

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Machines électriques**

Présenté par

Mokhtar AIT SAI
Ferroudja ACHERIR

Thème

Contribution à l'étude et à la réalisation d'un actionneur plasma

Mémoire soutenu publiquement le 28 Septembre 2015 devant le jury composé de :

M Salah HADDAD

Professeur, UMMTO, President

M M'hand MEKIOUS

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Rapporteur

M Mohammed MEGHERBI

Professeur, UMMTO, Examineur

Mme Ferroudja BITAM-MEGHERBI

Professeur, UMMTO, Examinatrice

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire Haute Tension Département d'Electrotechnique à l'Université Mouloud MAMMERRI de Tizi-Ouzou sous la Direction de M. MEKIOUS, qu'il trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance pour sa confiance, sa disponibilité, sa patience et son aide précieuse tout le long de ce travail.

Nos plus vifs remerciements vont à Monsieur S.HADDAD, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri, qui a contribué à notre formation. Qu'il soit une fois de plus remercié pour avoir accepté d'être président du Jury.

Nous tenons à remercier Monsieur M.MEGHERBI, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri pour sa contribution à notre formation, son intérêt à ce travail et d'avoir accepté de faire partie du jury.

Nous adressons nos sincères remerciements à Mme F.BITAM-MEGHERBI, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri pour d'une part, sa contribution à notre formation et d'autre part, l'honneur qu'elle nous fait en acceptant d'être membre du jury

Nos remerciements vont également à ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'aboutissement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents pour leur amour, le courage et
la volonté qu'ils m'ont inculqué,

A ma chère sœur Ouardia,

A mes très chers frères Hocine et Ahcène,

A toute la famille « ACHERIR, ACHIR et MAKHLOUF »
chacun a son nom surtout, ma petite Darine,

A mes cousines et cousins,

A mon binôme et sa famille,

Tous mes ami(e)s qui ont contribué à la réalisation de
ce modeste travail,

A ceux qui pensent à moi de près ou de loin

A tous mes camarades de la promotion
d'électrotechnique 2015

Ferroudja

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Notions générales sur les décharges dans les gaz.	
I.1. Introduction	3
I.2. Electrons primaires.....	3
I.3. Ionisation, recombinaison et attachement électronique.....	4
I.4. Mécanismes de formation des décharges électriques.....	4
a. Décharge non autonome	5
b. Entretien de la décharge et avalanche électronique.....	5
c. Décharge sombre de Townsend et décharge luminescente.....	6
e. Régime d'arc.....	6
I.5. Mécanismes de claquage de Townsend.....	6
I.5.1 Limite de la théorie de Townsend.....	9
I.5.2 Loi de Paschen.....	9
I.6. Mécanisme de claquage type streamer.....	11
I.6.1 Critère de Meek.....	13
I.6.2 Critère de Reather.....	14
I.7. Conclusion.....	14
Chapitre II : Physique des plasmas et décharges couronne.	
II.1. Introduction	15
II.2. Définition.....	15
II.3. Paramètres physiques d'un plasma.....	15
II.4 Classification des plasmas.....	16
II.5. Les décharges couronne.....	17
II.5.1. Principe et géométrie de la décharge.....	17
II.5.2. Différentes configurations.....	18
II.5.3. Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne.....	19

II.5.3.1. Cas d'une pointe positive.....	19
II.5.3.2. Cas d'une pointe négative.....	20
II.5.4. Décharge couronne en régime alternatif.....	21
II.6. Applications des décharges couronne.....	22
II.6.1. Traitement de surface.....	22
II.6.2. Générateur d'ozone.....	23
II.6.3. Elimination de l'électricité statique.....	23
II.6.4. Contrôle actif d'un écoulement.....	23
II.7. Conclusion.....	23
Chapitre III : Décharge à barrière diélectrique	
III.1. Introduction.....	24
III.2. Définition et caractéristique d'une décharge à barrière diélectrique.....	24
III.3. Différentes configurations de la décharge à barrière diélectrique.....	25
III.4. Principe de la décharge à barrière diélectrique.....	26
III.5. Les différents régimes de décharge à barrière diélectrique.....	27
III.5.1. Décharge à barrière diélectrique volumique.....	28
III.5.1.1. Décharge filamentaire.....	28
III.5.1.2. Décharge homogène.....	29
III.6. Régime de décharge à barrière diélectrique surfacique.....	29
III.7. Applications industrielles de décharge à barrière diélectrique.....	30
III.8. Conclusion.....	30
Chapitre IV : Résultats expérimentaux et commentaires	
IV.1. Introduction.....	31
IV.2 Caractérisation des actionneurs réalisés.....	31
IV.2.1 Matériau des électrodes.....	31
IV.2.2 Matériau du diélectrique.....	32
IV.2.3 Propriétés du Poly méthacrylate de méthyle (PMMA).....	32

IV.3. Les différents types d'actionneurs plasmas surfaciques.....	33
IV.3.1. L'actionneur à décharge couronne.....	33
IV.3.2. Caractérisation de l'actionneur décharge couronne de surface.....	33
IV.3.3. Observations et commentaires sur l'actionneur DC de surface.....	35
IV.4. L'actionneur à décharge à barrière diélectrique.....	38
IV.4.1. Description de l'actionneur DBD de surface.....	38
IV.5. Conclusion.....	40
Conclusion générale.....	41

LISTE DES FIGURES

N°		Page
Chapitre I : Notions générales sur les décharges dans les gaz		
Figure (I.1)	Régime de décharge en courant continu	5
Figure (I.2)	Schéma de l'avalanche électronique	7
Figure (I.3)	Schéma de claquage de type Townsend	8
Figure (I.4)	Courbe de Paschen pour l'air	10
Figure (I.5)	Mécanisme de type streamer avalanche primaire : création d'une charge d'espace	11
Figure (I.6)	Avalanche secondaire créées par photo-ionisation dans le cas d'un streamer positif	12
Figure (I.7)	Avalanche secondaire créées par photo-ionisation dans le cas d'un streamer négatif	13
Chapitre II : Physique des plasmas et décharges couronne		
Figure(II.1)	Différentiation des plasmas par l'énergie électronique KT_e , la densité électronique n_e et la longueur de Debye λ_d	16
Figure(II.2)	Caractéristique courant-tension d'une décharge alimentée par une tension continue dans l'air et à pression atmosphérique	18
Figure(II.3)	Les systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production de décharge couronne	18
Figure(II.4)	Description de la décharge couronne positive	19
Figure(II.5)	Description de la décharge couronne négative	20
Figure(II.6)	Différent composantes du courant en alternatif en géométrie pointe-plan a la pression atmosphérique	21
Chapitre III : Décharge à barrière diélectrique		
Figure(III .1)	Différents types de configuration de barrière diélectrique	25
Figure(III.2)	Exemple de configuration de décharge a barrière diélectrique avec (a) deux diélectriques solides (b) son schéma électrique équivalent	26
Figure(III.3)	Schéma de la configuration de la décharge à barrière diélectrique volumique	27
Figure(III.4)	Schéma de la configuration de la décharge à barrière diélectrique surfacique	28
Figure(III.5)	Schéma de la décharge surfacique	30
Chapitre IV : Résultat expérimentaux et commentaires		
Figure(IV.1)	Aspect de l'électrode haute-tension de cuivre après quelque minute d'utilisation en régime de décharge	31
Figure(IV.2)	Schéma de principe de l'actionneur plasma à décharge couronne	34
Figure(IV.3)	Photographie d'un actionneur plasma : $\phi_1=0.61\text{mm}$, $\phi_2=1.36\text{mm}$, $d=5\text{cm}$	35
Figure(IV.4)	Photographie d'un actionneur plasma : $\phi_1=0.61\text{mm}$, $\phi_2=1.36\text{mm}$, $d=5\text{cm}$ en régime filamentaire	36
Figure(IV.5)	Photographie de l'actionneur 5: $\phi_1=0.36\text{mm}$, $\phi_2=1.77\text{mm}$, $d=4\text{cm}$	37
Figure(IV.6)	Photographie en régime décharge homogène de l'actionneur 5: $\phi_1=0.36\text{mm}$, $\phi_2=1.77\text{mm}$, $d=4\text{cm}$	37
Figure(IV.7)	Photographie en régime décharge homogène de l'actionneur 6: $\phi_1=0.36\text{mm}$, $\phi_2=1.36\text{mm}$, $d=4\text{cm}$	37

N°		Page
Figure(IV.8)	Configuration géométrique des électrodes par Roth pour établir l'OAUGDP	39
Figure(IV.9)	Photographie de l'actionneur OAUGDP: $\phi_1=0.36\text{mm}$, $\phi_2=1.36\text{mm}$, $d=4\text{cm}$	39
Figure(IV.10)	Photographie en régime décharge homogène de l'actionneur: $\phi_1=0.36\text{mm}$, $\phi_2=1.36\text{mm}$, $d=4\text{cm}$	40

Introduction générale

Introduction générale

Dans les conditions usuelles, le milieu gazeux ne permet pas la conduction de l'électricité. Soumis à un champ électrique faible, un gaz pur est un isolant parfait. Le caractère d'isolement électrique tient au fait qu'un gaz ne contient pas suffisamment de particules chargées libres (électrons ou ions positifs) qui puissent assurer la conduction. Les gaz sont de bons isolants en ce qui concerne l'empêchement du claquage électrique entre autres dans les circuits de haute tension et dans les lignes de transmission.

Des électrons libres et des ions positifs ou négatifs peuvent apparaître si l'on soumet le gaz à un champ électrique de forte intensité ou à des températures suffisamment élevées, si on le soumet à un bombardement de particules ou encore s'il est soumis à un champ électromagnétique très intense.

Lorsque l'ionisation est assez importante, le gaz devient un plasma, qui est un fluide très conducteur. L'appellation plasma devrait être réservée aux gaz complètement ionisés et globalement neutres. Cela conduit à une grande diversité de situations physiques, puisqu'un grand nombre de plasmas de laboratoire sont hors équilibre thermodynamique, l'ionisation résultant des collisions entre électrons et neutres (les électrons accélérés par un champ électrique extérieur, ont alors une température élevée par rapport à celle des neutres).

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

L'objectif principal de ce mémoire est de mettre en œuvre des actionneurs plasmas. Il s'agit plus principalement de plasmas froids dits plasmas non thermiques. Ce type de plasma est actuellement de plus en plus développé et étudié car les applications sont toutes aussi nombreuses que variées. Parmi, ces applications on peut par exemple citer l'étude sur les écrans plasmas, le traitement de surfaces, etc....

. Dans notre cas, il s'agit de développer un actionneur plasma. Ce dernier est établi dans l'air à pression atmosphérique entre deux électrodes posées à la surface d'un diélectrique. Pour y arriver, deux types de décharges électriques ont été étudiées : la décharge couronne et la décharge à barrière diélectrique.

Le travail rapporté dans ce mémoire est réparti comme suit :

Un premier chapitre est consacré à des notions générales sur les décharges électriques dans les gaz qui sont interprétées sur la base de deux modèles : les décharges Townsend et les décharges de type streamer.

L'objectif du second chapitre est une présentation générale des plasmas et décharges couronne.

Le troisième chapitre quant à lui est réservé à l'étude de la décharge à barrière diélectrique (BDB), ainsi qu'aux différentes configurations de cette décharge.

Dans le quatrième chapitre, nous exposons deux modèles d'actionneurs réalisés au laboratoire. L'objectif est de modifier ou adapter la configuration originale de chacune de ces décharges électriques.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

Notions générales sur les décharges dans les gaz

I.1. Introduction

Les gaz constituent un des éléments de base de l'isolation à haute tension des matériels électriques. L'air est le gaz le plus utilisé, d'une part pour ses bonnes qualités isolantes, et d'autre part, pour sa disponibilité en quantité et gratuitement.

En pratique, un isolant n'est jamais parfait, car il contient toujours un certain nombre de charge libres à cause des rayonnements cosmique et 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 apparait. 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* [1], c'est ce que nous allons essayer d'expliquer dans ce premier chapitre.

Les décharges électriques présentent plusieurs régimes différents les uns des autres. Elles sont influencées par beaucoup de paramètres comme la nature de gaz, sa pression et sa température, l'uniformité du champ appliqué, etc... dans la classification des décharges fondée sur les caractéristiques courant-tension, on y distingue les décharges luminescentes à basse pression et les décharges couronne à basse et haute pression.

Dans tous les cas, les décharges sont interprétées sur la base de deux modèles [2] :
Le premier modèle concerne des décharges à long rayon d'action faisant intervenir l'intervalle de décharge tout entier : *c'est la décharge de Townsend*.
Le second modèle, mis au point pour expliquer la rapidité des phénomènes concerne les décharges à court rayon d'action : *c'est la décharge par streamers*.

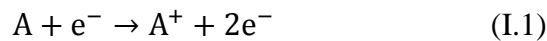
I.2. Électrons primaires

Il est tout à fait bien connu qu'aucune décharge électrique ne peut s'initier dans l'air sans la présence d'au moins un électron dans le volume de gaz couvrant l'espace inter-électrodes. Ces électrons, présents au tout début de la décharge sont communément appelés électrons *germes* ou encore électrons primaires. Ils permettent d'initier la première avalanche électronique sans laquelle aucun type de décharge ne peut prendre forme encore moins se maintenir. Ils peuvent être produits par radiation cosmique, par les sources naturelles d'ionisation, par les charges résiduelles issues des décharges précédentes ou encore par détachement des ions négatifs par effet de champ [3].

