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 d'applicabilité d'un modèle électrique à plusieurs lecteurs mathématique

Présenté par :

\* LAKEHAL Feriel

\* DRICI Hadjira

Devant le jury :

\* Pr. BOUCHIKHI Abdelaziz

\* Dr. RAOUTI Driss

\*Mr. AMARA Mohamed

Président Encadreur Examinateur

Soutenu le 30/09/2020 Promotion 2019-2020



# Remerciement

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 exprimons nos sincères gratitudes au professeur Dr. **RAOUTI Driss** qui a le privilège de nous guider et de nous fournir de précieux conseils qui nous ont aidés à compléter ce travail

\* Je voudrais exprimer mes sincères remerciements aux membres du comité de discussion pour leurs volontés d'accepter la discussion de ce mémorandum et d'enrichir ses aspects de leurs



remarques.

\* Je voudrais également remercier tous les professeurs de la faculté de technologie à l'Université du **Dr. Moulay Tahar**, en particulier les professeurs spécialisés en électrotechnique.

\* Je voudrais aussi remercier tous ceux qui m'ont soutenu même avec un bon mot.

# Dédicace

A la cause de mon être dans la vie

A la lumière qui brille ma vie à ceux qui sons fatigués pour mon confort et pour atteindre mon but. **A mon cher père Menad** 



Au symbole de l'amour, au cœur la plus sincère d'existence. A ceux qui ont fatigué de m'élever et ont porté tous mes sentiments et m'ont enseigné le sens de la vie. **A ma chéré mère Zahra** 

A qui était à coté de moi dans tous les mauvais moments avant le bon moment à mon mari et mon compagnon **Walid** 

A la cause de mon bonheur ceux qui m'ont soutenu et encouragé moi mes frères **Farouk** et **Fawzi** et ma belle sœur **Farida** 

A tout ma famille Lakehal

Et à toute ma famille **Boulanouar** 

A tous ceux qui m'ont connu et sont restés fidèles

Lakehal Feriel



# Dédicace



A mes chers parents

*Mr. Drici Lakhedar* et *madame Ramli Fatna* pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études

A mes chères sœurs et surtout ma sœur **Drici Fatima** pour leur encouragement permanent, et leur soutien moral.

A mes chers frères, pour leurs appuis et leur encouragement.

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

> Que c travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible

> > Merci toujours

Drici Hadjira



Remerciement
Dédicaces4
Table des matières6
Liste des figures10
Chapitre I : Généralités sur les décharges électriques
I. Introduction17
II. Définition d'un plasma17
II -1 Grandeurs caractéristiques19
II -1-1 Paramètres physiques des plasmas19
II-2 Différents types de plasma21
III. Définition de la décharge électrique22
III-1 Caractéristique Courant – Tension23
IV. Différentes types de décharge à plasma froid24
IV-1 Plasmas micro-ondes24
IV-2 Plasmas radiofréquence25
V. Décharges électriques à la pression atmosphérique26
V-1 Décharge à barrière diélectrique26
V-2 Décharges couronne28
V-2-1 Définition28
V-2-2 Les Configurations courantes de la décharge couronne
V-2-3 Différents types des décharges couronnes29
VI. Application de la décharge couronne

VI-1 N	Iodèle analytique pour déterminer la tension seuil de décharge couronne      30
VI-2	Approche mathématique pour déterminer le champ électrique
VII.	Conclusion
Chapit	re II : Présentation du dispositif expérimental de la décharge couronne étudiée.
I.	Introduction
II.	Dispositif expérimental de caractérisation de décharges couronne
	II-1 Cellule –réacteur
II-2	Système de pompage et de remplissage42
II-3	Alimentations électriques43
a. A	limentation en tension continue44
b. A	limentation en tension impulsionnelle44
III.	Outils de diagnostics45
III-1	Diagnostics électriques45
III-2	Diagnostics optiques49
IV.	Analyse spectroscopique52
V.	Conclusion
Chapit	tre III : Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.
I.	Introduction
II.	Comportement électrique d'une décharge couronne55
III.	Modélisation de la décharge pointe plan sous une alimentation impulsionnelle55

III-1 A	Aspect physique de décharge pointe-plan impulsionnelle	.56
III-2 <b>(</b>	Comportement d'un réacteur pointe-plan sans décharge	57
III-2-	1 Calcul de la capacité géométrique du réacteur pointe-plan	.59
III-3	Comportement du réacteur pointe plan avec décharge	.64
IV.	Modèle mathématique	.67
V.	Représentation matricielle du modèle mathématique	68
V-1 F	Représentation matricielle	.69
VI.	Reformulation du modèle mathématique équivalent	70
VII.	Conclusion	74

Chapitre IV : Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

I. Introduction
II. Etudes et analyse des simulations des différents lectures mathématiques du modèle équivalent76
II-1 Paramètres expérimentaux de la simulation76
a. Paramètres systématiques de l'algorithme76
b. Présentation des résultats77
c. Présentation des résultats78
II. Présentation de la simulation de la 1 <sup>ière</sup> lecture
III-1 Modèle utilisé en simulation78
III-2 Présentation des résultats et interprétation79
III. Présentation de la simulation du 2 <sup>ième</sup> lecture

IV-1 Modèle utilisé en simulation81
IV-1-2-1 Présentation les résultats et interprétation84
IV. Présentation de la simulation de la 3 <sup>ième</sup> lecture86
V-1 Modèle utilisé en simulation86
V-1-1-1 Présentation des résultats et interprétation du 1 <sup>ier</sup> cas87
V-1-2-1 Présentation des résultats et interprétation du 2 <sup>ième</sup> cas
V-1-3-1 Présentation les résultats et interprétation du 3 <sup>ième</sup> cas
V. Étude de comparaison et d'erreurs entre les différentes lectures96
VI. Conclusion96
Conclusion générale97
REFERENCES

# LISTE DES FIGURES

Figure I-1	Exemples de Plasmas dans l'Environnement	17
Figure I-2	Passage du gaz neutre au gaz ionisé	18
Figure I-3	Les différents états de la matière	19
Figure I-4	Types de plasmas électriques	22
Figure I-5	Caractéristique courant - tension des décharges électriques	23
Figure I-6	Schéma de dispositif utilisé pour la stérilisation de l'instrumentation médicale par post décharge micro-onde en flux (Ricard 2010)	25
Figure I- 7	Configurations existantes de décharges à barrière diélectrique	27
Figure I- 8	géométrie de DBD générant de décharge de surface	27
Figure I- 9	Exemples de décharges couronne	28
Figure I-10	Différentes configurations de décharge couronne	29
Figure I-11	Répartition du champ électrique dans une configuration pointe – plan	30
Figure I-12	Représentation d'une configuration hyperolique-plan	31
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	34
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) $V=20$ $KV$ .	35
Figure II-1	Schéma général du dispositif expérimental	39
Figure II-2	Photographie de la cellule de la décharge	40

Figure II-3	Photographie des pointes prise à l'aide d'un stéréo-microscope	41
Figure II-4	Photographie du plan utilisé	41
Figure II-5	Photographie des électrodes dans l'enceinte du réacteur (a) mono pointe-plan et (b) multi pointe-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	44
Figure II-9	Schéma symbolique de circuit 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 $d=11$ mm, $v=9,5$ kV et $\rho=25$ µm.	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	Principe de la caméra ICCD	52
Figure III-1	Schéma électrique simplifié d'une décharge pointe plan impulsionnelle.	56
Figure III -2	Forme d'onde de la tension inter-électrodes obtenue suite à une impulsion de tension appliquée ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm).	60
Figure III-3	Forme d'onde du courant capacitif mesuré sous une impulsion de tension appliquée ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm)	60
Figure III-4	Forme d'onde du courant capacitif intégré dans le cas ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm).	61
Figure III-5	Forme d'onde de l'impulsion de la tension dérivée dans le cas ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm)	62
Figure III-6	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,	62

	d = 7mm). sous une configuration Pointe-plan.	
Figure III-7	Valeurs des capacités géométriques calculées à vide pour plusieurs distances inter-électrodes dans une configuration pointe plan.	63
Figure III-8	Localisation des différents effets capacitifs dans l'espace inter-	63
	électrodes dans une configuration pointe-plan	
	Courant instantané de la décharge couronne pour, $V_a = 8kV$	
Figure III-9	$\tau = 40\mu s$ , $= 100Hz$ , $d = 8mm$ , $\rho = 25\mu m$ dans l'air sec et à la	65
	pression atmosphérique	
	(a) Image de la décharge couronne dans l'air sec à la pression	
	atmosphérique pour un temps d'exposition de $10ns$ : $V_a = 8kV$ , $\tau =$	
Eigura III 10	$40\mu s$ , = $100Hz$ , $d$ = $8mm$ , $ ho$ = $25\mu m$	66
Figure III-10	(b) Images de la décharge couronne à différents instants dans l'air sec à	00
	la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de 3ns:	
	$V_a = 8kV, \tau = 40\mu s, f = 100Hz, d = 8mm, \rho = 25\mu m$	
Figure III-11	Circuit équivalent proposé d'une décharge pointe plan impulsionnelle	67
Figure III-12	Circuit équivalent du modèle proposé	69
Figure IV-1	Représentation schématique du système à identifie (1 <sup>ère</sup> lecture,)	79
Figure VI-2	Présentation de la résistance obtenue par la 1 <sup>ière</sup> lecture, pour v=5kv,	80
	d=5mm	
Figure IV-3	présentation de la capacité de la décharge c(t) de la 1 <sup>ière</sup> lecture pour	80
	vd = 5kv, d=5mm	
Figure IV-4	Représentation schématique du système à identifie (2 <sup>ième</sup> lecture, 1 <sup>er</sup>	83
	cas)	
Figure IV-5	Représentation schématique du système à identifie (2 <sup>ième</sup> lecture, 2 <sup>ième</sup>	84
1150101105	cas)	01
Figure IV-6	présentation de la résistance obtenue par 2 <sup>ième</sup> lecture, 2 <sup>ième</sup> cas, pour	84
	v=5kv, d=5mm	0-1
Figure IV-7	présentation de la capacité de la décharge c(t) en utilisant la	85
<i>0</i>	présentation 2, $2^{ieme}$ cas) pour $vd = 5kv$ , d=5mm	

