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



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda Faculté de la Technologie

Département d'Electrotechnique

### Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

Etude de synthèse sur le comportement électrique d'une décharge couronne sous différents modes d'alimentation électrique

Présenté par :

\* BOUTCHICHE Ines Aicha

\* SOUAR Sara

Devant le jury :

\* Pr. BOUCHIKHI Abdelaziz

\* Dr. RAOUTI Driss

\*Pr. MEZIANE Rachid

Président Encadreur Examinateur

Soutenu le Septembre 2021 Promotion 2020-2021





Louange à Dieu qui nous a éclairé le chemin de la science et nous a aidé et nous a donné la force et la patience pour accomplir ce travail.

Nous voudrons dans un premier temps remercier, notre encadreur monsieur **Dr. RAOUTI Driss** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Merci également pour vos conseils de rédaction qui ont été très précieux.

Nous remercions également tous les intervenants professionnels responsables de la discussion pour leurs volontés d'accepter la discussion de notre mémoire et pour leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, de la faculté de technologie à l'Université du **Dr**. **Moulay Tahar**, en particulier les professeurs spécialisés en électrotechnique.

Enfin, nous remercions nos parents, nos sœurs, nos frères et nos copines qui ont toujours été présentes, avec leurs soutien inconditionnel et leurs encouragements.



À ma vie et ma raison de vivre, mon très cher père qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, l'éducation que tu nous as donnée aussi est irréprochable. Que ce travail traduit la gratitude et mon affection.

À mes très chères sœurs et frère pour votre soutien qui a été d'une grande aide.

À mon joli cadeau de dieu, la cause de mon bonheur ma charmante sœur SOUNDOUSS

À mes copines SAFIA et SARA qui m'ont toujours soutenu et aidé dans les moments difficiles.

À toute ma famille.

**P**uisse Allah vous donner santé, bonheur et réussite.

**BOUTCHICHE** Ines Aicha.

Dédicace

À ceux qui ont le premier crédit dans chaque succès que j'ai obtenu pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études

## Maman et papa

**À** Ma sœur HOUDA et mon frère MOHAMED pour leurs appuis et leur encouragement.

À ceux qui ont partagé avec moi les plus doux souvenirs À ceux qui m'ont rendu heureux mes meilleurs amies SAFIA et INES

**À** la famille Chaalane, mes tantes et mon chère oncle pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

SOUAR Sara





Remerciements	03
Dédicaces	04
Table des matières	07
Liste des figures	10
Liste des abréviations	14
Introduction générale	17

## Chapitre I : Généralités sur les décharges électriques.

I.Introduction
II.1 Grenadeurs caractéristiques22
II.1.1 Paramètre phtisique des plasmas22
II.2 Différents Types de Plasma23
III. Définition de la décharge électrique25
III.1 Caractérisation courant tension des décharges électriques25
IV. Différentes types de décharge à plasma froid26
IV.1 Plasmas micro-ondes26
IV.2 Plasmas radiofréquence27
V. Décharges électriques à la pression atmosphérique28
V.1 Décharge à barrière diélectrique28
V.2 Décharges couronnes
V.2.1 Définition
V.2.2 Les Configurations courantes de la décharge couronne30
V.2.3 Différents types des décharges couronnes31
VI. Application de la décharge couronne31
VI.1 Modèles analytique pour déterminer la tension seuil de décharge couronne31
VI.2 Approche mathématique pour déterminer le champ électrique32
VI. Conclusion
Chapitre II : Etude de la décharge couronne par le dispositif expérimental.
I. Introduction

II.	Dispositif expérimental	
II.1 <b>(</b>	Cellule–réacteur	40
II.2 S	Système de pompage et de remplissage	43
II.3	Alimentations électriques	44
a. Al b. Al	limentation en tension continue limentation en tension impulsionnelle	44 44
III.	Outils de diagnostics	45
III.1	Diagnostics électriques	46
III.2	2 Diagnostics optiques	49
IV.	Analyse spectroscopique	50
V.	Conclusion	51

# Chapitre III : Modèle électrique et identification paramétrique de la décharge couronne pointe-plan.

I.	Introduction	53
II.	Comportement électrique d'une décharge couronne point- plan	53
III.	Modélisation de la décharge pointe plan sous une alimentation continu	53
III.1	Aspect physique de décharge pointe plan positive	54
III.1.	1 Comportement d'un réacteur sans décharge	54
III.1.	1.1 Calcul de la capacité géométrique du réacteur pointe-plan	56
III.1.	2 Comportement d'un réacteur avec décharge	61
III.1.	2.1 Comportement d'un réacteur avec décharge en tension continu	61
III.1.	2.2 Comportement d'un réacteur avec décharge en tension impulsionnelle	64
IV.	Conclusion	66

# Chapitre VI : Etude comparative et de synthèse sur les comportements électriques d'une décharge couronne pointe-plan positive en continu et en impulsionnel.

I.	Introduction
II.	Simulation de la décharge couronne point-plan68

II.1 p	paramètres expérimentaux de la simulation	58
II.2 I deux	Estimation des paramètres électrique de la décharge couronne pointe-plan sous les modes d'alimentation continue et impulsionnelle	; 70
III.	Etude comparative entre les deux régimes d'alimentation	76
IV.	Synthèse sur le comportement électrique d'une décharge couronne sous deux différents modes d'alimentation électrique	31
V.	Conclusion8	2
Con	clusion générale8	4
REF	FERENCES	36

# Liste des figures

Figure I.1	Exemples de plasmas dans l'environnement	20
Figure I.2	Passage du gaz neutre au gaz ionisé	21
Figure I.3	Les différents états principaux changements d'état de la matière	21
Figure I.4	Types de plasmas électriques	24
Figure I.5	Caractéristique courant - tension des décharges électriques	25
Figure I.6	Schéma d'un dispositif utilisé pour la stérilisation de l'nstrumentation médicale par post décharge micro-onde en flux (Ricard 2010)	27
Figure I.7	Configurations existantes de décharges à barrière diélectrique	29
Figure I.8	Géométrie de DBD générant de décharge de surface	29
Figure I.9	Exemples de décharges couronnes	30
Figure I.10	Différentes configurations de décharge couronne	31
Figure I.11	Répartition du champ électrique dans une configuration pointe- plan	32
Figure I.12	Représentation d'une configuration hyperbolique-plan	33
Figure I.13	Distribution du champ électrique appliqué pour une distance inter-électrodes d =10 mm et des différentes tensions respectivement, a)V=5 KV, b) V=10 KV et c) V= 20 KV	35
Figure I.14	Distribution du champ électrique appliqué pour une distance inter-électrodes d=20 mm et des différentes tensions respectivement, d) $V=5 \ \kappa v$ , e) $V=10 \ \kappa v$ et f) $V=20 \ \kappa v$ .	36
Figure II.1	Schéma de principe de dispositif expérimental adopté pour l'étude électrique et optique.	39

Figure II.2	Photographie du dispositif expérimental du réacteur à décharge couronne mono et multi-pointes plan.	40
Figure II.3	Photographie de l'électrode plane utilisée	41
Figure II.4	Photographie d'une pointe de rayon de courbure ρ=20µm	42
Figure II.5	Photographie du réacteur multi pointes-plan	42
Figure II.6	Circuit d'alimentation du gaz	43
Figure II.7	Schéma de l'alimentation continue	44
Figure II.8	Schéma de l'alimentation impulsionnelle	45
Figure II.9	Schéma du dispositif de mesures électriques	46
Figure II.10	Tension inter-électrodes mesurée lors d'une impulsion de décharge couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour d=11mm, v=9,5kV et $\rho$ =25µm.	48
Figure II.11	Courant instantané de décharge couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour d=11mm, $v = 9,5kV$ et $\rho = 25\mu m$	49
Figure II.12	Photographie de la décharge en régime « breakdown streamer » à l'aide de la caméra Streak pour un temps de balayage de 100 ns (rayon de courbure 20µm, tension continue appliquée 7.5kV, distance inter-électrodes 7mm)	50
Figure II.13	Spectre d'émission de la décharge couronne dans l'azote pur à pression atmosphérique pour d=8mm,va=8kv,f=100hz, $\tau$ =40 µs $\rho$ =20 µm, temps d'exposition :1s et réseau de diffraction :2400 traits/mm	51
Figure III.1	Forme d'onde de la tension inter –électrode obtenue suite à une impulsion de tension appliqué ( $E_a$ =4.2kV, d=7mm)	56
Figure III.2	Forme d'onde du courant capacitif mesuré sous une impulsion de tension appliqué ( $E_a$ =4.2kV, d=7mm)	57
Figure III.3	Forme d'onde du courant capacitif intégré dans le cas ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm)	58
Figure III.4	Forme d'onde de l'impulsion de la tension dérivée dans le cas ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm)	58

Figure III.5	Forme d'onde des capacités géométriques calculées en fonction des formes d'onde du courant et de la tension dans le cas ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm). sous une configuration Pointe-plan.	59
Figure III.6	Valeurs des capacités géométriques calculées à vide pour plusieurs distances inter-électrodes dans une configuration pointe plan.	59
Figure III.7	Localisation des différents effets capacitifs dans l'espace inter- électrodes dans une configuration pointe-plan.	60
Figure III.8	Observation expérimentale de la propagation d'une décharge pointe plan positive obtenue par caméras ICCD et Streak.	62
Figure III.9	Schéma électrique représentatif simplifié d'une décharge pointe plan Continue positive.	63
Figure III.10	<ul> <li>(a) Image de la décharge couronne dans l'air sec à la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de 10ns : V<sub>a</sub> = 8kV ,τ = 40μs , = 100Hz ,d = 8mm ,ρ = 25μm.</li> <li>(b) Courant instantané de la décharge couronne pour,V<sub>a</sub> = 8kV ,τ = 40μs , = 100Hz ,d = 8mm ,ρ = 25μm dans l'air sec et à la pression atmosphérique</li> </ul>	64
Figure III.11	Circuit équivalent proposé d'une décharge pointe plan impulsionnelle	65
Figure IV.1	Qualité des paramètres électriques $R(t)$ et $c(t)$ estimées, au point opératoire d=6mm, $E_{app}$ =6 kV en continu	71
Figure VI.2	Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=8mm, tension appliquée =8kV <i>en continu</i>	71
Figure IV.3	Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=9mm, tension appliquée =9kV en continu	72
Figure IV.4	Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=6mm, tension appliquée =6kV en impulsionnelle	73
Figure IV.5	Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=8mm, tension appliquée =8kV <i>en impulsionnelle</i>	73

Figure IV.6	Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=9mm, tension appliquée =9kV <i>en impulsionnelle</i>	74
Figure IV.7	Valeur maximal de la résistance estimés pour plusieurs distances inter-électrodes dans une configuration pointe plan	75
Figure IV.8	Valeur maximal de la capacité estimés pour plusieurs distances inter-électrodes dans une configuration pointe plan	76
Figure IV.9	<ul> <li>a) et b) : Présentent les variations des courants de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement</li> </ul>	77
Figure IV.10	<ul> <li>c) et d): Présentent les variations des tensions de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement .</li> </ul>	78
Figure IV.11	<ul> <li>e) et f): Présentent les variations les résistance de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement</li> </ul>	79
Figure IV.12	<ul> <li>g) et h): Présentent les variations les capacité de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement</li> </ul>	80

# Liste des abréviations

- **4 TTL** : Transistor-Transistor Logic.
- **4 DBD** : une Décharge à Barrière Diélectrique.
- **MCR :** Moindres Carrées Récursif.
- **Te** : Température électronique.
- 🜲 eV: électron volt.
- $\mathbf{k} \mathbf{T}_{e}$  : l'énergie électronique.
- **d** : La distance inter-électrode.
- $\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{4}}}} \mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{E}}}}_{app}$  : La tension appliquée.
- $\mathbf{4} \mathbf{f}$ : La fréquence.

