

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



Université Dr. **Tahar Moulay de Saïda**
Faculté de **Sciences** et de la **Technologie**
Département d'**Electrotechnique** et d'**Automatique**



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : Electrotechnique

Intitulé :

**Etude énergétique d'une décharge couronne à faible
intervalle**

Présenté par :

BENHAMADA Sofiane
BALA Abdelmadjid

Devant le jury composé de :

Dr.ARZAG Kaddour

Président

Dr.RAOUTI Driss

Encadreur

Pr.BOUCHIKHI Abdelaziz

Examineur

Soutenu le 16/6/2025

Promotion 2024-2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

*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 voudrions dans un premier temps remercier, notre encadreur monsieur

***Dr. RAOUTI Driss** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Merci également pour vos conseils de qui ont été très précieux. Nous remercions également tous les intervenants professionnels responsables de la discussion pour leurs volontés d'accepter la discussion de notre mémoire et pour leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques.*

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

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

Dédicace

*À ma chance, la lumière qui brille ma vie ma très chère
mère quoique je fasse ou que je dise, je ne saurai point te
remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta
bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours
été une source de force pour affronter les différents
obstacles.*

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

*À mon très cher frère pour votre soutien qui a été d'une
grande aide*

À toute famille Bala.

Dédicace

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

Maman et papa

À Ma sœur et mes frères pour leurs appuis et leur encouragement.

À ceux qui ont partagé avec moi les plus doux souvenirs

À ceux qui m'ont rendu heureux mes meilleurs amis

Malik et Djamel

À la famille Benhamada pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Table des matières

Remerciements.....	1
Dédicace.....	2
Table des matières.....	4
Table des Figures.....	7
Introduction générale.....	10

Chapitre I : Généralités sur les décharges électriques.

I.1 Introduction.....	12
I.2 Définition du plasma.....	12
I.2.1 Classification des plasmas	13
I.2.1.1 Plasmas chaud.....	13
I.2.1.2 Plasmas froids.....	13
I.2.2 Caractéristiques des plasmas.....	14
I.2.3 Génération des plasmas.....	15
I.3 Décharges électriques.....	15
I.3.1 Types des décharges selon la caractéristique courant-tension.....	16
I.3.2 Différents Types de décharges à plasma froid.....	17
I.3.2.1 Décharge luminescente.....	19
I.3.2.2 Décharge couronne	19
I.3.2.3 Décharge avec barrière diélectrique (DBD).....	20
I.4 Mécanisme de création d'une décharge couronne.....	21
I.4.1 Mécanisme d'avalanche ou de multiplication électronique.....	23
I.4.2 Théorie de propagation de streamer.....	24
I.4.2. Différents régimes de décharge couronne.....	25
I.5 Applications de la décharge couronne.....	27

I.6 Conclusion.....	27
---------------------	----

Chapitre II : Expérimentation, mesures et modélisation d'une décharge couronne pointe-plan.

II.1 Introduction.....	28
II.2 Comportement électrique d'une décharge couronne.....	28
II.3 Aspect pratique de la décharge pointe-plan.....	29
II.3.1. Description générale du dispositif expérimental.....	29
II.3.2 Alimentations électriques	29
II.3.3 Moyens de mesure et enregistrement.....	31
II.4 Aspects physiques de la décharge.....	33
II.4.1 Comportement d'une décharge pointe plan sans décharge.....	34
II.4.2 Comportement avec décharge en tension continue	35
II.4.3 Comportement d'une décharge sous tension impulsionnelle	38
II.5 Modélisation de la décharge pointe plan.....	38
II.5.1 Modèle mathématique.....	38
II.5.2 Méthode d'identification de modèle.....	40
II.5.3.1 Identification paramétrique.....	40
II.5.3.2 Estimation de la complexité du Modèle (choix de méthode).....	40
II.5.3.3 Algorithmes des moindres carrés récursifs appliqué à la décharge pointe plan positive.....	41
II.5.3.4 Paramètres électriques estimés	44
II.5.3.4.1 Interprétation physique des résultats de la simulation.....	54
II.6 Conclusion.....	56

Chapitre III : Calcul d'énergie de décharge couronne pointe-plan.

III.1 Introduction.....	57
III.2 Énergie et comportement de la décharge électrique.....	57
III.3 L'énergie d'une décharge électrique.....	58
III.3.1 Energie de la décharge couronne pointe-plan , calculée en fonction des grandeurs caractéristique courant-tension.....	58
III.3.2 Energie de décharge en fonction des paramètres électrique.....	60
III.3.2.1 Calcul de l'énergie de la résistance.....	60
III.3.2.2 Calcul de l'énergie de la capacité.....	61
III.3.3 Calcul de l'énergie électrique dans le circuit électrique équivalent de la décharge.....	63
III.3.3.1 Simulation et résultats de calcul.....	63
III.3.3.2 Effet du niveau de la tension appliquée sur l'énergie.....	67
III.3.3.3 Effet de la distance inter-électrodes sur l'énergie.....	69
III.4 Conclusion.....	70

Conclusion générale.....	72
Références	74
Résumé.....	77

Table des Figures

Figure (I.1)	Différents états et principaux changements d'état de la matière.	13
Figure (I.2)	Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter-électrodes $d=13\text{ mm}$).	18
Figure (I.3)	Schéma d'un dispositif utilisé pour la stérilisation des l'instrumentations médicales par post décharge micro-onde en flux.	19
Figure (I.4)	Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production des décharges.	20
Figure (I.5)	Caractéristique Courant moyen – Tension de la décharge couronne pour 4 distances inter-électrodes, entre 1 et 3 cm à pression atmosphérique.	22
Figure (I.6)	Mécanisme de propagation d'un streamer en géométrie « pointe-plan ».	24
Figure (I.7)	Topographie de la décharge couronne « pointe-plan » en régime (glow).	26
Figure (II.1)	Circuit d'alimentation d'un diapositif à décharge, en tension continue.	30
Figure (II.2)	Circuit d'alimentation d'un diapositif à décharge, en tension impulsionnelle.	30
Figure (II.3)	Banc des mesures électriques.	30
Figure (II.4)	Tension inter-électrodes mesurée lors d'une impulsion de la décharge Couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour $d=11\text{ mm}$, $V=9,5\text{ kV}$ et $\rho=25\mu\text{m}$.	32
Figure (II.5)	Courant instantané de la décharge couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour $d=11\text{ mm}$, $V=9,5\text{ kV}$ et $\rho=25\mu\text{m}$.	32
Figure (II.6)	Courant instantané de la décharge couronne impulsionnelle pour $V=8\text{ kV}$, $d=8\text{ mm}$, $\rho=25\mu\text{m}$.	33

Figure (II.7)	Observation expérimentale de la propagation d'une décharge pointe plan Positive obtenue par caméras ICCD et Streak.	36
Figure (II.8)	Schéma électrique représentatif simplifié d'une décharge pointe plan Continue positive.	37
Figure (II.9)	(a) Image de la décharge couronne dans l'air sec à la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de 10ns : $E_{app}=8kV, \tau=40\mu s, f=100Hz, d=5mm, \rho=25\mu m$.	38
Figure (II.10)	Circuit équivalent proposé d'une décharge pointe plan positive.	39
Figure (II.11)	Représentation schématique du système à identifier.	42
Figure (II.12)	Courbe de la résistance de décharge estimée dans les conditions opératoires : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).	44
Figure (II.13)	Courbe de la capacité estimée dans les conditions opératoires : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).	45
Figure (II.14)	Comparaison entre le courant de décharge mesurer et le courant résistif estimé au point opératoire : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).	46
Figure (II.15)	Comparaison entre le courant de décharge mesurer et le courant capacitif estimée au point opératoire : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).	47
Figure (II.16)	Allures des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=7KV$ et $d=7mm$). a) Courbe de capacité et b) Courbe de résistance	48
Figure (II.17)	Comparaison entre le courant de décharge mesuré et les courants obtenus des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=7KV$ et $d=7mm$). b) Comparaison avec le courant capacitif et c) Comparaison avec le courant résistif	49
Figure (II.18)	Allures des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$). a) Courbe de capacité et b) Courbe de résistance	50
Figure (II.19)	Comparaison entre le courant de décharge mesuré et les courants obtenus des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$). b) Comparaison avec le courant capacitif et c) Comparaison avec le courant résistif.	51

Figure (II.20)	Allures des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$). a) Courbe de capacité et b) Courbe de résistance.	52
Figure (II.21)	Comparaison entre le courant de décharge mesuré et les courants obtenus des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$). b) Comparaison avec le courant capacitif et c) Comparaison avec le courant résistif.	53
Figure (III.1)	Variation de l'énergie de la décharge aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV, d=5mm$).	59
Figure (III.2)	Evolution de la charge électrique durant la phase d'une décharge couronne ($E_{app}=5KV, d=5mm$).	60
Figure (III.3)	Courbe de l'énergie de la résistance aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV, d=5mm$).	64
Figure (III.4)	Courbe de l'énergie de capacité aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV, d=5mm$).	65
Figure (III.5)	Comparaison entre l'énergie dissipée par la résistance et l'énergie de décharge aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).	65
Figure (III.6)	Comparaison entre les énergies des paramètres (résistance, capacité) et l'énergie de la décharge réelle aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).	66
Figure (III.7)	Comparaison entre l'énergie de la décharge en fonction des paramètres estimés et l'énergie réelle au point opératoire : ($E_{app}=5KV, d=5mm$).	67
Figure (III.8)	Comparaison des valeurs de l'énergie totale réelle et l'énergie calculé on fonction des paramètres sous différents valeurs de la tension appliquée (7,7.5, 8 et 8.5 KV) et une distance inter-électrode fixe ($d=8mm$).	68
Figure (III.9)	Comparaison des valeurs de l'énergie totale réelle et l'énergie calculée en fonction des paramètres sous différents valeurs de tension appliquée (7.5, 8,8.5 et 9.5 KV) et une distance fixe ($d=9mm$).	68
Figure (III.10)	Comparaison des valeurs d'énergie totale de l'énergie réelle et l'énergie calculée en fonction des paramètres électriques sous différentes distance inter-électrodes ($d=8,9$ et 10 mm) et une tension appliquée ($E_{app}=7.5KV$).	70

Introduction générale

L'énergie électrique est aujourd'hui au cœur du développement technologique et industriel, et sa conversion en d'autres formes d'énergie dans des milieux contrôlés ouvre la voie à de nombreuses applications scientifiques et industrielles. Parmi les phénomènes électro physiques exploitables la décharge électrique dans les gaz, qui, sous certaines conditions, conduit à la formation d'un état particulier de la matière : le plasma.