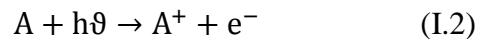
I.3. Ionisation, recombinaison et attachement électronique

L'existence d'une décharge électrique résulte du passage d'un courant dans le diélectrique gazeux et donc de la possibilité de créer des particules chargées, essentiellement des électrons ; à partir des atomes ou molécules neutres du gaz [4]. Les principaux mécanismes régissant la génération des porteurs de charge dans les gaz sont: les mécanismes d'ionisation, tendant à augmenter leur densité et les mécanismes de recombinaison et d'attachement, tendant à les réduire.

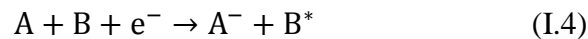
Le procédé principal d'ionisation résulte des impacts d'énergie élevée entre les électrons et les atomes.



Lorsqu'un atome (ou une molécule) a absorbé suffisamment d'énergie pour qu'un de ces électrons s'échappe à l'infinie, on dit que cet atome (ou cette molécule) a été ionisé, son énergie interne s'est accrue de l'énergie d'ionisation.

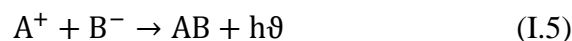


L'attachement électronique est d'autant plus important que la molécule présente une plus grande affinité électronique. Le processus d'attachement des électrons est le suivant :



La recombinaison a été beaucoup moins étudiée que son processus inverse, l'ionisation.

Cependant elle reste d'une importance fondamentale pour la bonne compréhension des mécanismes de développement de la décharge et tout particulièrement pour ceux de sa phase d'extinction [5]. La recombinaison est la neutralisation d'un ion positif par capture d'un électron ou d'ion négatif suivant le schéma ci-dessous.



I.4. Mécanismes de formation des décharges électriques

Nous allons présenter ici les différents régimes de formation et d'entretien d'une décharge électrique entre deux électrodes.

La Figure I.1 présente la caractéristique tension-courant de cette décharge électrique. Nous pouvons y voir plusieurs régimes de décharge.

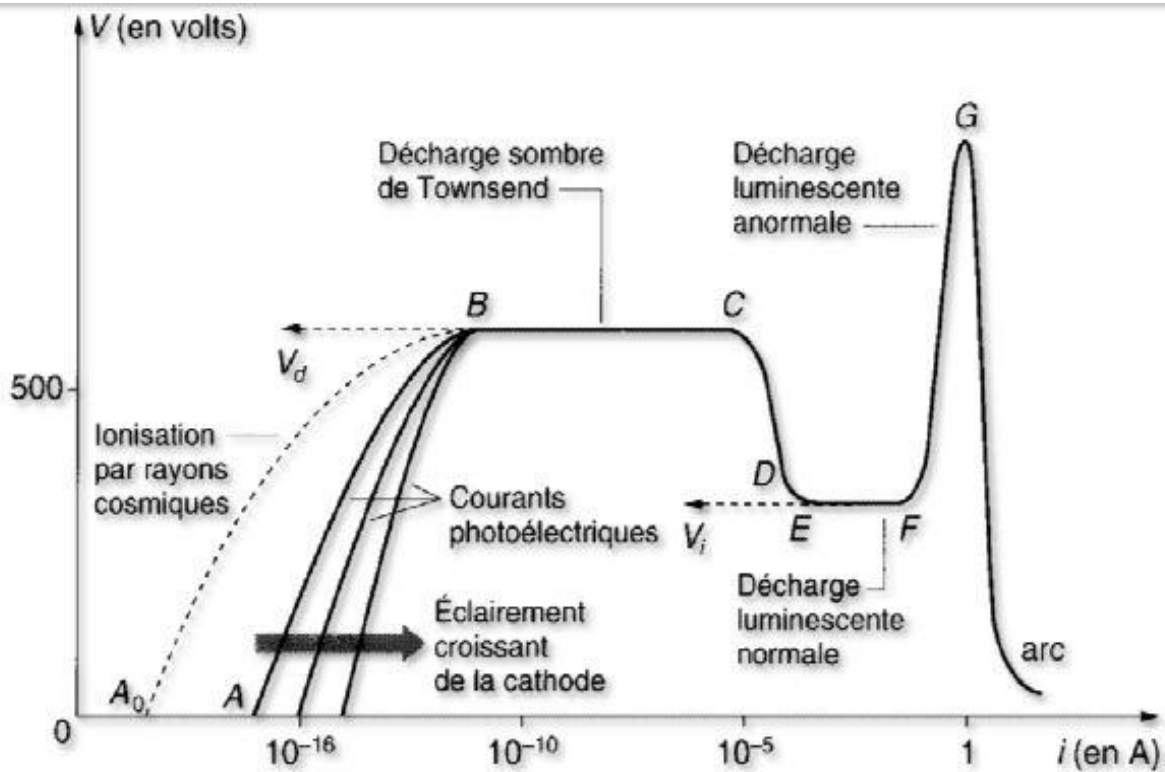


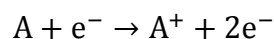
Figure I.1 : Régimes de décharge en courant continu.

a- Décharge non autonome :

Pour les faibles valeurs de courant, la décharge ne se produit que s'il existe une source extérieure émettant des charges. A ce stade, la présence d'ions s'explique essentiellement par la radioactivité naturelle ou le rayonnement cosmique. Si la cathode est isolée de tout rayonnement électromagnétique alors la décharge est interrompue, celle-ci ne s'entretient pas d'elle-même, elle est dite non-autonome.

b- Entretien de la décharge et avalanche électronique :

Lorsque la tension atteint une valeur seuil V_d , le champ est assez intense pour qu'un électron acquiert suffisamment d'énergie cinétique et ionise une particule environnante selon la formule suivante :



Les deux électrons ainsi libérés peuvent à leur tour ioniser des molécules environnantes en initiant une réaction d'ionisation en chaîne que l'on nomme avalanche électronique. Il en résulte une multiplication du nombre d'électrons mais celle-ci n'est pas suffisante pour que la décharge soit auto-entretenu. A ce stade, une source d'ionisation secondaire est nécessaire, on parle de régime de Townsend non entretenu.

c- Décharge sombre de Townsend et décharge luminescente :

Dans la zone de potentiel constant (BC) de la figure I.1, les densités électroniques restent faibles et les phénomènes de charge d'espace sont négligeables. La décharge est donc très faiblement lumineuse, elle est appelée *décharge sombre de Townsend*. Si l'augmentation du courant se poursuit, une chute de potentiel est alors observée pour atteindre un palier (EF). Le tube devient lumineux mais l'illumination n'est pas homogène à cause des phénomènes de charge d'espace. Cette zone correspond à une décharge nommée *luminescente normale*. Puis si l'intensité croît d'avantage, on entre dans la région (FG) où toute la surface de la cathode est utilisée pour la décharge. Cette décharge dite *luminescente anormale* est caractérisée par une augmentation rapide du potentiel.

e- Régime d'arc :

Ce dernier régime, appelé aussi régime disruptif, est caractérisé par un courant de décharge conséquent. De ce fait, toute l'énergie passe par un canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. Il s'en suit des effets thermiques importants, aussi bien dans le gaz que sur les électrodes. Les arcs électriques peuvent être naturels, comme la foudre, ou générés de façon industrielle pour la soudure à l'arc par exemple [6].

I.5. Mécanisme de claquage de Townsend

Dans le cas d'une décharge électrique, un gaz compris entre deux électrodes est soumis à un champ électrique, les électrons primaires contenus dans le gaz vont être accélérés en migrant jusqu'à l'anode. Lors de cette migration, ils vont réaliser des collisions ionisantes ou non avec les atomes contenus dans le gaz. Les collisions ionisantes vont permettre de générer de nouveaux électrons. Cette génération de nouveaux électrons dans le volume de gaz permet d'amplifier la densité électronique et est définie par le coefficient α appelé premier coefficient de Townsend.

Ce phénomène d'avalanche électronique est présenté sur la Figure I.2.

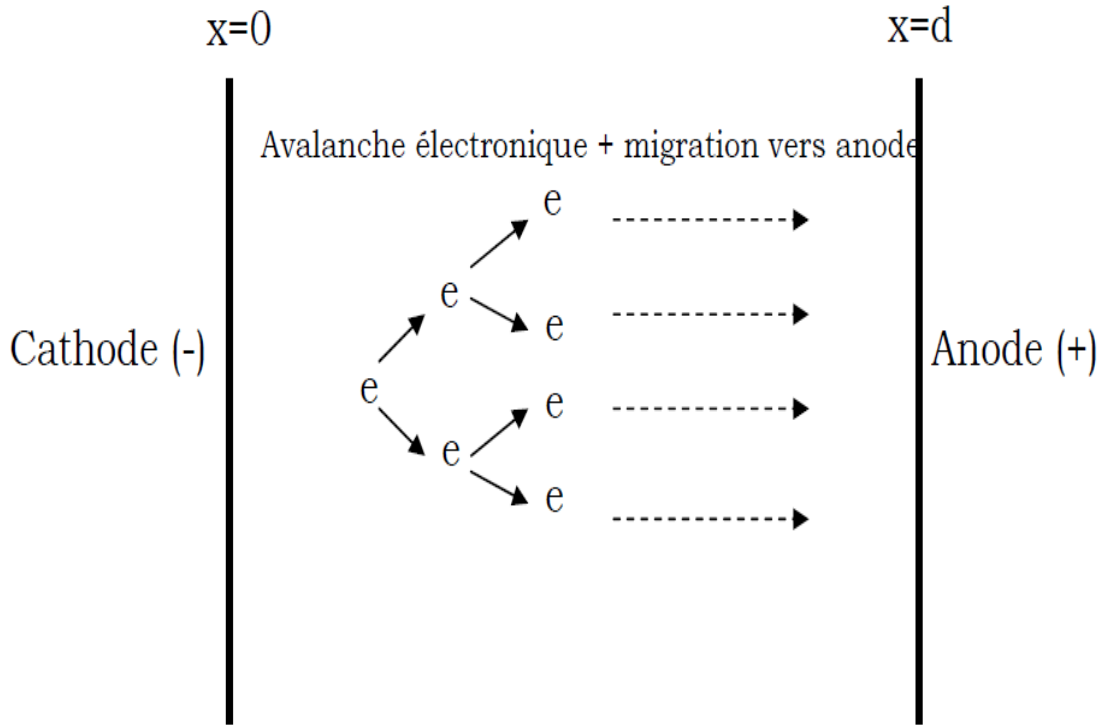


Figure I.2-Schéma d'une avalanche électronique.

Ce coefficient est défini par les formules suivantes où $n(0)$ est le nombre d'électrons primaires.

$$\frac{dn}{dx} = \alpha n(x)$$

$$n(x) = n(0)e^{\alpha x} \quad (I.6)$$

Si on considère $I(x)$ le courant électrique avec $I(0)$ le courant initial à la cathode, on peut décrire l'amplification du courant entre la cathode et l'anode séparées d'une distance d :

$$I(d) = I(0)e^{\alpha d} \quad (I.7)$$

Lors du transit des électrons de la cathode à l'anode, la génération d'électrons secondaires entraîne la création d'ions chargés positivement. Ces ions vont migrer jusqu'à la cathode où ils vont pouvoir arracher des électrons à l'électrode. Ce phénomène est décrit par le deuxième coefficient de Townsend γ qui est la probabilité de libération d'un électron de la cathode lors du bombardement ionique.

On appelle cet effet l'émission secondaire, le coefficient γ dépend de la nature de l'électrode et du gaz.

Pour décrire complètement l'initiation de la décharge, il faut donc tenir compte de la combinaison de l'amplification électronique dans le volume et de l'émission secondaire

d'électrons à la cathode par bombardement ionique. Le schéma récapitulant l'association de ces deux phénomènes est présenté sur la Figure I.3.

Migration des ions à la cathode + émission d' e^- à la cathode

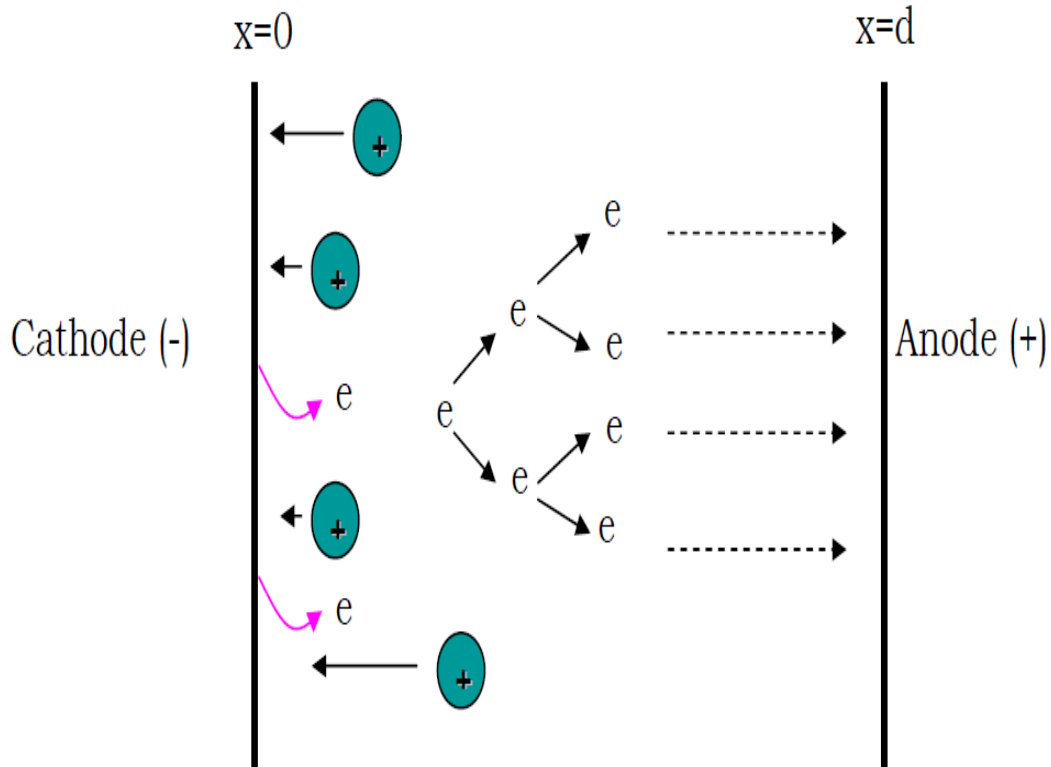


Figure I.3-Schéma de claquage de type Townsend

Le courant créé à la cathode s'exprime : $I_{\text{cathode}} = I(0) + \gamma \cdot I_{\text{ion}}$

Un électron primaire lors de son transit cathode-anode génère $(e^{\alpha d} - 1)$ ions. Le courant ionique correspond donc à $I_{\text{ion}} = I_{\text{cathode}} (e^{\alpha d} - 1)$.