#### **Symboles :**

- $\downarrow$   $\lambda$ : Coefficient de pondération.
- $\mathbf{4} \ \boldsymbol{\alpha}$ : Coefficient du gain initial.
- $\mathbf{4} \boldsymbol{\rho}$ : Rayon de courbure de la pointe.
- $\mathbf{4} \mathbf{v}$ : La tension relevée aux bornes des électrodes.
- 4 *i*: Le courant traversant l'espace inter-électrodes.
- $\mathbf{4} \mathbf{c_0}$ : La capacité géométrique du système.
- ↓ V : La tension appliquée à la pointe.
- $r_c$ : Le rayon courbure de la pointe.
- $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ : Le champ électrique.
- **4** *ζ*: Le paramètre de l'hyperbole.
- **4** C : Une constante qui dépend de la tension appliquée à la pointe.
- *E* : Le champ de coordonnées hyperboliques.
- *e* : La charge élémentaire d'un électron.
- $\mathbf{\epsilon_0}$ : La permittivité du vide.
- $\downarrow$   $\lambda_D$ : La Longueur de Debye.
- $\downarrow$  *λ*' : Le libre parcours moyen.
- **W** : Le nombre de particules neutres par unité de volume.
- $largenturber n_e$ : Nombre d'électrons libre.

- $\mathbf{4} \ \mathbf{\tau}_i$ : Taux d'ionisation.
- $\mathbf{L}_{\mathbf{g}}$ : La capacitance du gaz.
- $\clubsuit$   $E_{max}$ : Le champ électrique maximum.



Les décharges électriques qui sont à l'origine, des phénomènes courant dans la nature ont devenues l'objet de nombreuses études de recherche, principalement parce qu'il s'agit de phénomènes qui peuvent êtres réalisés facilement de façon artificielle et qui sont largement utilisés dans les applications pratiques et industrielles.

Ces décharges sont la base d'un quatrième état de la matière qu'est l'état plasma. On distingue deux grandes familles, les plasmas dits chauds et les plasmas froids.

Les décharges couronnes font partie des plasmas froids dont elles sont produites sous différentes configurations géométriques asymétriques et sous différents mode d'alimentation (continue, impulsionnelle et variable). Le mode d'alimentation caractérise considérablement le comportement électrique de ces décharges.

Dans ce travail, on s'intéresse au mécanisme de conversion d'énergie au sein de ces décharges. Ce dernier représente le comportement électrique de la décharge et qui est largement lié au type de l'alimentation électrique appliquée.

Dans notre cas, nous étudions le comportement électrique de la décharge couronne pointe-plan positive sous une alimentation continue et impulsionnelle.

Ce mémoire est présenté en quatre chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous commençons d'abord par quelques généralités sur le plasma, tout on rappelant les différents types et qualités caractéristiques des plasmas. Nous présentons par la suite les décharges électriques en général et notamment les décharges électriques à la pression atmosphérique ainsi que les caractéristiques courant-tension, nous présenterons enfin la décharge couronne et leurs différents types et les configurations géométriques courantes générant ce type de décharges. Nous donnons quelques exemples d'application de la décharge couronne.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental utilisé pour réaliser les mesures nécessaires à la modélisation électrique de notre décharge. Nous commençons par une description générale de l'ensemble du dispositif expérimental utilisé. Ensuite, nous détaillerons la constitution de la cellule ainsi que les méthodes de remplissage et de pompage du gaz. Nous présenterons également les circuits d'alimentation et de mesures électriques, ainsi que la partie chargée de l'analyse spectroscopique.

Dans le troisième chapitre nous expliquons l'élaboration du modèle électrique équivalent représentant la décharge couronne pointe-plan créée sous une alimentation impulsionnelle positive à la pression atmosphérique.

Le quatrième chapitre est dédié à l'exploitation de résultats de simulation pour comparer les paramètres électriques de la décharge couronne pointe plan sous les deux modes d'alimentation continue et impulsionnelle puis nous allons présenter une synthèse sur le comportement électrique.

Notre mémoire se termine par une conclusion générale qui résume les principaux points résultants de ce travail.



#### I. Introduction

La matière qui compose notre environnement proche ou lointain se manifeste essentiellement sous un état solide, liquide ou gazeux. Au-delà de ces trois états, Il existe une quatrième forme de matière appelée « plasma électrique ». "Le plasma est un état particulier de la matière dans lequel un milieu gazeux devient un gaz partiellement ou entièrement ionisé dans certaines conditions, qui contient une grande quantité de charge électrique gratuite. Par conséquent, le plasma peut exister dans tous les environnements où l'énergie est suffisante pour soutenir le l'existence de particules chargées. Ce plasma représente plus de 99% de la matière de notre univers. Il fait partie de la vie quotidienne, naturelle ou artificielle, du soleil qui produit la lumière aux milliers de pixels sur l'écran de télévision récent, passant dans le tube.



(Figure I.1): Exemples de plasmas dans l'environnement

#### II. Définition d'un plasma

Un plasma est obtenu à partir d'un gaz en lui apportant suffisamment d'énergie pour qu'une partie ou la totalité des particules neutres constituant ce gaz se transforment en espèces chargées positivement et/ou négativement (Figure I.2). Un plasma est donc constitué en général d'électrons, d'ions, de particules neutres (atomes, molécules, radicaux libres) et de photons. Il existe aussi dans un plasma des atomes ou molécules dits *«excités »* (les électrons ne sont pas arrachés, mais portés dans des états d'énergie potentielle élevée en restant liés au noyau) qui peuvent se désexciter en émettant de la lumière [1].



(Figure I.2): Passage du Gaz neutre au Gaz ionisé [1].

Malgré son existence depuis l'éternité le plasma comme état de la matière a été étudié pour la première fois en 1870 par **Sir W. Crooks**, physicien anglais, puis nommé ainsi par le physicien américain **Irving Langmuir** en **1928** par analogie avec le plasma sanguin. Le plasma qui représente l'état d'un gaz partiellement ou totalement excité est supposé électriquement neutre du point de vue macroscopique (Figure I.3) [1].



(Figure I.3): Différents états et principaux changements d'état de la matière [1].

#### II.1 Grandeurs caractéristiques

#### I.1.1 Paramètres physiques des plasmas

Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être ainsi classifiés en fonction de certains paramètres précis. Ces paramètres sont essentiellement [2]:

- Densité électronique
- Taux d'ionisation
- Température électronique
- Libre parcours moyen
- Longueur de Debye

**Densité électronique** : la  $\tau i$  densité électronique n'est le nombre d'électrons libres par unités de volume (cm-3).

**Taux d'ionisation :** le taux d'ionisations représente le rapport du nombre d'électrons libre ne sur le nombre de particules totales $n_{e+}N$ , où N est le nombre de particules neutres par unité de volume. Le taux d'ionisation est alors donné par :

$$\tau_i = \frac{n_e}{n_e + N} \tag{I.1}$$

On utilise également le rapport ne/N qui traduit l'importance des collisions entre particules chargées par rapport aux collisions entre particules chargées et neutres.

**Température électronique** : *Te* est la température électronique qui correspond à la température absolue en Kelvin (°K) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique  $k T_e$  (en électronvolt eV) avec k la constante de Boltzmann, sachant que

 $k T_e \approx 1.4 \times 10^4 K.$ 

Libre parcours moyen : le libre parcours moyen  $\lambda$  correspond à la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions.

Il dépend de la vitesse des particules, ainsi que de la probabilité de collision.

**Longueur de Debye :** la longueur de Debye  $\lambda_D$  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 opposées dans le volume environnant.

Elle est donnée par la relation suivante :

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

Avec  $\varepsilon_0$  la permittivité du vide  $(8,84 \times 10^{-12} F/m)$  et e la charge élémentaire d'un électron  $(1,6 \times 10^{-19} C)$ .

#### II.2 Différents Types de Plasma

Les plasmas électriques peuvent être classés aussi selon la température ces particules chargées électrons/ions en trois grandes catégories [1] (Figure I.4) :

Les « plasmas chauds » (étoiles, plasma de fusion...), dont la température des ions et des électrons est supérieure à 10 millions de degrés. Ces derniers ont sensiblement la même énergie et par conséquent la même température. Le gaz est complètement ionisé (Equilibre thermodynamique). Pour ce type de plasma, il existe alors deux grands types de collisions entre ces éléments. Les collisions élastiques, qui ne participent pas directement à l'activation du gaz, mais sont responsables de la conduction et de la diffusion de la chaleur. Les collisions inélastiques responsables de changements au niveau d'énergie interne des molécules, de la nature des particules (ionisation, dissociation, attachement électronique, etc.), sont fonction de l'énergie cinétique des électrons.

Les « plasmas thermiques » (arc électrique), sont des milieux gazeux partiellement ionisés ou fortement ionisés dans lesquels toutes les particules (molécules, atomes, ions, électrons) ont à peu près la même énergie cinétique moyenne (températures voisines  $T_e \approx T_i \approx T_n$ ) (Equilibre thermique). On peut supposer qu'ils sont aussi en équilibre thermodynamique ce qui permet de définir une température unique, dont la valeur dans les régions les plus chaudes peut atteindre 20000 °K (à cette température le plasma restepartiellement ionisé). Les plasmas utilisés dans les réacteurs à fusion sont du type thermique. L'un des désavantages des plasmas thermiques est leur caractère destructif par leur température élevée au contact des matériaux.

Les « plasmas froids », où les électrons ont une température supérieure à celle des ions ou des neutres ( $T_e \succ T_n$ , de l'ordre de 300 à 1500 °K). Dans ce cas, le gaz est faiblement ionisé avec un taux d'ionisation compris entre10<sup>-6</sup> et 10<sup>-2</sup>Hors équilibre thermodynamique). Hors équilibre thermodynamique, les différentes particules (électrons, ions, atomes, molécules) ont des énergies moyennes très différentes.

L'énergie moyenne des électrons est typiquement de plusieurs eV (1 eV correspond à  $11600 \, {}^{\circ}K$ ), tandis que la température du gaz reste proche de la température ambiante, d'où l'appellation de « plasmas froids ». Ainsi, la majeure partie de l'énergie ne sert pas à chauffer le gaz mais à produire des espèces chimiquement actives: espèces métastables, dissociées et ionisées.

En effet si la puissance dissipée par unité de volume dans le milieu dépasse une valeur seuil pendant un temps suffisamment long, on passe brusquement et de façon souvent incontrôlée d'un système hors équilibre thermodynamique à un système proche de l'équilibre thermodynamique. Cela correspond, dans le cas d'une décharge électrique dans un gaz, au passage du régime luminescent ou diffus au régime d'arc.



(Figure I.4): Types de plasmas électriques [1].