Le plasma, considéré comme le quatrième état de la matière, est un milieu partiellement ou totalement ionisé, contenant des particules libres (électrons, ions) et présentant des propriétés uniques. Il peut être généré de manière contrôlée par des décharges électriques dans différents types de configurations. Parmi celles-ci, la décharge couronne se distingue par sa capacité à créer un plasma froid à pression atmosphérique, sans élever significativement la température du gaz.

Ce type de décharge, généralement produit entre des électrodes asymétriques (souvent pointe-plan), est particulièrement intéressant en raison de ses caractéristiques non destructives et de ses nombreuses applications, notamment dans le traitement des surfaces, la dépollution des gaz, la génération d'ozone, ou encore la stérilisation médicale.

Ce travail de mémoire a pour objectif principal la modélisation électrique et l'évaluation énergétique d'une décharge couronne dans une configuration pointe-plan. Après une étude théorique approfondie des phénomènes physiques régissant la formation et le comportement des décharges électriques, en particulier les décharges couronnes et précisément celles générées sous une configuration pointe-plan à pression atmosphérique par une alimentation continue, une modélisation équivalente du comportement électrique de la décharge sera proposée dans. Cette modélisation sera ensuite validée à l'aide de données expérimentales et exploitée pour calculer l'énergie dissipée ou stockée au sein du système.

La démarche adoptée repose ainsi sur une approche pluridisciplinaire combinant analyse théorique, simulation numérique et expérimentation pratique. Elle permet non seulement de mieux comprendre les mécanismes physiques mis en jeu, mais aussi de fournir des outils fiables pour l'optimisation énergétique.

Ce mémoire se compose de trois 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 ainsi que les caractéristiques courant-tension enfin nous présenterons une décharge couronne et leurs différents types et les configurations géométriques courantes générant ce type de décharge et quelques exemples d'application de la décharge couronne

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de décharge pointe-plan. Nous expliquons tout d'abord la formulation du modèle équivalent puis la projection de la méthode d'identification utilisant l'algorithme des moindres carrées pour l'estimation des paramètres de ce modèle électrique. Puis, la présentation des résultats de calcul.

Le troisième chapitre est dédié au calcul d'énergie consommée par la décharge par méthode directe et paramétrique ainsi que la distribution d'énergies entre les paramètres électriques de la décharge. Finalement nous avons étudié l'impact des conditions opératoires tension appliquée et distance inter-électrodes pour une conversion optimale.

Une conclusion générale est réalisée synthétise l'essentiel de ce travail et mettant la lumière sur les résultats les plus pertinents réalisés.

Chapitre I : Généralités sur les décharges électriques

I.1 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]. Notre intérêt dans ce chapitre est de présenter une étude théorique sur les décharges électriques en particulier la décharge couronne qui donne naissance à un milieu plasma dans lequel s'injecte et convertit l'énergie électrique en d'autres formes qui le rend riche et réactif chimiquement.

Dans ce chapitre nous donnons la définition du plasma avant de passer à leur classification (plasma chaud, plasma froid) ainsi que les types des décharges selon la caractéristique courant-tension

I.2 Définition du plasma

Le plasma est défini comme étant le quatrième état de la matière, en suivant les états « solide-liquide-gaz » et défini aussi comme étant un gaz partiellement ou totalement ionisé. Ce terme a été introduit pour la première fois pour expliquer un état de la matière contenant des espèces chargées positivement ou négativement, mais globalement neutre. Ceci peut être généré en fournissant de l'énergie à un gaz, en appliquant par exemple un champ électrique intense conduisant à l'ionisation du gaz. Cette dernière se fait par le transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz, et dans ce cadre il existe deux types de

Collisions entre ces éléments :

- les collisions élastiques, sont responsables de la conduction et de la diffusion de la chaleur. Elles conduisent essentiellement à un changement de trajectoire des particules et des transferts d'énergie cinétique, sans modification des énergies internes.

- les collisions inélastiques, sont responsables de changements au niveau de l'énergie

interne des molécules, de la nature des particules (ionisation, dissociation, attachement électronique, etc.), en fonction de l'énergie cinétique des électrons. Ces collisions participent à la réactivité chimique des plasmas [2].

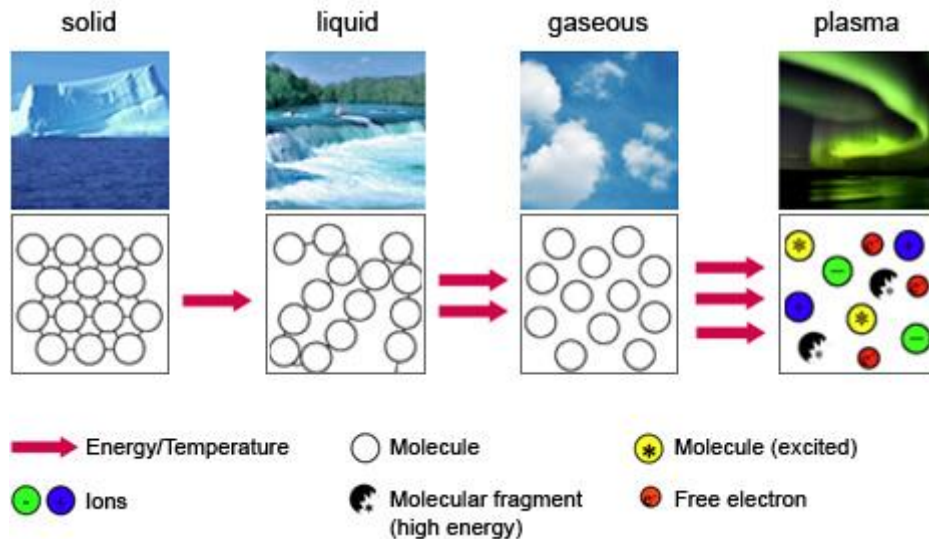


Figure I.1 : Différents états et principaux changements d'état de la matière [36].

I.2.1 Classification du plasma

Il est possible de distinguer deux grandes catégories de plasma, selon la température et leurs différentes composantes : plasma thermique et non-thermique :

I.2.1.1 Plasmas chaud

Les plasmas chauds sont ceux rencontrés au cœur des étoiles ou générés par fusion de deutérium et de tritium soit par confinement magnétique dans les tokamaks soit par concentration de faisceaux laser. Les plasmas chauds sont à des températures de plusieurs millions de degrés et sont des plasmas essentiellement constitués d'électrons et de noyaux atomiques [3].

I.2.1.2 Plasmas froids

Ils sont des milieux gazeux partiellement ionisés ou fortement ionisés. Il est possible de distinguer deux grandes catégories de plasma, selon la température et leurs différentes composantes : plasma thermique et non-thermique.

- **Plasma thermique**

Les plasmas thermiques sont caractérisés par une seule température de gaz T_g , les autres températures des électrons T_e , des ions T_i et des neutres T_N étant proches, voire égale à celle de gaz.

- **Plasma non thermique (Hors équilibre thermodynamique)**

Ces plasmas non thermiques sont naturellement caractérisés par plusieurs températures. La température des électrons T_e est très grande devant celle de gaz T_g qui reste assez proche de la température ambiante. Il y a également une température des ions qui peut être assez grande par rapport à celle du gaz surtout à basse pression ainsi qu'une température propre aux états excités notamment les états vibrationnels qui sont un réservoir d'énergie souvent à l'origine de la dynamique du gaz provoquée au sein de ces plasmas froids non-thermiques. Ce sont donc des plasmas en régime hors équilibre thermodynamique mais aussi chimique parce que la micro-réversibilité n'est naturellement pas vérifiée lors des collisions inélastiques [2].

I.2.2 Caractéristiques des plasmas

Les plasmas sont caractérisés par leurs degrés d'ionisation, l'énergie électrique et la longueur de Debye qui se distinguent d'un type à l'autre (chaud, froid, thermique ou non thermique), ces caractéristiques seront détaillées comme suit :

- ✓ **Degré d'ionisation :**

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

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

On parle de gaz faiblement ionisés lorsque $\alpha \leq 10^{-4}$ (principales interactions de type collisions électron-neutre) et de gaz partiellement voire fortement ionisés lorsque $\alpha > 10^{-4}$.

Lorsque les interactions coulombiennes ne sont plus négligeables (collision électron-électron ou électron-ion).

✓ **Energie électronique**

T_e est la température électronique qui correspond à la température absolue en Kelvin (°K) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique kT_e (en électron-volt eV) avec k la constante de Boltzmann, sachant que $kT_e \sim 1,4 \times 10^4$ K [5].