Figure IV-8	Représentation schématique du système à identifier (3 <sup>ième</sup> lecture 1 <sup>ièr</sup> cas).	87
Figure IV-9	présentation de la résistance de la décharge impulsionnelle obtenu par 3 <sup>ième</sup> lecture 1 <sup>er</sup> cas pour v=5kv, d=5mm	88
Figure IV-10	variation de la capacité de la décharge $c(t)$ en utilisant la présentation 3,1 <sup>ièr</sup> cas) pour $vd = 5kv$ , d=5mm	88
Figure IV-11	Représentation schématique du système à identifier (3 <sup>ième</sup> lecture 2 <sup>ième</sup> cas)	90
Figure IV-12	présentation de la résistance de la décharge impulsionnelle pour v=5kv, d=5mm	91
Figure IV-13	variation de la capacité de la décharge $c(t) 3^{ième}$ lecture, 2cas pour vd = 5kv, d=5mm	92
Figure IV-14	Représentation schématique du système à identifier (3 <sup>ième</sup> lecture, 3 <sup>ième</sup> cas)	94
Figure IV-15	variation de la résistance de la décharge impulsionnelle pour v=5kv, d=5mm	94
Figure IV-16	présentation de la capacité de la décharge $c(t)$ de la $3^{ième}$ lecture, $3^{ième}$ cas pour $vd = 5kv$ , d=5mm	95
Figure IV-17	comparaison les capacités c(t) entre les différents lectures	96
Figure IV-18	Comparaison les résistances r(t) entre les différents lectures	97

#### Introduction générale

La matière constituant notre environnement proche se présente essentiellement sous forme solide, liquide ou gazeuse. Au-delà de ces trois états, à haute et à basse températures, deux nouveaux types d'états, les gaz quantiques et les gaz ionisés, se distinguent par l'apparition d'une grande diversité de phénomènes physiques nouveaux [1] :

\* à très basse température, les états supra-conducteurs, superfluides ainsi que les condensats de Bose-Einstein présentent une richesse de comportements associée aux corrélations et aux phénomènes d'échange et de cohérence quantiques.

\* à très haute température, la dissociation puis l'ionisation conduisent à la création de populations d'ions et d'électrons libres et ces charges libres induisent un comportement collectif, non-linéaire, chaotique et turbulent.

On appelle « Plasma ou gaz ionisé » cet état « exotique » de la matière contenant une fraction significative de charges libres. Le plasma peut donc exister dans tous les environnements où l'énergie est suffisante pour maintenir l'existence des particules ionisées. Il représente plus de 99% de la matière de l'univers. Le plasma fait partie de la vie de tous les jours, du soleil qui produit la lumière jusqu'aux milliers de pixels des écrans de télévision récents, en passant par le tube fluorescent

Toutefois, ils passent presque inaperçus dans notre environnement proche, étant donné leurs conditions d'apparition très éloignées des conditions de température et de pression de l'atmosphère terrestre.

Dans ce travail on s'intéresse au phénomène de conversion d'énergie au sein d'un plasma traduit par ce qu'on appelle une décharge électrique. Pour étudier ce mode de conversion d'énergie, le comportement électrique de la décharge qui peut être traduit par un modèle électrique équivalent doit être connu. Dans notre cas, nous étudions comment la multitude des lectures mathématiques d'un modèle peuvent aboutir à des résultats différents en termes de paramètres électriques de ce modèle.

Ce mémoire se compose de quatre (04) chapitres comme suit :

Dans le premier chapitre, nous commençons dans un premier temps par quelques rappels et généralités sur les plasmas, nous rappellerons les différents types de plasma et les grandeurs caractéristiques , dans un second temps, nous allons présenter les décharges électriques et les décharges électriques à la pression atmosphérique ainsi que les caractéristiques couranttension, nous présenterons enfin une décharge couronne et leurs différents types et les configurations géométriques courantes générant ce type de décharge. 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 étudier l'effet du changement des lectures mathématiques représentons notre modèle sur les paramètres électriques identifiés de notre décharge.

Notre clôturons ce mémoire par une conclusion générale qui résume l'essentiel de ce travail.

Chapitre I : Généralités sur les décharges électriques.

#### I. Introduction

La matière constituant notre environnement proche se présente essentiellement sous forme solide, liquide ou gazeuse. Au-delà de ces trois états, à haute températures,

Il y a une quatrième forme de la matière qu'on appelle « un plasma électrique ».

« Plasma électrique est état exotique de la matière ou un milieu gazeux devient sous certaines conditions un gaz partiellement ou totalement ionisé contenant une fraction significative de charges libres. Le plasma peut donc exister dans tous les environnements où l'énergie est suffisante pour maintenir l'existence des particules chargées. Ce plasma qui représente plus de 99% de la matière dans notre univers fait partie de la vie de tous les jours naturellement ou artificiellement, du soleil qui produit la lumière jusqu'aux milliers de pixels des écrans de télévision récents, en passant par le tube fluorescent [1].



Figure I-1 : Exemples de plasmas dans l'environnement [1].

#### 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: Les différents états de la matière [1].

# II -1 Grandeurs caractéristiques

# II -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 :

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

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 entre $10^{-6}$ et  $10^{-2}$ 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.

#### Généralités sur les décharges électriques.

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** Caractéristique Courant – Tension

La variation du courant de décharges en fonction de la tension appliquée à un intervalle de gaz compris entre deux électrodes planes et parallèles est représentée sur la Figure I-5.

Cette caractéristique U(I) comporte différentes zones correspondant chacune à un régime de décharges donné [1].



Figure I-5 : Caractéristique courant - tension des décharges électriques [1].

✓ **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 satisfasse. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire : on parle de régime de Townsend non entretenu. Le courant reste faible ( $\leq 10^{-9}$  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 de 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].

#### V-2 Décharges couronne

#### 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-8) [1].



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

(a) Décharge couronne à polarité positive.

(b) Décharge couronne à polarité négative.

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

#### V-2-2 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 grandes classes de décharges couronnes [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 3.10, 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 hyperbolique-plan [6].

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

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

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.3

Pour  $r \ll d$ , l'expression (I-3) 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.4

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.5

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.

$$E_{max} = \frac{2.V}{r_c \ln\left[\frac{4.d}{r_c}\right]}$$
 I.6

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].

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.

# Généralités sur les décharges électriques.

# Chapitre I

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 le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les u plasmas électriques, en termes de définition et de grandeurs caractéristiques les plus importantes, les différents types de plasma, y compris le plasma froid, et en particulier la décharge de couronne. Nous avons exposé quelques applications de la décharge couronne et sa modélisation.
Chapitre II : Présentation du dispositif expérimental de la décharge couronne étudiée.

# I. Introduction

Ce chapitre est consacré à la description de l'outil expérimental utilisé pour la modélisation électrique de notre décharge. Dans ce travail, nodifférents montages expérimentaux ont été utilisé, pour l'étude des décharges couronnes de type mono-pointe/plan et multi-pointes/plan, nous ferons 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 l'analyse spectroscopique.

# II. Dispositif expérimental de caractérisation de décharges couronne

La figure (II.1) présente un schéma du dispositif utilisé pour étudier les décharges couronne. Ce système est composé de plusieurs parties qu'on va les détailler dans les paragraphes suivantes [2] :

1. Cellule.

2. Système d'alimentation en gaz comprenant la partie injection ainsi le système de pompage.

3. Alimentation électrique.

4. Dispositifs de mesure respectivement électrique, spectroscopique.



Figure II-1: Schéma général du dispositif expérimental [5].

# II-1 Cellule – réacteur

La cellule est représentée sur la figure II-2, On y distingue trois parties essentielles :



Figure II-2 : Photographie de la cellule de la décharge [7].

# • Le corps de la cellule

Il est constitué par une enceinte en inox en forme d'une croix à six branches un volume de 3 Litres, dans laquelle vient se loger un système d'électrodes. La cellule possède diverses ouvertures qui nous permettent d'avoir un passage de connexion électrique haute tension, un passage du gaz, deux hublots pour les diagnostics optique, une évacuation du gaz, un passage de connexion électrique basse tension avec une colonne Z permettant la variation de la distance inter-électrodes [2].

#### Les électrodes

Elle est composée d'une anode et d'une cathode [2]:

- la partie active ou l'anode est une pointe en tungstène sous forme d'un cylindre de diamètre de 1mm et de longueur de 5mm et de rayon de courbure de 25 ou 50 ou 100 $\mu$ m, fixée sur le support d'électrode est portée à la haute tension à travers un passage haute tension.



Figure II-3 : Photographie des pointes prise à l'aide d'un stéréo-microscope [2].