#### III. Définition de la décharge électrique

Ce sont des phénomènes crées dans les gaz suite à une application d'une tension capable à rendre ce dernier conducteur. Selon le niveau de cette tension on obtient un courant traversant se milieu gazeux, dont on peut caractériser cette décharge.

On peut parler de trois catégories de décharges électriques :

1/ Naturelles : si elles sont créées spontanément dans la nature telles que la foudre avec distance de rupture de quelques centaines de mètres.

2/ Artificielles non contrôlées : observées par exemple dans les postes de transformation sur les dispositifs de coupure, avec des distances de quelques mètres ou l'effet couronne sur les lignes de transport électrique HT.

3/ Artificielles contrôlées : telles que les décharges luminescentes et les arcs à souder [3].

#### III.1 Caractérisation courant tension des décharges électriques

On peut localiser chaque type selon la tension appliquée et le courant obtenu de la décharge dans une caractéristique tension – courant en tenant compte d'autres paramètres tels que la distance inter-électrodes la configuration, la pression et la température ambiante...

(Figure I.5) donne un exemple de cette caractéristique.



(Figure I.5): Caractéristique courant - tension des décharges électriques [2].

✓ **Zone I** : le courant est très faible ( $\leq 10^{-12}$  A/cm<sup>-2</sup>), dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou rayonnement cosmique. Dans ce cas, le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique.

✓ Zone II : lorsque la tension atteint une valeur seuil V, le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule environnante. Le processus d'avalanche se déclenche alors sans que le critère d'auto-entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire : on parle de régime de Townsend non entretenu. Le courant reste faible (≤10<sup>-9</sup>A/cm<sup>-2</sup>).

✓ Zone III : ici la décharge ne s'éteint plus car la condition d'auto-entretien est atteinte. La composante continue (représentative de la charge d'espace) augmente avec la tension.

✓ Zone IV : Une hausse significative de tension permet d'atteindre le régime de plasma hors d'équilibre le plus énergétique (décharge luminescente anormale).

 $\checkmark$  Zone V : les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrode le régime des décharges disruptives telles que les arcs électriques [2].

#### IV. Différentes types de décharge à plasma froid

#### **IV.1** Plasmas micro-ondes

Dans ce type de plasma, le gaz est ionisé par injection d'une énergie micro-onde (rayonnement électromagnétique) de fréquence variable entre 300 MHz et 10 GHz. Ces plasmas ne sont pas générés à l'aide d'électrodes, comme dans le cas des décharges électriques, mais avec des systèmes à cavité résonante, à guide d'onde ou à effet de surface, alimentés par un générateur de type magnétron ou surfatron.

Les plasmas micro-onde sont caractérisés par une bonne uniformité en volume ou en surface et sont principalement utilisés à basse pression dans les procédés de traitement de surface, de dépôt de couches minces et de gravure (Lin 1988) (Füner 1999) ou, plus récemment, pour la stérilisation de l'instrumentation médicale (Villeger 2005) (Ricard 2005). Ces plasmas sont également utilisés à la pression atmosphérique dans le domaine de l'analyse spectroscopique (Green 2001) et dans le traitement de surfaces métalliques (Tendero 2005) et

des matériaux (Cardoso 2007). La figure I.6 montre un dispositif expérimental qui génère les plasmas micro-onde pour la stérilisation de l'instrumentation médicale [4].



(Figure I.6): Schéma d'un dispositif utilisé pour la stérilisation de l'instrumentation médicale par post décharge micro-onde en flux (Ricard 2010) [4].

#### **IV.2** Plasmas radiofréquence

Les ensembles dits radiofréquence fonctionnent avec une alimentation électrique sinusoïdale dont la fréquence est de 13,56 MHz ou une de ses harmoniques (27,12 et 40,68 MHz). Ces systèmes comportent, outre le générateur, un appareil d'adaptation d'impédance et le réacteur. Les générateurs utilisés sont de type amplificateurs, tandis que l'horloge est pilotée par quartz (grande précision et stabilité de la fréquence). La géométrie du réacteur dépend quant à elle du procédé de traitement envisagé. Le couplage entre le réacteur et l'alimentation électrique peut être de type capacitif (le gaz à ioniser est situé entre deux électrodes planes ou cylindriques) ou inductif (le réacteur est placé dans l'axe d'un solénoïde).

L'adaptation en impédance permet, de son coté, d'optimiser le transfert d'énergie au milieu ionisé en égalisant les impédances de sortie du générateur et d'entrée du réacteur (qui dépend de la pression, du type de gaz excité ou du type de couplage utilisé) [4].

#### V. Décharges électriques à la pression atmosphérique

Le plasma froid non thermique est créé à l'aide d'une décharge électrique hors équilibre établie entre deux électrodes par application d'une tension (continue, alternative ou pulsée).

Les électrons énergétiques sont créés lors de leur accélération par le champ électrique au sein même du milieu gazeux contrairement aux procédés à faisceaux d'électrons, où les électrons énergétiques sont injectés dans le milieu à partir d'une source externe. Lorsque l'énergie gagnée par le champ est suffisante, ont lieu les collisions inélastiques qui forment le plasma réactif recherché. Comme à la pression atmosphérique la décharge électrique possède généralement une structure filamentaire (le régime diffus relève plutôt d'une particularité de la source de tension ou de la composition du gaz ou encore de la nature du diélectrique dans le cas d'une décharge DBD), le plasma est donc spatialement inhomogène (filament lumineux très fins de quelques dizaine de micromètres) tout en étant dans un régime transitoire de courte durée (quelques dizaines de nanosecondes).

Selon que la configuration des électrodes, les décharges électriques à la pression atmosphérique peuvent être de type couronne (lorsque l'électrode portée à la haute tension a une structure incurvée) ou DBD (lorsque une ou les deux électrodes sont recouvertes d'un diélectrique) [5].

#### V.1 Décharge à barrière diélectrique

Les décharges à barrières diélectriques, sont caractérisées par la présence d'au moins une couche de matériau isolant en contact avec la décharge (Figure I.6), ce qui nécessite l'emploi d'une alimentation alternative ou pulsée. Dans ce type de décharge, le passage à l'arc électrique est empêché grâce à un isolant placé entre les électrodes. L'accumulation des particules chargées sur la surface du diélectrique, au moment de l'arrivée des filaments de décharge sur le diélectrique, génère un champ électrique qui s'oppose au champ externe dû à la tension appliquée entre les électrodes. Au fur et à mesure que les charges électriques se déposent sur le diélectrique, le champ électrique vu par le gaz diminue, ce qui induit à l'extinction de la décharge avant que les processus de thermalisation du gaz dans le canal de décharge n'aient eu lieu



(Figure I.7): Configurations existantes de décharges à barrière diélectrique [5].

Dans l'air à pression atmosphérique avec une distance inter-électrodes de quelques millimètres, le plasma est constitué d'une succession de filaments très fins (~ 100  $\mu$ m) qui traverse l'espace gazeux sur des temps très courts (~ 10ns).

On utilise généralement une tension alternative avec une fréquence de répétition de quelques kHz pour générer un plasma réactif assez riche en espèces actives. Mais pour une source d'espèces actives encore plus efficace, on peut aussi utiliser des sources pulsées en particulier mono-polaires (tension uniquement positive par exemple) où l'inversion des charges se produit non pas lorsqu'on passe de l'alternance positive à l'alternance négative comme dans les DBD classiques mais lorsqu'on passe de la partie montante à la partie descendante de l'impulsion de tension de plus dans le cas des configurations d'électrodes classique, la décharge se développe principalement dans le volume gazeux. Il existe d'autres géométries d'électrodes où on peut être en présence d'une DBD de surface lorsque les deux électrodes sont en contact avec la même barrière diélectrique car le plasma se développe le long de la surface isolante. Ce type de géométrie peut être notamment utilisé pour les actionneurs plasmas [5].



(Figure I.8): Géométrie de DBD générant de décharge de surface [5].

(c)

#### V.2 Décharges couronnes

#### V.2.1 Définition

La décharge couronne fait partie de la famille des plasmas froids non thermiques. Elle se produit d'habitude aux alentours de la pression atmosphérique. Elle est toujours associée à deux électrodes, l'une à un petit rayon de courbure (pointe ou fil), est soumise à une haute tension. L'autre électrode a un rayon de courbure beaucoup plus grand (plaque plate ou cylindre). La polarité de la couronne dépend de la nature de la tension appliquée à l'électrode de faible rayon de courbure (Figure I.9) [1].



(b)

(Figure I.9): Exemples de décharges couronne [1].

(a) Décharge couronne à polarité positive.

(a)

(b) Décharge couronne à polarité négative.

(c) Décharges couronne lumineuse produite entre des pointes et une électrode plane reliée à la terre.

#### V2.2 Les Configurations courantes de la décharge couronne

Les jeux d'électrodes que l'on retrouve couramment dans les décharges couronnes sont de type : (Fil – Cylindre), (Pointe – Plan), (Fil – Plan), (Multi-pointes- Plan) (Figure I.10).

• Le système d'électrodes « fil – cylindre » est très utilisé pour la dépollution en volume.

• Le système mono pointe – plan à l'avantage de pouvoir isoler une décharge d'une part.

• Le système « multi pointes – plan » à l'avantage de pouvoir contrôler la répartition des décharges le long de l'écoulement.

Plusieurs géométries de répartition d'électrodes sont aussi possibles : En forme de hérisson, en alignement de dents de scie, en brosse sur une surface, etc. De plus, des

paramètres de réglage supplémentaires apparaissent, par exemple la densité des pointes, leur positionnement le long de l'écoulement ou leur rayon de courbure [1].



(Figure I.10): Différentes configurations de décharge couronne [1].

#### V.2.3 Différents types des décharges couronnes

On distingue deux types de décharges couronnes selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure [1] :

- Les décharges couronnes à polarité positive.
- Les décharges couronnes à polarité négative.

#### VI. Application de la décharge couronne

Actuellement la décharge couronne est largement utilisé dans de nombreuses applications surtout physico-chimiques parmi les principales applications sont [6]:

- Traitement de surfaces par un nettoyage et une modification de la chimie des surfaces.
- Traitement et dépollution des gaz, par l'élimination des effluents toxiques présents en quantité minoritaire dans des milieux gazeux occupant de grands volumes (ce qui est le cas des gaz d'échappement).
- Fabrication de l'ozone à partir d'un fort taux de production d'oxygène ou de l'air sec.
- Production de plasma et d'éclairage.
- Séparation électrostatique de matières conductrices et non-conductrices.

#### VI.1 Modèle analytique pour déterminer la tension seuil de décharge couronne

Un modelé physique proposé pour l'étude est représenté par la figure I.11, il s'agit d'une configuration pointe - plan, ou la décharge électrique de type couronne peut être créée

facilement, ce qui implique qu'une formation d'un champ électrique fortement inhomogène est repartie sur tout l'espace inter- électrodes [6].



(Figure I.11): Répartition du champ électrique dans une configuration pointe - plan [6].

#### VI.2 Approche mathématique pour déterminer le champ électrique

Dans ces conditions une certaine modélisation mathématique nécessaire pour permettre d'estimer la répartition spatiale du champ électrique sur tout l'espace inter-électrodes, cette dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter électrodes.