✓ **La longueur de debye**

La longueur de Debye λ_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 :

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

Avec ϵ_0 la permittivité du vide (8×10^{-12} F/m) et e la charge élémentaire d'un électron ($e=1,6 \times 10^{-19}$ C).

I.2.3 Génération des plasmas

Les milieux plasma est un milieu post décharge électrique généré suite à la création et le passage de cette dernière. Afin de bien comprendre ce plasma ; il est indispensable de bien connaitre en détail ces phénomènes de décharge

I.3 Décharges électriques

Le terme décharge se rapportait initialement à la décharge se produisant entre les deux électrodes planes d'un condensateur plongé dans un gaz. Lorsque un potentiel est appliqué à l'anode est suffisamment important, on observe alors l'apparition d'un courant dans le circuit. Ce courant a pour origine le déplacement des électrons produits par l'ionisation du gaz de la cathode vers l'anode. La tension nécessaire à l'apparition de ce courant est appelée tension disruptive ou tension de claquage [5].

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 lumineuses et les arcs à souder.

I.3.1 Types des décharges selon la caractéristique courant-tension

Un électron placé dans un champ électrique uniforme ($E = V/d$, où V est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes placés à une distance d) est accéléré et peut ioniser des atomes ou des molécules, tel que $A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$. L'ionisation d'une espèce conduit donc à la formation d'une particule chargée et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquérir une énergie suffisante pour ioniser une seconde particule. Ce mécanisme d'ionisation successive conduit à la formation d'une suite d'avalanche électronique conduisant à une « Décharge de Townsend » dans laquelle le champ de charge d'espace est en général négligeable et le maintien de la décharge est assurée par les processus d'émission secondaires comme l'impact d'ions positifs à la cathode.

Pour que la décharge soit autoentretenue, il est nécessaire que tout électron qui quitte la zone d'ionisation soit remplacé. Chaque électron doit créer suffisamment d'ions positifs, de photons et d'espèces métastables pour qu'au moins l'un d'eux puisse produire un nouvel électron [5].

L'augmentation progressive d'une tension appliquée aux bornes des électrodes donne une variation du courant de valeur moyenne en fonction de l'évolution de la tension. Cette variation obtenue est appelée la caractéristique courant-tension de la décharge couronne. Le long de l'axe de variation de la tension dans cette caractéristique, la décharge électrique se comporte en plusieurs régimes.

Zone I : On peut distinguer le premier régime, qui est caractérisé par une simple collection de charges (originaires de la radioactivité naturelle) sous une faible valeur de tension appliquée.

Zone II : commence à partir d'une tension seuil V_0 . Dans cette zone, une forte augmentation de courant est observée pour une faible variation de tension. Ce courant est le résultat des avalanches déclenchées suite à la création des électrons germes assurée par une source externe, donc la décharge demeure non autonome. Une augmentation supplémentaire

de la tension appliquée ramène la décharge à la création des électrons germes assurée par une source externe, donc la décharge demeure non autonome.

Zone III : La décharge devienne autonome en création des électrons germes, autrement dit la création de nouvelles avalanches qui entretiennent la décharge et qu'on appelle décharge couronne appelée aussi décharge streamer.

Zone IV : Une hausse significative de tension permet d'atteindre le régime de plasma hors d'équilibre le plus énergétique (décharge lumineuse anormale) [5].

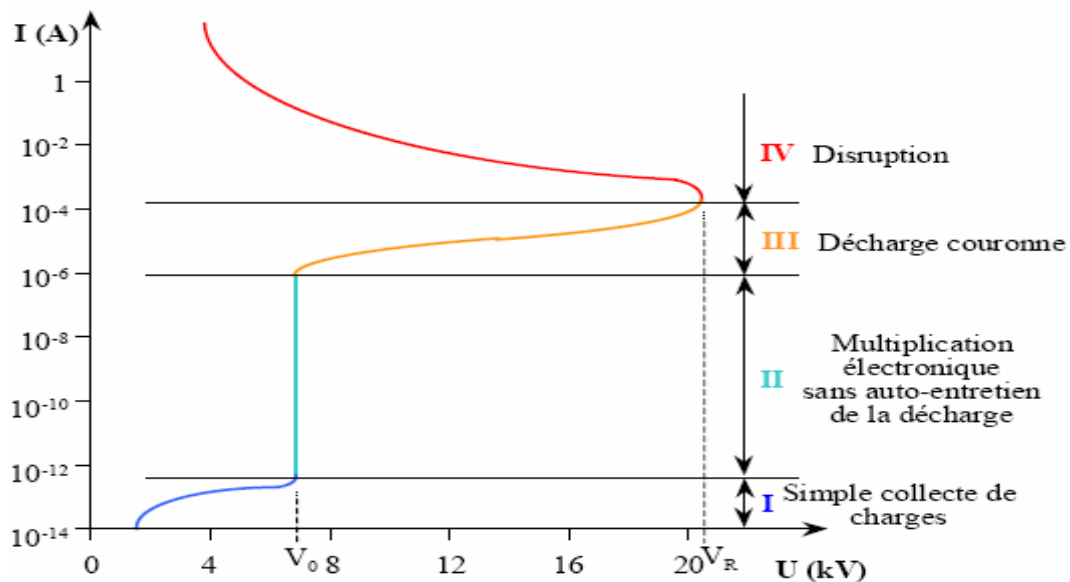


Figure I.2 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter-électrodes $d=13$ mm)[8].

I.3.2 Différents types de décharge à plasma froid

Plasma radio fréquence :

Les systèmes dits radio fréquence fonctionnent en utilisant une alimentation électrique sinusoïdale à une fréquence de 13,56 MHz ou l'une de ses harmoniques (27,12 MHz et 40,68 MHz). Ces configurations comprennent généralement un générateur, un appareil d'adaptation d'impédance et un réacteur. Les générateurs utilisés sont souvent des amplificateurs, synchronisés par une horloge à quartz pour assurer une haute précision et stabilité de la

fréquence. La géométrie du réacteur est adaptée en fonction du processus de traitement spécifique envisagé. Le couplage entre le réacteur et l'alimentation électrique peut être réalisé de manière capacitive, où le gaz à ioniser se trouve entre deux électrodes planes ou cylindriques, ou de manières inductives, où le réacteur est positionné le long de l'axe d'un solénoïde.

L'adaptation d'impédance joue un rôle crucial en optimisant le transfert d'énergie vers le milieu ionisé en équilibrant les impédances de sortie du générateur et d'entrée du réacteur.

Cette adaptation dépend de paramètres tels que la pression du gaz, le type de gaz excité et le type de couplage utilisé entre le générateur et le réacteur [5].

Plasma micro onde :

La décharge luminescente est un phénomène électrique qui se produit lorsqu'un gaz sous faible pression est soumis à une différence de potentiel élevée entre deux électrodes, créant un plasma visible sous forme d'impulsions lumineuses. Générés à l'aide d'électrodes, comme dans le cas des décharges électriques, mais avec des 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 [9,10] ou, plus récemment, pour la stérilisation de l'instrumentation médicale [11,12] Ces plasmas sont également utilisés à la pression atmosphérique dans le domaine de l'analyse spectroscopique [13] et dans le traitement de surfaces métalliques [14] et des matériaux [15] la figure (I.3) montre un dispositif expérimental qui génère les plasmas micro-onde pour la stérilisation de l'instrumentation médicale.

.

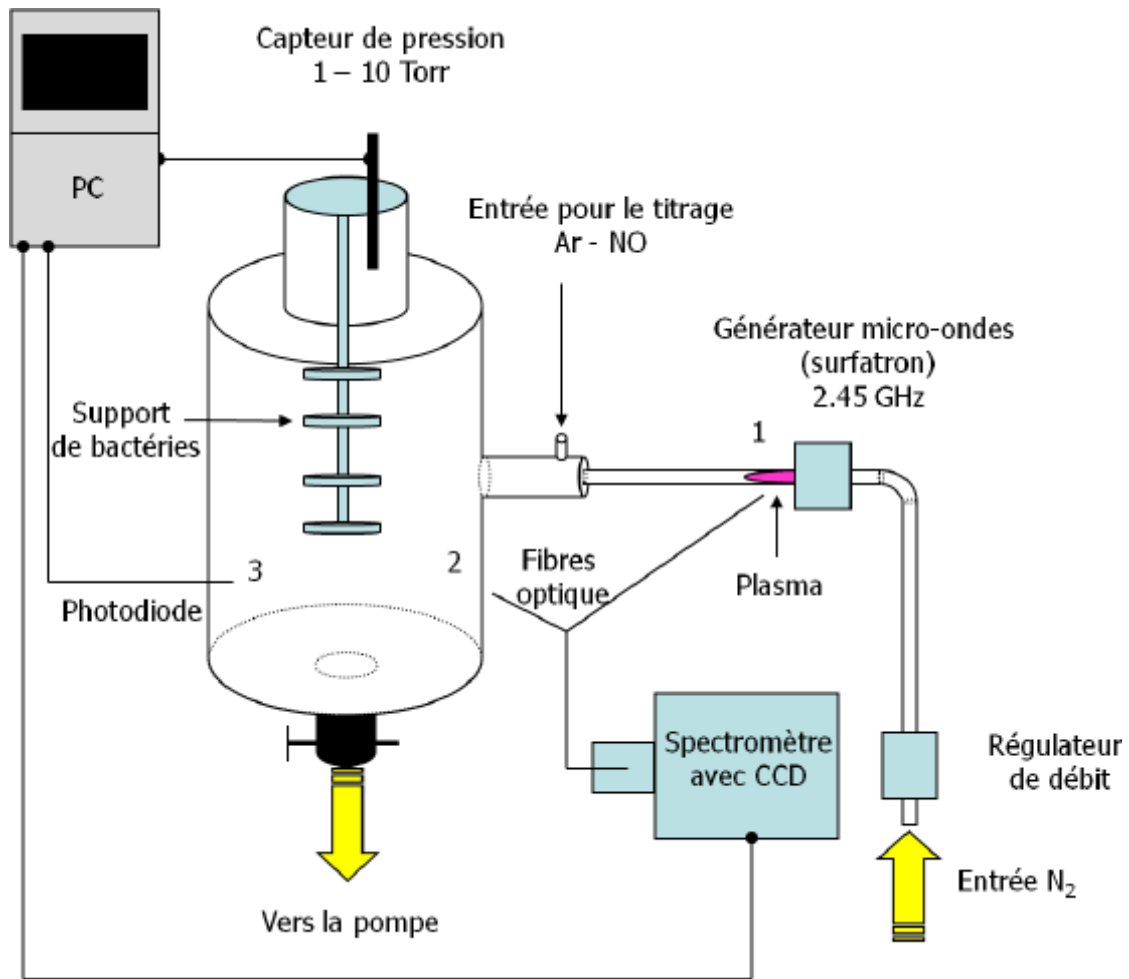


Figure I.3 : Schéma d'un dispositif utilisé pour la stérilisation des l'instrumentations médicales par post décharge micro-ondes en flux [12].