-La partie cathode est un disque en cuivre de 20mm d'épaisseur et 40mm de diamètre, isolé électriquement, porté à la masse, par un joint en Téflon. Dans notre étude le rayon du disque a été choisis environ deux fois supérieur à la distance inter-électrodes en vue de limiter les effets de bord dus aux éventuels gradients de champ électrique à proximité des bords.



Figure II.4 : Photographie du plan utilisé [2].



Figure II-5: Photographie des électrodes dans l'enceinte du réacteur (a) mono pointe-plan et (b) multi pointe-plan [4].

#### 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<sub>2</sub> - 20% O<sub>2</sub> 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  $10^{-4}$  mbar, une pompe primaire 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  $10^{-4}$  mbar [5].



Figure II-6: Circuit d'alimentation du gaz [5].

#### **II-3** Alimentations électriques

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 » [7].

# a. Alimentation en tension continue

Le circuit électrique utilisé pour alimenter la cellule de décharge, se compose de plusieurs éléments: Un générateur de haute tension continue, qui fournit une tension maximale de 10 kv et un courant de 30 mA

Cette alimentation est mise en série avec une résistance de charge R de 25  $M\Omega$ , pour 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 (avec une configuration anodique soit mono-pointe soit multi-pointes) de la cellule de décharge. Cette dernière est connectée elle aussi à une résistance de mesurer comme montre sur la figure II-7.

# Présentation du dispositif expérimental de la décharge couronne étudiée.

Ce régime permet d'effectuer une étude paramétrique simplifiée de la décharge. Par contre, il ne permet pas de contrôler certains paramètres de la décharge tels que la fréquence de répétition des impulsions de courant ou l'énergie injectée dans la décharge [2].



Figure II-7: Schéma de l'alimentation continue [2].

#### b. Alimentation en tension impulsionnelle

En plus des éléments constituants l'alimentation en tension continue, le dispositif d'alimentation en régime de tension impulsionnelle comporte un commutateur de haute tension (BELKE HTS 300-03). Ce commutateur est commandé par un générateur d'impulsion T.T.L; les deux éléments sont responsables de la génération d'une tension impulsionnelle réglable en fonction de certains paramètres cités ci-après [8].

La Figure II-8, montre les différentes parties de l'alimentation en régime de tension impulsionnelle.



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

Les tensions impulsionnelle délivrées par cette alimentation sont caractérisées par les paramètres suivants:

- La durée de l'impulsion T;
- La fréquence de répétition f;
- Le rapport cyclique (rapport entre la durée de l'impulsion et la période),  $C_r = \tau/T$
- Le temps de montée de la tension.  $t_m$

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  $C_r$ .

La tension récupérée à la sortie du commutateur est une impulsion carrée mono-polaire dont la gamme de fréquences a été étendue pour atteindre des hautes fréquences allant jusqu'à 15 *kHz* alors qu'elle était limitée à 100*Hz* dans les premiers temps de la mise en œuvre du réacteur. La largeur des impulsions produites varie de 10  $\mu$ s jusqu'à 500  $\mu$ s. De la même façon que dans le cas du régime d'alimentation en tension continue, le commutateur est connecté à la cellule de décharge couronne, branché en série avec une résistance qui permet de mesurer le courant de la décharge [8].

#### III. Outils de diagnostics

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 [7].

#### **III-1 Diagnostics électriques**

Les moyens de mesure électriques de la décharge sont incérés dans le circuit électrique entre la sortie basse tension de l'enceinte (relié au plan) et la masse pour les mesures de courant et au niveau du passage haute – tension pour la sonde haute – tension [7].



Figure II-9: Schéma symbolique de circuit de mesures électriques [8].

La mesure de la tension inter – électrodes U0 est faite par l'intermédiaire d'une sonde haute – tension (LECROY PPE20kV ou TEKTRONIX 6015A) reliée à un oscilloscope (LECROY WAVERUNNER 6050). Les caractéristiques de la sonde haute – tension sont :

- un rapport de conversion de 1 pour 1000,
- une bande passante de 100 MHz,
- une tension maximale de 20 kV (40 kV en crête à crête),
- une impédance de 50 M $\Omega$ .

Ces caractéristiques couplées à celles de l'oscilloscope permettent de visualiser la montée en tension en régime impulsionnelle. L'oscilloscope choisi possède :

- quatre voies d'entrée,
- une bande passante de 500MHz,
- une fréquence d'échantillonnage de 5  $G.s^{-1}$ .

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 [7].

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 protége 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 [7]

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 :

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

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

$$\Delta U_r = 50 \times 100.10^{-6} = 5.10^{-3} V \qquad \text{II.3}$$

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

L'oscilloscope donne d'autres mesures telles que : [7]

- ✓ le courant maximal  $I_{M}$ ,
- ✓ la période de répétition moyenne des impulsions de courant T,
- ✓ l'évolution de la tension inter électrodes U .

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 [8].

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



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 ρ=25μm [8].



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 [8]

#### **III-2 Diagnostics optiques**

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 [8].

Le développement de la décharge entre la pointe et le plan est suivi par deux caméras:

- ➢ Une caméra ICCD,
- Une caméra à balayage rapide (streak caméra).

#### Caméra à balayage rapide (streak caméra)

Est une caméra TSU C7700 de Hamamatsu couplée avec une caméra ICCD C4742. La décharge est focalisée sur l'entrée de la caméra à l'aide d'une lentille. Le trigger de la caméra est relié au trigger externe de l'oscilloscope par l'intermédiaire d'une ligne à retard. La caméra possède un temps de décalage fixe entre son trigger d'entrée et l'ouverture de sa fente d'entrée qui contraint de synchroniser sur l'impulsion précédente pour photographier une impulsion [8]



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) [8].

#### **Caméra ICCD**

Les mesures d'imagerie sont réalisées dans le visible avec une caméra PI-MAX de Princeton Instruments. A l'aide d'un support mobile, on peut disposer la caméra devant la cellule afin d'obtenir des vues de face de la décharge. Pour focaliser l'image de la décharge sur le capteur CCD de la caméra, on a utilisé un objectif Micro-Nikkor 60mm f/2.8D [5].

La figure (II-13) présente un schéma détaillé de la caméra ICCD, qui a les caractéristiques suivantes [2] :

### a) Environnement

- \* Température de stockage ≤55°C,
- \* Température d'environnement opérationnel : 30°C > T >-25°C,
- \* Humidité relative < 50%.

#### b) Ventilation

\* Caméra: la camera à un système d'auto refroidissement.

# Présentation du dispositif expérimental de la décharge couronne étudiée.

\* Le contrôleur ST-133: il y a un ventilateur situé à l'intérieur, son but est simplement de refroidir le contrôleur électronique. Ce ventilateur fonctionne en permanence lorsque le contrôleur est sous tension [2].

### c) Alimentation

\*Camera: La camera PI-MAX, reçoit son alimentation à partir du contrôleur ST-133 et qui est lui même branché à une source alimentation secteur.

\*Le générateur d'impulsion DG535: Le générateur d'impulsion DG535 de Standford Research permet de moduler l'allumage et l'extinction de la basse tension appliquée à la photocathode, ainsi que la haute tension appliquée entre l'entrée du plateau de microcanaux et l'écran de phosphores.

Le temps d'application de la haute tension régit la durée pendant laquelle les charges s'accumulent sur la matrice CCD « time exposure » [2].



Figure II-13: Principe de la caméra ICCD [2].

#### 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 lumière émise par le plasma est focalisée par une lentille sur une fibre optique. Cette fibre est reliée à un monochromateur dans lequel la lumière est dispersée par un réseau de diffraction et détectée par un capteur CCD.

Le monochromateur a une longueur focale de 0.5 m (SpectraPro 2500i, Acton Research Corporation) et équipé d'un ensemble à trois réseaux de diffraction pour analyser la lumière émise par la décharge (600, 1200 et 2400 traits/mm). Il dispose d'un port de sortie équipé d'une caméra ICCD (PI-MAX, Princeton Instruments) pour les mesures spectrales en continu.

L'acquisition des spectres par l'ensemble du montage est pilotée par un ordinateur utilisant le logiciel d'acquisition et de traitement des données "WinSpec". Chaque spectre est obtenu par accumulation de lumière de milliers de décharges.

L'analyse spectrale a été réalisée dans le visible, sur une gamme de longueur d'onde de 200 nm à 500 nm [5].

#### V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le dispositif expérimental source des données de notre étude. Nous avons commencé par présenter la cellule de la décharge (le réacteur) puis le circuit d'alimentation en gaz y compris le système de pompage et de remplissage.

Après on a détaillé les circuits d'alimentation électriques utilisés à savoir en continue et en impulsionnelle. Nous avons conclu ce chapitre par présenter les outils de diagnostiques électrique et, ainsi que celui de l'analyse spectroscopique.

Dans le troisième chapitre on va présenté la modélisation de la décharge couronne pointe plan impulsionnelle.

Chapitre III : Modélisation électrique d'une décharge couronne pointeplan positive impulsionnelle.

## I. Introduction

La modélisation électrique d'une décharge couronne à pour but la représentation équivalente du comportement électrique responsable de la conversion d'énergie électrique au sein du milieu plasma. Nous exploitons le modèle réalisé dans le contexte de l'étude de ce type de décharge pour effectuer notre étude qui sert à simuler et étudier les résultats de ce modèle en le représentant sous différente lectures mathématiques.