En l'absence de charge d'espace, et en se basant sur la proposition de Coelho et Lama pour exprimer le champ électrique sur une géométrie hyperbolique simple en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie **ox** [6] :



(Figure I.12): Représentation d'une configuration hyperolique-plan [6].

Le champ en point M ( $\zeta\eta$ ) de coordonnées hyperboliques s'écrit de la manière suivante :

$$E(\zeta - \eta) = \frac{C}{a \cos \zeta \left(\cos h^2 \eta - \sin^2 \zeta\right)^{1/2}}$$
(I.3)

Où C est une constante qui dépend de la tension appliquée à la pointe. Lorsque le paramètre  $\zeta$  qui définit l'hyperbole égale à zéro on se trouve sur l'axe OY(plan) par contre si  $\zeta = \pi/2$  cela corresponde à l'axe OX, où le champ peut s'exprimer en utilisant les équations hyperboliques suivantes :

 $x = a \sin \zeta . \cos h\eta$  Et  $y = a \cos \zeta . \sin h\eta$ 

Ce qui permet d'écrire d'après lama, le champ le long de la distance inter-électrodes.

$$E(x) = \frac{2.V}{\ln\left[\frac{\left(1+\frac{r}{d}\right)^{1/2}+1}{\left(1+\frac{r}{d}\right)^{1/2}-1}\right]} \cdot \frac{d\left(1+\frac{r}{d}\right)^{1/2}}{d^{2}\left(1+\frac{r}{d}\right)(d-x)^{2}}$$
(I.4)

Pour  $r \ll d$ , l'expression (I.5) peut prendre la forme réduite.

$$E(x) = \frac{2.V}{\ln\left[\frac{4.d}{r_c}\right]} \cdot \frac{d}{d.(2x+r_c) - x^2}$$
(I.5)

Pour une configuration pointe-plan du type pointe parabolique plan, une autre expression mathématique établie par, permet de calculer le champ éclectique,

$$E(x) = \frac{2.V}{(2x + r_c).\ln\left[\frac{2.d + r_c}{r_c}\right]}$$
(I.6)

Avec : E(x) est le champ électrique, V : Tension appliquée à la pointe,

x: l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine.

 $r_c$ : Rayon de la courbure de la pointe à son extrémité, et d : est la distance interélectrodes.

Par conséquent, le maximum du champ électrique qui est au niveau de la pointe hyperbolique est donné par l'expression.

$$E_{max} = \frac{2.V}{r_c \ln\left[\frac{4.d}{r_c}\right]} \tag{I.7}$$

Pour une distance inter-électrodes, d = 10mm, et pour plusieurs rayons de courbure, une simulation a été fait pour démontrer la répartition du champ électrique en appliquant trois niveaux de tension sur les électrodes, les résultats sont représentés par les figures suivantes ;



(Figure I.13): Distribution du champ électrique appliqué pour une distance inter-électrodes d = 10 mm et des différentes tensions respectivement, a)V=5 KV, b) V=10 KV et c) V=20 KV [6].



Figure I.14: Distribution du champ électrique appliqué pour une distance inter-électrodes d =20 mm et des différentes tensions respectivement, d) V=5 KV, e) V=10 KV et f) V=20 KV [6].
### Chapitre I

Les courbes représentés par les figures I.13 et I.14, donnent l'allure de la variation du champ électrique appliqué à la pointe hyperbolique, ce dernier devient plus important en fonction de l'augmentation de la tension appliquée, ces courbes sont obtenus à des tensions respectivement 5, 10 et 20 kV, cependant nous avons présenté l'effet du rayon de courbure de la pointe sur l'intensité du champ électrique.

Nous pouvons déjà dire que plus ce rayon de courbure n'est faible, plus le champ électrique autour de cette électrode n'est important par contre, lorsque l'on s'éloigne de l'électrode active, la valeur du champ électrique diminue fortement.

Les résultats représentés sur la figure I.14 montrent une croissance du champ électrique avec la tension appliquée sur les électrodes et sa diminution avec l'augmentation de la distance inter-électrodes pour un même rayon de courbure de la pointe [6].

#### VII. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté un aperçu sur les plasmas électriques en commençant par une définition et des grandeurs caractéristiques les plus importantes qui concernent le paramètre physique et les différents types de plasmas (les plasmas chauds, thermique et froids). Puis nous avons expliqué la décharge électrique et ces catégories par une définition et même ces caractéristiques tensions courant, et après avoir cité les différents types des décharges électriques, nous avons bien définis la décharge couronne et ces configuration courant, les types de décharge couronne afin de préparer le terrain pour ce qui suis dans ce travail.

## Chapitre II :

Etude de la décharge couronne par le dispositif expérimental

#### I. Introduction

Ce chapitre présente le dispositif expérimental utilisé pour réaliser les mesures et les observations optiques des grandeurs opératoires tels que le courant instantané, le courant moyen, la tension aux bornes de la décharge en plus de la visualisation morphologiques en imagerie de la propagation de la décharge dans l'espace inter-électrodes.

Une description détaillée sur les différentes parties de dispositif est donnée suivie par quelques échantillons de mesures et d'imagerie qui sont rapportées à la fin de ce chapitre.

#### II. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimentale décrite dans cette section comprend le réacteur corona utilisé, et Configuration du plan de pointe ou de l'électrode multi-pointes et type d'alimentation électrique Choisissez de mener cette recherche. Nous décrivons ci-dessous les différents systèmes de diagnostic, Faisons des recherches électriques et spectroscopiques.



(Figure II.1): Schéma de principe de dispositif expérimental adopté pour l'étude électrique et optique [5].

#### II.1 Cellule- réacteur

Le schéma général du dispositif expérimental adopté dans cette étude est représenté sur la Figure II.1. Au centre de ce schéma on trouve la cellule, elle est sous forme d'une croix à six branches en inox avec un volume de 3L. Elle possède diverses ouvertures, qui nous permettent d'avoir [5] :

- > Un passage de connexion électrique haute tension
- Un passage du gaz.
- > Une disposition des diagnostics optiques.
- Une évacuation du gaz.
- Un passage de connexion électrique basse tension avec une colonne Z (réglage de la distance inter-électrodes).



(Figure II.2): Photographie du dispositif expérimental du réacteur à décharge couronne mono et multi-pointes plan [7].

Parmi les six ouvertures de la cellule on trouve deux hublots qui s'ouvrent rapidement et qui nous permettent un accès facile à l'intérieur de la cellule pour pouvoir, entre autre, changer les électrodes et qui sont :

### Chapitre II

La cathode est un disque (Figure II.3) de 2 cm d'épaisseur, dont le rayon doit être au moins deux fois supérieur à la distance inter-électrodes pour limiter les effets de bord. Le diamètre choisi est de 40 mm.



(Figure II.3): Photographie du plan utilisé.

La cathode dont le matériau constitutif est le cuivre, étant reliée à la masse par l'intermédiaire d'une résistance de très faible valeur ohmique r=50  $\Omega$ .L'électrode active (anode) est une pointe en tungstène (Figure II.4).

Le diamètre du cylindre à partir duquel sont usinées les pointes est de 1 mm, sa longueur est de 5 cm et son rayon de courbure  $\rho$  est de 20µm. Les deux électrodes sont séparées par une distance inter-électrodes réglable de l'extérieur grâce à une colonne Z, sans ouverture du réacteur. Les électrodes sont changées systématiquement entre chaque série d'expérience. En effet, les plans présentent parfois des traces d'usures visibles à l'œil nu et sur les pointes on observe parfois de multiples points d'érosion et des irisations d'oxydation, l'état de surface de celle-ci est vérifié à l'aide d'un stéréo-microscope (Leica S8 APO) qui possède un pouvoir de grandissement de 200.



(Figure II.4): Photographie d'une pointe de rayon de courbure  $\rho=20\mu m$ .

Après avoir fini l'étude dans le cas de la configuration pointe-plan, nous avons mis en place un réacteur de laboratoire multi pointe-plan, en se basant sur la cellule que nous avions et en rajoutant plusieurs pointes avec une distance latérale inter-pointes est modifiable (FigureII.5).



(Figure II.5): Photographie du réacteur multi pointes-plan.

#### II.2 Système de pompage et de remplissage

Les différents mélanges gazeux utilisés proviennent de bouteilles prêtes à l'usage et qui sont des bouteilles de type B 50, de 200 bar (air synthétique 80% N 2 - 20% O 2 et azote pur 5.0). Sur chaque bouteille sont installés des manodétendeurs pour limiter la pression dans la partie supérieure de circuit de gaz à quelques bars (Figure II.6).

La purge du réacteur est effectuée par l'association de deux pompes qui permettent d'obtenir un vide secondaire de quelques 10<sup>-4</sup> mbar, une pompe primaire (Figure II-6), qui est une pompe sèche à membrane (Alcatel AMD4C, elle est prévue pour résister au pompage de gaz toxique et oxydant) et une pompe secondaire qui est une pompe turbo-moléculaire (ALCATEL ATH31C). La mesure de la pression à l'intérieur de la cellule se fait à l'aide de deux jauges :

- Une jauge capacitive (ALCATEL ASD1001) qui donne la pression autour de la pression atmosphérique, elle mesure les pressions entre 100 et 1100 mbar.
- Une jauge Pirani-cathode-Froide (ALCATEL ACC1009) pour les basses pressions comprises entre 1 et 10<sup>-4</sup> mbar [5].



(Figure II.6): Circuit d'alimentation du gaz.

#### **II.3 Alimentation électrique**

La décharge peut être alimentée sous deux types de régime de tension, continue ou pulsée. Des alimentations spécifiques ont été réalisées par nos partenaires du Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse dans le cadre du projet « Plasma DeNOx » [8].

#### a. Alimentation en tension continu

Le circuit électrique utilisé dans ce type d'alimentation pour alimenter la cellule de décharge, se compose de plusieurs éléments : le premier est un générateur haute tension continue (SPELMANN SL600), pouvant atteindre une tension maximale de 15kV. Ensuite on trouve une résistance de charge de  $25M\Omega$ , dont le rôle est de limiter le courant dans le circuit en cas de passage à l'arc. La résistance de charge R, est connectée directement à l'électrode active (la pointe) de la cellule de décharge, cette dernière est connectée elle aussi à une résistance de mesure r.



(Figure II.7): Schéma de l'alimentation continue [8].

#### b. Alimentation en tension impulsionnelle

Le régime d'alimentation en tension impulsionnelle est généré par l'intermédiaire d'un commutateur haute-tension (BEHLKE HTS 300-03), commandé par un générateur d'impulsion T.T.L. (MODEL TGP110, 10MHz PULSE GENERATOR). Le générateur d'impulsion T.T.L. est variable, il permet de fixer aisément la durée de l'impulsion  $\tau$ , la fréquence de répétition f et le rapport cyclique. Le schéma de l'alimentation en tension impulsionnelle comprend blocs principaux trois (Figure II.8) : un générateur de haute tension

continue (le même que celui de la Figure II.7), un commutateur Belhke et une cellule de décharge couronne [5].



(Figure II.8): Schéma de l'alimentation impulsionnelle [8].