I.3.2.1 Décharge luminescente

La décharge luminescente est un phénomène électrique qui se produit lorsqu'un gaz sous faible pression est soumis à une différence de potentiel élevée entre deux électrodes, créant un plasma visible sous forme d'impulsions lumineuses.

I.3.2.2 Décharge couronne

Toutes les décharges pré-disruptives apparaissant sous la forme de lueurs diverses qui prennent naissance au voisinage d'une électrode à faible rayon de courbure dans la zone où le champ électrique est non uniforme peuvent être qualifiées de décharges couronne [5].

I.3.2.3 Décharge avec barrière diélectrique (DBD)

Les décharges à barrières diélectriques sont réalisées dans un espace inter – électrodes de faible distance, isolé par la présence d’au moins un diélectrique sur l’une des électrodes métalliques (limitant ainsi le risque de passage à l’arc) [7]. L’intérêt des décharges à Barrières Diélectriques (DBD) est de permettre l’obtention d’un plasma froid hors équilibre. De plus l’utilisation du diélectrique a également pour conséquence une répartition plus uniforme des micro-décharges sur toute la surface des diélectriques [5].

La décharge couronne fait partie de la famille des plasmas froids non thermiques. La décharge couronne apparaît entre des électrodes asymétriques et pour une pression du gaz pouvant varier de quelques torrs à plusieurs atmosphères [7].

Les décharges couronnes sont généralement des décharges qui peuvent être générées à des pressions allant de quelques atmosphères à quelques centaines de pascals. Elles se présentent sous un caractère pré-disruptif qui se développe dans un milieu gazeux sous une géométrie entre deux électrodes fortement asymétriques. Sous l’effet de cette asymétrie d’électrodes, une distribution de champ électrique non uniforme (fortement hétérogène) aura lieu suite à une application d’une tension donnée [1].

Il existe différentes configurations des électrodes pour la génération d’une décharge couronne figure (I.5) telles que : Pointe/plan, multi-pointes/plan, fil/cylindre, couteau/cylindre, et cylindre/cylindre.



Figure I.4 : Systèmes d’électrodes couramment utilisés pour la production des décharges [8].

Une décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l’électrode ou de faible rayon de courbure qui va porter son nom, Selon la configuration des électrodes, la

décharge couronne se présente sous forme de canaux lumineux de diamètres allant de quelques nanomètres à quelques micromètres établis entre les deux électrodes.

I.4 Mécanisme de création d'une décharge couronne

Sachant que, la décharge doit nécessairement se disposer d'un nombre d'électrons libres dits électrons germes soit près de la cathode s'il s'agit d'une décharge positive, soit près de l'anode s'il s'agit d'une décharge négative pour se déclencher.

La question qui reste à poser ici, est d'où viens ces électrons ?

Comme réponse, on peut dire que les électrons initiateurs de la décharge couronne son généralement de sources différentes :

1) Sources des électrons germes

La décharge électrique s'établissant dans un espace gazeux soumis à un potentiel, nécessite la présence de charges libres dans le milieu : électrons germes. Ces électrons libres présents dans le milieu gazeux, gagneront de l'énergie sous l'action du champ électrique [2].

2) Emission d'électrons à la cathode

L'émission d'un électron de la cathode s'effectue, soit par effet thermoélectronique par le passage par-dessus d'une barrière de potentiel créée à l'interface métal-diélectrique, soit par effet tunnel par passage à travers cette barrière.

Les électrons qui proviens de la cathode dans le cas d'une polarité positive, constituent une faible contribution au nombre total des électrons germes. Cette faible contribution est à cause des faibles valeurs du champ au niveau de la cathode qui se trouvent relativement loin.

Cela est notablement remarquable dans le cas d'une configuration pointe positive-plan négatif.

En effet, la cathode est généralement considérée comme étant une source d'électrons germes peu efficace, parce qu'elle est d'une part soumise à un champ électrique faible et d'autre part elle se situe à une distance importante de la zone de décharge [1].

3) Ionisation par champ électrique (cas d'une pointe positive)

Ce mécanisme correspond à l'ionisation par champ électrique des molécules ou des atomes qui donnent naissance aux électrons germes. La probabilité de création d'électrons germes est liée à la probabilité de présence d'un ion O^{2-} [21] ou à la présence des impuretés tels que O_2 ou

de H_2O qui donnent naissance aux ions négatifs $O_2^-(H_2O)_n$ et $H_2O^-(H_2O)_n$. Ces espèces (électrons germes), sont produites sous l'effet de l'irradiation par rayonnements cosmiques ou des particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes du gaz présents dans l'espace inter-électrodes par les processus de radio activité naturelle. Il est à noter que 7 à 20 électrons par cm^3/sec sont produits dans l'air à la pression atmosphérique [2, 7, 21,22].

Caractéristique en courant tension d'une décharge couronne

On distingue trois régimes différents de fonctionnement de la décharge couronne :

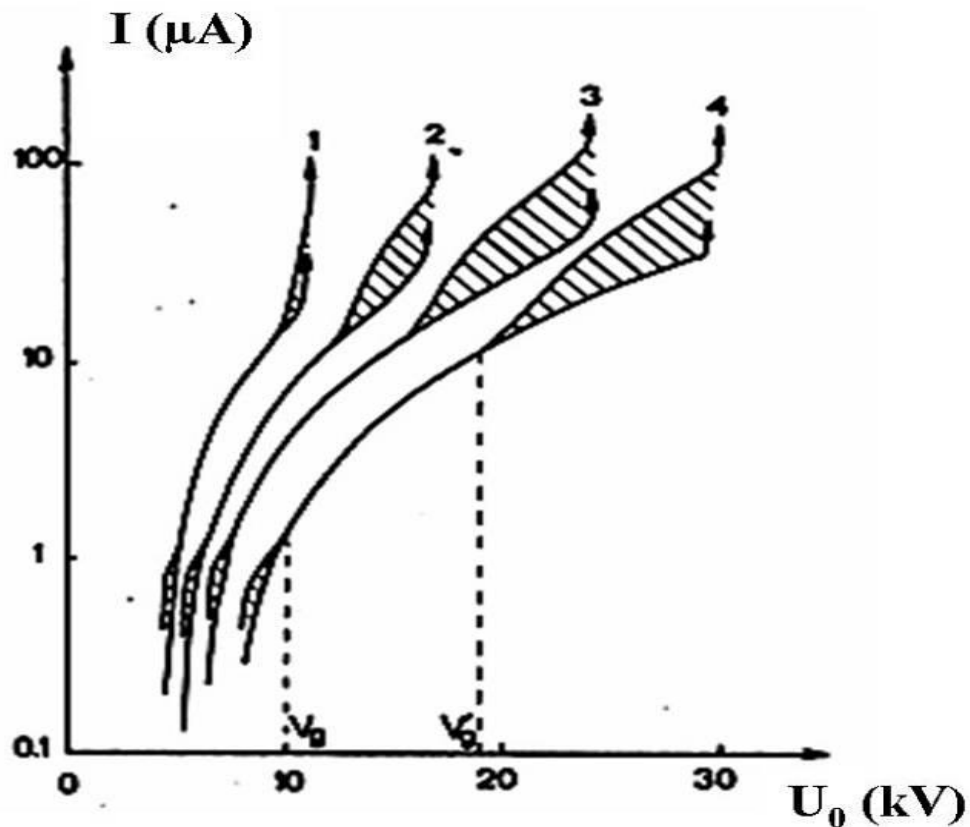


Figure I.5 : Caractéristique Courant moyen – Tension de la décharge couronne pour 4 distances inter-électrodes, entre 1 et 3 cm à pression atmosphérique [17].

- La zone d'auto – stabilisation de la décharge couronne apparaît pour des tensions inférieures à V_g . Le courant de la décharge est impulsionnelle.

La décharge est dite en régime « onset streamer ».

- La décharge couronne à courant continu apparaît pour des tensions entre V_g et $V_{g'}$. La décharge est dite en régime « glow ».

• La décharge couronne à courant impulsionnelle apparaît pour des tensions supérieures à V_g . La décharge est dite en régime « breakdown streamer ».