A noté que le modèle est donc représenté par un circuit équivalent constitué de l'ensemble des paramètres électriques de caractères statiques ou variables, capable de reproduire au mieux possible les grandeurs électriques générées réellement par la décharge. [8]

# II. Comportement électrique d'une décharge couronne

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 [8].

#### III. Modélisation de la décharge pointe plan sous une alimentation impulsionnelle

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

- Alimentation impulsionnelle appliquée  $(E_a)$
- Air synthétique sec  $(80\%N_2, 20\%O_2)$
- Pression atmosphérique
- Température ambiante
- Rayon de courbure de la pointe  $\rho = 25\mu m$

Pour élaborer le modèle de la décharge à identifier, nous allons d'abord expliquer l'aspect physique de la décharge [3].

#### III-1 L'aspect physique de décharge pointe plan impulsionnelle

Dans le présent paragraphe nous nous sommes concentrés sur les points qui nous permettent d'imaginer et de proposer notre modèle.

Lorsque une tension impulsionnelle est appliquée à la pointe du système d'électrodes, un passage d'un courant électrique relative au nivaux de cette tension est inscrit malgré que l'espace inter-électrodes est au début un milieu isolant. Le passage d'un courant électrique est le résultat d'un phénomène de décharge électrique dont sa théorie est bien connue alors que la loi d'ohm régissant ce passage reste inconnue et à identifier [3].

Le schéma électrique simplifié d'un réacteur à décharge couronne pointe plan soumis à une alimentation électrique impulsionnelle est donné sur la Figure III-1 [8].



#### Figure III-1: Schéma électrique simplifié d'une décharge pointe plan impulsionnelle [8].

La mise en place des moyens pratiques de mesure et d'imagerie ultra rapide, a permis l'observation d'une onde ionisante appelée streamer qui résulte de la décharge que se crée entre la pointe et le plan. Ce streamer se développe à partir de la pointe sous l'action du champ électrique extérieur créé suite à l'application de la tension impulsionnelle porté à la pointe. Dans la littérature, la plupart des travaux de modélisation électrique, parlent de deux comportements en fonctionnement dans un réacteur à décharge couronne par rapport au

niveau de la tension appliquée. Ces deux comportements sont : *un comportement sans décharge* et *un comportement avec décharge* [3].

### III-2 Comportement d'un réacteur pointe plan sans décharge

Généralement, lorsque la tension appliquée sur le système d'électrodes est insuffisante pour provoquer la propagation de la décharge, ce système se comporte comme un condensateur à valeur fixe. Plusieurs travaux ont confirmé que le réacteur à décharge couronne se comporte électriquement comme un condensateur si la tension appliquée est relativement faible.

Dans ces conditions, un courant de déplacement prend naissance sous l'action d'un faible champ électrique dans l'espace inter-électrodes. Ce courant dépend strictement de la configuration géométrique des électrodes. Ainsi, un champ électrique E est généré dans l'espace gazeux suite à l'application d'une différence de potentiel entre les électrodes. Les électrons présents vont donc se déplacer sous l'action de champ vers l'électrode active, en créant des avalanches électroniques par collisions avec les molécules présentes dans le milieu gazeux.

L'expression du courant capacitif s'écrit de la façon suivante [8]:

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

Avec :

 $C_0$ : est la capacité géométrique du système

 $\dot{l}$ : est le courant traversant l'espace inter-électrodes

 $\mathcal{V}$  : 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 relation c(t) = q(t)/v(t)

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

#### Cas d'une géométrie d'électrodes symétriques

Les géométries les plus connues dans le domaine des décharges couronnes de ce type sont : plan-plan, cylindre-cylindre ou sphériques concentriques, ... etc.

L'exemple suivant explique la méthode de calcul de la capacité quant il s'agit d'un condensateur à électrodes symétriques planes. Le condensateur est constitué de deux plans conducteurs de surface A, séparé d'une distance d relativement faible par rapport aux dimensions des cotés de la surface A. Il nous résulte un champ électrique E uniforme entre les armatures donné par [8] :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{A\varepsilon_0} \qquad \qquad \text{III. 2}$$

La différence de potentiel entre les armatures est alors donnée par :

$$V = E_d = \frac{Qd}{A\varepsilon_0}$$
 III. 3

La capacité est alors obtenue en appliquant la définition :

$$C = \frac{Q}{\frac{Qd}{A\varepsilon_0}} = \frac{A\varepsilon_0}{d}V$$
 III. 4

Donc, la capacité géométrique pour cette configuration est donnée par :

$$C = \frac{A\varepsilon_0}{d}$$
 III. 5

On constate que, la capacité dépend de la constante diélectrique du milieu entre les armatures, ainsi qu'aux facteurs géométriques.

Elle est proportionnelle à la surface des armatures A et inversement proportionnelle à la distance entre deux armatures.

#### > Cas d'un système d'électrodes doté d'une barrière diélectrique

Dans ce type de décharge couronnes, en plus du diélectrique gazeux, un diélectrique solide sur l'une ou les deux électrodes est présent. La constante du diélectrique englobe la constante du diélectrique gazeux de l'air pure  $\varepsilon_0$  et celle du diélectrique solide en présence donc  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  La capacité est alors déduite de la même façon que dans le cas d'une configuration à électrodes sans diélectrique mais on prend cette fois-ci en considération la nouvelle constante diélectrique [8].

# > 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 [8].

#### III-2-1 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 [8].

59



Figure III-2: Forme d'onde de la tension inter-électrodes obtenue suite à une impulsion de tension appliquée ( $E_a$ = 4.2 kV, d = 7mm) [8].



Figure III-3 : Forme d'onde du courant capacitif mesuré sous une impulsion de tension appliquée ( $E_a$  = 4.2 kV, d = 7mm) [8].

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-2 et III-3 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*.

# Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.

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-4 et III-5, 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



 $(d = 5mm, E_a = 4, 2kV)$  [8].

Figure III- 4: Forme d'onde du courant capacitif intégré dans le cas  $(E_a = 4.2 kV, d = 7mm)$  [8].



Figure III-5 : Forme d'onde de l'impulsion de la tension dérivée dans le cas  $(E_a = 4.2 \ kV, d = 7mm)$  [8].

La Figure III-6, 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 -6 : 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 [8].



Figure III-7: Valeurs des capacités géométriques calculées à vide pour plusieurs distances inter-électrodes dans une configuration pointe plan [8].

La Figure III-7, montre l'évolution de la capacité géométrique à vide calculée pour un ensemble de distances inter-électrodes (*d*) entre 9 et 3 *mm*, en incrémentant cette dernière d'un pas de -0,5 *mm*. Ce dernier résultat peut être également exploité pour vérifier la distribution de l'effet capacitif le long de l'espace inter-électrodes surtout au niveau des passages hauts tensions. Si on considère que sans décharge le schéma équivalent des capacités localisées entre la pointe et le plan est le suivant :



Figure III-8 : Localisation des différents effets capacitifs dans l'espace inter-électrodes dans une configuration pointe-plan [8].

La courbe de la Figure III-8, 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 par l'équation (III-5).

**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 [8].

#### III-3 Comportement du réacteur pointe plan avec décharge

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 voir figure III-10 (a).

La figure III-10, (b) présente des images de la décharge couronne à différents instants dans l'air sec à la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de 3ns et pour : une tension  $V_a = 8kV$ ,  $\tau = 40\mu s$ , = 100Hz, d = 8mm,  $\rho = 25\mu m$ .

L'amorçage de la décharge liée à des processus d'ionisation intenses correspond à la fore luminosité de la décharge observée sur l'image à l'instant t = 3 ns de la figure III-10 (b).

Cette image montre que ces processus d'amorçage sont localisés autour de la pointe. Ceci est directement corrélé au premier pic du courant de la figure III-9.

Les instants à 9,12 *ns* et 21 *ns* de la figure III-10 (b), montre la propagation du primary streamer de la pointe vers le plan. Les branches ou filaments du primary streamer arrivent à la

cathode séparément avec une vitesse moyenne de propagation estimée à environ

 $2,72 \times 10^7 cm s^{-1}$  (images correspondant à 33 *ns* et 48*ns* sur la figure III-10 (b)). Après

# Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.

l'arrivée du primer streamer à la cathode, le seconder streamer commence à se développer à partir de la pointe en se propageant vers le plan (photos correspondant à 63 *ns* et 72 *ns* sur la figure III-10 (b)). Il faut signaler qu'avec les paramètres opératoires utilisés, la propagation du second streamer ne dépasse pas la moitié de la distance inter-électrodes. Ensuite, on observe une phase de relaxation qui se poursuit jusqu'au l'extinction de la décharge (voir les images de la figure III-10 (b) pour les instants108 *ns*, 132 *ns*, 162 *ns* et 189 *ns*). Cette phase s'accompagne par une évacuation des charges d'espace créées dans la zone inter-électrodes, pour permettre au champ de recouvrer sa forme géométrique initiale (champ intense autour de la pointe qui décroit ensuite jusqu'au plan). C'est à cet instant que la formation et la propagation de nouvelles décharges deviennent possibles.

Dans cette étude, nous travaillons avec des fréquences de l'alimentation électrique beaucoup plus faible que la fréquence naturelle de la décharge (environs 20kHz) pour éviter les effets mémoires et permettre ainsi aux charges d'espaces créées dans le milieu gazeux de s'évacuer avant chaque série de décharges [2].



Figure III-9 : Courant instantané de la décharge couronne pour,  $V_a = 8kV, \tau = 40\mu s, = 100Hz, d = 8mm, \rho = 25\mu m$  dans l'air sec et à la pression atmosphérique [2].



