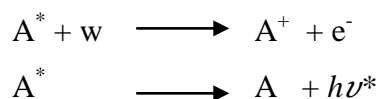
k_B : constante de Boltzman

$k_B T_e$: l'énergie électronique ($1 k_B T_e \approx 1,4 \times 10^4$ K)

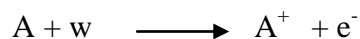
4. Excitation : Sous l'effet d'un choc, un électron peut passer de la première orbite (état fondamental) à une orbite supérieure (état excité) qui nécessite un apport d'énergie w de la particule incidente (électron ou photon). L'énergie minimale E_{ex} nécessaire pour exciter l'atome (ou la molécule) est appelée *seuil d'excitation*.



L'atome excité peut soit, retomber dans l'état fondamental en libérant certaine énergie sous forme de rayonnement soit être ionisé sous l'effet d'un choc porteur d'une énergie supplémentaire.

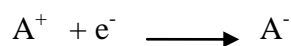


5. Ionisation : L'atome peut libérer complètement un électron de la couche externe sous l'effet d'un choc. La réaction d'ionisation de l'électron est de la forme :

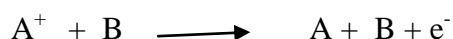


L'énergie minimale nécessaire pour cette réaction, notée E_i est appelée *seuil d'ionisation*.

6. Attachement : Lors d'une collision entre un électron peu énergétique et un atome, ce dernier peut capter l'électron. La réaction est de la forme :



7. Détachement : Des collisions entre particules et ions négatifs peuvent faire perdre à ces derniers leur électron.



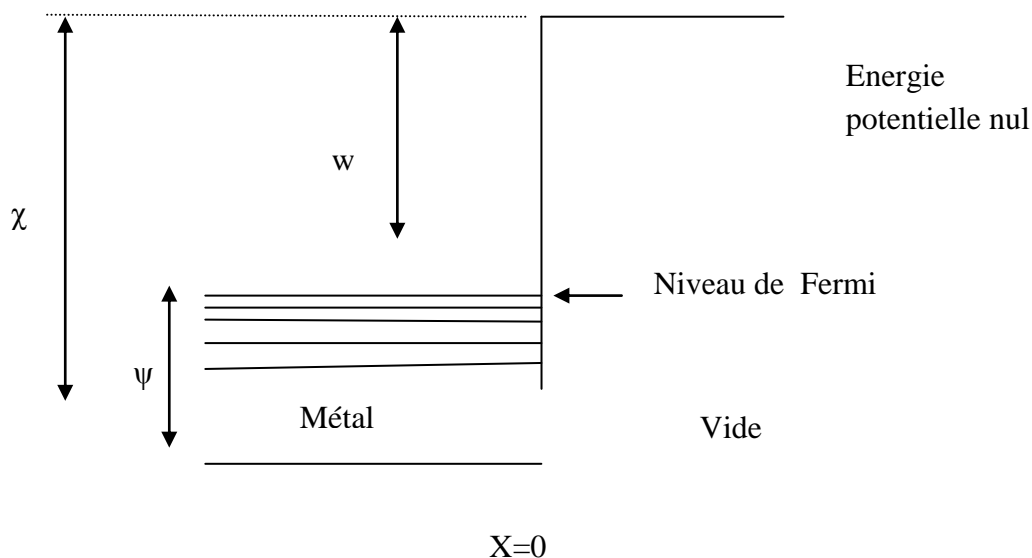
8. Mobilité : Un électron de charge e et de masse m dans un champ électrique E est soumis à une force $e\vec{E}$ et une accélération $e\vec{E}/m$ dans le sens opposé à E . Entre deux collisions, il acquiert une énergie cinétique qui dépend de E et de l.p.m. Si l'électron subit plusieurs collisions, un état est atteint où l'énergie perdue lors d'une collision est exactement égale à celle gagnée entre deux collisions. L'énergie cinétique moyenne est alors constante ainsi que les vitesses moyennes le long du champ aussi. Cette vitesse est appelée *vitesse de dérive* de l'électron.

La vitesse de dérive \vec{V}_e est parallèle et de sens contraire, au champ électrique \vec{E} appliqué. Le coefficient de proportionnalité μ_e est *la mobilité* des électrons.

$$\vec{v}_e = \mu_e \vec{E}$$

Annexe II : Processus lies aux électrodes

Les électrons du métal de l'électrode ont une énergie potentielle qui diffère de celle d'un électron externe d'une valeur maximale χ . Si ces électrons acquièrent une énergie suffisante pour surmonter la barrière de potentiel à la surface du métal, ils sont alors libérés et peuvent participer à la décharge. Dans certains cas, cette barrière peut être abaissée et les électrons peuvent y pénétrer et s'en échapper à cause de leurs propriétés ondulatoires [12].