A partir de ces résultats, nous pouvons donc déduire le courant total à la cathode :

$$I_{\text{cathode}} = I(0) + \gamma I_{\text{e-cathode}} (e^{\alpha d} - 1)$$

$$I_{\text{cathode}} = \frac{I(0)}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

Le courant total électronique à l'anode s'écrit :

$$I = I_{\text{e-cathode}} e^{\alpha d} = I(0) \frac{e^{\alpha d}}{(1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1))} \quad (\text{I.8})$$

Lorsque le dénominateur s'annule, on peut avoir un courant même en l'absence d'un courant extérieur, cela nous donne la condition d'auto-entretien d'une décharge qui est :

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (\text{I.9})$$

Le processus de Townsend est un processus homogène qui décrit une décharge à basse pression, c'est-à-dire du produit $p.d < 100 \text{ Torr.cm}$. Le temps d'établissement d'une décharge de type Townsend est assez lent puisqu'il est dépendant du temps de migration des ions à la cathode. Par contre, à haute pression les temps caractéristiques d'établissement de la décharge sont beaucoup plus rapides que le temps nécessaire pour que les ions migrent vers la cathode. C'est pourquoi nous allons ensuite présenter le claquage de type streamer valable pour des plus hautes pressions [7].

I.5.1.Limites de la théorie de Townsend

La théorie de Townsend fait intervenir tout l'intervalle inter-électrodes. Elle prévoit à des pressions élevées, de l'ordre de la pression atmosphérique, des temps de transition des charges beaucoup plus grands que le temps de formation de la décharge.

Dans le système d'électrodes pointe-plan, la théorie de Townsend s'applique aux cas de la valeur faible du produit $p.d$ et de basse pression. Quand $p.d$ est trop petit ou trop grand, le mécanisme de décharge change et cette théorie n'est plus valable.

Dès que $p.d > 200 \text{ cm.mmHg}$, le mécanisme de décharge par formation de streamers remplace le mécanisme de Townsend [2].

I.5.2.Loi de Paschen

En 1889, Friedrich Paschen a recherché pour différents gaz la tension nécessaire (disruptive) pour initier un plasma entre deux électrodes planes et parallèles. Cette tension est dépendante de la nature du gaz, de sa pression et de sa température. Les courbes de Paschen pour une température fixe de 300 °K sont présentées sur la Figure I.4 pour différents gaz. La tension disruptive est tracée en fonction du produit pression du gaz et distance inter-électrodes. Cette figure montre que le bon paramètre n'est ni la pression, ni la distance mais le produit de ces deux grandeurs.

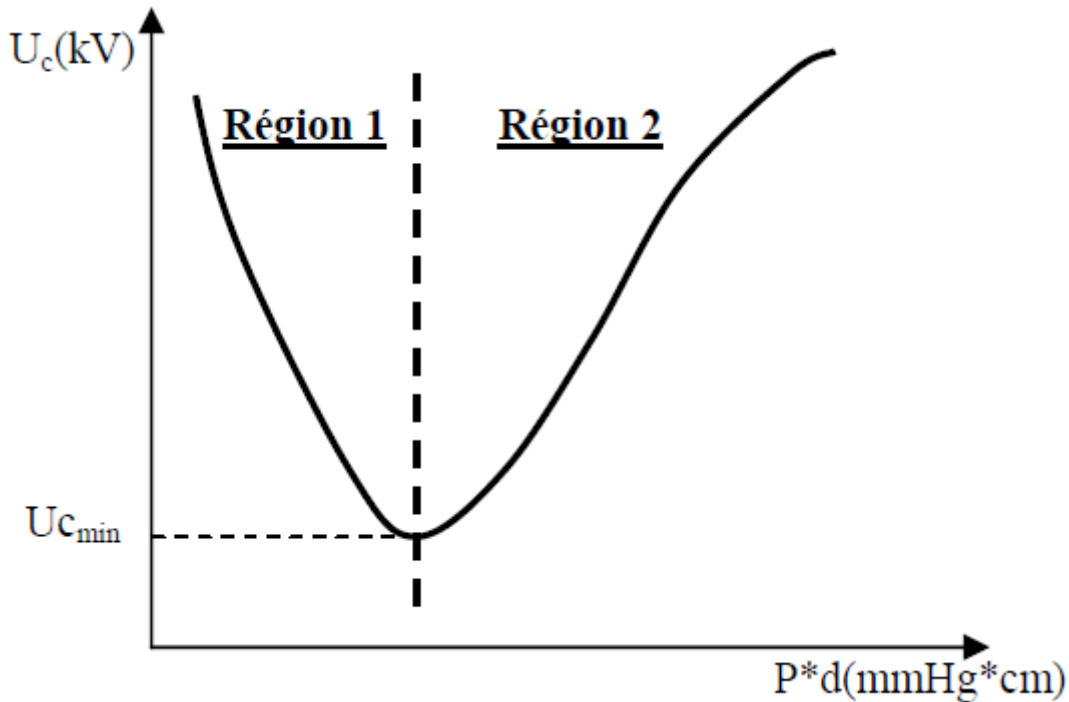


Figure I.4-Courbe de Paschen pour l'air [7]

L'exemple présenté sur cette figure correspond à une décharge dans l'air. Cette courbe peut s'écrire sous la forme de l'équation de Paschen pour une température constante [7]:

$$V(p, d) = \frac{C.P.d}{D+\ln(P.d)} \quad (I.10)$$

Les valeurs C et D sont des constantes dépendantes de la nature du gaz, et de celle des électrodes.

En observant cette courbe, nous pouvons remarquer qu'elle présente un minimum de tension qui correspond à la densité optimale de molécules présentes dans le gaz pour favoriser un claquage. Pour une distance d donnée :

- Avant ce minimum de tension, la pression est peu élevée, la densité de molécules est faible : nous avons donc un grand libre parcours moyen et une faible fréquence de collisions. Pour initier une décharge, il faut donc augmenter le champ électrique pour que les électrons soient plus énergétiques et ainsi favoriser la probabilité d'ionisation lors d'une collision.

- Après ce minimum, la pression est plus élevée, la fréquence de collisions également, mais de ce fait la distance parcourue par les électrons avant une collision est réduite et donc l'énergie acquise par cet électron également. Pour que les collisions soient ionisantes, il est nécessaire d'augmenter le champ électrique pour rendre les électrons plus énergétiques et augmenter la probabilité d'ionisation.

I.6. Mécanisme de claquage type streamer

Le mécanisme de type streamer est dominant pour des produits pression/distance supérieurs à 100 Torr.cm d'après le critère de Raether [7] qui est variable selon la nature du gaz et des électrodes. C'est un processus inhomogène qui engendre l'apparition de filaments. Ce mécanisme présente plusieurs étapes de formation:

1ère étape : Avalanche primaire

Un champ électrique est appliqué entre deux électrodes, un électron primaire présent dans le gaz près de la cathode va être accéléré par le champ électrique et créer une avalanche électronique primaire. Les électrons plus légers vont migrer jusqu'à l'anode, les ions plus lourds vont alors créer une charge d'espace derrière ce front de charges négatives en raison de la présence d'un nuage ionique se déplaçant plus lentement. La charge d'espace crée un champ électrique E' opposé au champ appliqué. Cette première étape est schématisée sur la Figure I.5.

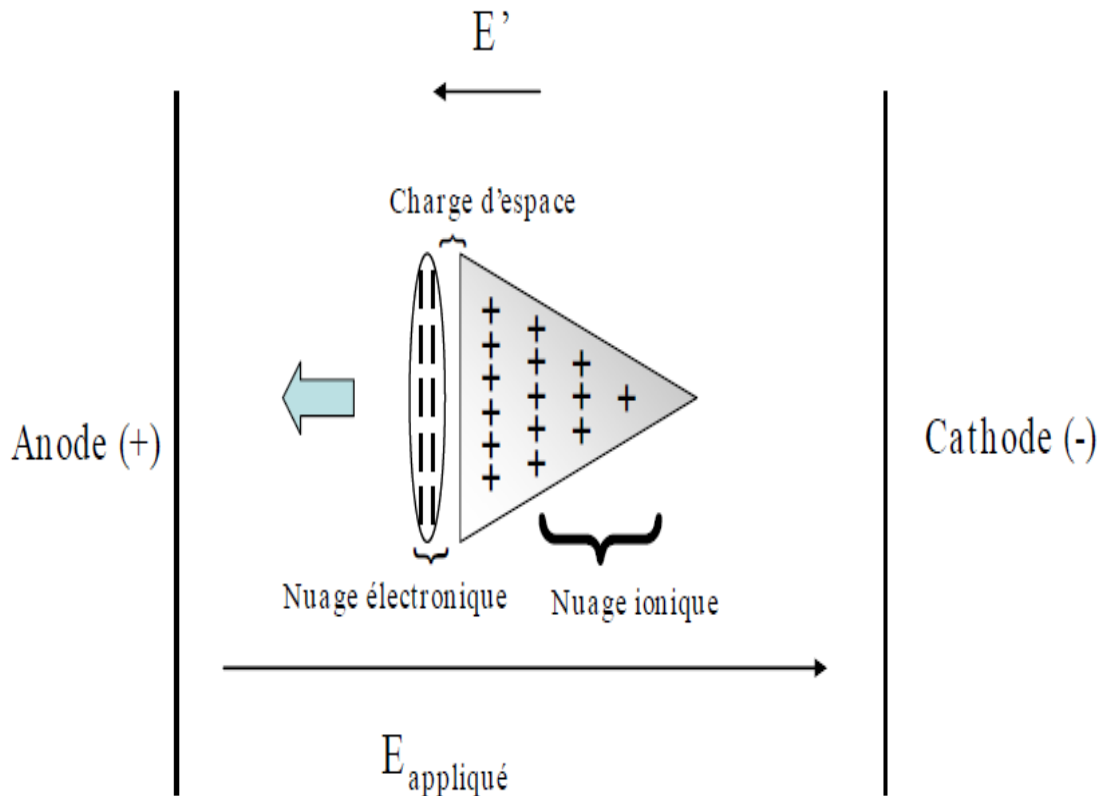


Figure I.5-Mécanisme de type streamer avalanche primaire : création d'une charge d'espace.

Le champ de charge d'espace E' doit être suffisamment élevé par rapport au champ géométrique E pour induire une distorsion du champ. Cette distorsion augmente le champ en tête d'avalanche et permet d'augmenter la vitesse de propagation vers l'anode. Il est

communément admis que le streamer se développe quand le nombre d'électrons dans la tête d'avalanche dépasse 10^8 cm^{-3} .

2ème étape : Création d'avalanches secondaires

Au processus d'ionisation par collisions électrons-ions s'ajoute un processus de photo-ionisation qui engendre des avalanches secondaires. Lors de cette étape, il est possible de distinguer deux types de streamers : le streamer négatif et le streamer positif.

a-Streamer positif :

La génération d'un streamer positif est présentée sur la Figure I.6. Les atomes excités par l'avalanche primaire produisent des photons dans la direction de l'avalanche primaire c'est-à-dire vers la cathode. Les électrons produits par ces photons initient des avalanches secondaires dans cette même direction. Ces avalanches secondaires se mêlent aux ions générés par la première avalanche et forment un plasma quasi-neutre. Ces électrons peuvent aussi exciter de nouveaux atomes qui émettent des photons. L'avalanche secondaire d'ions va renforcer la charge positive près de la cathode et faire évoluer le canal de plasma. Le streamer peut ainsi croître.

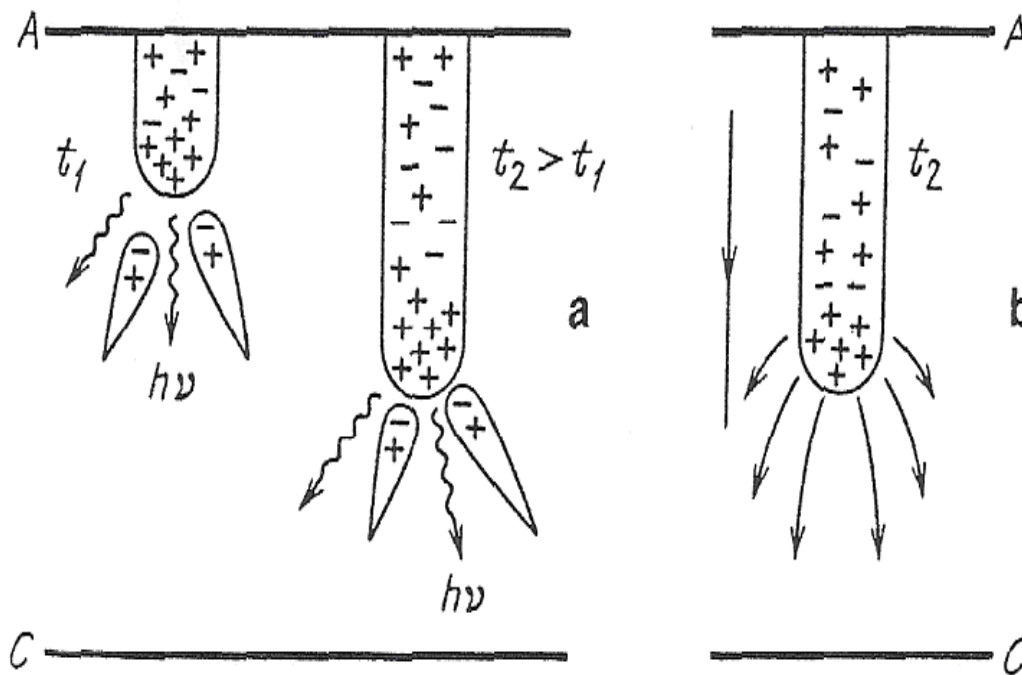


Figure I.6- Avalanches secondaires créées par photo-ionisation dans le cas d'un Streamer positif [8].

b- Streamer négatif :

Le streamer est dit négatif lorsque le début de l'avalanche primaire est proche de la cathode, ainsi le streamer se dirige principalement en direction de l'anode comme présenté sur le schéma de la Figure I.7. Les caractéristiques de propagation sont différentes de celles présentées dans le cas du streamer positif, car dans ce cas la dérive des électrons a lieu dans la même direction que celle du streamer. Dans ce cas, la photo ionisation et les avalanches secondaires se dirigent vers l'anode c'est-à-dire vers la tête du streamer chargée négativement.