I.4.1 Mécanisme d'avalanche ou de multiplication électronique

Le transfert d'énergie cinétique par collisions entre un électron accéléré par un champ électrique et les molécules neutres du gaz sein est le processus fondamental d'initiation des avalanches. Ce processus a été proposé en 1910 par John Sealy Edward Townsend pour décrire le phénomène de claquage dans les gaz [26,27].

Il suppose que les électrons existants (électrons germes), ou créés par ionisation sont accélérés par le champ géométrique qui règne dans l'espace inter-électrode sur une distance égale au libre parcours moyen qui est suffisamment longue. Selon la valeur du champ en présence, ces électrons acquièrent une énergie cinétique d'une valeur donnée. Si le gain d'énergie est suffisant pour produire une collision élastique, cela entraîne un transfert d'une quantité de mouvement à l'élément cible. Encore si ce gain est de l'ordre ou supérieur de l'énergie d'ionisation, une collision inélastiques aura lieu. Pour chaque collision ionisante, un nouvel électron est créé, ce dernier sera accéléré et rentre à son tour en collision avec une autre cible. Le processus se répète et se multiplie au fur et à mesure que le nombre total d'électrons augmente. Ce phénomène est appelé l'avalanche électronique.

Il est à noter que la notion de libre parcours moyen, représente la distance moyenne parcourue par un électron entre deux chocs successifs. Sa valeur est donnée par la relation suivante :

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

Avec :

v : vitesse moyenne des particules de gaz.

n : la concentration des particules.

t : temps moyen séparant deux collisions.

δ : la section efficace pour la collision.

N : densité des particules.

I.4.2 Théorie de propagation de streamer

Afin d'expliquer la continuation des avalanches sans arrêt avec une vitesse importante et non affectée par le champ local résultant, il était indispensable de chercher un autre mécanisme qui assure cette combinaison. Ce mécanisme clé est traduit par le fait que, la superposition du champ, appliqué et celui de la charge d'espace a pour effet la création de plus d'électrons germes par photo-ionisation en amont de la charge d'espace. En effet la désexcitation des espaces excités se trouvant dans la charge d'espace, émettra des photons qui vont exciter les neutres devant elle. Donc la création de nouveaux électrons est fortement possible et favorisée préalablement par l'existence des espèces excitées dans la charge d'espace [28,29,30]. Ces nouveaux électrons sont ensuite accélérés par un champ électrique imposé par la charge d'espace créée suite à la coalition des têtes des avalanches interférées. Une vague d'électrons créée par ionisation et accélérés par le champ géométrique appliqué. La vague d'électrons formera un pôle fictif négatif, se sépare de la vague d'ions positifs qui formera à son tour un pôle fictif positif, à cause de la grande vitesse de dérive des électrons. En conséquence, un champ local opposé au champ géométrique s'établira entre les deux pôles où il peut atteindre le même ordre de grandeur que le champ appliqué. En conclusion, les électrons qui dérivent dans cette zone n'auront pas un pouvoir ionisant suffisant à cause de la faible valeur du champ résultant. Ce dernier résultat, implique qu'à un certain moment un arrêt des avalanches aura lieu, cet arrêt est imposé par l'égalité entre les deux champs [1].

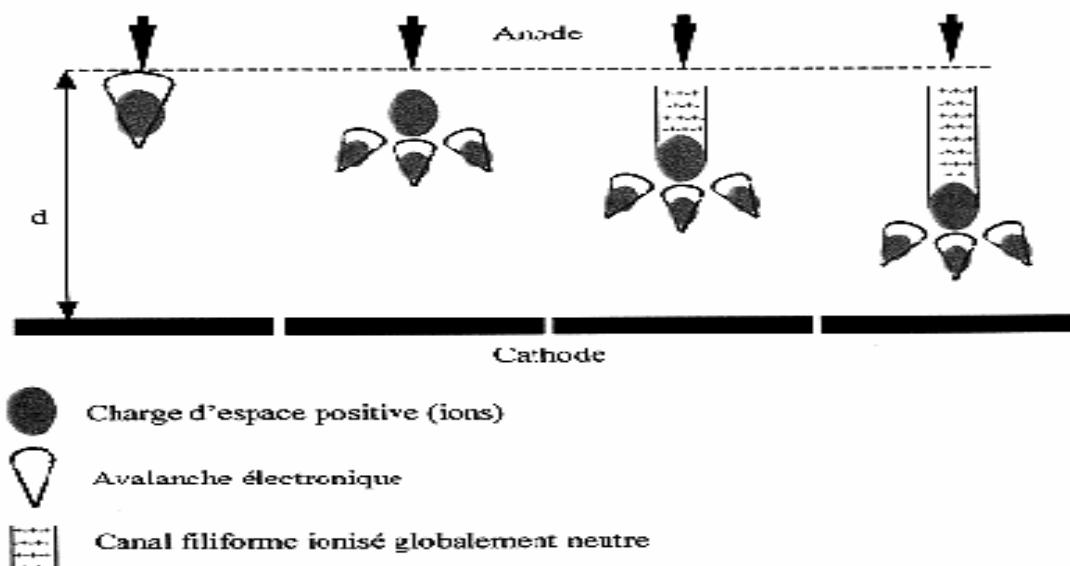


Figure I.6 : Mécanisme de propagation d'un streamer en géométrie « pointe-plan » [19,31].

I.4.2.1 Les différents régimes de décharge couronne

Régime Onset streamer, dû à une tension très faible, ce régime est caractérisé par une zone d'auto-stabilisation de la décharge couronne. Il donne naissance à un courant impulsionnelle d'une valeur moyenne de quelques micromètres et d'une fréquence aléatoire. A cause de la déformation du champ électrique affecté par la charge d'espace positive et négative présentent dans l'espace inter-électrode est de tel caractère.

Les avalanches sont alors avortées dès qu'elles dépassent la zone d'auto-entretien de la décharge.

Régime glow, dû à une tension moins faible par rapport à celle du premier régime qui reste insuffisante pour provoquer le développement des streamers jusqu'à la cathode.

A cause de l'effet de la pointe, le champ électrique n'est plus uniforme le long de l'axe inter-électrodes. La valeur du champ dans l'intervalle pointe-plan est donc très importante au niveau de la pointe par contre elle devienne de plus en plus faible plus en éloignant vers le plan.

Sous ces conditions, il en résulte trois zones distinctes :

-1- La zone d'ionisation : c'est une zone de forte ionisation située au voisinage de l'électrode active là où le champ électrique géométrique est le plus intense. En outre, dans cette zone on marque une domination du processus d'ionisation avec un coefficient d'ionisation très important.

-2- La zone de dérive ionique : de son nom, on peut comprendre que dans cette zone dérivent les ions produits dans la première zone. Le champ électrique géométrique devient faible, donc les processus d'attachement et de recombinaison dominent cette zone. Du point de vue électrique, cette zone est passive mais elle est le siège d'une activité physico-chimique complexe et intense.

-3- La zone critique : constitue la frontière entre les deux zones précédentes où les deux processus se neutralisent entre eux. Visuellement, elle apparaît comme une couronne lumineuse qui enveloppe la pointe.

Globalement, le courant continu de la décharge couronne en régime "**glow**" est le résultat du mouvement des espèces chargées dans l'espace inter-électrodes.

Plusieurs auteurs ont décrit la variation du champ électrique le long de l'axe inter-électrodes, afin de monter la graduation des zones pré-décrites.

A titre d'exemple, dans un espace inter-électrodes pointe parabolique-plan, le champ décroît à partir d'une valeur maximale située au niveau de la pointe parabolique ($z=0$). Cette variation peut être décrite par l'équation suivante :

$$E(z) = \frac{U}{(z + \frac{r}{2}) \ln\left(\frac{2d+r}{2}\right)} \quad (I.4)$$

Avec :

- $E(z)$, est le champ électrique ($V \cdot m^{-1}$),
- U , est la tension appliquée à la pointe (V)
- Z est la distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m),
- r , est le rayon courbure de la pointe (m),
- d , est la distance inter-électrode (m).

La figure (I.7) présente l'enchaînement des différentes zones dans l'espace inter-électrode en régime "glow" dans le cas d'une configuration pointe parabolique-plan.

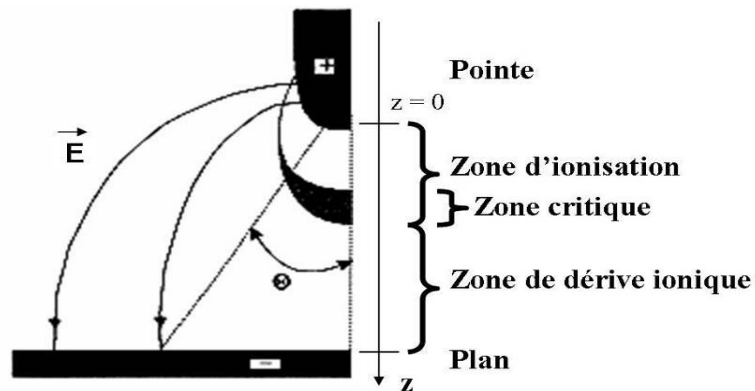


Figure I.7: Topographie de la décharge couronne « pointe-plan » en régime (glow) [17].

Régime breakdown streamer

Ce régime aura lieu quand la tension appliquée dépasse un seuil au-delà d'elle, les avalanches puissent se propager jusqu'à la cathode. A partir de ce seuil, des impulsions de courant s'ajoutent de manière significative au courant continu déjà observé au régime "glow".

I.5 Applications de la décharge couronne

Actuellement la décharge couronne est largement utilisée dans de nombreuses applications surtout physico-chimiques parmi les principales applications sont : [4]

- 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.