Figure III-10 :(a) Image de la décharge couronne dans l'air sec à la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de 10*ns* :  $V_a = 8kV$ ,  $\tau = 40\mu s$ , = 100Hz, d = 8mm,  $\rho = 25\mu m$ (b) Images de la décharge couronne à différents instants dans l'air sec à la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de 3 *ns* ::  $V_a = 8kV$ ,  $\tau = 40\mu s$ , f = 100Hzd = 8mm,  $\rho = 25\mu m$  [2].



Le schéma symbolique suivant synthétise le circuit électrique équivalent proposé [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. Modèle mathématique

Le courant résultant dans la décharge  $i_d(t)$  donné par le circuit équivalent est régit par l'équation suivante [3] :

$$i_d(t) = i_{rd}(t) + i_{cd}(t)$$
 III.6

 $i_d(t)$ : Le courant traversant la décharge ;

 $i_{rd}(t)$ : Le courant traversant la résistance variable de la décharge ;

 $i_{cd}(t)$ : Le courant traversant la capacité variable de la décharge.

En remplaçant  $i_{rd}(t)$  et  $i_{cd}(t)$  par leurs expressions équivalentes dans l'équation (III-6), on obtient :

$$i_d(t) = \frac{v_d(t)}{r_d(t)} + \frac{dq(t)}{dv(t)}$$

Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.

$$i_d(t) = \frac{v_d(t)}{r_d(t)} + i_{cd}(t)$$
$$i_d(t) - i_{cd}(t) = \frac{v_d(t)}{r_d(t)}$$

$$v_d(t) = Ri_t(t) - Ric_d(t)$$

Avec  $C(t) = \frac{q(t)}{v_d(t)}$ 

L'équation peut être donnée comme suit :

$$i_{d}(t) = \frac{v_{d}(t)}{r_{d}(t)} + i_{cd}(t) = \left[\int i_{d}(t)\right]' = [c.v_{d}]'$$
 III.7

 $v_d(t)$ : La tension aux bornes de la décharge.

q(t): représente la charge accumulée durant la phase de décharge correspondant à une impulsion de courant de la décharge.

# V. Représentation matricielle du modèle mathématique

Le modèle obtenu dans le chapitre précédent est représentée en circuit équivalent montré sur la figure suivante.

Ce circuit permet l'obtention du modèle mathématique qui peut être écrit de plusieurs façons en considérant la branche capacitive comme étant un générateur de courant capacitif  $i_c(t)$  [3].



Figure III.12 : Circuit équivalent du modèle proposé [3].

Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.

$$i_d(t) = i_c(t) + i_r(t)$$
 III.8

Le courant capacitif s'écrit en fonction de la charge accumulée comme suit:

$$i_c(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$
 III.9

Le courant résistif est donné par:

$$i_r(t) = \frac{v(t)}{r(t)}$$
 III. 10

Le courant total de la décharge noté  $i_d(t)$  est donc :

Si on remplace la charge q par sa valeur au niveau de l'équation (III.8), on obtient :

En prenant en considération la variation de la capacité sachant que q = c. v on obtient un courant de décharge dont la forme de son équation est :

$$i(t) = \frac{v(t)}{r(t)} + c(t)\frac{dv(t)}{dt} + v(t)\frac{dc(t)}{dt}$$
 III. 11

$$i_{d}(t) = c(t)\frac{dv(t)}{dt} + v_{d}(t)\frac{dc(t)}{dt} + \frac{v_{d}(t)}{r(t)}$$
 III.12

#### **V-1 Représentation matricielle**

Pour la représentation matricielle l'ensemble des grandeurs seront substituées par des vecteurs dont le système d'équation matriciel est présenté sous la forme [3]

$$y(i+1) = \theta_1 u(i) + \theta_2 y(i) \qquad \text{III. 13}$$

En posant :

$$u(t) = i(t)(courant)$$
,  $y(t) = v(t)(tension)$ 

De même les vecteurs d'observation notés $X^T$ , et les vecteurs des paramètres notés  $\theta$  se présentent comme suit :

- Vecteur d'observation  $X^T[u(i), y(i)]$
- Vecteur des paramètres  $\theta \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$

Pour commencer on a besoin de  $\theta_1$  (à l'instant t=0) et  $\theta_2$  (à l'instant t=0) qui dépendent aux valeurs de r(t = 0) et c(t = 0)

### VI. Reformulation du modèle mathématique équivalent

Par cette reformulation, on réécrit l'équation mathématique décrivant notre modèle équivalent de la décharge impulsionnelle en plusieurs versions dans le but est de l'exploitées dans la phase de simulation du modèle [3].

A partir de chaque représentation trois éléments seront bien définit qui sont :

- La ou les grandeurs représentants les entrées du modèle ;

- La ou les grandeurs représentants les mesures (observations) ;

- La ou les grandeurs représentants les paramètres à identifiés.

# • <u>1ère représentation</u> :

On considère la tension de la décharge comme étant une entrée de notre modèle, on peut écrire :

$$v_d(t) = r(t)i_r(t) = r(t)(i_d(t) - i_c(t))$$
 III. 14

$$v_d(t) = r(t)i_d(t) - r(t)i_c(t)$$
 III.15

Dans ce cas sachant que le courant de la décharge est connu on peut le considérer ainsi que la résistance (dont ses valeurs sont prises arbitrairement au démarrage de la simulation) comme des grandeurs mesurées (observées).

Les grandeurs à identifiées seront donc le courant capacitif  $i_c(t)$  et la résistance qui sera corrigée automatiquement après le démarrage de simulation.

La représentation matricielle de l'équation (III.15) est donnée par :

$$[v_d(t)] = \begin{bmatrix} \theta_1(t) = r(t) \\ \theta_2(t) = i_c(t) \end{bmatrix} [i_d(t), r(t)]$$

 $v_d(t)$ : La tension aux bornes de la décharge.

#### • <u>2ème représentation</u> :

On considère la tension de la décharge aux bornes de la résistance, on a :

$$v_d(t) = r(t)i_r III.16$$

Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.

Sachant que le courant résistif est donné par :

$$i_r(t) = i_d(t) - i_c(t)$$
 III. 17

Le courant capacitif c'écrit comme suit :

$$i_c(t) = c(t)\frac{dv(t)}{dt} + v(t)\frac{dc(t)}{dt}$$
 III. 18

L'expression du courant résistif devienne donc :

$$i_r(t) = i_d(t) - c(t)\frac{dv(t)}{dt} + v(t)\frac{dc(t)}{dt}$$
 III. 19

L'équation (III.19), peut s'écrire comme suit :

$$i_r(t) = i_d(t) - c(t)\frac{v(t+dt) - v(t)}{dt} + v(i)\frac{c(t+dt) - c(t)}{dt}$$
 III.20

Considérons cette dernière équation deux reformulations seront possibles.

# <u>1er Cas</u> :

$$v_{d}(t) = i_{d}(t)r(t) - c(t)\frac{\left(v(t+dt) - 2v(t)\right)}{dt} - c(t+dt)\frac{v(t)}{dt}$$
 III.21

Sous une forme matricielle, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r(t) \\ c(t) \\ c(t+dt) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(t), & \frac{\left(v(t=dt)-2v(t)\right)}{dt}, & \frac{v(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

# 2eme Cas :

L'équation de la tension de décharge (III.21) s'écrit comme suit :

$$v_d(t) = r(t)i_d(t) - \frac{r(t)}{dt} - c(t)\frac{(v(t+dt) - 2v(t))}{dt} - c(t+dt)\frac{v(t)}{dt}$$

$$v_{d}(t) + c(t)\frac{\left(v(t+dt) - 2v(t+dt)\right)}{dt} = r(t)i_{d}(t) - c(t+dt)\frac{v(t)r(t)}{dt}$$
 III.22

On pose :

Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.

$$v_{di}(t) = v_d(t) + c(t) \frac{(v(t+dt) - 2v(t))r(t)}{dt}$$
 III. 23

Sou une forme matricielle on obtient :

$$[v_d(t) + v_{ci}(t)] = \begin{bmatrix} r(t) \\ c(t+dt) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(t), & \frac{r(t)v(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

D'après cette représentation on peut considérer :

- >  $[v_d(t) + v_{ci}(t)]$ : Comme une sortie d'un système
- > r(t), c(t + dt): Comme des paramètres a identifié
- ➢  $i_d(t)$ ,  $\frac{r(t)v(t)}{dt}$ : Comme des entrées du système

# • <u>3ème présentation</u> :

L'équation de la tension de la décharge est écrite sous la forme suivante :

$$v_d(t) = r(t)i_r(t) = r(t)(i_d(t) - i_c(t))$$
 III.24

Si on divise sur r on aura le courant traversant la résistance comme suit :

$$\frac{v_d(t)}{r(t)} = i_d(t) - i_c(t)$$
 III. 25

De cette équation (III.25) on peut avoir trois cas comme suit :

. .