Le générateur fournit une tension continue, pouvant atteindre 15 kV, transformée par la Suite en tension impulsionnelle par l'intermédiaire du commutateur Behlke (HTS 300-03) commandé par un T.T.L. qui peut régler la fréquence et la largeur de l'impulsion de la tension délivrée à la cellule de décharge. La fréquence maximale qu'on peut atteindre est de l'ordre de 100 Hz, car au-delà de cette valeur, la résistance R de 10 M $\Omega$ , chauffe et on aura comme conséquence une chute de tension très remarquable au niveau de la pointe. La gamme de fréquence de notre commutateur s'étend de 10 Hz à 100 Hz et la largeur de son impulsion de 10  $\mu$ s jusqu'à 500  $\mu$ s. Le switch est connecté à la cellule de décharge couronne, branché en série avec une résistance qui permet de mesurer le courant de la décharge[2].

#### III. Outils de diagnostique

Les outils de diagnostics de la décharge qui ont été utilisés sont de deux types : électriques et optiques. Les moyens de mesure électriques permettent de mesurer le courant instantané et moyen de la décharge. Les moyens de mesure optiques permettent de connaître l'émission lumineuse de la décharge soit par l'intermédiaire d'une photographie de la décharge, soit par son étude spectroscopique. Ces mesures permettent de caractériser la décharge (amplitude, localisation et vitesse des fronts d'ionisations, morphologie...) et aussi d'avoir différents points de comparaison entre le modèle et l'expérimentation [8].

#### III.1 Diagnostique électrique

Les grandeurs électriques mesurées sont la tension inter-électrodes, le courant instantané et le courant moyen. La tension inter-électrodes est mesurée par l'intermédiaire d'une sonde haute-tension (TEKTRONIX P6015A, rapport de conversion de 1 pour 1000, bande passante de 100 MHz, tension maximale de 20 kV, impédance de 50 M $\Omega$ ) disposée entre l'anode et la masse. Les signaux de courant instantané produits par la décharge sont mesurés par l'intermédiaire de la tension aux bornes d'une résistance de mesure de 50  $\Omega$ . Puis, ils sont visualisés sur un oscilloscope (LeCroy Waverunner 6050), qui possède quatre voies d'entrée, une bande passante de 500 MHz et une fréquence d'échantillonnage de 5 G.s-1 alors que le courant moyen de la décharge est mesuré par un ampèremètre numérique (METRIX MX 53B), branché en série entre la cathode et la résistance de mesure (r=50 $\Omega$ ). La Figure II-9, représente schématiquement le dispositif de mesures électriques utilisé dans cette étude [5].



(Figure II.9): Schéma du dispositif de mesures électriques [5].

Les caractéristiques de la sonde de tension sont plus contraignantes que celles de l'oscilloscope. L'oscilloscope choisi se montre ainsi moins limitant que la sonde pour l'étude de la tension et suffisamment efficace pour l'étude du courant. En effet, les variations rapides du courant de la décharge nécessitent, pour être bien définies, plusieurs points de mesures par nanoseconde [8].

La mesure du courant qui circule dans le circuit se fait de deux manières différentes selon que l'on s'intéresse au courant instantané ou au courant moyen :

 L'étude du type de décharge et la détermination du courant instantané sont réalisés par l'intermédiaire de la tension aux bornes d'une résistance de mesure r de 50 Ω.

$$i(t) = )\frac{u_r(t)}{r} = \frac{u_r(t)}{50}$$
(II. 1)

 La détermination du courant moyen nécessite l'utilisation d'un ampèremètre. Pour cela on insère un ampèremètre numérique (METRIX MX 53B) entre la sortie de l'enceinte et la résistance de mesure.

Pour la détermination du courant moyen  $I_{moy}$  servant pour tracer les courbes courant moyen – tension, on insère une sonde de tension (LECROY PP007-WR) divisant par 10 le courant moyen. Celle-ci protège l'oscilloscope des surtensions qui apparaissent lorsqu'il y a passage à l'arc de la décharge. Lorsque l'ampèremètre et la sonde sont présents dans le circuit électrique, il y a beaucoup plus de perturbations visibles sur l'oscillogramme du courant. Les mesures du courant instantané et de l'amplitude maximale du courant ne se feront donc pas en même temps que les mesures de courant moyen [8].

La mesure de la tension inter – électrodes n'est pas perturbée par la présence de la résistance de mesure r qui est très faible 50  $\Omega$  devant la résistance de charge R = 25 M $\Omega$ .

L'écart entre la tension mesurée par rapport à la tension réelle est :

$$\Delta U_r = U_{r\acute{e}el} - U_0 = r \times I_{moy} \tag{II.2}$$

Pour un courant moyen I<sub>moy</sub> inférieur à 100  $\mu A$ , l'écart maximum est de:

$$\Delta Ur = 50 \times 100.10^{-6} = 5.10^{-3}V \tag{II.3}$$

Cette perturbation est négligeable devant les kilovolts qui sont mesurés pour la tension inter – électrodes.

L'oscilloscope donne d'autres mesures telles que [8]:

- $\checkmark$  le courant maximal I<sub>M</sub>,
- ✓ la période de répétition moyenne des impulsions de courant T,
- ✓ l'évolution de la tension inter électrodes  $U_0$ .

Les données obtenues dans la première situation sont utilisées par la suite comme valeurs initiales pour identifier les paramètres électriques décrivant le comportement de la cellule en décharge [7].

Les Figure (II.10) et (II.11), montrent les formes d'ondes du courant instantané et de la tension inter-électrodes affichés sur l'oscilloscope sous forme de graphe et qui sont aussi enregistrées sous formes de données numériques exploitées ultérieurement dans le calcul d'identification.





d=11mm, v=9,5kV et 
$$\rho$$
=25 $\mu$ m [7].



(Figure II.11): Courant instantané de décharge couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour d=11mm, v=9,5kV et ρ=25μm [7].

#### **III.2 Diagnostique optique**

Les moyens de diagnostiques optiques permettent une visualisation photographique et une évaluation de l'activité de l'émission radiative de la décharge. Par l'intermédiaire de deux types de cameras installées en face des hublots (rapide et streak), la localisation de la décharge, la détermination de la vitesse des fronts d'ionisations et la visualisation de la morphologie de la décharge est possible [7].

Le développement de la décharge entre la pointe et le plan est suivi par deux caméras: Une caméra ICCD et une caméra à balayage rapide (streak caméra).

La figure présente une photographie d'une impulsion de décharge sous une alimentation continue prise par une caméra ICCD.



(Figure II.12): Photographie de la décharge en régime « breakdown streamer » à l'aide de la caméra streak pour un temps de balayage de 100 ns (rayon de courbure 20μm, tension continue appliquée 7.5kV, distance inter-électrodes 7mm) [7].

#### IV. Analyse spectroscopique

La spectroscopie d'émission optique est un diagnostic basé sur l'analyse spectrale de la lumière émise par le plasma. Cette technique d'analyse permet d'identifier les différentes espèces excitées émettant dans le spectre de la lumière visible.

La Figure II.13, représente le spectre d'émission de la décharge couronne impulsionelle dans l'azote pur, dans une gamme spectrale du 200 nm jusqu'à 500 nm, pour une distance inter-électrodes de 8 mm, une tension appliquée de 8 kV, une fréquence de 100 Hz et une largeur d'impulsion de 40  $\mu$ s [5].



(Figure II-13): Spectre d'émission de la décharge couronne dans l'azote pur à la pression atmosphérique pour d=8mm, Va=8kV, f=100Hz, τ=40μs, ρ=20μm, temps d'exposition : 1s et réseau de diffraction : 2400 traits/mm [5].

#### V. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description du dispositif expérimental, que nous avons rédigé pour effectuer une étude électrique paramétrique et optique dans l'air synthétique et dans l'azote pur à la pression atmosphérique, en régime de tension continue et impulsionnelle. Ce dispositif expérimental est composé d'un réacteur corona mono pointeplan, une alimentation continue et impulsionnelle, des moyens de mesures et d'imagerie associés avec des moyens de diagnostics électrique et optique. La partie correspondant au conditionnement du gaz est également décrite (systèmes d'arrivée et de pompage des gaz).

Le chapitre suivant, présentera les résultats obtenus dans l'air synthétique à la pression atmosphérique dans une configuration d'électrodes pointe-plan en régime de tension continue et impulsionnelle.

## Chapitre III :

Modèle électrique et identification paramétrique de la décharge couronne pointe-plan

#### I. Introduction

La modélisation électrique d'une décharge couronne à pour objectif notamment l'étude du comportement électrique, énergétique et optique de cette dernière afin d'évaluer la quantité d'énergie injectée dans le milieu gazeux et par conséquence l'efficacité du procédé plasma. Le modèle obtenu dépend de l'ensemble de circonstances opératoires réelles du système étudié. Nous représentons le modèle par un circuit équivalent qui représente le comportement électrique en fonction de paramètres électriques dynamiques à identifiés en utilisons certains méthodes et/ou algorithmes.

Deux modèles électriques proposés, représentant la décharge couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique dans une configuration pointe-plan, sous les deux modes alimentations en tension continue et impulsionnelle seront détaillés dans ce chapitre.

#### II. Comportement électrique d'une décharge couronne pointe-plan

Nous avons vu que les décharges couronnes font parties des plasmas froids, où seuls les électrons qui sont énergétiques dans le milieu plasmagène.

Le rôle du convertisseur que joue une décharge électrique à travers l'ensemble des phénomènes physico-chimiques d'une source extérieure (électrique et /ou magnétique) vers un gaz pour le rendre conducteur dépend du comportement électrique de la décharge. Ce dernier représente la manière dont cette énergie est transférée et convertit au sein du gaz. C'est ce qu'on appel le couplage, source d'énergie-gaz [7].

#### III. Modalisation de la décharge point-plan sous une alimentation continue

La décharge couronne pointe plan que nous venons de la modéliser, déroulera dans les conditions opératoires pratiques suivantes :

- Alimentation impulsionnelle appliquée  $(E_{app})$
- Air synthétique sec  $(80\%N_2, 20\%O_2)$
- Pression atmosphérique
- Température ambiante

• Rayon de courbure de la pointe  $\rho = 25 \mu m$ 

Nous commençons par l'explication de l'aspect physique de la décharge afin d'élaborer le modèle de la décharge à identifier [7].

#### III.1 Aspect physique de décharge pointe-plan positive

Le processus fondamental provoquant une décharge couronne se base sur le phénomène de streamer déjà détaillé dans les chapitres précédents. Ce phénomène crée conjointement deux effets électriques dépendant l'un à l'autre. Il s'agit d'un effet résistif localisé dans le canal de plasma engendré et un effet capacitif localisé en amant de la tête du canal du plasma dû au phénomène d'ionisation a cette région.

Néanmoins la propagation de la décharge dépend strictement du niveau de la tension appliquée ce qui traduit qu'on peut assister à deux comportement le premier sans décharge si le niveau de la tension appliquée est inferieur au seuil de la tension de décharge ou avec décharge si il le dépasse.

A la présence d'une décharge, la disposition de ces deux effets qui formule en général le modèle équivalent du comportement électrique de la décharge. Cette disposition et par conséquence le modèle représentative de la décharge dépend en sa majeur partie au type d'alimentation électrique appliquée aux bornes de la décharge.

Dans notre cas nous utilisons deux modes d'alimentation en continu et en impulsionnel amenant à deux modèles électriques équivalents détaillés dans ce qui suit.