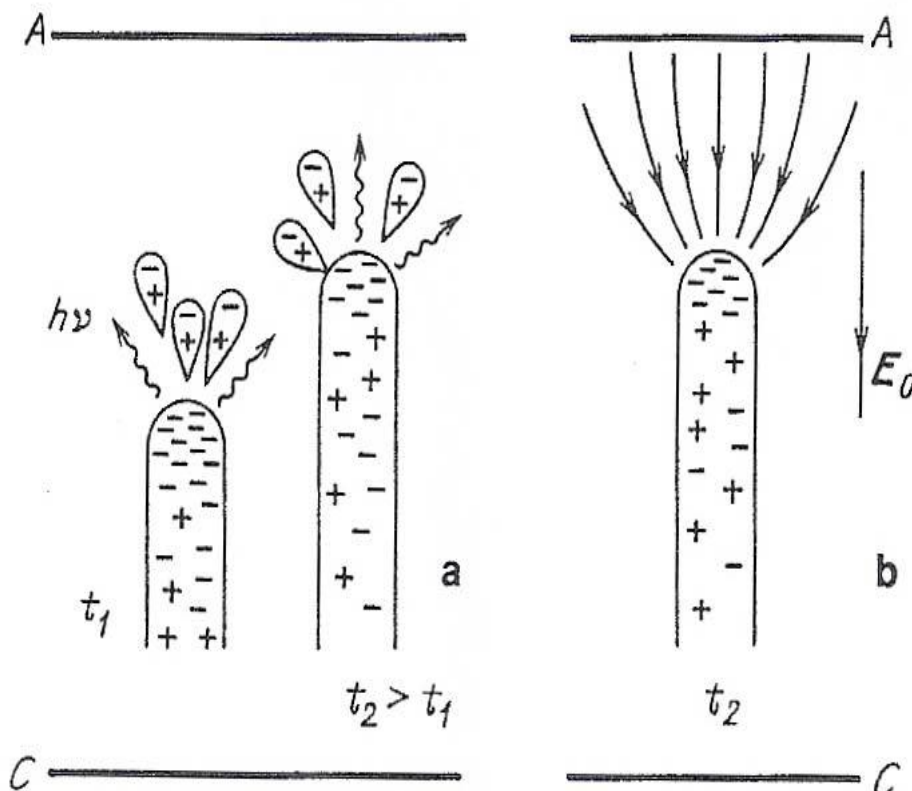


Figure I.7- Avalanches secondaires créées par photo-ionisation dans le cas d'un Streamer négatif [8].

I.6.1.Critère de Meek

La transition avalanche-streamer n'est pas spontanée et ne se produit pas toujours. Ceci a conduit certains auteurs (Loeb, Kip....) à des considérations théoriques sur les conditions de cette transition. 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.

Cependant, Meek a mis l'accent sur le fait que la déformation n'est pas seulement axiale, mais aussi radiale, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction du champ appliqué. Or un facteur essentiel de la propagation des streamers est la photo-ionisation du gaz à proximité de la tête de streamer. Ces photoélectrons sont donc, non seulement accélérés, mais encore ramenés à la tête de streamer. Ces considérations ont servi de base pour dégager un critère quantitatif de formation d'un streamer. Le principe de base 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 »[2].

I.6.2. Critère de Reather

A la même époque, mais indépendamment de Meek, Reather avait pu établir un critère empirique fondé principalement sur le fait que l'avalanche devait atteindre une taille critique pour que la transition avalanche-streamer puisse avoir lieu. Ce critère s'écrit simplement dans le cas d'un champ non uniforme :[2]

$$\int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx = \text{Log} n_c \quad (\text{I.12})$$

x_c : représente la distance critique et n_c le nombre d'électrons produits par l'avalanche. En général, ce nombre est de l'ordre de 10^8 [8].

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les processus élémentaires permettant de comprendre les phénomènes des décharges électriques dans les gaz. Cette partie du travail n'est donc qu'une entrée en matière nous permettant de mieux comprendre les phénomènes liés à la décharge de type couronne qui fera l'objet du chapitre qui va suivre.

Chapitre II

Physique des plasmas et décharges couronne

II.1. Introduction:

Ce chapitre est composé de deux parties. Les décharges électriques étant considérées comme un plasma, nous commençons dans un premier temps par quelques rappels et généralités sur les plasmas. Nous rappellerons les différents paramètres et processus physiques qui interviennent au sein des plasmas et qui permettent ainsi de les classifier. Dans la seconde partie, nous allons présenter les décharges couronne.

II.2. 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 la première fois en 1923 par les physiciens Américains I. Langmuir et L. Tonks pour désigner dans les tubes à décharges certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre.

Ainsi, un plasma est défini étant analogue à un gaz mais constitué de particules chargées d'ions et d'électrons de telle sorte que cet ensemble soit globalement électriquement neutre. D'une façon générale, la physique des plasmas joue un rôle très important en astrophysique puisque l'on estime que près de 99% de l'univers est constitué par la matière à l'état plasma [1].

II.3. Paramètres physiques d'un plasma :

Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être ainsi classifiés en certains paramètres précis. Ces paramètres sont essentiellement :

La densité électronique: est le nombre d'électrons libres n_e par unité de volume (cm^{-3}).

Le degré d'ionisation: représente le rapport du nombre d'électrons libres n_e sur le nombre de particules totales $n_e + N$ (N étant le nombre de particules neutres par unité de volume). Le degré d'ionisation est alors donné par :

$$\alpha = \frac{n_e}{n_e + N} \quad (\text{II. 1})$$

Le libre parcours moyen: noté lpm , correspond à la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions. Celui-ci dépend de la vitesse des particules, de même que la probabilité de collision.

La température électronique: notée T_e est la température électronique qui correspond à la température absolue en Kelvin des électrons. On peut aussi utiliser l'énergie électronique kT_e (en électronvolt).

Dans la nature, les plasmas tels que les étoiles ont une température d'environ 10^7 °K et l'ionosphère terrestre de 10^4 °K.

La longueur de Debye: définit la longueur à partir de laquelle le champ électrique Coulombien issue d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signe opposé dans le volume environnant. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{k \cdot T_e \epsilon_0}{n_e e^2}} \quad (II.2)$$

II.4. Classification des plasmas

Il existe de nombreux types de plasmas que l'on différencie selon différents critères. Parmi ces critères nous trouvons la densité électronique n_e et la température électronique T_e (Ou énergie kT_e) ou la longueur de Debye λ_d (Figure II.1).

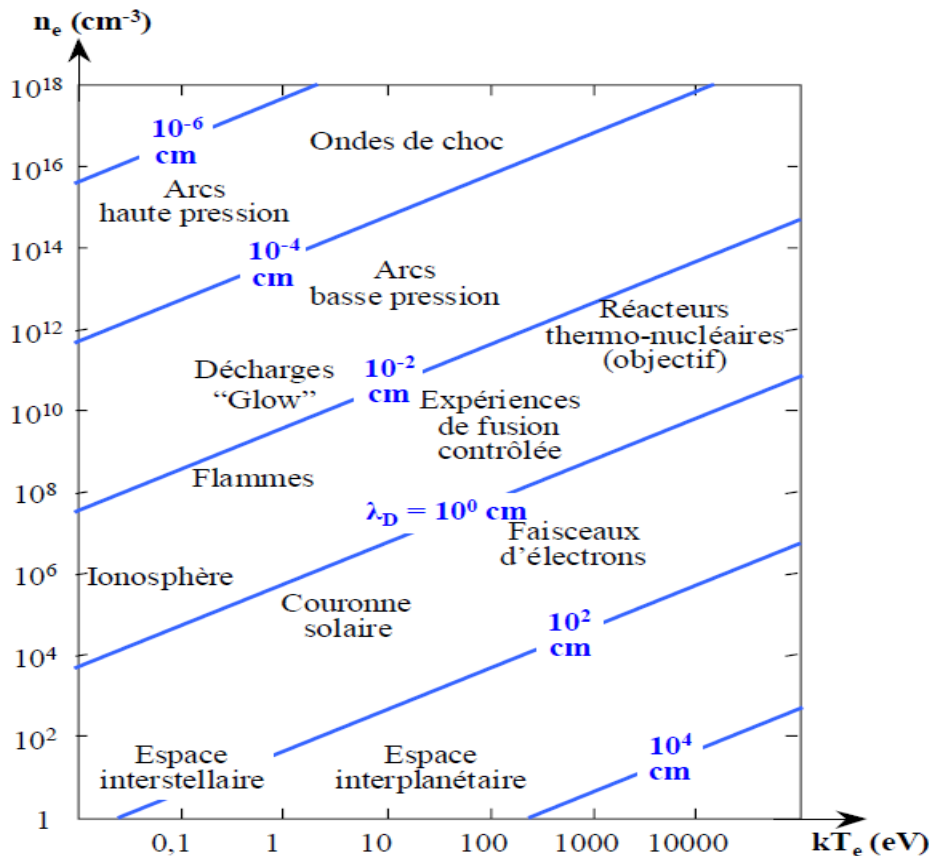


Figure II.1- Différentiation des plasmas par l'énergie électronique kT_e , la densité électronique n_e et la longueur de Debye λ_d [1]

Une autre forme de différenciation des plasmas est leur état thermodynamique : on distingue alors les plasmas à l'équilibre thermodynamique (plasmas thermiques ou plasmas chauds), des plasmas hors-équilibre (ou plasmas froids).

- Dans les plasmas à l'équilibre thermodynamique tous les éléments présents (électrons, ions, molécules) ont sensiblement la même énergie et la même température. Cette dernière est très élevée (entre 5000 °K et 50000 °K). On rencontre ce type de plasmas dans les étoiles ou les arcs électriques comme la foudre.

- Dans Les plasmas hors-équilibre les différentes particules (électrons, ions, atomes, molécules) ont des énergies très différentes. L'énergie des électrons est de plusieurs eV (1 eV correspond à 11600 °K), tandis que la température du gaz reste proche de la température ambiante (≤ 500 °K), d'où l'appellation de *plasmas froids* qui leur est donnée.

II.5. Les décharges couronne

II.5.1.Principe et géométrie de la décharge

Les décharges couronne se situent dans le régime (III) de la figure II.2. La décharge est classiquement établie entre une électrode active et une électrode passive (électrode reliée à la terre). L'électrode active est une pointe (dans notre cas est un fil de petit diamètre) à laquelle on va appliquer un haut potentiel électrique tandis que l'électrode passive est un plan (dans notre cas c'est un fils de diamètre supérieure à celui de l'électrode active). On obtient alors une décharge couronne. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. En l'absence de charge d'espace et dans la configuration pointe-plan, **Hartmann(1977)** a établi une expression du champ électrique E en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie x :

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln \left[\frac{2d+r}{r}\right]} \quad (\text{II. 3})$$

Avec V le potentiel, d la distance inter-électrodes, r le rayon de courbure de la pointe et x l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine.

Dans une configuration fil-plan, **Lacoste et al (2004)** ont utilisé :

$$E(x) = E_i \frac{r}{x} \quad (\text{II. 4})$$

Avec E_i le champ électrique à la surface du fil que l'on peut déterminer par la formule empirique de Peek (157 kV/cm).