I.6 Conclusion

Dans le premier chapitre nous avons présenté introduction sur les décharges en général avec une définition des plasmas et leur caractéristique des généralités sur les 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 le mécanisme et quelques applications de la décharge couronne.

Chapitre II : Expérimentation, mesures et modélisation d'une décharge couronne pointe-plan.

II.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de modélisation de décharge couronne et présenter un comportement électrique équivalent responsable de la conversion d'énergie électrique au sein du milieu plasma. Le modèle est représenté par un circuit équivalent constitué de l'ensemble des paramètres électrique .c'est donc une étape importante que nous devons déterminer ces paramètres Toutefois, cette modélisation est réalisée il est possible d'étudier et d'évaluer l'influence des différents paramètres opératoires sur ce comportement. Dans ce même contexte, ce chapitre sera consacré à l'élaboration d'un modèle électrique équivalent de la décharge pointe plan créée sous deux régime d'alimentation continue où la méthode mathématique d'identification paramétrique qui est utilisée conjointement avec les mesures expérimentales pour déterminer les paramètres électriques du modèle proposé.

II .2 Comportement électrique d'une décharge couronne

Les décharges coronas sont des plasmas froids où seuls les électrons sont énergétiques, entraînant une ionisation locale du gaz sans augmenter significativement la température des ions.

Le comportement électrique d'une décharge corona est principalement gouverné par la dynamique des électrons qui, sous l'effet d'un champ électrique intense, acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules du gaz environnant. Cela crée un canal ionisé qui permet à la décharge de se maintenir. La décharge commence généralement par une ionisation de l'air à la pointe de l'électrode (l'anode) où la densité d'électrons est la plus élevée, formant ainsi un plasma froid. Le courant de la décharge corona est souvent caractérisé par des pics de courant instantané suivis de périodes de faible intensité. Ce comportement est lié à la propagation du streamer, une structure ionisée qui se déplace le long du champ électrique, augmentant l'efficacité de l'ionisation à mesure qu'elle se propage. La résistance électrique du canal ionisé reste faible, ce qui permet à la décharge de se propager sans créer de chaleur excessive. Le courant moyen dépend de la densité des particules chargées dans le canal ionisé et de la tension appliquée entre les électrodes, tandis que la forme d'onde de la tension et du courant peut varier selon la configuration et les conditions expérimentales.

II.3 Aspect pratique de la décharge pointe-plan

Une étude expérimentale constitue la source des données nécessaires pour la modélisation des et ses validations. Pour cette importance, nous consacrerons une partie expérimentale pour l'enregistrement électrique et visuel pour étudier les caractéristiques et le comportement de décharge couronne.

L'expérience doit prendre en compte toutes les conditions expérimentales accessibles en matière de prélèvement des mesures des différentes grandeurs de la décharge électrique et en matière d'observation et d'enregistrement visuels d'une décharge couronne pointe -plan.

II.3.1. Description générale du dispositif expérimental

Le dispositif comporte des électrodes dans un siège qui possède diverses ouvertures pour assurer le passage pour assurer la réalisation des conditions expérimentales (pression de gaz, alimentation électrique) et la capacité de relier les appareils des mesures soit électrique ou visuel. Avec une colonne Z pour le réglage de la distance inter-électrodes graduée en de 0 à 25 mm. Les deux électrodes sont placées et reliées à l'alimentation à travers les connexions appropriées.

Les électrode sont disponibles dans de nombreuses configurations basées sur l'étude de décharge dans notre cas, nous souhaitons utiliser la configuration point-plan qui est composé d'une anode et d'une cathode , La partie active ou l'anode est la pointe sous forme d'un cylindre de diamètre de 1mm et de longueur de 5mm avec un rayon de courbure varier de 20 à 100 μm . La partie cathode est un disque en cuivre de 20mm d'épaisseur et 40mm de diamètre, isolé électriquement.

II.3.2 Alimentations électriques

Les alimentations électriques utilisées pour générer des décharges coronas jouent un rôle crucial dans le contrôle de la décharge et la régulation de la tension et du courant. Dans le cadre des décharges coronas, il existe principalement deux modes d'alimentations : continue et impulsionnelle.

Mode d'alimentation continue

Le circuit électrique utilisé pour la décharge, se compose de plusieurs éléments :

Un générateur haute tension continue (SPELMANN SL600), qui fournit une tension U_g maximale de 15kV.

Ce générateur est suivi par une résistance de charge de $25M\Omega$, dont le rôle est de limiter le courant dans le circuit en cas de passage à l'arc. L'électrode active (la pointe) est reliée directement à la résistance de charge R , tandis que la cathode est connectée à une résistance de mesure. L'alimentation électrique en régime continu assure une alimentation réglable.

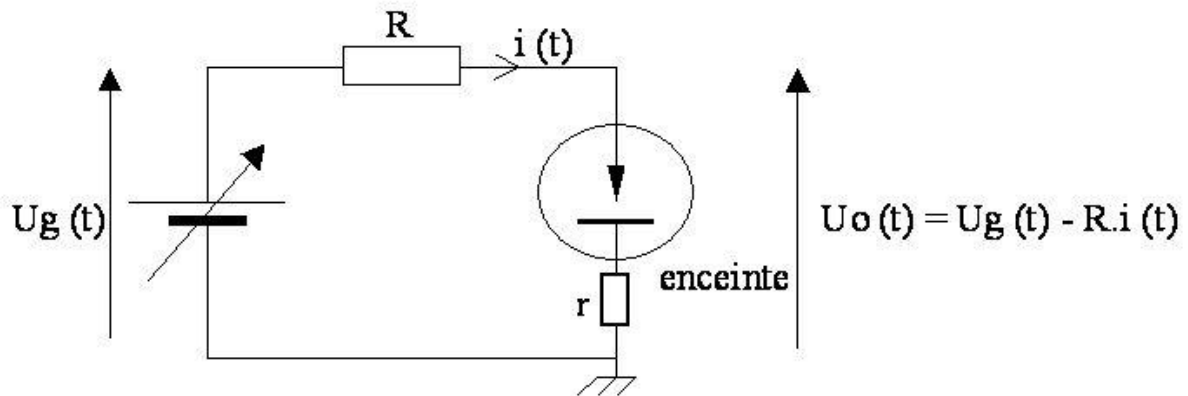


Figure II.1 : Circuit d'alimentation d'un diaphragme à décharge, en tension continue [7].

Mode d'alimentation impulsionnelle

En plus des éléments constituant 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.

La figure II.3, montre les différentes parties de l'alimentation en régime de tension impulsionnelle.

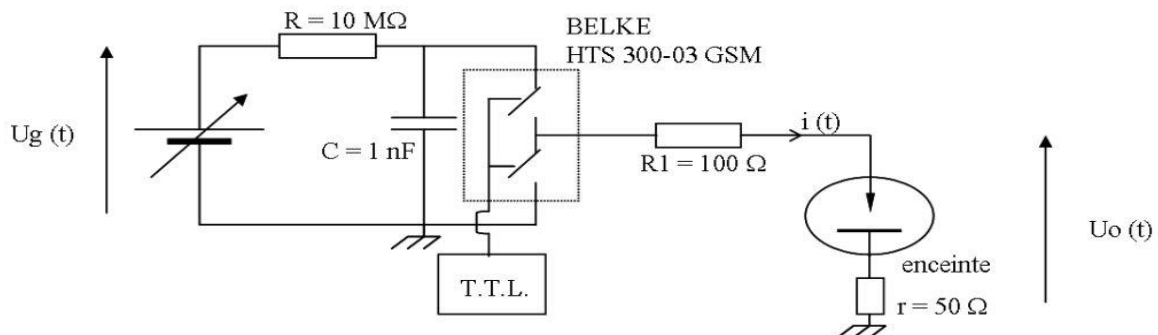


Figure II.2 : Circuit d'alimentation d'un diaphragme à décharge, en tension impulsionnelle.[7].

Le régime de tension i pulsionnelle est beaucoup plus complexe dans sa mise en œuvre et dans son étude. De nouveaux paramètres apparaissent tels que :

$$C_r = \frac{\tau}{T} \quad (\text{II.1})$$

- la durée de l'impulsion τ ,
- la fréquence de répétition f ,
- le rapport cyclique (rapport entre la durée de l'impulsion et la période).

II.3.3 Moyens de mesures et enregistrement

L'ensemble des mesures électriques sont réalisées par l'intermédiaire d'une sonde haute – tension (LeCroy PPE20kV ou Tektronix 6015A) reliée à un oscilloscope

(LeCroyWaverunner 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 Ω .

Les grandeurs électriques mesurées sont le courant moyen, instantané ainsi que la tension de la décharge. Les mesures de courant sont prises le plan et la masse.

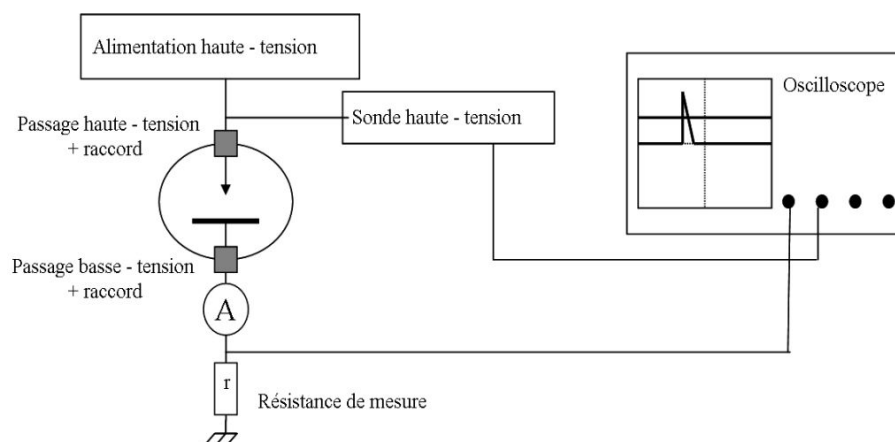


Figure II.3 : Banc des mesures électriques [7].