#### 1er Cas :

$$i_d(t) = \frac{v_d(t)}{r(t)} + i_c(t)$$
 III.26

Sous forme matricielle on écrit :

$$[i_d(t)] = \begin{bmatrix} \frac{1}{r(t)} \\ i_c(t) \end{bmatrix} . [v_d(t), In]$$

### 2eme Cas :
**Chapitre III** 

Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan positive impulsionnelle.

$$\frac{vd(t)}{r(t)} = i_d(t) - i_c(t)$$

En remplaçant le courant capacitif par ça formule correspondante à notre circuit :

$$i_d(i) = \frac{vd(i)}{r(i)} + c(i)\frac{(v(i+1) - 2v(i))}{\Delta t} + c(i+1)\frac{v(i)}{\Delta t}$$
 III. 27

Sous forme matricielle, on écrit :

$$i_d(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \\ c(t) \\ c(t+dt) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d(t), & \frac{v(t+dt)}{dt}, & \frac{v(i)}{dt} \end{bmatrix}$$

<u>3eme Cas</u> :

$$\frac{v_d(t)}{r(t)} = i_d(t) - i_c(t)$$
$$i_d(t) - c(t)\frac{\left(v(t+dt) - 2v(t)\right)}{dt} = \frac{v_d(t)}{r(t)} + c(t+dt)\frac{v(t)}{dt}$$
III.28

On pose :

$$i_T(t) = i_d(t) - c(i) \frac{\left(v(t+dt) - 2v(t)\right)}{dt}$$
 III.29

Donc l'équation (III.28) devient :

$$i_T(t) = \frac{v_d(t)}{r(t)} + c(t+dt)\frac{v(t)}{dt}$$
 III. 30

Sous une forme matricielle on obtient :

$$[i_T(t)] = \begin{bmatrix} \frac{1}{r(t)} \\ c(t+dt) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d(t), & \frac{v(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

#### VII. Conclusion

En conclusion, dans ce chapitre nous avons présenté un modèle électrique équivalent à notre décharge pointe-plan à la pression atmosphérique dans l'air sec à température ambiante et sous une alimentation impulsionnelle qui sera le sujet de notre étude proposée.

Le comportement électrique de notre décharge étudiée se traduit par un circuit équivalent regroupe deux effets capacitif et résistif du phénomène de décharge arborescente établie entre l'espace inter-électrodes dont la disposition que nous avons proposé met une résistance globale variable en parallèle avec une capacité globale variable.

Le modèle de la décharge est présenté sous différentes représentations mathématiques et qui seront par la suite simulées et comparées en terme de résultats en tenant compte l'effet du changement de lecture sur les paramètres électriques obtenus. Chapitre IV : Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

## I. Introduction

Dans ce dernier chapitre, nous présentons une étude comparative sur les résultats de simulation du modèle équivalent de la décharge couronne présenté au chapitre précédent.

Le modèle équivalent qui a était présenté à la fin du troisième chapitre en trois formes mathématiques différentes sera simulé pour chaque lecture de ces trois formes. Les résultats des paramètres électriques obtenus dans chaque cas seront donc comparés et analysés afin de montrer l'effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

# II. Etudes et analyse des simulations des différentes lectures mathématiques du modèle équivalent

Dans cette partie du travail, nous simulons trois différentes lectures de modèle équivalent dont le but est de montrer leurs cohérences entres eux et par apport à une représentation de base référentielle. Nous utilisons lors des simulations, les mêmes données et les mêmes conditions opératoires pour voir leurs compatibilités avec le modèle de référence.

## 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 cas), ces données d'entrée sont obtenues à partir du dispositif expérimental décris précédemment dans le chapitre II, ainsi que certains paramètres opératoires de la décharge qui sont :

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

## a. Paramètres systématiques de l'algorithme

L'algorithme de moindre carrée récursif, base dans sa mise en œuvre sur deux paramètres systématiques réglables Ces deux paramètres influent considérablement sur la qualité d'estimation des paramètres recherchés du modèle, on parle de :

## > coefficient d'adaptation alpha ( $\alpha$ )

Le choix de ce paramètre dépond du choix des valeurs initiales des paramètres estimées [3]

# Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

## > 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.

## b. Présentation des résultats

## 1. effet du coefficient d'adaptation alpha ( $\alpha$ )

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, si la valeur de ce coefficient est choisi grande, les valeurs initiales de nos paramètres à identifier 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 utilisées 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 <  $\lambda \leq 1$ ).

## 3. Effet du nombre d'itérations

Sachant que le paramètre estimé r(t) (résistance de la décharge) par rapport à notre modèle, était à la fois un paramètre à estimer et un paramètre observé, cela nous a imposé de répéter l'estimation autant de fois pour aboutir à la convergence du processus d'estimation. Cette répétition est réalisée par une boucle à un nombre d'itérations noté m.

La vérification de cet effet représente la dernière étape avant l'obtention des résultats définitifs optimisés.

Les résultats optimisés sont présentés pour plusieurs points opératoires caractérisés par leurs distances inter-électrodes et leurs tensions appliquées.

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

#### c. Présentation des résultats

Nous commençons par la simulation et la présentation des résultats ajustés de la représentation de base référentielle.

# **III.** Présentation de la simulation de la 1<sup>ière</sup> lecture

## III-1 Modèle utilisé en simulation

Le modèle équivalent de la décharge dont on considère la tension décharge comme sortie est présenté sous la forme mathématique suivante :

$$v_d(t) = r(t)i_r(t) \qquad \text{IV.1}$$

Le courant résistif est donné comme suit :

$$i_r(t) = i_d(t)_i_c(t) \qquad \text{IV.2}$$

Si on remplace le courant résistif  $i_r(t)$ , dans cette équation on obtient :

$$v_d(t) = r(t)(i_d(t) - i_c(t))$$
 IV.3

Alors l'équation finale s'écrit comme suit :

$$v_d(t) = r(t)i_d(t)_r(t)i_c(t) \qquad \text{IV.4}$$

La représentation matricielle de cette formulation sera comme suit: Avec :  $V = X^T \theta$ 

$$X^{T} = [i_{d}(t), r(t)]$$
$$\theta = [r(t), i_{c}(t)]$$

 $X^T$ : Vecteur d'observation

 $\theta$ : Vecteur des paramètres

Puisque r(t) est utilisée à l'entrée et à la sortie, on optimise r(t) et  $i_c(t)$  au même instant jusqu'à avoir r(t) et  $i_c(t)$  invariants.





# **III-2** Présentation des résultats et interprétation

## a. Résultats

Les figures VI-2 et VI-3 présentent respectivement les allures de la résistance et la capacité de la décharge, estimées lors du passage de l'impulsion de la décharge à travers l'espace inter-électrodes suite à l'application de la tension à ces bornes.

> Résistance estimée r(t)Avec :  $r_{min} = 3.8387 \times 10^5$ 



Figure VI-2 : Présentation de la résistance obtenue par la 1<sup>ière</sup> lecture, pour v=5kv, d=5mm

> Capacité estiméeC(t)

Avec :  $C_{max} = 1.5680 \times 10^{-15} F$ 



Pour  $\lambda = 0.95$ 



# Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

Théoriquement la résistance de la zone de la décharge inter-électrode et sous l'effet de la tension appliquée au début puis sous l'action de développement et propagation de streamers à partir de la pointe et jusqu'au la plan de la cathode, diminue brusquement. Au moment où la décharge atteint la cathode l'espace noter-électrodes est totalement court-circuité et la résistance atteint son minimum dans ce cas la valeur est  $r_{min} = 3.8387 \times 10^5$ 

A partir de cet instant la décharge cesse le courant se déclin et la résistance reprenne sa valeur initiale.

Le résultat de simulation est très cohérent avec l'aspect théorique de phénomène.

Cela confirme la validité du modèle en bien sûr la représentation mathématique mise en œuvre pour la simulation dans ce cas.

En ce qui concerne la capacité de la décharge quant à elle est en cohérence avec sa tendance de variation théorique dans telles condition le développement de la décharge crée d'avantage de charges cela augmente automatiquement la valeur de la capacité d'autre part la propagation des canaux de la décharge diminue les distances entre les têtes des canaux et la cathode favorise d'avantage l'augmentation de la capacité de la décharge. Lorsque la décharge impacte sur la cathode la capacité atteint sa valeur maximale  $C_{max} = 1.5680 \times 10^{-15}$ . Alors que l'effet capacitif disparaisse à partir de cet instant et sa courbe déclin au fur et à mesure que les charges dans l'espace inter électrode disparaissent ce qui traduit par le déclin de la courbe de la capacité. Cette tendance de variation est très bien claire sur le graphe de la figure IV-3, représentant ce cas.

# IV. Présentation de la simulation du 2<sup>ième</sup> lecture

### IV-1 Modèle utilisé en simulation

On expose une deuxième lecture du modèle mathématique de la décharge impulsionnelle qui peut se présenter sous deux formes différentes comme suit.