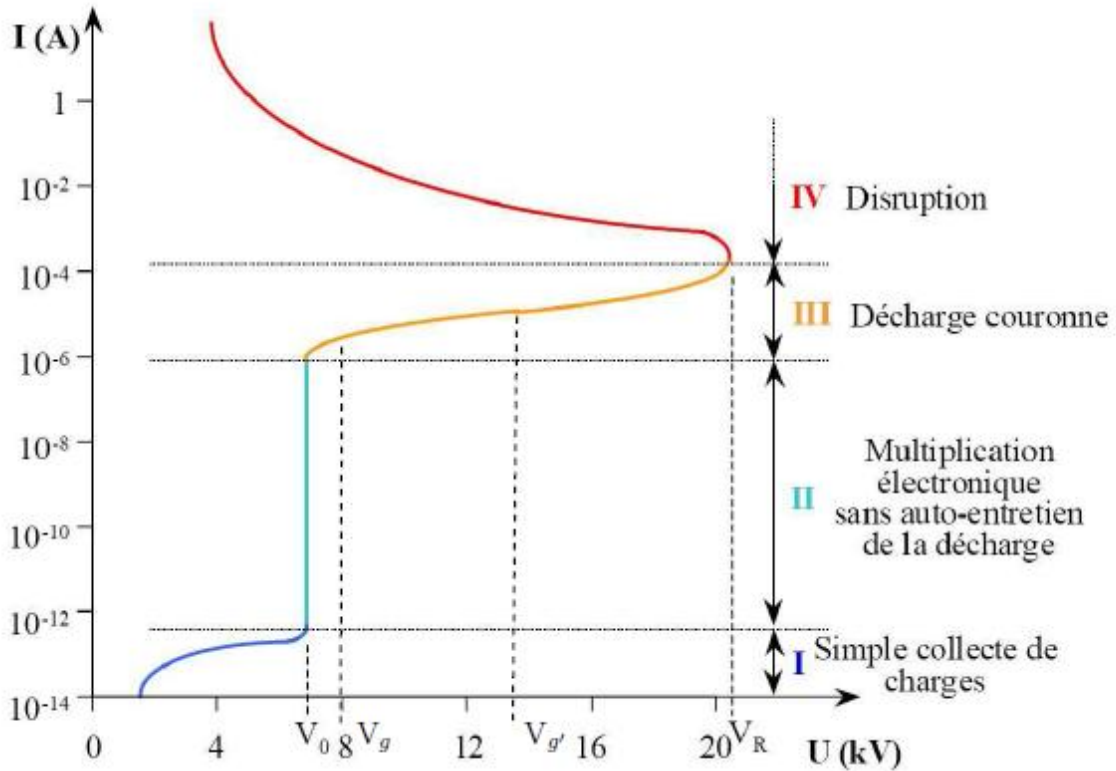


Figure I.2- Caractéristique courant-tension d'une décharge alimentée par une tension continue dans l'air et à pression atmosphérique [9].

II-5.2. Différentes configurations

Les décharges couronne sont des décharges électriques pré-disruptives qui se développent dans l'intervalle gazeux entre deux électrodes fortement asymétriques. Parmi les configurations très variées de systèmes d'électrodes utilisés, les plus courantes sont les systèmes pointe-plan, multi pointes-plan, couteau-cylindre, fil-cylindre et cylindre-cylindre.



Pointe/Plan Multipointe/Plan Couteau/Cylindre Fil/Cylindre Cylindre/Cylindre

Figure II.3- Les Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production de décharge couronne.

II.5.3. 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. 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. De plus la décharge couronne apparaît à des tensions plus faibles en pointe négative qu'en pointe positive.

En effet, pour la décharge couronne négative, l'avalanche électronique prend naissance sur 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.

I.5.3.1. Cas d'une pointe positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé sur la Figure II.4.

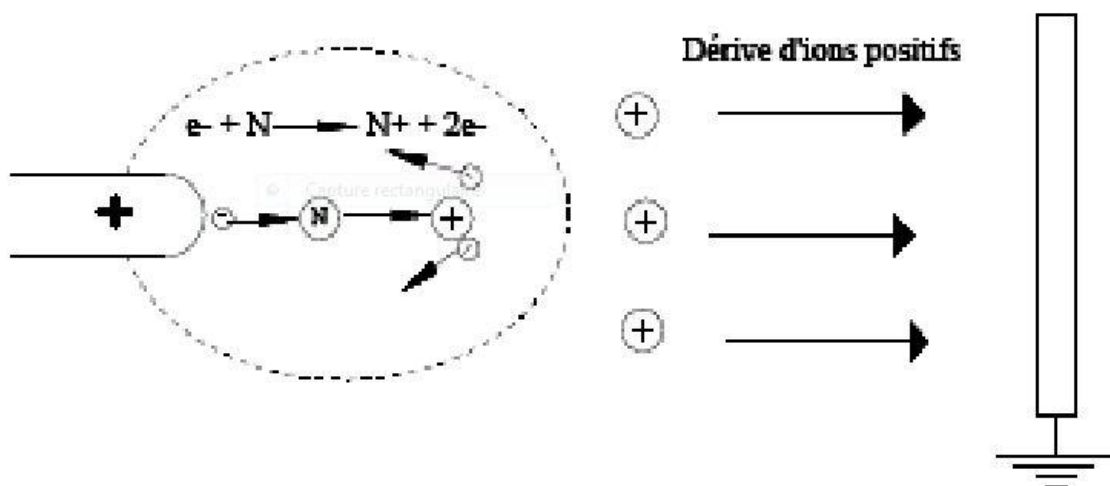


Figure II.4-: Description de la décharge couronne positive [5].

II.5.3.2 Cas d'une pointe négative :

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. *Goldman* et *Sigmond* (1982) expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (Figure II.5).

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

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

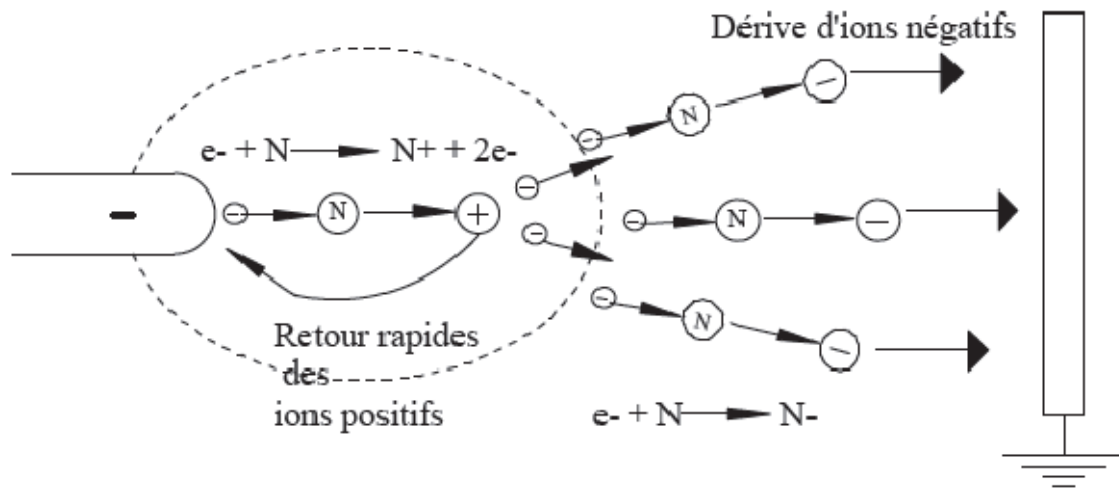


Figure II.5- Description de la décharge couronne négative [5].

II.5.4. 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-électrode d_{\max} et la fréquence d'alimentation électrique donnée par la relation suivante :

$$d_{\max} = \frac{\mu E_{\max}}{2\pi f} \quad (\text{II. 5})$$

Où : f : fréquence du champ alternatif.

μ : mobilité des ions.

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 de courant continu. Pour les distances supérieures à d_{\max} , il ya 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.

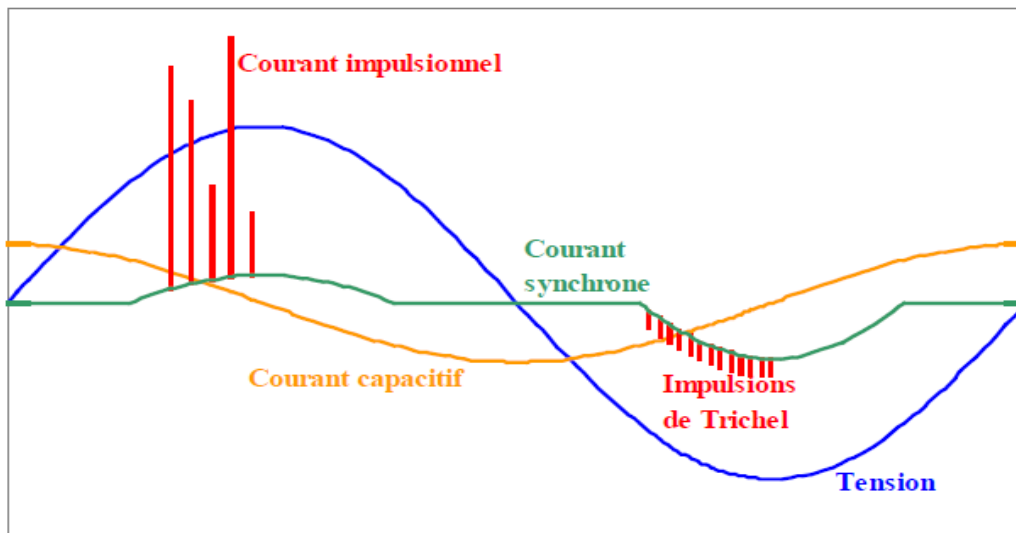


Figure II.6- Différentes composantes du courant en alternatif en géométrie pointe-plan à la pression atmosphérique [9].

De la figure II.6, il apparaît clairement trois composantes de courant :

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 impulsionnel : somme des impulsions streamer pour les alternances positives et des impulsions de Trichel lors des alternances négatives.

II.6. Applications des décharges couronne

Les décharges couronne sont utilisées dans de nombreux domaines où elles remplacent des techniques souvent plus polluantes (utilisation de solvants). Cependant elles restent pour certaines applications encore trop coûteuses d'un point de vue énergétique comparées à d'autres méthodes mieux maîtrisées. Mais les recherches effectuées sur le sujet tendent à accroître sa pénétration dans le milieu industriel et ouvrent de nouvelles possibilités.

II.6.1. Traitement de surface

Le traitement des surfaces est le deuxième domaine d'utilisation des plasmas froids produits par décharges couronne, le premier secteur à les voir adoptés couramment est la micro-électronique pour la fabrication des circuits intégrés et des circuits imprimés. En raison de leurs caractéristiques et leurs qualités intrinsèques, ils se diffusent dans d'autres secteurs comme : la métallurgie et la mécanique (durcissement superficiel et protection anticorrosion des pièces et outillages). La plasturgie (préparation de la surface à une enduction ultérieure, nettoyage et dégraissage, élaboration de fonctions sélectives sur membranes, modification du coefficient de frottement, création d'un effet barrière, notamment pour les emballages alimentaire), le textile (anti-mouillabilité, antiglisse), ou encore l'optique et l'optoélectronique (dépôts, organométalliques, multicouches).

II.6.2. Générateur d'ozone

Une autre solution pour traiter les effluents gazeux est d'utiliser (O_3), au lieu de créer un milieu fortement réactif, une espèce possédant un fort pouvoir oxydant est introduite dans le gaz à traiter. Cette espèce est l'ozone. L'ozone est également utilisé dans le traitement de l'eau mais aussi dans de nombreux domaines comme l'industrie agroalimentaire en tant que désinfectant ou conservateur.

Il existe trois générateurs pour les productions artificielles d'ozone et ils emploient des méthodes différentes de production :

- Générateur à ultraviolets (UV) ;
- Générateur avec décharge couronne à oxygène pure (CDOX) ;
- Générateur avec décharge couronne à coefficient réduit (RCCD).

II.6.3. Elimination de l'électricité statique

L'électricité statique est, dans l'industrie, la source de dysfonctionnements gênants. Elle provoque des décharges aux dispositifs électroniques ou décollage de poussière sur des produits souhaités purs. Pour éviter les inconvénients d'une production d'ions par décharge électrique dans un milieu susceptible d'exploser, les ions sont produits par effet couronne à l'intérieur d'une buse, constituée d'un tube alimenté en gaz pur sous pression et ouvert sur la veine à traiter à travers le col tuyère supersonique.

II.6.4. Contrôle actif d'un écoulement

Contrôler un écoulement consiste à modifier ses caractéristiques pour l'amener dans un état souhaité. Cela peut permettre une diminution de trainée, une augmentation de la portance des profils, une augmentation de mélange ou une réduction des bruits.

II.7. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté de manière bibliographique les plasmas et les décharge couronne. Cette dernière établie dans établie dans l'air et à pression atmosphérique, fait partie des plasmas dits froids pour laquelle les énergies mises en jeu sont faibles.

Chapitre III

Décharges à barrière diélectrique

III.1. Introduction

L'inconvénient de la décharge couronne est la transition à l'arc électrique. Pour éviter ce type de problème, plusieurs solutions ont été avancées pour limiter le courant de décharge. L'une de ces solutions est de disposer une barrière diélectrique entre les électrodes, car celle-ci homogénéise la répartition des charges à la surface des électrodes.

Ainsi, la transition de la décharge lumineuse ou filamentaire vers une décharge de type arc est stoppée par la barrière diélectrique. Ceci empêche tout échauffement local important. **Les décharges à barrière diélectriques** (DBD) sont connues depuis le milieu de XIX^{ème} siècle. La première DBD à pression atmosphérique dans l'air a été obtenue par **Von Engle** et al [6]. Les premières expériences sur ce type de décharges ont été proposées en 1857 par **Siemens**[9]. Ces décharges sont des plasmas froids hors équilibre dans lesquels les électrons créés possèdent une énergie ou une température supérieure à celles des ions (énergie moyenne de quelques eV) et des particules neutres de gaz (300°K) qui restent majoritaires.

Les principales caractéristiques des décharges à barrière diélectrique sont : pression de travail élevée (autour de la pression atmosphérique), une tension de l'ordre du kilovolt, une fréquence d'excitation de l'ordre du kilo Hertz et au moins une électrode recouverte par un diélectrique. La distance inter-électrodes est de quelques millimètres à quelques centimètres.

III.2.Définition et caractéristique d'une DBD

La décharge à barrière diélectrique est une décharge silencieuse qui permet de générer un plasma hors-équilibre thermodynamique à des pressions proches de la pression atmosphérique. Les DBD sont utilisables pour de nombreuses applications industrielles telles que la production d'ozone, le traitement d'effluents gazeux ou la modification d'état de surface [9].