Les figures II.4 et II.5, montrent les formes d'ondes du courant instantané et de la tension inter-électrodes affichés sur l'oscilloscope sous forme de graphe

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

- ✓ Alimentation positive continue appliquée (E_{app})
- ✓ Air synthétique sec (80% N₂, 20% O₂)
- ✓ Pression atmosphérique ✓ Température ambiante
- ✓ Rayon de courbure de la pointe $\rho=25\text{ }\mu\text{m}$

Grandeurs électriques sous-alimentation continue

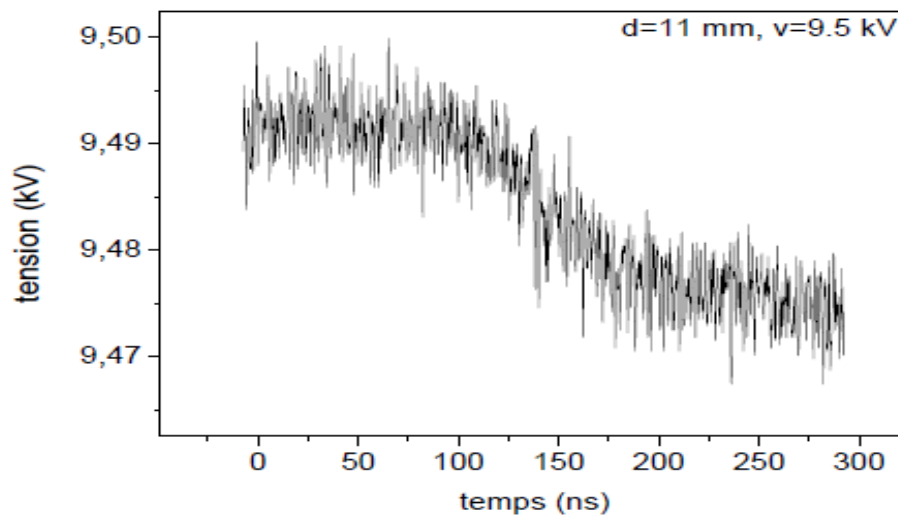


Figure II-4 : Tension inter-électrodes mesurée lors d'une impulsion de la décharge Couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour $d=11\text{ mm}$, $V=9,5\text{ kV}$ et $\rho=25\text{ }\mu\text{m}$ [1].

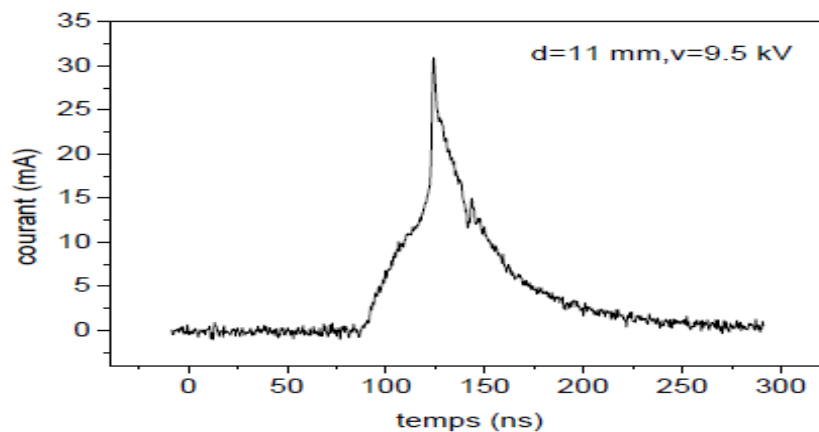


Figure II-5 : Courant instantané de la décharge couronne dans l'air synthétique à la pression atmosphérique pour $d=11\text{ mm}$, $V=9,5\text{ kV}$ et $\rho=25\text{ }\mu\text{m}$ [1].

Grandeurs électriques sous-alimentation impulstionnelle

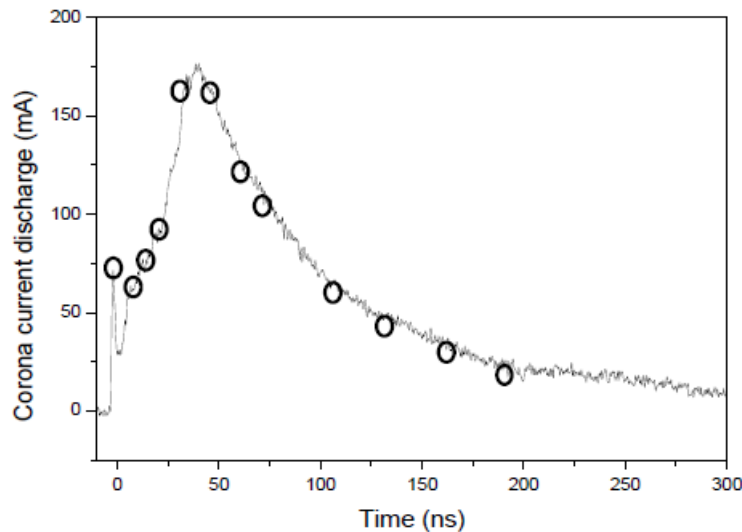


Figure II-6 : Courant instantané de la décharge couronne impulsionnelle pour $V=8\text{kV}$, $d=8\text{mm}$, $\rho=25\mu\text{m}$ [5].

II.4 Aspect physique de la décharge pointe -plan

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

Néanmoins la propagation de la décharge dépend strictement du niveau de la tension appliquée ce qui traduit qu'on peut assister à deux comportements : le premier sans décharge si le niveau de la tension appliquée est inférieur au seuil de la tension de décharge ou avec décharge si il le dépasse. [1]

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

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

II.4.1 Comportement d'une décharge pointe plan sans décharge

Les espaces inter-électrode avant le développement de la décharge est le siège d'un faible courant de fuite capacitif à la géométrie inter-électrode

Habituellement, lorsque la tension appliquée n'est toujours pas suffisante pour provoquer La propagation de la décharge, le système d'électrodes se comporte comme un condensateur à valeur fixe. Un certain nombre d'études ont confirmé le comportement du réacteur à décharge corona Si la tension appliquée est relativement faible, elle est électriquement similaire à un condensateur.

Cela nous permet de calculer la capacité initiale utilisant l'expression du courant capacitif de la façon suivante [1]:

$$i(t) = \frac{C_0 dv(t)}{dt} \quad (II-2)$$

Avec :

C_0 , est la capacité géométrique du système

i , est le courant traversant l'espace inter-électrodes

$v(t)$, 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 :

$$c(t) = \frac{q(t)}{v(t)} \quad (II.3)$$

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

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

➤ Cas d'une géométrie d'électrodes asymétrique

Pour plus de détail sur ce calcul nous invitons les lecteurs à se référer [32, 33,34].

II.4.2 Comportement d'une décharge pointe plan avec décharge en tension continue

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

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

En décharges couronnes filamenteuse, telle que notre décharge pointe plan, l'ensemble des études est des observations expérimentales montrent que le canal de décharge est caractérisé par des faibles valeurs du champ électrique tandis que sa tête qui contient ce qu'on appelle la charge d'espace est marquée par des valeurs du champ assez importantes. Les images dans le figure II.7 prises au laboratoire, montrent la morphologie réelle de notre décharge pointe plan avec toutes ses phases de propagation visualisées [1].

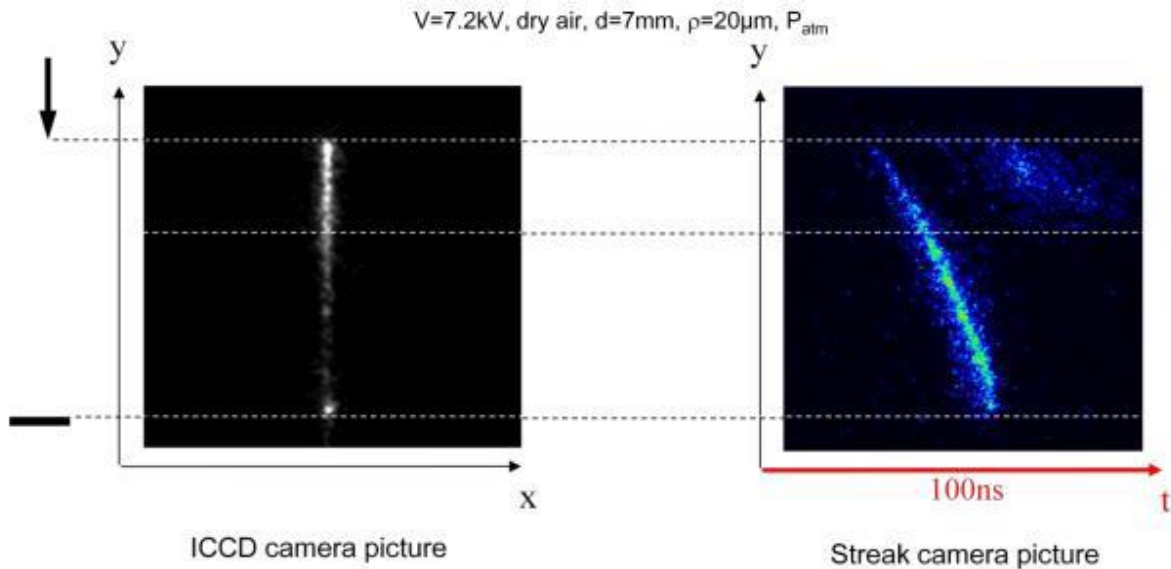


Figure II-7: Observation expérimentale de la propagation d'une décharge pointe plan positive obtenue par caméras ICCD et Streak [12].