#### III.1.1 Comportement d'un réacteur sans décharge

Habituellement, lorsque la tension appliquée n'est toujours pas suffisante pour provoquer La propagation de la décharge, le système d'électrodes se comporte comme un condensateur Valeur fixe. Un certain nombre d'études ont confirmé le comportement du réacteur à décharge corona Si la tension appliquée est relativement faible, elle est électriquement similaire à un condensateur. Dans ces conditions, un courant de déplacement est généré sous faible action Le champ électrique dans l'espace entre les électrodes. Le courant dépend strictement de La géométrie de l'électrode. Par conséquent, dans l'application de différents Le potentiel électrique entre les armatures (électrodes), qui génère un champ électrique E dans l'espace Gazeux. Par conséquent, les électrons existants se déplaceront vers l'électrode sous l'action du champ Actif, génère une avalanche électronique en entrant en collision avec des molécules présentes dans celui-ci Milieu gazeux.

L'expression du courant capacitif s'écrit de la façon suivante [5]:

$$i(t) = c_0 \frac{dv(t)}{dt}$$
(III. 1)

Avec :

 $C_0$ : est la capacité géométrique du système

*i*: Est le courant traversant l'espace inter-électrodes

v : est la tension relevée aux bornes des électrodes.

La valeur de la capacité géométrique peut être obtenue de deux manières différentes :

- Soit par mesure directe à travers un capacito-mètre si cela est possible.

- Soit elle se détermine indirectement par l'intermédiaire de mesure des grandeurs électriques (courant, tension) basant sur la relationc(t) = q(t)/v(t).

Selon la géométrie de système d'électrodes, on distingue trois cas possibles.

- > Cas d'une géométrie d'électrodes symétriques
- Cas d'un système d'électrodes doté d'une barrière diélectrique
- Cas d'une géométrie d'électrodes asymétrique

Les géométries à système d'électrodes asymétrique qu'on peut rencontrer dans les réacteurs à décharge couronne sont en générale : pointe plan, multi-pointes plan, couteau cylindre, fil plan, et d'autres. Ces figurations permettent d'accroître significativement les valeurs du champ électrique au niveau de l'électrode de faible rayon de courbure.

Dans ce type de géométrie, vue la difficulté voir même l'impossibilité de mesurer ou de calculer analytiquement la valeur de la capacité, on fait appelle à une méthode alternative.

Cette dernière consiste à déterminer la valeur de la capacité par l'intermédiaire des mesures des grandeurs électriques du courant et de la tension de deux manières.

\* Soit en faisant le rapport instantané entre les valeurs de la forme d'onde du courant et celle de la dérivée temporelle de la forme d'onde de la tension, prisent à un niveau suffisamment faible de la tension.

\* Soit en faisant le rapport entre les valeurs de l'intégral de la forme d'onde du courant et celles de la forme d'onde de la tension mesurées toujours à un niveau suffisamment faible, afin de ne pas induire une décharge par effet corona [7].

#### III.1.1.1 Calcul de la capacité géométrique du réacteur pointe-plan

Une série de mesures des courants capacitifs pour plusieurs distances inter-électrodes sous faibles tensions appliquées ( $E_a$ ), a été réalisée afin d'évaluer la capacité du réacteur en chaque distance inter-électrodes (d), de notre dispositif expérimental [7].



(Figure III.1): Forme d'onde de la tension inter-électrodes obtenue suite à une impulsion de Tension appliquée ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm) [7].



(Figure III.2): Forme d'onde du courant capacitif mesuré sous une impulsion de tension appliquée ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm) [7].

Les conditions opératoires sont les suivantes : largeur d'impulsion,50  $\mu s$  fréquence de répétition f=100 Hz, distance inter-électrodes, rayon de courbure de la pointe  $\rho = 25\mu m$ . Les Figures III.1 et III.2 ci-dessus, montrent respectivement, la forme d'onde de l'impulsion de la tension appliquée (niveau de la tension  $E_a = 4.2kv$ , distance inter-électrodes d = 7mm), et la forme d'onde du courant capacitif obtenu avec un pas d'échantillonnage de 20*ns*.

La courbe du courant présente deux impulsions correspondantes aux fronts montant et descendant de l'impulsion de la tension appliquée.

En effet, la variation de la tension sur le front montant impose une différence de potentiel appliquée aux électrodes et un champ électrique dirigé vers la cathode. Par conséquent, des avalanches électroniques dirigées vers l'anode sont ainsi créées et donnent naissance à une circulation d'un courant de fuite dans le circuit externe. Ce courant charge la capacité géométrique du réacteur ce qui donne la première impulsion. Le courant revient au zéro quand la capacité du réacteur est totalement chargée car la tension se stabilise.

Le même processus se répète lors de la variation de la tension en front descendant, ce qui donne la deuxième impulsion qui sera négative car la polarité est inversée.

Il est à noter que la présence d'une composante parasite de caractère continue superposée à la tension et au courant mesuré, influe considérablement sur les résultats. Ce problème est survenu lors de l'intégration du courant et/ou la dérivation de la tension. Pour éviter ce problème, cette composante doit être éliminée avant toute utilisation des mesures en calcul.

Les Figures III.3 et III.4, présentent respectivement les allures du courant intégré par rapport au temps et la tension dérivée par rapport au temps utilisées pour calculer la capacité du réacteur à vide par les deux méthodes précitées dans le cas suivant

 $(d = 5mm, E_a = 4, 2kV)$  [7].



(Figure III.3): Forme d'onde du courant capacitif intégré dans le cas ( $E_a$  = 4.2 kV, d = 7mm) [3].



(Figure III.4): Forme d'onde de l'impulsion de la tension dérivée dans le cas  $(E_a = 4.2 \ kV, \ d = 7mm)$  [7].

La Figure III.5, ci-dessous montre les allures des deux capacités obtenues soit par intégration du courant soit par dérivation de la tension, qui permettent par la suite de calculer la valeur de la capacité correspondante à la distance inter-électrodes choisie comme c'est expliqué en haut.



(Figure III.5): Forme d'onde des capacités géométriques calculées en fonction des formes d'onde du courant et de la tension dans le cas ( $E_a$  = 4.2 kV, d = 7mm). Sous une configuration Pointe-plan [7].



(Figure III.6): Valeurs des capacités géométriques calculées à vide pour plusieurs distances Inter-électrodes dans une configuration pointe plan [7].

La figure III.6 montre l'évolution de la capacité géométrique à vide calculée pour un ensemble de distances inter-électrodes (d) comprises entre 9 et 3 mm, en augmentant cette dernière par pas de -0,5 mm. Le dernier résultat permet également de vérifier la répartition de l'effet capacitif le long de l'espace entre les électrodes, notamment au niveau du canal haute tension. Si vous considérez le diagramme équivalent de la capacité entre la pointe et le plan sans décharge :





La courbe de la Figure III.7, montre une nette augmentation qui est presque linéaire de la capacité équivalente de l'espace inter-électrodes en diminuant la distance inter-électrodes cette diminution proportionnelle à la variation de la distance inter-électrodes. Ce résultat montre que l'effet capacitif de l'espace inter-électrodes l'emporte sur celui causé au niveau du passage hautes tensions (au niveau la pointe et la cathode).

Ce résultat respecte la tendance de variation de la capacité géométrique en fonction de la distance inter-électrodes pour des configurations symétriques exprimée.

**Remarque :** Il est à noter qu'il est possible d'utiliser la méthode des images pour calculer mathématiquement les valeurs de la capacité créée dans l'espace inter-électrodes on utilisant la tension appliquée mesurée.

L'obtention des valeurs des capacités de la configuration pointe plan est très important car elles seront utilisées comme valeurs initiales pour déclencher le calcul de la capacité variable du réacteur en décharge [7].

#### III.1.2 Comportement d'un réacteur avec décharge

#### III.1.2.1 Comportement d'un réacteur avec décharge en tension continue

D'après les observations pratiques, lorsque la tension appliquée à une configuration d'électrodes asymétrique, dépasse le seuil de régime Onset (comportement sans décharge), une décharge couronne à fréquence de répétition stable est enregistrée. Cette décharge est traduite par un changement de conductivité et un passage d'un courant électrique.

La physique des décharges couronnes repose sur la théorie de propagation des streamers qui a été expliquée au premier chapitre. En bref, un streamer se développe en direction du champ électrique appliqué selon le mécanisme suivant. Sous l'action du champ électrique intense au niveau de l'électrode active une onde ionisante propage et laisse derrière elle un canal équilibré électriquement. Alors qu'elle continue sa propagation jusqu'à ce que l'espace interélectrodes soit totalement court-circuité, elle arrive à établir un canal plasma liant les deux électrodes, c'est ce qu'on appelle une décharge couronne filamentaire. Il est à noter qu'il est possible d'observer une deuxième onde ionisante moins forte que la première et qui succède directement l'établissement du premier filament, appelée un second streamer

En décharges couronnes filamentaire, telle que notre décharge pointe plan, l'ensemble des études est des observations expérimentales montrent que le canal de décharge est caractérisé par des faibles valeurs du champ électrique tandis que sa tête qui contient ce qu'on appelle la charge d'espace est marquée par des valeurs du champ assez importantes. Les images suivantes prises au laboratoire, montrent la morphologie réelle de notre décharge pointe plan avec toutes ses phases de propagation visualisées [7].



(Figure III.8): Observation expérimentale de la propagation d'une décharge pointe plan positive obtenue par caméras ICCD et Streak.par simulation.

Électriquement, l'espace inter-électrodes se comporte comme une résistance infinie à l'instant du commencement de la décharge. L'activité d'ionisation initiée à cet instant par à l'anode sous l'action du champ intense provoque une onde ionisante à deux effets :

- Le court-circuit progressif de l'espace inter-électrodes au fur et à mesure que l'onde ionisante avance.

- La multiplication de la quantité des charges positives causée par l'activité ionisante. Ces deux effets ont également deux conséquences :

- ✓ Un changement en résistance de l'intervalle inter-électrodes,
- ✓ La création d'un dipôle capacitif à anode fictif mobile.

La partie déjà court-circuitée de l'espace inter-électrodes est en série géométriquement avec le dipôle capacitif. A cet effet, la propagation du streamer augmentera la longueur du canal conducteur, tout en diminuant de la distance de séparation entre les deux électrodes du dipôle capacitif. Ceci impliquera que ni la capacité formée par la tête du streamer et la cathode ni la résistance du canal conducteur (lissé derrière), ne sont constantes. De plus, la charge d'espace créée par l'activité d'ionisation à la tête du streamer imposera un champ électrique local qui se dirige dans le même sens que celui initialement appliqué. Le champ résultant renforcera de sa part l'accroissement de la charge d'espace et l'allongement du canal conducteur. Ainsi, on assistera par cet effet mutuel à une variation non linéaire de la charge d'espace et de la distance soit par l'allongement du canal conducteur, soit par le rapprochement entre les électrodes du dipôle capacitif résultant. D'autre part, sachant que le même courant de décharge traversera le dipôle capacitif et le canal conducteur, on peut conclure que notre décharge couronne pointe plan positive se comporte électriquement comme une résistance non linéaire en série avec une capacité non linéaire.