Les DBD sont en général excitées en appliquant une tension alternative de forme sinusoïdale, d'amplitude de quelques kilovolts avec une fréquence de répétition pouvant atteindre quelques kilos Hertz, entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant. L'utilisation de la barrière diélectrique homogénéise la répartition des charges à la surface des électrodes et empêche toute transition à l'arc et tout échauffement local important. [10]

La décharge à barrière diélectrique est caractérisée par :

- Sa pression de travail élevée (autour de la pression atmosphérique),
- La tension appliquée aux bornes des deux électrodes est de l'ordre de quelque kV,
- La fréquence d'excitation est de l'ordre du kHz,
- La décharge est contrôlée par une barrière diélectrique qui rend la décharge de courte durée et une répartition de charges telle que les micros décharges soient rares,
- La distance entre les électrodes est de l'ordre de quelques centimètres.

III.3. Différentes configurations de la décharge à barrière diélectrique

Suivants le type d'application envisagée, différentes possibilités d'arrangement de la décharge à barrière diélectrique (DBD) peuvent être adaptées. Les différentes configurations existantes de la (DBD), ayant toutes en commun l'insertion d'une barrière diélectrique couvrant au moins l'une des deux électrodes, sont représentées sur la figure III.1.

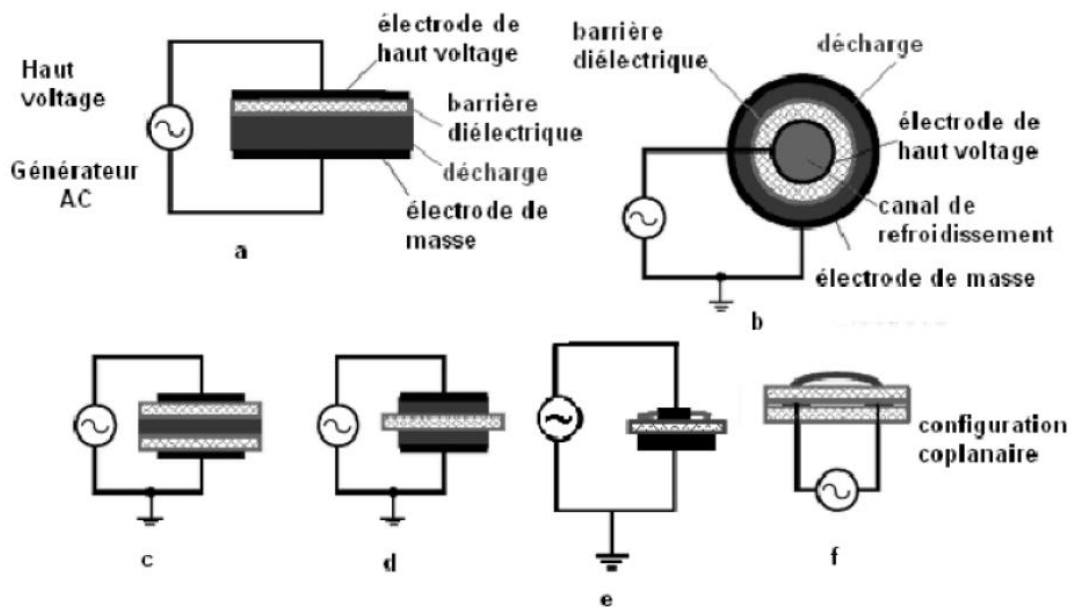


Figure III.1- Différents types de configuration de barrière diélectrique [9].

III.4. Principe de la décharge à barrière diélectrique

Le principe de fonctionnement est illustré sur la figure III.2. Avec l'application de la tension V_a sur les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d'un canal conducteur, le passage du courant induit une accumulation de charges sur la surface de la barrière diélectrique et donc une tension V_{ds} à ses bornes. Dans ce cas le diélectrique est considéré comme un condensateur dont les armatures sont d'un côté, et la décharge de l'autre côté de l'électrode. Si l'augmentation, au fur et à mesure du développement de la décharge, est plus rapide que l'augmentation de la tension d'alimentation, elle cause une chute de la tension appliquée sur le gaz V_g , ce qui conduit à l'extinction de la décharge. Ainsi, quelle que soit la taille et la distribution spatiale des décharges, elles sont bloquées bien avant d'atteindre un degré d'ionisation suffisant pour échauffer la cathode et conduire à l'arc.

Le rôle principal du diélectrique est de limiter la charge déposée sur les électrodes afin que la décharge ne devienne un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à pression atmosphérique. En contrepartie, la présence d'un diélectrique impose l'utilisation d'une excitation électrique *alternative* afin de décharger le condensateur C_{ds} .

Par ailleurs, l'utilisation de la barrière diélectrique a pour conséquence de tendre vers une répartition plus uniforme des micro-décharges sur toute la surface des diélectriques.

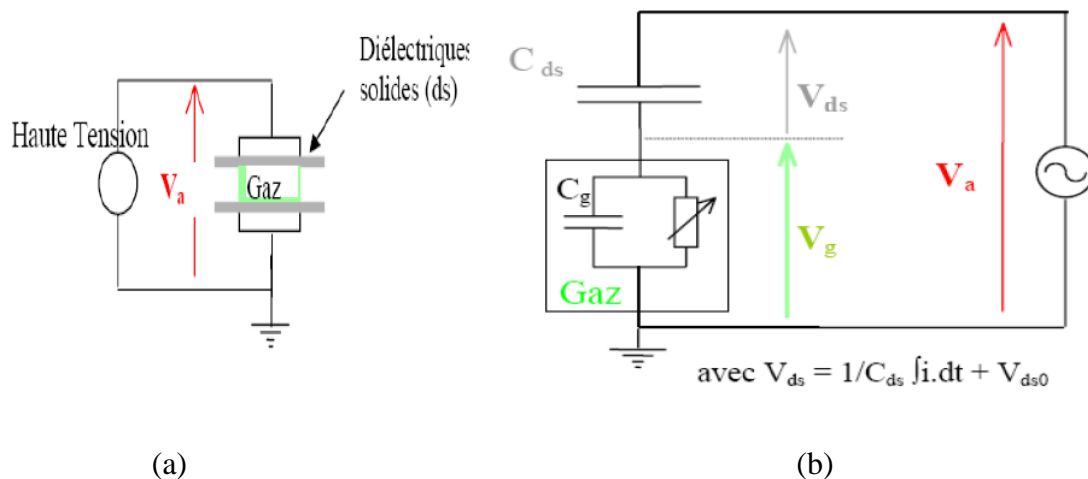


Figure III.2- Exemple de configuration de DBD avec (a) deux diélectriques solides
(b) son schéma électrique équivalent [10].

III.5. Les différents régimes de décharges à barrière diélectrique

Selon la distance inter électrodes, on peut distinguer deux régimes de décharge à barrière diélectrique :

- Le premier régime est la décharge à barrière diélectrique volumique ; ce genre de décharge est établit entre deux électrodes séparées l'une de l'autre par un diélectrique.

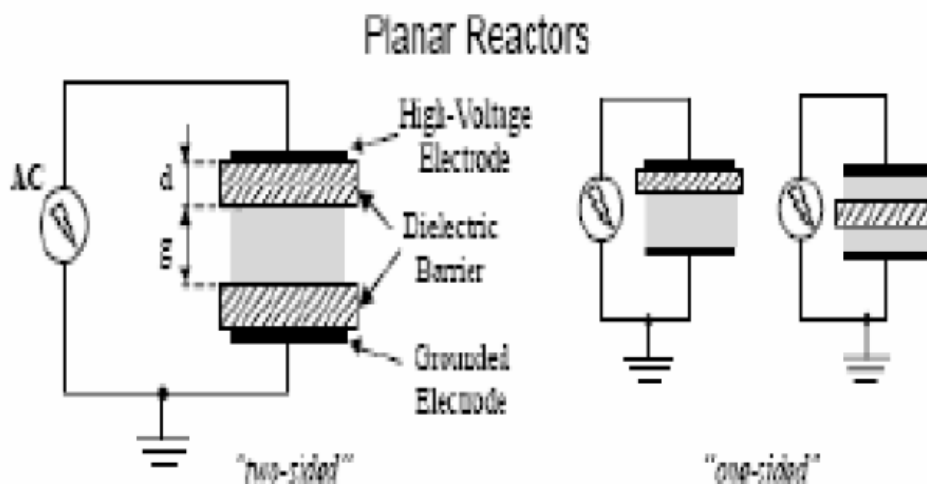


Figure III.3: Schéma de la configuration de la décharge à barrière diélectrique volumique [11]

- Le deuxième régime est la décharge à barrière diélectrique surfacique. C'est Roth qui est le premier à mettre au point cette nouvelle configuration et qu'il nomme « **OAUGDP** » (One Atmosphère Uniform Glow Discharge Plasma).

Cette décharge est établie au moins entre deux électrodes placées de part et d'autre d'un diélectrique et est dite *surfactive* car il n'y a plus, comme précédemment, d'espace gazeux entre les électrodes (le diélectrique occupant tout l'espace inter-électrodes). La figure III.4, montre la configuration que Roth a testée [1]. Les électrodes sont des plaques très fines et sont distantes de quelques millimètres. Une haute tension sinusoïdale à valeur moyenne nulle entre les électrodes posées sur la face supérieure du diélectrique et la (ou les) électrode(s) de la face inférieure reliée(s) à la terre.

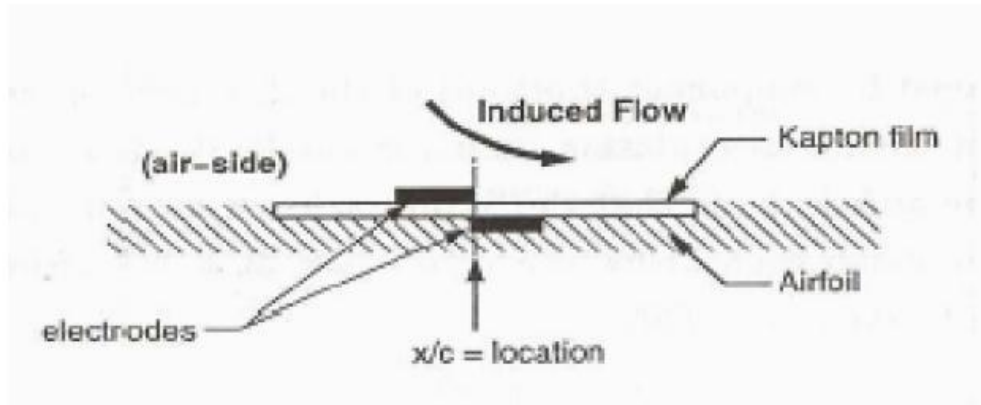


Figure III.4: Schéma de la configuration de la décharge à barrière diélectrique surfacique [10].

III.5.1. Décharge à barrière diélectrique volumique

Selon le type de claquage de gaz et le produit pression du gaz par la distance inter électrodes, on peut distinguer deux types de décharge :

- Décharge filamentaire,
- Décharge homogène (luminescente).

La décharge filamentaire consiste en une multitude de micro filaments distribués aléatoirement sur la surface des électrodes. Le courant de décharge est caractérisé par de nombreux pics apparaissant à chaque alternance de la tension. Cependant sous certaines conditions, la décharge peut devenir homogène, c'est le régime appelé **APGD** (Atmospheric Pressure Glow Discharge) qui permet des traitements plus homogènes que ceux obtenus par DBD.

III.5.1.1. Décharge filamentaire

La décharge filamentaire est le premier mode de décharge à barrière diélectrique découvert et le plus facile à obtenir. Ce type de décharge est composé d'une multitude de filaments initiés par un claquage de type streamers, il est caractérisé par la distribution d'une multitude de micro décharges dans l'espace inter électrode de façon aléatoire.

Lorsque la tension appliquée aux électrodes est suffisamment importante, des phénomènes d'ionisation par effet d'avalanche apparaissent. Les électrons « germes » naturellement présents dans le gaz vont être accélérés par le champ électrique et vont, par collision, créer de nouveaux électrons, c'est la phase d'avalanche. Les charges apparues modifient localement le

champ électrique. Ces charges, en se propageant selon les lignes de champ, laissent une traînée ionisée (*streamer*) qui correspond au canal d'une micro décharge dont le rayon est d'environ 100 μm . La durée de vie d'une micro-décharge est de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. Lorsqu'un canal ionisé est établi entre l'électrode et le diélectrique, celui-ci se charge, ce qui diminue le champ électrique et provoque l'extinction de la micro-décharge. Les principales réactions chimiques caractéristiques de la DBD interviennent dans la phase *streamer* : ce sont des réactions produites par des collisions électroniques. Après l'extinction du *streamer* et la recombinaison des charges, les différentes espèces neutres créées (molécules et radicaux) réagissent dans un milieu dont la température est voisine de la température ambiante. Dans la phase *streamer*, dont la durée est très courte (10 ns), les électrons peuvent cependant acquérir des énergies très élevées.

III.5.1.2. Décharge homogène

Il est toutefois possible d'obtenir des décharges lumineuses et homogènes (sans filaments) dans l'air à pression atmosphérique en appliquant des champs électriques de quelques dizaines de kV/cm à des fréquences de l'ordre du kHz et avec des distances inter électrodes de 0,5 à 5cm. Ce type de décharge est dû principalement à l'émission secondaire d'électrons suite au bombardement ionique de la cathode (**claquage Townsend**).

Cette décharge est caractérisée par une répartition spatiale de la lumière homogène radialement mais localisée près d'une électrode lorsque la décharge est établie.

Elle ne correspond donc pas à une décharge filamentaire. Le terme de *décharge luminescente* (Glow discharge) est utilisé en raison des similitudes observées entre le régime de DBD d'aspect homogène et la véritable décharge luminescente obtenue à faible produit pression-distance.