Les électrons du métal possèdent des énergies cinétiques internes ou au maximum égales à ψ (statistiques de Fermi-Dirac). Le surcroît d'énergie à fournir aux électrons de niveau le plus élevé (niveau de Fermi-Dirac) est égale à : $w=\chi-\psi$.

W est appelé *travail de sortie* (ou d'extraction) du métal et le tableau suivant représente les travaux de sortie pour quelques matériaux

| Métaux | Travail de sortie en (eV) |
|--------|---------------------------|
| Au | 5,4 |
| Cu | 4,65 |
| Fe | 4,50 |
| Al | 4,28 |
| Ag | 4,26 |

Tableau A.II.1 : Travaux de sortie des électrons de certains métaux constitutifs électrodes [12]

1. Emission photoélectrique :

L'émission électronique peut être favorisée par une irradiation U.V. cette dernière fournit une certaine énergie aux électrons sous forme quanta de valeur $h\nu$ (h étant la constante de Planck et ν la fréquence de rayonnement). Si $h\nu$ est supérieure ou égale au travail de sortie w , un électron peut être extrait du métal. Il en sort avec une énergie $E_1 = h\nu - w$.

2. Emission thermo-ionique :

Une émission d'électrons peut être causée par l'augmentation de la température de l'électrode. La formule de Richardson et Nordheim, lie la densité de courant injecté à la température absolue :

$$J = A(1-r)T^2 \exp(-w/kT)$$

Avec :

T : température absolue

k : constante de Boltzman

A : constante

r : probabilité que des électrons suffisamment énergétiques pour traverser la barrière de potentiel soient réfléchis vers le métal.

3. Effet Schottky :

Si le champ électrique est intense, alors le travail de sortie peut être réduit et il devient :

$$w' = w - e^{3/2} \sqrt{E}$$

e : étant la charge de l'électron

4. Emission par effet de champ :

Grâce à les propriétés ondulatoire des électrons peuvent traverse la barrière de potentiel sans la surmonter et c'est ce qu'on appel *l'effet tunnel*.

5. Impact d'ions positifs :

Quand l'impact a lieu L'ion positif peut avoir plusieurs possibilités :

- Peut être réfléchi mais repart avec une énergie plus faible en gardant son caractère d'ion,

- neutraliser (réfléchi comme un atome, excité ou non),
- endommager la surface de l'électrode (les atomes du métal peuvent être éjectés de la surface, à la suite de cet impact),
- finalement éjecter les électrons (l'électrode au point d'impact peut être chauffée intensément et localement si l'ion incident est très énergétique).

Ainsi se dernier favorise une émission thermo-ionique.

Références bibliographiques

- [1] M. Mekious, « *Influence du matériau d'électrode sur une décharge couronne* », Mémoire de Magister de l'UMMTO, 2001.
- [2] D. Guillaume et F. Benoît, « *Décharge couronne : Application et modélisation* », Rapport de stage de l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 2005.
- [3] 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 marqués par un isotrope* », Thèse de Doctorat de l'université Paris VI, 2002.
- [4] N. Dubus, « *Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique* », Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers 2009.
- [5] 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, 2011.
- [6] M. Hamel, « *Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne* », Mémoire Maîtrise de l'université du Québec, 1991.
- [7] 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.
- [8] M. Abdelmalek, « *Etude de l'effet de l'humidité sur les propriétés électriques de la surface d'un polymère* », Mémoire de Magister de l'université de Constantine,
- [9] J. Jolibois, « *Etude et développement d'un actionneur plasma a décharge a barrière diélectrique-application au contrôle d'écoulement sur profil d'aile* », Thèse de Doctorat de l'université de Poitiers, 2006.

[10] A. Abahazem, « *Etude expérimentale des décharges couronne pour la dépollution des gaz* », Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2009.

[11] A. Sublet, « *Caractérisation de décharges à barrières diélectriques atmosphériques et sub-atmosphériques et application à la déposition de Couches d'oxyde de silicium* », Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2007.

[12] E. Belhiteche, « *Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électrique de surface* », Mémoire de Magister de l'UMMTO, 2012.

[13] J.C.M Vélez, « *Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharges couronne et de son interaction avec l'aérodynamique* », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2006.

[14] R.D. Medina, « *Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement* », Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2008.