Une phase de relaxation commence dès l'impacte de la charge d'espace en tête de streamer sur la cathode. A cet instant, la charge positive à la tête commencera à s'évacuer progressivement à travers la cathode alors que les électrons produits par ionisation s'évacuent rapidement par l'anode bénéficiant de la baisse importante de la résistance à travers le canal conducteur qui vient de s'établir entre l'anode et la cathode. Le déclenchement d'un second steamer est probable si la tension appliquée reste capable à conquérir les conditions du milieu qui sont modifiées par le passage du premier streamer.

En conclusion, on vient de proposer un modèle électrique équivalent à notre décharge pointe plan positive à la pression atmosphérique [7].

✤ Le schéma symbolique suivant synthétise le circuit électrique équivalent proposé [7].



(Figure III.9): Schéma électrique représentatif simplifié d'une décharge pointe plan Continue positive [7].

Considèrent que l'impédance du plasma comporte une capacité  $C_{dis}$  en série avec une résistance  $R_{dis}$ , qui représente la résistance des micro-décharges filamentaire et  $C_{dis}$  qui est différente de la capacitance du gaz  $C_g$ . Ils considèrent que la variation de la capacité de décharge est due au changement dans la permittivité relative du gaz durant l'ionisation [7].

#### III.1.2.2 Comportement d'un réacteur avec décharge en tension impulsionnelle

Physiquement, la décharge couronne en régime d'alimentation impulsionnelle est caractérisée par une propagation arborescente des filaments de décharge (streamers), ce sont donc plusieurs streamers qui se développent simultanément de la pointe en direction du plan avec des vitesses de propagation différentes. La figure III-10 (a) montre une photograhie prise lors de développement d'une décharge couronne impulsionnelle [2].



(Figure III-10): (a) Image de la décharge couronne dans l'air sec à la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de  $10ns: V_a = 8kV, \tau = 40\mu s, = 100Hz, d = 8mm, \rho = 25\mu m.$ 

(b) Courant instantané de la décharge couronne pour, $V_a = 8kV$ ,  $\tau = 40\mu s$ , = 100*Hz*, d = 8mm,  $\rho = 25\mu m$  dans l'air sec et à la pression atmosphérique [2].

Le mécanisme de propagation de la décharge en chaque branche est semblable à celui enregistré lors d'une décharge mono-filamentaire sous une alimentation continue.

Comme c'est montré sur la figure III-10(a), chaque branche présente donc un effet résistif qui s'additionne parallèlement avec les autres et en série avec celui du tronc qu'il les réunit. D'autre part chaque branche présente un effet capacitif en amant de sa tête et un autre mutuellement échangé avec les autres branches.

Sur la courbe du courant figure III-10(b), une bosse importante est remarquée sur le front mentant du courant qui se traduit par un effet capacitif marqué dû normalement à un gradient important en potentiel lors de la monté de variation brusque en tension de la impulsion de la tension appliquée.

Un modèle équivalent proposé basant sur les constatations précédentes présente la décharge couronne pointe-plan sous une alimentation impulsionnelle en fonction d'une résistance variable en parallèle à une capacité variable.

La figure III-11 présente le schéma symbolique qui synthétise le circuit électrique équivalent proposé [3].



(Figure III-11): Circuit équivalent proposé d'une décharge pointe plan impulsionnelle [3].

 $E_a$ : est la tension impulsionnelle d'alimentation du réacteur de décharge.

Rl: est une résistance limitatrice du courant d'alimentation

Cp: représente la capacité parasite résultante des connexions de l'alimentation.

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué en premier lieu le comportement électrique d'une décharge couronne pointe-plan cette partie été nécessaire pour la modélisation de la décharge point-plan sous une alimentation continue et impulsionnelle, que nous avons détaillé par la suite.

Nous avons commencée par une description sur l'aspect physique de décharge pointe plan positive.

Nous avons expliqué tout d'abord le comportement d'un réacteur sans décharge dont il est représenté par une capacité d'une valeur constante équivalente à sa capacité géométrique.

Le comportement du réacteur avec décharge et leurs modèles équivalents, premièrement sous une tension continue puis sous une tension impulsionnelle ont été détaillés et présentés.

# Chapitre IV:

Etude comparative et de synthèse sur les comportements électriques d'une décharge couronne pointe-plan positive en continu et en impulsionnel

## Chapitre IV Etude comparative et de synthèse sur les comportements électriques d'une décharge couronne pointe-plan positive en continu et en impulsionnel

#### I. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude électrique sous deux régimes d'alimentation (tension continue et tension impulsionnelle). Nous avons simulées en utilisant le MATLB comme programme les deux modèles équivalant la décharge couronne pointe-plan en plusieurs points opératoires (distance inter-électrodes, tension appliquée). Dans le cas de l'alimentation impulsionnelle sachant qu'on peut générer la décharge avec des fréquences différentes, nous choisissons la fréquence la plus basse pour être comparer avec le même point opératoire dans le cas de la tension continue.

Nous comparons donc les paramètres électriques des circuits équivalents (résistance et capacité de la décharge), obtenus dans les mêmes points opératoires. Nous analysons les résultats de comparaison a fin d'évaluer les différances entre les deux comportements.

#### II. Simulation de la décharge couronne pointe-plan

Dans cette partie du travail, nous présentons une simulation d'une décharge couronne dans une configuration point-plan dont le but est de comparer les résultats des paramètres électriques obtenus en régime continu par rapport au régime impulsionnelle en choisissant les mêmes points opératoires en terme de distance inter-électrodes et la tension appliquée.

#### II.1 Paramètres expérimentaux de la simulation

La simulation du modèle nécessite l'introduction de certaines données d'entrée (tension, courant et temps dans notre exemple), qui sont obtenues à partir du dispositif expérimental décrit au chapitre 2 précédent, ainsi que certains paramètres de fonctionnement de la décharge.

- Distance inter-électrode (d);
- Rayon de courbure de la pointe ( $\rho$ );
- Fréquence de l'impulsion de la tension d'alimentation (f)

### Chapitre IV Etude comparative et de synthèse sur les comportements électriques d'une décharge couronne pointe-plan positive en continu et en impulsionnel

#### > Détermination des paramètres électriques de la décharge

Les deux modèles de la décharge en continue et en impulsionnelle présenté en chapitre trois seront utilisés pour la simulation de la décharge.

La détermination des paramètres électriques dans les deux cas fait appelle a la méthode d'identification paramétriques basée sur l'algorithme de moindres carrées récursif « MCR » (en anglais Recurcive Least Square RLS).

#### > Paramètres systématiques de l'algorithme d'identification paramétrique

L'algorithme MCR, utilise deux paramètres systématiques à ajustés. Il s'agit de coefficient du gain initial  $\alpha$  et le coefficient d'adaptation ( $\lambda$ ) :

#### ✓ coefficient **du gain initial** alpha ( $\alpha$ )

Le choix de ce paramètre dépond du choix des valeurs initiales des paramètres estimées.

#### $\checkmark$ coefficient de pondération Lambda ( $\lambda$ )

Ce dernier fixe le nombre de valeurs des données anciennes des mesures (vecteurs d'observations) pris en considération par l'algorithme [3].

#### a. Présentation des résultats

#### 1. effet du coefficient du gain initial alpha (α)

Le choix de la valeur de ce coefficient $\alpha$ , dépond de la certitude des valeurs initiales, si nos valeurs initiales sont males choisis la valeur de ce coefficient devrait être plus faible, par contre la valeur de ce coefficient est choisi grande si les valeurs initiales de nos paramètres à identifiés ont une bonne certitude.

Ce choix influx directement sur la convergence des résultats. En simulation, alpha varie entre 10<sup>-1</sup> et 10<sup>-3</sup> ( $10^{-1} < o \le 10^{-3}$ ).

#### 2. Effet du coefficient d'oubli lambda ( $\lambda$ )

Ce coefficient introduit une pondération de plus en plus faible sur le nombre des données anciennes utilisé dans le processus d'estimation paramétrique. C'est pour cette raison que  $\lambda$ , est appelé "coefficient d'oubli". Le poids maximum est donné à la dernière erreur [3].

En simulation, lambda varie entre 0 et1 (0 <  $\lambda \leq 1$ ).

A notre niveau de travail nous présentons les résultats des paramètres estimées obtenus après l'ajustement des deux coefficients et la validation finale de la sortie prédite (courant de la décharge) [3].

#### b. Présentation des résultats

Nous présentons les résultats des paramètres électriques (résistance et capacité de décharge) sous les deux modes d'alimentations chacun de coté puis dans une cadence de comparaison.

## II.2 Estimation des paramètres électriques de la décharge couronne pointe plan sous les deux modes d'alimentation continue et impulsionnelle

Dans cette partie nous présentons les paramètres électriques obtenus sous les deux modes d'alimentation continue et impulsionnelle pour des points opératoires différents. Il s'agit de la résistance et la capacité du circuit équivalent représentant la décharge dans les deux cas d'alimentation.

Les figures IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, représentent les points opératoires choisis de façon à couvrir la bande de mesure où la décharge est possible. En termes de distance inter-électrodes, Les points opératoires choisis sont les suivants : d=6mm,  $E_{app}$ = 6kV, d=8mm,  $E_{app}$ = 8kV et d=9mm,  $E_{app}$ = 9kV sous les deux modes d'alimentation.

### Chapitre IV

Etude comparative et de synthèse sur les comportements électriques d'une décharge couronne pointe-plan positive en continu et en impulsionnel

### Cas de l'alimentation continue

#### Distance inter-électrodes d=6mm, tension appliquée 6kV $\checkmark$



(Figures IV.1): Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=6mm, E<sub>app</sub> =6 kV en continu

Distance inter-électrodes d=8mm, tension appliquée 8kV  $\checkmark$ 



(Figures IV.2): Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=8mm, *E<sub>app</sub>* =8kV en continu



✓ Distance inter-électrodes d=9mm, tension appliquée 9kV



- Cas de l'alimentation impulsionnelle
  - Distance inter-électrodes d=6mm, tension appliquée 6kV
## Chapitre IV

Etude comparative et de synthèse sur les comportements

électriques d'une décharge couronne pointe-plan positive en continu et en impulsionnel



(Figures IV.4): Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=6mm,  $E_{app}$  =6kV en impulsionnelle.

Distance inter-électrodes d=8mm, tension appliquée 8kV



(Figures IV.5): Qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimées, au point opératoire d=8mm,  $E_{app}$  =8kV en impulsionnelle.



## Distance inter-électrodes d=9mm, tension appliquée 9kV

(Figures IV.6): qualité des paramètres électriques R(t) et c(t) estimés, au point opératoire d=9mm,  $E_{app}$  =9kV en impulsionnelle

## > Interprétation

## Tendances globales de variation des paramètres

## ✓ Résistance de la décharge

En observe la même tendance de variation quelque soit le point opératoire choisi. Cette tendance présente trois phases. Une première phase stable avant décharge dans la valeur de la résistance est très grande le milieu reste non conducteur le courant de décharge et presque nul. Une deuxième phase marquée par une chute brusque ou la résistance attient une valeur minimale au même instant au le courant atteint son maximum la dernier phase est la phase de l'atténuation de la décharge la résistance repère progressivement sa valeur initiale au même temps au le courant se déclin progressivement.