On considère la tension de la décharge aux bornes de la résistance, on a :

$$v_d(t) = r(t)i_r(t) \qquad \text{IV.5}$$

Sachant que le courant résistif est donné par :

$$i_r(t) + i_d(t) - i_c(t) \qquad \text{IV.6}$$

Le courant capacitif c'écrit comme suit :

$$i_c(t) = c(t)\frac{dv(t)}{dt} + v(t)\frac{dc(t)}{dt}$$
 IV.7

L'expression du courant résistif devienne donc :

$$i_r(t) = i_d(t) - c(t)\frac{dv(t)}{dt} + v(t)\frac{dc(t)}{dt}$$
 IV.8

L'équation IV.8 peut s'écrire comme suit :

$$i_{r}(t) = i_{d}(t) - c(t) \left( \frac{v(t+dt) - v(t)}{dt} \right) + v(t) \frac{(c(t+dt))_{-}c(t)}{dt}$$
 IV.9

On tenant compte de cette dernière équation, deux reformulations seront possibles :

# IV-1-1. 1<sup>er</sup> Cas

$$v_{d}(t) = i_{d}(t)i_{r}(t) - c(t)\frac{v(dt + dt_{1-}2v(dt))}{dt} - c(t + dt)\frac{v(t)}{dt}$$
 IV.10

 $v_d(t)$ : La tension de la décharge

La représentation matricielle peut immerger deux cas dont on peut les montrés en jouant sur les vecteurs d'observation et de paramètres comme suit

On peut écrire :

$$X^{T}\left[i_{d}(t), \left(\frac{v(t=dt)-2v(t)}{dt}\right), \frac{v(t)}{dt}\right], \ \theta \begin{bmatrix} r(t) \\ c(t) \\ c(t+dt) \end{bmatrix}$$

 $X^T$ : est le vecteur d'observation  $\theta$ : est le vecteur des paramètres



Figure IV-4 : Représentation schématique du système à identifie (2<sup>ième</sup> lecture, 1<sup>ier</sup> cas)

# IV-1 -2. 2<sup>eme</sup> Cas

La tension de la décharge dans ce cas s'écrit comme suit :

$$v_d(t) = i_r(t)i_d(t) - \frac{r(t)}{dt} - c(t)\frac{\left(v(t=dt)\right) - 2v(t)}{dt} - c(t+dt)\frac{v(t)r(t)}{dt}$$
 IV.11

On peut réarranger l'équation IV-11 comme suit :

$$v_d(t) + c(t) \frac{\left(v(t+dt) - 2v(t+dt)\right)}{dt} = i_r(t)i_d(t) - c(t+dt)\frac{v(t)r(t)}{dt}$$
 IV.12

On obtient :

$$v_{di}(t) = v_d(t) + c(t) \frac{(v(t+dt) - 2v(t))r(t)}{dt}$$
 IV.13

La représentation matricielle dans ce cas est :

$$\mathbf{X}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ \frac{r(t)v(t)}{dt} \end{bmatrix}, \quad \theta \begin{bmatrix} r(t) \\ c(t+dt) \end{bmatrix}$$

- X<sup>T</sup>: Vecteur d'observation
- $\theta$ : Vecteur des paramètres



Figure IV-5 : Représentation schématique du système à identifié (2<sup>ème</sup> lecture, 2<sup>ème</sup> cas)

## IV-1-2-1 Présentation des résultats et interprétation a. Résultats

Les figures IV-6 et IV-7 respectivement montrent les allures de la résistance et la capacité de la décharge, estimées par simulation de la présente formulation mathématique du modèle.





Figure IV-6 : présentation de la résistance obtenue par la 2<sup>ième</sup> lecture, 2<sup>ième</sup> cas, pour v=5kv, d=5mm

Nous constatons à partir de la courbe de la résistance estimée  $\mathbf{r}(t)$  que :

$$r_{min} = 3.2531 \times 10^5 \Omega$$



Pour  $\lambda = 0.92$ 

Figure IV-7: présentation de la capacité de la décharge c(t)en utilisent la presentation2, 2 cas) pour vd = 5kv, d=5mm

Pour la courbe de la capacité estimée C(t) on peut déduire la valeur maximale telle que :

 $C_{max} = 4.6903 \times 10^{-16}$ 

## b. Interprétation

Les variations de la résistance et la capacité de la décharge respectent dans ce cas l'aspect théorique du phénomène de la décharge couronne étudié.

Le résultat de simulation est très cohérent avec ceux présentés dans le cas précédant.

Cela valide cette représentation mathématique pour la simulation du modèle

## V. Présentation de la simulation de la 3<sup>ième</sup> lecture

## V-1 Modèle utilisé en simulation

Nous présentons la 3<sup>ième</sup> lecture en exploitant l'équation de la tension de la décharge qui s'écrit sous la forme suivante :

$$v_d(t) = r(t)i_r(t) \qquad \text{IV. 14}$$

Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

$$v_d(t) = r(t)(i_d(t) - i_c(t))$$
 IV.15

$$i_r(t) = (i_d(t) - i_c(t))$$
 IV. 16

Si on divise sur r(t), on aura l'expression du courant traversant la résistance comme suit :

$$\frac{v_d(t)}{r(t)} = i_d(t) - i_c(t) \qquad \text{IV. 17}$$

De cette équation IV. 17 on peut avoir trois cas comme suit :

# V-1-1- 1<sup>er</sup> Cas

L'équation du courant de la décharge s'écrit comme suit :

$$i_d(t) = \frac{v_d(t)}{r(t)} + i_c(t)$$
 IV. 18

La représentation matricielle sera donc comme suit:

$$[i_d(t)] = \begin{bmatrix} \frac{1}{r(t)} \\ i_c(t) \end{bmatrix} \cdot [v_d(t), I_n]$$

Avec :



Figure IV-8 : Représentation schématique du système à identifier (3<sup>ième</sup> lecture 1<sup>ièr</sup> cas).

## V-1-1-1 Présentation les résultats et interprétation

## a. Résultats

Les figures IV-8 et IV-9 présentent respectivement les allures de la résistance et la capacité de la décharge, estimées lors du passage de l'impulsion de la décharge à travers l'espace inter-électrodes suite à l'application de la tension à ces bornes.



Pour  $\lambda = 0$  . 98

Figure IV-9 : présentation de la résistance de la décharge impulsionnelle obtenue par la 3<sup>eme</sup> lecture 1<sup>ier</sup> cas pour v=5kv, d=5mm

La valeur maximale de la résistance estimée est  $3,0678.10^5\Omega$ 



Figure IV-10: variation de la capacité de la décharge c(t) en utilisant la présentation 3,  $1^{\rm er}$  cas) pour vd = 5kv, d=5mm,  $\lambda = 0.90$ 

La valeur maximale de la capacité estimée est,  $C_{max} = 1.9044 \times 10^{-16} F$ 

## b. Interprétation

c. Comme dans les cas précédant les tendances de variation des deux paramètres électriques capacité et de la résistance de la décharge, sont en concordance avec les tendances de variations observées expérimentalement dans ce type de décharge. De plus ces courbes sont très similaires à celles obtenues dans les cas précédant. Donc on peut conclure que cette formulation peut être simulable pour l'obtention des paramètres du modèle tout en choisissant la plus prise entre eux.

## V-1-2 2<sup>eme</sup> cas

L'équation IV.18 représente le courant de la décharge comme suite :

$$\frac{v_d(t)}{r(t)} = i_d(t) - i_c(t)$$
 IV.18

# Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

En remplaçant le courant capacitif par sa formule correspondante on obtient:

$$i_d(t) = \frac{v_d(t)}{r(t)} + c(i)\frac{\left(v(i+1) - 2v(i_r)\right)}{\Delta t} + c(i+1)\frac{v(i)}{\Delta t}$$
 IV. 19

Sous la forme matricielle, on écrit :

$$i_d(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \\ c(t) \\ c(t+dt) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d(t), & \frac{v(t+dt)}{dt} & \frac{v(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

$$\theta \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \\ c(t) \\ c(t+dt) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad X^T \begin{bmatrix} v_d(t), & \frac{v(t+dt)}{dt} & \frac{v(t)}{dt} \end{bmatrix}$$

 $X^T$  : est le vecteur d'observation

 $\theta$ : est la vecteur d'identification



# Figure IV-11: Représentation schématique du système à identifier(3<sup>ième</sup> lecture 2<sup>ième</sup> cas) V-1-2-1 Présentation des résultats et interprétation

## a. Résultats

La simulation de cette formulation nous a permet d'obtenir les allures de variations de la résistance et la capacité de la décharge présentées sur les figures IV-12 et IV-13 respectivement.



Pour  $\lambda = 0.92$ 

Figure IV-12: présentation de la résistance de la décharge impulsionnelle pour v=5kv, d=5mm

La va leur minimale de la résistance de la décharge est,  $r_{min} = 4,310 \times 10^{5} \Omega$ 



Pour  $\lambda = 0$  . 98

Figure IV-13: variation de la capacité de la décharge c(t) 3eme lecture, 2cas pour vd = 5kv, d=5mm

La valeur maximale de la capacité estimée est,  $C_{max} = 1.4310 \times 10^{-15} F$ .

## b. Interprétation

Les résultats de simulation de cette lecture s'écoulent dans le même sens des variations paramétriques de la résistance et la capacité de la décharge électrique dans le cas de ce type de décharge couronne. Ces résultats sont trop proches à ceux déjà obtenus dans les cas des lectures précédentes ce qui valide cette lecture pour la simulation de ce modèle.

## V-1-3 3eme cas

De l'analyse du circuit électrique de décharge couronne on obtient :

$$v_d(t) = i_d(t) - i_c(t)$$
 IV. 20

On substituant le courant capacitif par son équation on peut écrire :

$$i_d(t) - c(t)\frac{(v(t+dt) - 2v(t))}{dt} = \frac{v_d(t)}{r(t)} + c(t+dt)\frac{v(t)}{dt}$$
 IV.21

On pose :

$$i_T(t) = i_d(t) - i_c(t) \frac{(v(t+dt) - 2v(t))}{dt}$$
 IV.22

Donc l'équation IV.22 devient :

$$i_T(t) = \frac{v_d(t)}{r(t)} + c(t+dt)\frac{v(t)}{dt}$$
 IV.23

Sous une forme matricielle on obtient :

$$i_{T}(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{r(t)} \\ c(t+dt) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{d}(t), \frac{v(t)}{dt} \end{bmatrix}$$
$$X^{T} \begin{bmatrix} v_{d}(t), \frac{v(t)}{dt} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \theta \begin{bmatrix} \frac{1}{r(t)} \\ c(t+dt) \end{bmatrix}$$

 $X^T$  : est le vecteur d'observation

 $\theta$ : est la vecteur d'identification



Figure IV-14 : Représentation schématique du système à identifier (3<sup>ième</sup> lecture, 3<sup>ième</sup> cas)

## V-1-3-1 Présentation les résultats et interprétation

## a. Résultats

Les figures IV-15 et IV-16, présentent respectivement les allures de la résistance et la capacité de la décharge, estimées lors du passage de l'impulsion de la décharge à travers l'espace inter-électrodes suite à l'application de la tension à ces bornes, en utilisant cette dernière représentation mathématique du modèle.