III.6. Régime de décharge à barrière diélectrique surfacique

Dans ce cas, le bombardement ionique sur la surface est très important et alimente la décharge en électrons secondaires, ce qui modifie grandement les caractéristiques de chaque filament de plasma. Ces géométries se rencontrent en particulier dans les cellules d'écran plasma. Ce type de DBD permet également de générer des vents ioniques lorsque les

électrodes sont dissymétriques, ce qui permet de contrôler des écoulements fluides dans des réacteurs.

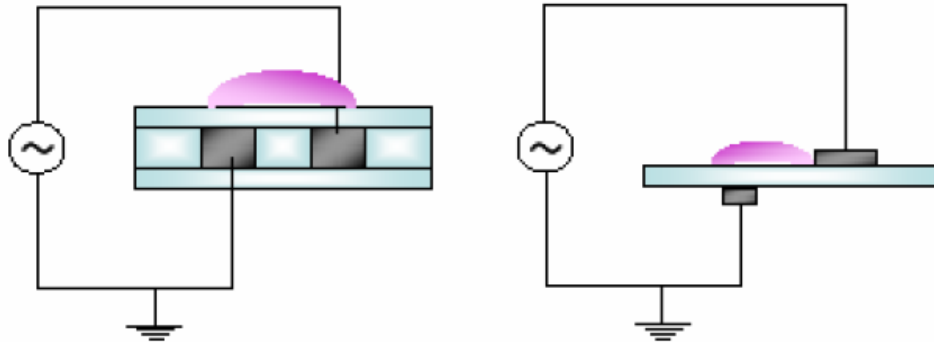


Figure III.- Schéma de la décharge surfacique [11].

III.7.Applications industrielles des décharges à barrière diélectrique

La production d'ozone est l'une des applications principales des décharges à barrière diélectrique, Elle a été appliquée pour le traitement de l'eau pour la rendre potable ainsi que dans l'industrie du papier. On peut également associer l'oxygène ou l'hydroxyde d'hydrogène avec l'ozone ce qui permet de traiter la pâte à papier sans ajout de chlore [11], Les décharges à barrière diélectrique sont également utilisées dans :

- le traitement des surfaces,
- la génération d'ultraviolet dans les lampes excimères,
- l'infrarouge dans les lasers CO₂,
- comme cellules élémentaires des écrans plasmas.

Les applications visées dans le futur concernent le pompage des lasers à excimères par des décharges à barrière diélectrique afin de minimiser le coût des systèmes laser.

II.8.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'étude de deux types de décharge à barrière diélectrique, décharge à barrière diélectrique volumique, et la décharge à barrière diélectrique surfacique. Le principal avantage de la décharge à barrière diélectrique par rapport à la décharge couronne est sa stabilité et sa meilleure homogénéité le long des électrodes.

Chapitre IV

Résultat expérimentaux et commentaires

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différentes configurations des actionneurs plasmas surfaciques réalisés au laboratoire de haute tension. Les expériences ont été effectuées dans les conditions normales de température et à la pression atmosphérique en utilisant une source de tension alternative allant de 0 à 100 kV.

Deux types de décharges ont été testées: la décharge couronne et la décharge à barrière diélectrique.

IV.2. Caractérisation des actionneurs réalisés

Les principaux paramètres à prendre en compte pour réaliser un réacteur plasma sont :

- Forme des électrodes,
- Matériau des électrodes,
- Dimensions des électrodes,
- Matériau du diélectrique.

IV.2.1. Matériau des électrodes

La nature de l'électrode haute-tension peut avoir une influence sur la tension de claquage (facilité plus ou moins grande à émettre des électrons secondaires par impact des ions sur les atomes de l'électrode). Des effets catalytiques ou des phénomènes de corrosion peuvent aussi intervenir au niveau des électrodes à champ fort. Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé des conducteurs en cuivre.

La figure IV.1 présente la photographie de l'électrode de cuivre après quelques dizaines de minutes de fonctionnement dans l'actionneur : nous pouvons constater la présence de traces de corrosion sur l'électrode de cuivre.

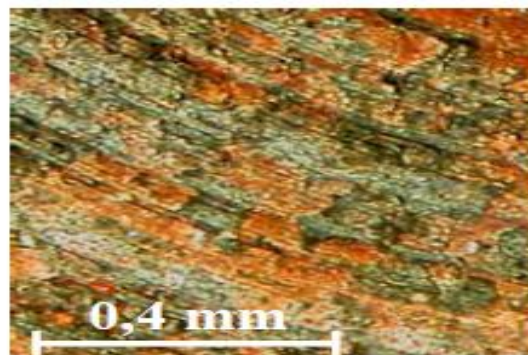


Figure IV.1- Aspect de l'électrode haute-tension de cuivre après quelques minutes d'utilisation en régime de décharge [6].

IV.2.2. Matériau du diélectrique

Le rôle du diélectrique est multiple :

- **Sa constante diélectrique**, conditionne le comportement électrique du réacteur en modifiant, par exemple, la tension de calquage de la décharge, le courant moyen, le courant impulsionnel ou la puissance consommée.

- **La nature chimique du diélectrique**, sa structure, et sa surface spécifique peuvent, quant à elles, avoir une grande influence sur les propriétés catalytiques de ce support.

- **La température du diélectrique**, qui contrôle sa réactivité de surface, est enfin affectée par le comportement électrique du système.

Nous voyons donc la complexité du choix du diélectrique puisqu'il influence, par ces paramètres interdépendants, le comportement du réacteur à tous les niveaux (électrique, catalytique ou thermique).

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le poly méthacrylate méthyle (**PMMA**) comme barrière diélectrique.

IV.2.3. Propriétés du poly méthacrylate de méthyle (PMMA)

Le PMMA présente une très grande transparence, très limpide avec un aspect brillant. Il possède une propriété optique exceptionnelle (transmission lumineuse supérieure à celle du verre). Il a été découvert en 1927 et présente les caractéristiques suivantes :

- Transparence, limpidité, brillance. Son indice optique est de : 1,49,
- Aspect de la surface très lisse et brillant,
- Excellente tenue aux rayons ultraviolets et à la corrosion,
- Excellente résistante aux agents atmosphériques,
- Légèreté : densité de 1.19 g/cm^3 donc beaucoup plus léger que le verre,
- Un bon pouvoir d'isolation,
- Très haute résistance au vieillissement,
- Haute dureté,
- Rigidité diélectrique de 15 à 20 kV/mm,
- Température de fusion : $2100 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Température de transition vitreuse : de 110 à $135 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Température de ramollissement : $90 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Résistance superficielle de 10^{15} à $10^{16} \Omega$,
- Résistance transversale de 10^{15} à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$,

- Permittivité relative :
 - de 3 à 4 F/m pour 50 ou 60 Hz,
 - de 3 à 4.5 F/m pour 1kHz,
 - de 2.7 à 3.2 F/m pour 1MHz.

IV.3. Les différents types d'actionneurs plasmas surfaciques

Les actionneurs plasmas de surface ont été développés récemment (milieu des années 90) et font l'objet de nombreuses études expérimentales et numériques. Le fait que ces décharges soient surfaciques induit d'importantes différences par rapport aux décharges volumiques. En effet, l'interaction entre le plasma et la surface du diélectrique contribue à la modification des phénomènes électrostatiques (déviation des lignes de champs, dépôt de charges à la surface de l'isolant, etc...) ainsi que de la physico-chimie du plasma.

IV.3.1. L'actionneur à décharge couronne

Les actionneurs plasmas à décharge couronne de surface ont pris leur essor dans le milieu des années 90 avec l'émergence d'autres nouveaux moyens de contrôle actif d'écoulement. Les premiers travaux concernant la modification de l'écoulement au-dessus d'une plaque plane par application d'une décharge continue de surface.

IV.3.2. Caractérisation de l'actionneur décharge couronne de surface

Initialement, dans les premières configurations testées, les électrodes étaient posées en vis-à-vis à la surface d'une plaque de PMMA et distantes l'une de l'autre séparée d'une distance d .

Cependant, cette décharge fut difficile à stabiliser. Ceci est probablement dû au fait que les électrodes sont directement en regard, ce qui rend la décharge sensible aux imperfections des électrodes.

Nous avons opté dans le cadre de ce mémoire pour la configuration de la Figure IV.2 qui donne une représentation d'une décharge stable, d'un point de vue disruptif. La décharge est établie entre deux électrodes placées à l'intérieur de rainures usinées dans un matériau isolant. (PMMA dans notre cas).

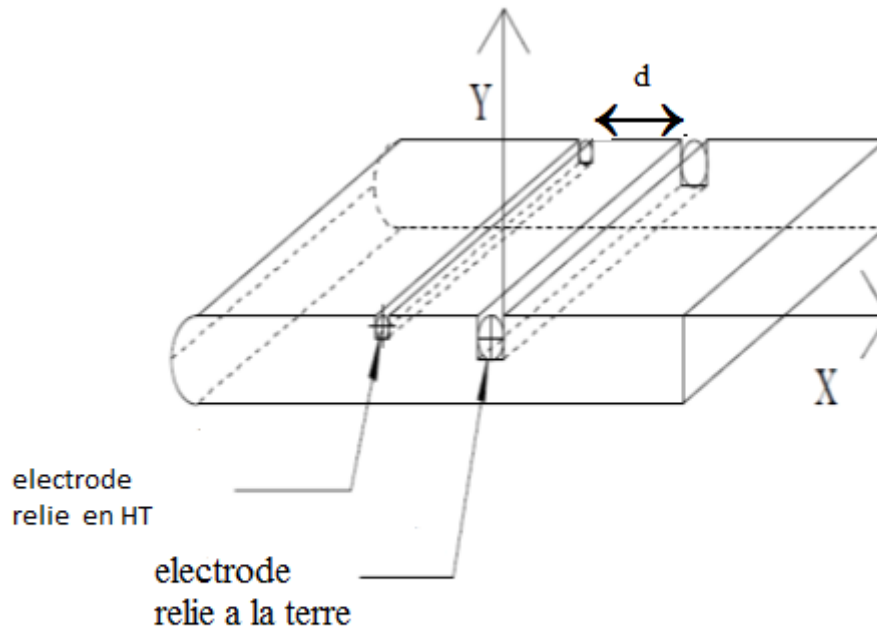


Figure IV.2 Schéma de principe de l'actionneur plasma à décharge couronne

Les électrodes sont deux conducteurs en cuivre ayant des diamètres différents. Ces derniers sont insérés à l'intérieur de rainures adaptées de telle sorte à éviter des creux (donc des vacuoles d'air) pour palier au problème de vis-à-vis. Lors de la réalisation, nous avons veillé à ce que la distance inter-électrodes soit partout pareille le long des conducteurs.

Pour ce dispositif, nous avons réalisé plusieurs prototypes d'actionneurs présentant les caractéristiques suivantes:

- Actionneur 1 : $\phi_1 = 0,2 \text{ mm}$, $\phi_2 = 0,37 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ cm}$,
- Actionneur 2 : $\phi_1 = 0,2 \text{ mm}$, $\phi_2 = 0,75 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$,
- Actionneur 3 : $\phi_1 = 0,61 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ cm}$,
- Actionneur 4 : $\phi_1 = 0,61 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$,
- Actionneur 5 : $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,77 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$,
- Actionneur 6 : $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$,

ϕ_1 et ϕ_2 sont respectivement les diamètres des conducteurs de l'anode et cathode et d la distance séparant ces derniers.

Nous tenons à signaler que les diamètres des conducteurs sont mesurés avec un pied à coulisse à affichage digital.

IV.3.3. Observations et commentaires sur l'actionneur décharge couronne de surface

- **Actionneur 1:** $\phi_1 = 0,2 \text{ mm}$, $\phi_2 = 0,37 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ cm}$,

Nous avons constaté que pour cet actionneur, le régime de claquage est atteint rapidement sans apparition du régime homogène. Cela est dû probablement à la distance inter-électrodes moins grande.

- **Actionneur 2:** $\phi_1 = 0,2 \text{ mm}$, $\phi_2 = 0,75 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$,

Pour cet actionneur, nous avons augmenté le diamètre, le rayon de la cathode ainsi que la distance inter-électrodes par rapport à l'actionneur 1. Dans la littérature, il est conseillé de prendre le rayon du conducteur constituant la cathode au moins le double de celui de l'anode.

Lors des essais, nous avons remarqué en augmentant la tension que pour cet actionneur le régime streamer apparait, par contre le régime filamentaire et la décharge homogène restent inexistantes. De plus, au claquage, il y a eu rupture du conducteur de faible rayon.

- **Actionneur 3:** $\phi_1 = 0,61 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ cm}$,



Figure IV.3- Photographie d'un actionneur plasma: $\phi_1 = 0,61 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ cm}$

Dans le cas de cet actionneur, nous avons pu observer le régime streamer. En augmentant la tension appliquée, nous avons pu voir le régime filamentaire (Figure IV.4), il n'y a pas de décharge homogène et le claquage s'est produit vers 29 kV. Nous remarquons que les brûlures sur la plaque de PMMA (figure IV.3) correspondent aux points les plus rapprochés et c'est à ces endroits que l'on observe les régimes streamer et filamentaire

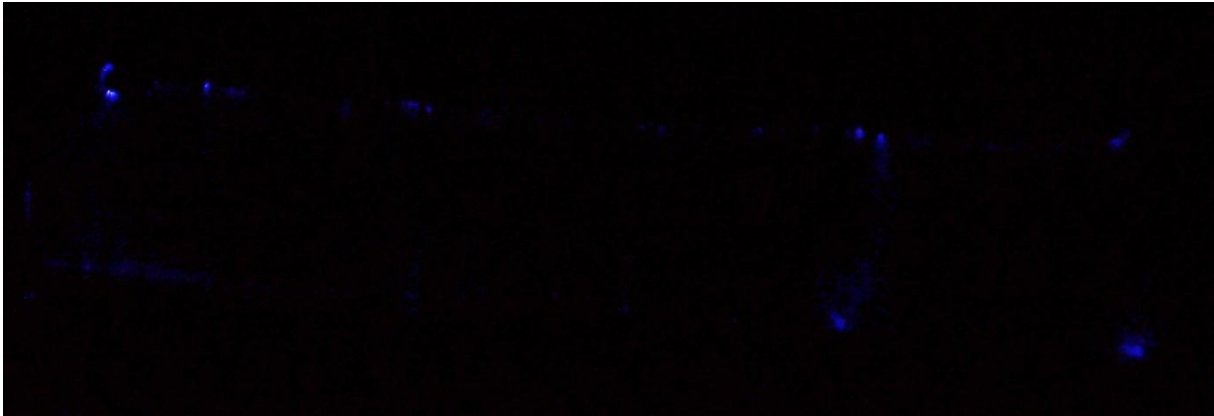


Figure IV.4- Photographie actionneur plasma: $\phi_1 = 0,61 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ cm}$
en régime filamentaire

- **Actionneur 4 :** $\phi_1 = 0,61 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$,

Ayant observé, les deux premiers régimes de décharge pour l'actionneur 3, nous avons décidé de garder les mêmes rayons des conducteurs mais nous avons changé la distance inter-électrodes en passant de 5 à 4 cm.