## ✓ Capacité de la décharge

Sa tendance de variation présent trois phase qui suit pratiquement la variation du courant la première phase le courant qui presque nul produit très peu de charges, la capacité garde presque sa valeur initiale. Une deuxième phase marqué par l'augmentations très rapide de la capacité et qui correspond a l'augmentation du courant dont il charge au maximum la capacité de système la dernière phase, la capacité se décline a partir de l'instant ou la décharge attient le plan et court-circuit l'intervalle inter-électrodes cette phase dure le temps ou le système évacue la totalité de ses charges

## ✓ Tendance de variation caractéristique des paramètres



(Figures IV.7): Valeur maximale de la résistance estimés pour plusieurs distances inter-électrodes dans une configuration pointe plan.



(Figures IV.8): Valeur maximale de la capacité estimée pour plusieurs distances interélectrodes dans une configuration pointe plan.

Comme première constatation nous remarquons que en augmentons la distance interélectrodes et la tension appliquée, la valeur minimale de la résistance augmente tendis que la valeur maximale de la capacité diminue cela peut être expliquée par le fait que la résistance de la décharge peut être simulé a une résistance d'un conducteur qui dépend de la longueur de son conducteur ainsi que la résistivité de son milieu  $R=f(\rho, l, s)$ . La résistivité et la section de canal de décharge restent pratiquement constants, donc la résistance finale du canal qui représente le minimum de cette dernière dépend de la longueur de son canal qui est égal a la distance inter-électrode.

La variation de la capacité d'un système est anti-proportionnelle à la distance de séparation de ces électrodes, cela confirme le résultat enregistre dans notre cas ou la valeur maximale de la capacité attient augmente en fonction de la distance inter-électrodes de système de décharge.

#### III. Etude comparative entre les deux régimes d'alimentation

Nous comparons les courant, les tensions ainsi que les deux paramètres électriques résistance et capacité de la décharge obtenu en continu et en impulsionnelle deux à deux pour les mêmes points opératoires.

## Exemple :



Distance inter-électrodes d=5mm, tension appliquée 5kV

(Les figures IV.9) a) et b) : Présentent les variations des courants de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement .

On remarque que pour la même tension appliquée, l'intensité maximale de courant dans le cas impulsionnelle est environs 0.9 A qui est envorons cinq fois la valeur en continue. Sur la phase de déscente. On remarque que le courant en impulsionnel présente une bosse contrairement au courant en continu.

On remarque que le courant impulsionnl varie très rapidement dans le temps en virons 0.1 µs par apport à celui dans le cas continu où il varie dans un temps de 0.2µs.

On peut expliquer ces tendences de variation par le suivant : la décharge impulsionnelle crie plusieurs branches liées à une colonne principale cette situation multiple les processus d'ionosation et par consiquence l'intensité des charges créée par cette décharge. L'écoulement des charges créées ce fait sur un seul canal dans le cas continue tendis que cet écoulelment se fait via plusieurs branches dans le cas impultionnelle ce qui explique la variation rapide du courant de décharge dans ce cas.

La bosse observée dans le cas impulsionnel peut être expliquée par le fait que la cession de l'impulsion de la tension provoque une quantité de charge suplimentaire dûe à sa variation.



(Les figures IV.10) c) et d): Présentent les variations des tensions de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement .

On remarque la mème tendence de variation de la tension marquée par une chute de l'ordre de 25 a 30 V dans les deux modes d'alimentation cela explique que la tension influe de la même façon dans les deux cas.

## Chapitre IV

Etude comparative et de synthèse sur les comportements

électriques d'une décharge couronne pointe-plan positive en continu et en impulsionnel



(Les figures IV.11) e) et f): Présentent les variations les résistance de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement .

On remarque que le milieu de la décharge présente au début la même valeur de la résistance sous les deux mode d'alimentation qui est dans ce cas d'une valeur de 70 M $\Omega$ . Dans les deux cas la résistance chute brusquement a une valeur minimale de 0.233 M $\Omega$  en continue et à une valeur de 5.7 k $\Omega$  en impulsionnelle cela confirme que le milieu plasma sous une tension impulsionnelle à une condictivité beaucoup plus superieurs que dans le cas continue à cause de la miltitude des branches conductrices créées en impulsionnelle. On remarque que la reprise de la résistance du milieu est beaucoup plus rapide dans le cas

on peux expliquée cette tendance par le fait que malgré que la décharge impulsionnelle crée plus de charges sans mécanisme de branching lui permette une évacuation plus rapide que le mécanisme unifilamentaire en continu.

impulsionnelle que dans le cas continue.



(Les figures IV.12) g) et h): Présentent les variations les capacité de décharge pour la distance inter-électrodes de 5mm etune tension appliquée de 5kV en continue et impulsionnelle respectivement .

On observe que la capacité dans le cas continu ateint une valeure maximale très grande (Cmax=75pF) par apport a une valeur maximale en impulsionnelle (Cmax= $1.05^* 10^{-14}$  F), il est probable que l'effet capacitif mutuel entre les branches de la décharge s'emporte sur l'effet capacitif des têtes des branches dans un sens où il diminue sa valeur résultente.

Par apport au temps dont il perciste l'effet capacitif, cela dépend du temps nécessaire pour lequel la première tête de décharge atteint la cathode. ce temps dépend strictement de la vitesse de propagation de streamer qui est la même dans les deux cas d'alimentation et qu'est égale la vitesse de la lumière .

## IV. Synthèse sur le comportement électrique d'une décharge couronne sous deux différents modes d'alimentations électriques

## > En termes de courant :

La valeur du courant moyen de la décharge est beaucoup plus basse en régime de tension continue qu'en régime de tension impulsionnelle. Cela donc, c'est un avantage pour un réacteur alimenté en régime de tension impulsionnelle pour la dépollution des gaz toxique par exemple.

## > En termes de résistance :

le milieu plasma sous une tension impulsionnelle à une conductivité beaucoup plus superieurs que dans le cas continue à cause de la miltitude de branche conductrices créées en impulsionnelle.

## En termes de capacité :

l'effet capacitif mutuel entre les branches de la décharge dans le cas de la décharge impulsionnel s'emporte sur l'effet capacitif des têtes des branches dans une tendance à diminue sa valeur résultente. Cet effet mutuel est inexistant dans le cas continue ce qui explique le fait que les valeurs maximales des capacités atteintes en impulsionnel est inférieurs à celles atteintes en continu.

## > En termes de puissance :

La puissance de la décharge est le produit résultent de la tension aux bornes de la décharge et du courant résultent. Nous avons remarqué que la tension garde la même valeur dans les deux modes d'alimentation.

La différence donc est liée a la variation du courant en peut conclure que le courant impulsionnelle écoule une puissance plus importante que celle enregistrée dans le cas continue.

## > En termes d'énergie:

L'énergie dépend dans notre cas de la valeur du courant et du temps nécessaire pour écouler la puissance injectée, on remarque que en plus de l'effet du courant le temps influe dans le même sens que le courant dont t'il augmente la valeur de l'énergie consommée par la décharge impulsionnelle contrairement au cas de la décharge continue.

#### V. Conclusion :

Nous avons effectué dans ce chapitre une étude électrique comparative paramétrique dans le cas de deux régimes d'alimentation (tension continue et tension impulsionnelle). Tout d'abord nous avons calculé dans quelques points opératoire (en fonction de la distance inter-électrodes et la tension appliquée) les paramètres électriques résistance et capacité de la décharge sous les deux types d'alimentation continue et impulsionnelle.

Suite à une comparaison entre les courants, les tensions et les paramètres électriques (la capacité, la résistance) pour des mêmes points opératoires nous avons constaté que :

- les valeurs des courants en impulsionnelle sont plus grandes que celles enregistrées en continues
- ✓ la tension aux bornes de décharge présente la même variation et la même chute de tension
- ✓ les valeurs minimales atteintes de la résistance sont assez grandes en continue par apport aux valeurs obtenues en impulsionnelle.
- ✓ Les valeurs maximales de la capacité atteintes, sont très supérieurs en continue par apport à celles obtenus l'impulsionnelle.

Une synthèse globale sur le comportement électrique sous les deux modes d'alimentations en terme courant, résistance, capacité, puissance et énergie.



Dans ce travail, nous avons réalisé une étude sur le comportement électrique de la décharge couronne pointe-plan sous deux types d'alimentation électrique continue et impulsionnelle.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre à présenté une vue panoramique sur les décharges électriques et en notamment les décharges couronnes. Une attention particulière est réservée aux décharges créées sur une configuration géométrique pointe-plan.

Le deuxième chapitre est réservé à la description de dispositif expérimental utilisé pour l'obtention des données nécessaires pour la modélisation électrique de la décharge couronne pointe-plan en impulsionnel et en continu.

Le troisième chapitre expose les deux modèles électriques proposés et qui sont exploités par la suite pour la simulation de la décharge continue et impulsionnelle.

Le comportement de la décharge en continu est traduit par une résistance variable en série avec une capacité variable contrairement à celui en impulsionnel qui se traduit par une résistance variable en parallèle avec une capacité variable.

Le quatrième et le dernier chapitre récapitule l'ensemble de résultats obtenus par simulation concernant le calcul des paramètres électriques (résistance et capacité variables) pour les deux régimes d'alimentation, continu et impulsionnel en choisissant plusieurs points opératoires en fonction de la distance inter-électrodes et la tension appliquée. Une comparaison entre les courants, les tensions aux bornes de la décharge et les deux paramètres électriques (la capacité et la résistance).

Ce chapitre est concrétisé par une synthèse globale sur le comportement électrique sous les deux modes d'alimentations en termes de courant, de résistance, de capacité, de puissance et d'énergie de la décharge.



## **REFERENCES :**

[1] D. Mekkaoui, " Etude De L'Evolution des Espèces Présentes dans Un Gaz Pur O2 Par Décharge Couronne. ", Thèse Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Juin 2018

[2] A. Mraihi "Réalisation caractérisation et bilan énergétique de réacteurs corona mono et multi-pointes dans l'air à la pression atmosphérique pour application à la décontamination. " PhD thèses, Université de Toulouse III, 2012.

[3] O. Saidi "Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan impulsionnelle." Université Dr. Moulay Tahar de Saïda, 09/2018.

[4] M. MEZIANE "Modélisation 2D et 3D d'un écoulement gazeux instationnaire activé par décharges couronnes dans un réacteur multi-pointes plan dédie a la décontamination des gaz", Université de Toulouse, le Mardi 22/11/2011.

[5] A. ABAHAZEM "Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz "Doctorat de l'université de Toulouse, Décembre 2009.

[6] F. BELOUCIF "Analyse et prédiction des seuils d'apparition des décharges Couronnes dans les gaz isolants en haute tension" Université 8 mai 1945 Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, Soutenue le 26 Octobre 2017.

[7] D. RAOUTI "Contribution a l'étude de la dépollution des gaz toxiques par décharges électriques ", Université des Sciences et de La Technologie d'Oran- Mohamed Boudiaf, Faculté de Génie Électrique, le 2015

[8] D. DUBOIS " Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement." Doctorat de l'université de Toulouse III Soutenue le 20 septembre 2006.

[9] O.DUCASSE" Modélisation électrodynamique d'un réacteur plasmas hors équilibre de dépollution des gaz" Thèse université Paul salarier, Toulouse (2006)