Pour  $\lambda = 0$  . 90

Figure IV-15 : variation de la résistance de la décharge impulsionnelle pour

#### v=5kv, d=5mm

La valeur minimale de la résistance estimée r(t) est,  $r_{min} = 3,426 \times 10^5 \Omega$ 



Pour  $\lambda = 0.90$ 

Figure IV-16 : présentation de la capacité de la décharge c(t) de la $3^{ième}$  lecture,  $3^{ième}$  cas pour vd = 5kv, d=5mm

La valeur maximale de la capacité estimée C(t) est,  $C_{max} = 4.9491 \times 10^{-15} F$ 

## b. Interprétation

Les résultats des paramètres électriques de la décharge obtenus de ce cas de la dernière représentation mathématique présentent les mêmes tendances de variation habituelle à ce type de décharge et confirment ainsi la validité de cette représentation pour la simulation du modèle de la décharge.

L'ensemble des résultats obtenus pour valident la simulabilité des différentes représentations du modèle équivalent de notre décharge couronne. A ce point il nous reste que d'étudier la précision de chaque représentation en terme d'identification de paramètres de modèle cela sera vérifier dans ce qui suit par une analyse d'erreurs passant d'une représentation à l'autre.

# VI. Étude de comparaison et d'erreurs entre les présentations de différentes lectures

## a. Résultats

# Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

Les figures IV-17 et IV-18 présentent respectivement les comparaisons entre les paramètres électriques, capacité et résistance de la décharge des différentes représentations mathématiques déjà simulées pour les mêmes conditions opératoires.



Figure IV-17: comparaison des capacités c(t) de a décharges obtenues par simulation des différentes lectures mathématiques du modèle électrique de la décharge.



Figure : IV-18 Figure IV-17: comparaison des capacités c(t) de a décharges obtenues par simulation des différentes lectures mathématiques du modèle électrique de la décharge.

La figure IV-17, et IV-18 présente une comparaison entre les paramètres électriques (capacité et résistance) estimés en utilisant les différentes représentations mathématiques du modèles électrique simulées précédemment.

Les figure montrent une tendance de variation identique y pour la résistance y pour la capacité de la décharge avec des écarts enregistrés passant d'une représentation à une autre.

Pour évaluer l'effet du changement des représentations mathématiques du modèle sur la précision de l'estimation des paramètres identifiés, nous suivons en particulier deux point caractéristiques qui sont le maximum de la capacité et le minimum de la résistance de la décharge

Le suivie des paramètres de différentes représentations en leurs points caractéristiques montre :

- une correspondance entre la représentation de la 3<sup>iéme</sup> lecture 3<sup>iéme</sup> cas, et celle du  $3^{i\acute{e}me}$  lecture,  $2^{i\acute{e}me}$  cas,
- une légère différence en 3<sup>iéme</sup> lecture, 1<sup>iére</sup> cas et 2<sup>iéme</sup> lecture, 2<sup>iéme</sup> cas avec une tendance de convergence,
- pour 1<sup>*iére*</sup> lecture il est clair que la lecture ne correspond pas aux autres.

Nous avons également étudie le taux d'erreur de la capacité en prenant la 3<sup>iéme</sup> lecture, 3<sup>iéme</sup> cas comme référence pour comparaison avec les autres lectures, en tenant compte de l'erreur relative entre la représentation 3/3cas et la représentation 1  $\left(\frac{C_{3/3max} - C_{1max}}{C_{3/3max} + C_{1max}} \times 100\right)$  et la valeur 52%, et avec lecture 2,  $2^{ieme} \cos \left(\frac{C_{3/3max} - C_{2/2max}}{C_{3/3max} + C_{2/2max}} \times 100\right)$ , donnez la valeur suivant 82 % et respectivement aux lectures  $3/1^{\text{ier}} \cos \frac{C_{3/3max} - C_{3/1max}}{C_{3/3max} + C_{3/1max}} \times 100$ ) et lecture  $3/2^{\text{ième}} \cos \frac{C_{3/3max} - C_{3/1max}}{C_{3/3max} + C_{3/1max}}$  $\frac{C_{3/3max} - C_{3/2max}}{C_{3/3max} + C_{3/2max}} \times 100), 82\%, 92\%.$ 

Nous avons remarqué que :

- concernant les résultats de la capacité de la décharge électrique au niveau de la forme et au niveau des ordres de grandeurs qu'il existe une certaine similitude entre les lectures.
- Concernant la résistance de la décharge en prenant la 1<sup>ière</sup> lecture, comme référence que l'erreur relative entre la présentation 1 et la présentation 3, 3<sup>ième</sup> cas  $\binom{R_{1min} - R_{3/3min}}{R_{1min} + R_{3/3min}} \times 100$  est de 41%, et avec lecture  $2/2^{ième} \cos{(\frac{R_{1min} - R_{2/2min}}{R_{1min} + R_{2/2min}} \times 100)}$ ,

# Effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur les résultats de sa simulation

est de 8% et respectivement par apport aux lectures  $3/1^{\text{ier}} \cos \frac{R_{1min} - R_{3/1min}}{R_{1min} + R_{3/1main}} \times 100)$ et lecture 3,  $2^{\text{ième}} \cos \frac{R_{1min} - R_{3/2min}}{R_{1min} + R_{3/2min}} \times 100)$ , sont de 21% et 20%.

En effet, les résultats d'analyse d'erreur que nous venons de les exposés, montrent que la lecture  $3/3^{ième}$  cas est la lecture la plus précise en estimation des paramètres et à retenir pour la simulation du modèle équivalent.

## VII. Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté d'une étude l'effet du changement de la représentation mathématique d'un modèle sur l'identification des paramètres de ce dernier.

Plusieurs présentations ont était comparé en termes de paramètres premièrement au niveau de leurs formes puis au niveau de l'erreur relative. Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des représentations donnent la même tendance de variation est qui est en concordance avec la physique de la décharge étudiée néanmoins cette étude montre qu'en terme de précision la troisième représentation en son troisième cas est la représentation la plus précise.

#### **Conclusion générale**

Dans ce travail, nous avons traité la problématique le changement de la représentation d'un modèle équivalent sur sa simulation est la précision de ces résultats.

Pour mettre cette étude en évidence nous avons suivi en ordre hiérarchique les étapes exposées dans ce manuscrit en les quatre chapitres suivants :

Le premier chapitre présente des détailles théoriques sur les plasmas gazeux en général et les plasmas froids en particulier, tout en focalisant sur la décharge couronne sujet de notre étude.

Dans le second chapitre nous présentons le dispositif expérimental exploité comme source de données pour la modélisation électrique de notre décharge couronne pointe-plan impulsionnelle.

Nous avons détaillé dans le troisième chapitre le modèle électrique équivalent de la décharge pointe plan à la pression atmosphérique et sous une alimentation impulsionnelle.

Nous avons présenté aussi les représentations mathématiques possibles de notre modèle équivalent et qui seront simulé afin d'étudier l'effet de changement de la représentation mathématique sur la simulation du modèle et précisément sur les paramètres identifier du modèle.

En fin, nous avons présenté dans le quatrième chapitre une étude détaillée sur sa la applicabilité de plusieurs représentations mathématique issues de même modèle équivalent de notre décharge couronne pointe-plan impulsionnelle. Nous avons étudié premièrement la simulabilité des différentes représentations mathématiques dont le nombre est six en total. Cette étude montre que l'ensemble des représentations donne des bons résultats en termes de variation des paramètres identifiés du modèle (résistance et capacité de la décharge).

Deuxièmement nous avons étudié la précision des résultats de simulation dont on a constaté que la précision est meilleure lorsque la représentation est la plus simple par apport aux autres.

Se travail est clôturé par la présente conclusion générale qui a met le jour sur l'ensemble des étapes suivies pour réussir ce travail est surtout sur les résultats issus de ce projet.

## REFERENCES

[1] Mr MEKKIOUI DJAOUED" Etude De L'Evolution des Espèces Présentes dans Un Gaz Pur O2 Par Décharge Couronne. " Université Abou Baker Belkaid de Tlemcen Faculté des Sciences, Soutenu Oralement le 24 Juin 2018

[2] Abderrahmane 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 thesis, Université de Toulouse 3, 2012.

[3] SAIDI Oum El Djillali "Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan impulsionnelle" Université Dr . Ta h a r Moulay de Saïda, Soutenu le 09/2018.

[4] Mohamed 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 ", L'université de Toulouse, le Mardi 22/11/2011.

**[5]** Alyen ABAHAZEM "Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz " Doctorat de l'université de Toulouse, Le 01 Décembre 2009.

[6] BELOUCIF Faissel "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] Diane 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.

**[8]** Driss RAOUTI, "contribution à 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, Soutenue le 2015