Dans ce cas, nous avons pu observer les 3 régimes de décharge. Le régime de décharge homogène est finalement apparu.

Il en résulte donc de ces constatations, que la distance inter-électrodes de 4 cm est la plus adéquate.

- **Actionneur 5 :** $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,77 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$

Pour cet actionneur, nous avons fait une tentative de changer le rayon des conducteurs, et garder la distance inter-électrodes de 4 cm.

Lors des essais, nous avons pu constater les 3 régimes de décharges et à des paliers de tensions assez espacés.

Le régime streamer apparaît à 17 kV et le régime filamentaire à 20 kV (figure IV.6), le régime homogène à 24 kV et enfin, le claquage à 28 kV. Il faut signaler que la décharge n'est pas complètement homogène.



Figure IV.5- Photographie de l'actionneur 5 : $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,77 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$

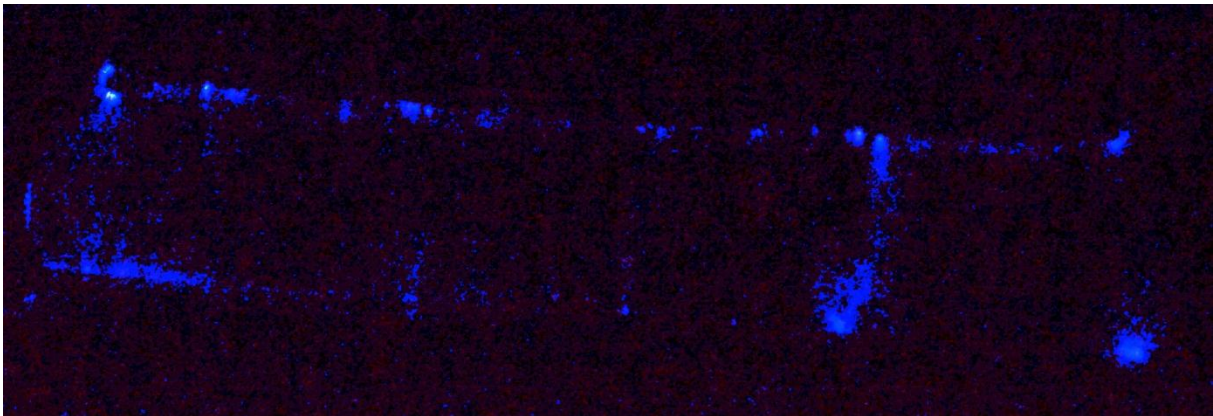


Figure IV.6- photographie en régime de décharge homogène de l'actionneur 5 : $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,77 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$

- **Actionneur 6** : $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$.

Ce qui nous intéresse dans cette étude est d'avoir une configuration qui nous donne un régime de décharge homogène sans passer directement au régime d'arc.



Figure IV.7- photographie en régime de décharge homogène de l'actionneur 6: $\Phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\Phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$

Après divers prototypes, l'actionneur qui répond à la condition de stabilité en régime de décharge homogène est celui de la figure IV.7

Pour cette configuration, nous avons pu avoir une décharge vraiment homogène et stable.

Néanmoins, nous avons le regret de ne pas pouvoir fournir les photographies des différents régimes de décharges, faute d'appareil ayant une forte sensibilité.

IV.4. L'actionneur à Décharge à Barrière Diélectrique (DBD)

Vers le début des années 90, Roth met au point un dispositif capable de générer une décharge à barrière de surface lumineuse et stable à pression atmosphérique. Il dépose alors plusieurs brevets et baptise ce dispositif "One Atmosphère Uniform Glow Discharge Plasma" (OAUGDP).

IV.4.1. Description de l'actionneur DBD de surface

Cette décharge est établie à la surface d'une plaque isolante, entre au moins deux électrodes asymétriquement disposées de part et d'autre du diélectrique (Figure IV.8). L'électrode de la face supérieure, appelée électrode active, est reliée à un haut potentiel alternatif tandis que celle de la partie inférieure est mise à la terre. Une haute tension sinusoïdale à valeur moyenne nulle est appliquée entre les électrodes placées sur la face supérieure du diélectrique et la ou les électrodes inférieures sont mises à la terre. Les grandeurs électriques caractéristiques de la décharge sont les suivantes : haute tension de plusieurs kV, une distance inter-électrodes de quelques mm, une puissance électrique consommée de l'ordre de 500 W/m^2 de plasma. Roth désigne l'origine de la mise en

mouvement de l'air à la surface du plasma par l'action de **la force para électrique**. Cette force est donnée par l'expression :

$$F = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \right)$$

Cette force est donc proportionnelle au gradient du carré du champ électrique. En utilisant une dissymétrie dans la configuration des électrodes, on crée un gradient de champ donc un écoulement.

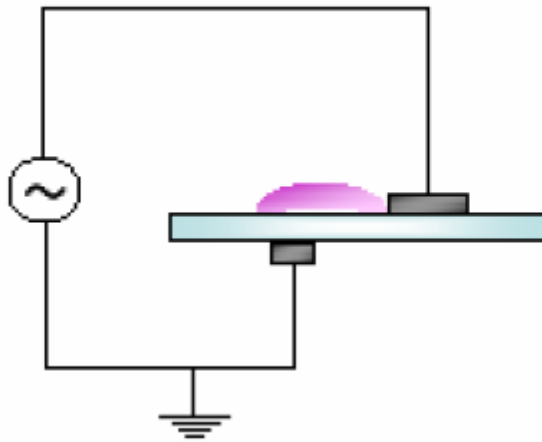


Figure IV.8-Configuration géométrique des électrodes utilisées par Roth pour établir l'OAUGDP.

IV.4.2. Observation et commentaires sur l'actionneur DBD de surface

Pour ce cas, nous présentons un actionneur ayant les caractéristiques suivantes :

$$\varnothing_1 = 0,36 \text{ mm} , \varnothing_2 = 1,36 \text{ mm} , d = 4 \text{ cm} .$$

Conformément à la figure IV.8, les deux conducteurs sont collées de part et d'autre sur une plaque de PMMA ayant une épaisseur de 3 mm.



Figure IV.9- Photographie de l'actionneur OAUGDP : $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$

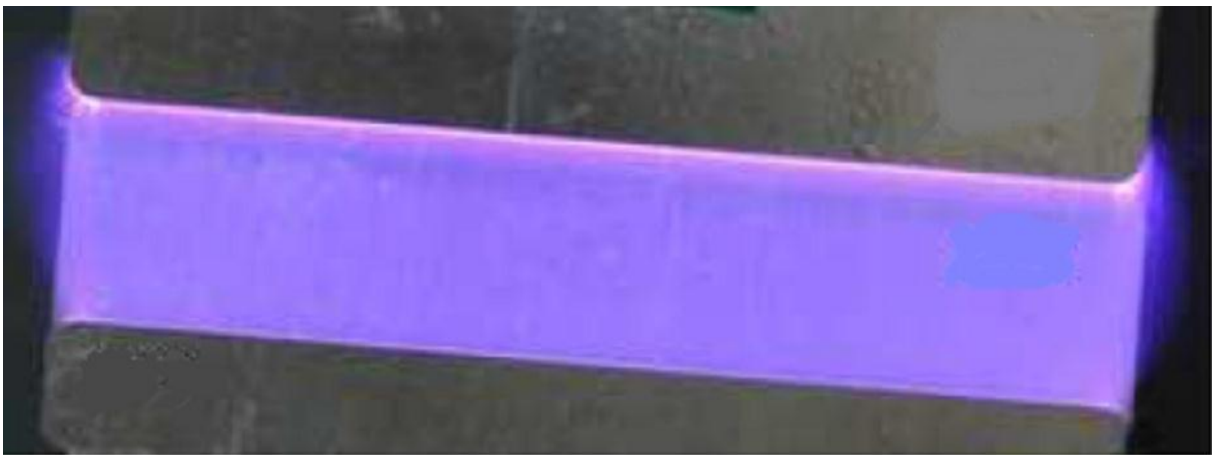


Figure IV.10- Photographie de la décharge homogène de l'actionneur :
 $\phi_1 = 0,36 \text{ mm}$, $\phi_2 = 1,36 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ cm}$

La décharge débute à 17 kV, le régime filamentaire à 23 kV. A 31 kV, la décharge est plus homogène, le claquage a lieu à 34 kV.

Nous pouvons dire que la décharge homogène est plus facile à obtenir pour cette configuration, la seule règle à respecter est que l'un des conducteurs doit avoir un rayon deux fois plus grand que l'autre.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des résultats concernant le développement d'une décharge couronne de surface dans l'optique d'utiliser ce dispositif comme actionneur.

La décharge est établie par l'application d'une haute tension entre deux électrodes, deux fils de diamètres différents, logés à l'intérieur d'une paroi d'un diélectrique.

Cependant l'inconvénient majeur de cette décharge reste son instabilité (passage à l'arc) et inhomogénéité.

Nous avons aussi présenté un seul résultat concernant un actionneur à barrière diélectrique DBD mis au point au laboratoire

Le principal avantage de ce dernier par rapport au premier est sa stabilité et la meilleure homogénéité de la décharge le long des électrodes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire, réalisé au laboratoire de Haute Tension, nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement et développement des actionneurs plasmas. Il est impossible de s'attaquer à l'étude des actionneurs plasmas sans comprendre les processus élémentaires intervenant dans les décharges électriques dans les gaz. De plus, les connaissances de base sur les décharges couronne sont indispensables ainsi que les décharges à barrière diélectrique. Ces dernières étant de deux types :

- La décharge à barrière diélectrique volumique,
- La décharge à barrière diélectrique surfacique.

Note travail a consisté d'une part au l'étude de la décharge couronne de surface établie entre deux électrodes (conducteurs) accolées à la paroi d'un diélectrique (PMMA). Le but ici est de développer un actionneur à une décharge plus stable et plus homogène, ce que nous avons réussi à réaliser. D'autre part à l'étude de la décharge à barrière diélectrique, établie en appliquant une haute tension alternative entre deux électrodes placées de part et d'autre d'un diélectrique. Comparativement à la décharge couronne de surface, la DBD se caractérise par une plus grande stabilité et homogénéité.

Il faut signaler que pour la réalisation d'actionneurs à décharge couronne surfacique ou à barrière diélectrique surfacique performants, nous devons appliquer une haute tension alternative de fréquence de quelques kHz.

Ce travail n'est qu'une ébauche pour des études futures en vue d'optimiser ces actionneurs.

Références bibliographiques

- [1] **A.Labergue,**’’ *Etude de la décharge électrique dans l’air pour le développement d’actionneur plasmas.* ’’, Thèse de Doctorat de l’Université de Poitiers, 2005.
- [2] **M.Mekious,**’’ *Influence du matériau d’électrode sur une décharge couronne*”, Mémoire de Magister de l’UMMTO, 2001.
- [3] **E. M. Van Veldhuizen and W. R. Rutgers,** *”Corona Discharges: Fundamentals and Diagnostics”*, Faculty of Applied Physics, Private Communication, Technische Universiteit Eindhoven, année 2008.
- [4] **G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lalot and C. Dubanton,** *”Les propriétés diélectriques de l’air et les très hautes tensions”*, Editions Eyrolles, Paris, 1984.
- [5] **E.H. Belhiteche,** *” Etude de la dégradation d’un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface”*, Mémoire de Magister de l’UMMTO, 2012.
- [6] **J. Jolibois,** *”étude et développement d’un actionneur plasma à décharge à barrière diélectrique- application au contrôle d’écoulement sur profil d’aile”*, Thèse de Doctorat de l’Université de Poitiers, 2008.
- [7] **V. Martin,** *”Etude de micro décharges comme source de rayonnement ultraviolet intense»*, Thèse de Doctorat de l’Université Paris Sud, 2011.
- [8] **Y.Raiser,** *”Gas Discharge Physics”*, Edition Springer Verlag, 1991.
- [9] **Dj.SAAD,** *”Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques”* Mémoire de magistère UMMTO.2011.
- [10] **E.Michel, V.Puech, E.Silberberg** «Traitement de tôles métalliques par décharge à barrière diélectrique monopolaire fonctionnant à pression atmosphérique» Proceeding des résumés du 8iem congrès "Plasma" de la société Française de Durance. Physique 5-7 Mai 2003 -Cadarache- St Paul Lez G. Bauville, P. Choque, B. Lacour,
- [11] **O.BOULEGHLIMAT,** <<Traitement de surfaces de films de polyimide par une décharge à barrière diélectrique>>. Magister en électronique de l’Université Mentouri de Constantine.2009.