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

- Le court-circuit progressif de l'espace inter-électrodes au fur et à mesure que l'onde ionisante avance.
- La multiplication de la quantité des charges positives causée par l'activité ionisante. Ces deux effets ont également deux conséquences :
 - ✓ Un changement en résistance de l'intervalle inter-électrodes,
 - ✓ La création d'un dipôle capacitif à anode fictif mobile.

La partie déjà court-circuitée de l'espace inter-électrodes est en série géométriquement avec le dipôle capacitif. A cet effet, la propagation du streamer augmentera la longueur du canal conducteur, tout en diminuant de la distance de séparation entre les deux électrodes du dipôle capacitif. Ceci impliquera que ni la capacité formée par la tête du streamer et la cathode ni la résistance du canal conducteur (lissé derrière), ne sont constantes.

De plus Le champ résultant renforcera de sa part l'accroissement de la charge d'espace et l'allongement du canal conducteur. Ainsi, on assistera par cet effet mutuel à une variation non

linéaire de la charge d'espace et de la distance soit par l'allongement du canal conducteur, soit par le rapprochement entre les électrodes du dipôle capacitif résultant. D'autre part, sachant que le même courant de décharge traversera le dipôle capacitif et le canal conducteur, on peut conclure que notre décharge couronne pointe plan positive se comporte électriquement comme une résistance non linéaire en série avec une capacité non linéaire.

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

En conclusion, on vient de proposer un modèle électrique équivalent à notre décharge pointe plan positive à la pression atmosphérique [1].

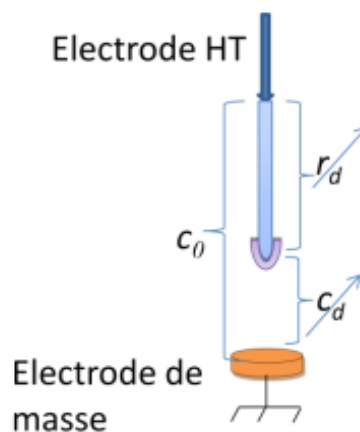


Figure II-8 : Schéma électrique représentatif simplifié d'une décharge pointe plan Continue positive [1].

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

II.4.3 Comportement avec décharge sous tension impulsionnelle

Physiquement, la décharge couronne en régime d'alimentation impulsionnelle est caractérisée par une propagation arborescente des filaments de décharge (streamers), ce sont donc plusieurs streamers qui se développent simultanément de la pointe en direction du plan avec des vitesses de propagation différentes. La figure II-9 montre une photographie prise lors de développement d'une décharge couronne impulsionnelle.

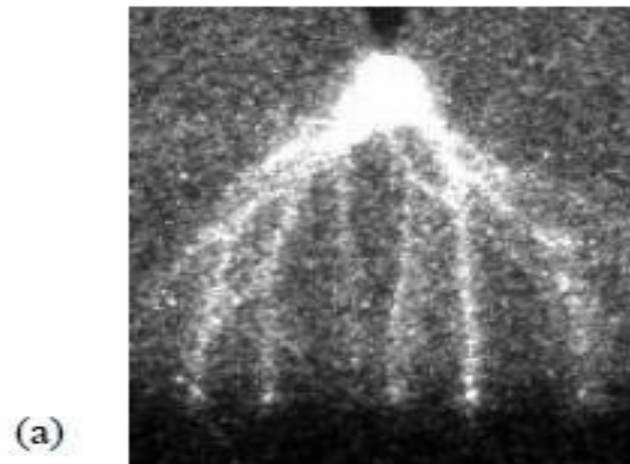


Figure II-9 : (a) Image de la décharge couronne dans l'air sec à la pression atmosphérique pour un temps d'exposition de 10ns : $E_{app}=8kV$, $\tau=40\mu s$, $f=100Hz$, $d=8mm$, $\rho=25\mu m$ [5].

II.5 Modélisation de la décharge pointe plan

II.5.1 Modèle mathématique

Le modèle électrique proposé est représenté par un circuit électrique équivalent dont on peut déduire ses équations mathématiques appropriées. La figure (II-10), représente le schéma électrique équivalent du modèle de la décharge.

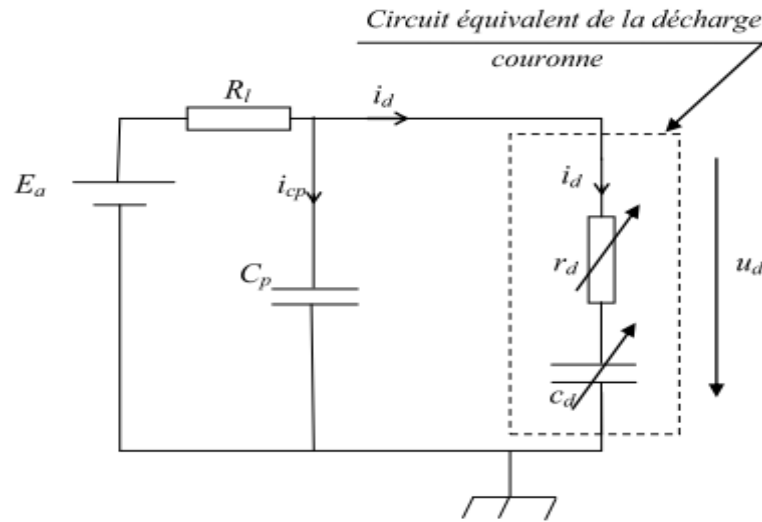


Figure II-10: Circuit équivalent proposé d'une décharge pointe plan positive.

E_a : est la tension continue d'alimentation

R_l : est une résistance limitatrice du courant d'alimentation

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

La tension aux bornes de la décharge $i_{d(t)}$ donnée par le circuit équivalent est régit par l'équation suivante :

$$u(t) = u_{r_d}(t) + u_{c_d}(t) \quad (\text{II-4})$$

(t) est la tension aux bornes de la décharge,

$u_{c_d}(t)$: est la tension aux bornes de la capacité variable de la décharge

Remplaçant les tensions (t) , $u_{c_d}(t)$ par leurs expressions équivalentes en fonction

du courant de la décharge et la charge accumulée, on obtient :

$$u_{d(t)} = r_d(t) i_d(t) + \frac{q(t)}{c_{d(t)}} \quad (\text{II-5})$$

$q(t)$ représente la charge accumulée durant la phase de décharge correspondant à une impulsion de courant de la décharge. La charge accumulée $q(t)$ obtenue en intégrant par rapport au temps le courant d'une impulsion de décharge couronne.

L'équation peut être donnée sous la forme suivante :

$$i(t) = \frac{1}{c_d(t) r_d(t)} q(t) + u(t) \frac{1}{r_d(t)} \quad (\text{II-6})$$

Nous avons fourni un modèle électrique équivalent de notre décharge qui nous donne un résultat approximatif sur le comportement de décharge. La deuxième étape sera donc la détermination des paramètres du modèle proposé. Nous proposons donc une méthode de résolution adaptée basée sur quelques données expérimentales. Ce type de problèmes est traité par certaines méthodes d'optimisations connues sous le nom « méthodes d'identification des modèles ». Le choix entre ces méthodes en application, obéie à la nature et la complexité du problème étudié.

L'expérimentation joue un rôle crucial dans l'identification paramétrique, qui consiste à déterminer les valeurs des paramètres d'un modèle théorique à partir des données réelles observées dans des conditions spécifiques.

II.5.2 Méthode d'identification de modèle

La méthode d'identification est technique qui permet d'obtenir un modèle mathématique d'un système à partir de données expérimentales et de connaissances physiques disponibles a priori. Les modèles obtenus par identification doivent fournir une approximation fidèle du comportement du système physique qui exprime la relation entre les entrées et les sorties du système à travers des paramètres qui traduisent son comportement. Ces entrées sorties dans ce cas est (courant \tension).

II.5.3.1 Identification paramétrique

Le principe d'une identification paramétrique est de déterminer les paramètres d'un modèle mathématique à partir des données d'observations pratiques. Le modèle doit permettre de calculer la sortie d'un procédé y à n'importe quel instant t si les conditions initiales du système sont connues. Dans un modèle régressif, il est possible de se servir des valeurs des entrées aux instants présents et précédents ($u(t)$, $u(t-1)$, ...) et des valeurs précédentes de la sortie ($y(t-1)$, $y(t-2)$, ...) pour calculer la valeur de sortie $y(t)$ à l'instant actuel [1].

On peut donc dire que : $y(t) = f(y(t-1), y(t-2) ; (u(t), u(t-1), \dots))$.

II.5.3.2 Estimation de la complexité du Modèle (choix de méthode)

Le choix d'un estimateur réalise un compromis entre les considérations liées au procédé et les contraintes liées à sa mise en œuvre. Ce que nous devons prendre en considération ici ce que les données de mesure ne sont pas précises car elles sont en général toujours perturbées par des bruits de diverses origines. Une perturbation s'ajoute sous forme d'un bruit de caractère aléatoire qui influe ainsi sur l'opération d'identification toute entière. La prise en compte de cette perturbation est un facteur déterminant pour le choix de la méthode d'identification appropriée [1].

Le model identifier doit satisfaire les critères mentionnés précédemment après les tests statistiques sur l'erreur de prédiction et la sortie prédite.

L'identification se base sur les données expérimentales, ces données sont enregistrées à partir des mesures effectuées qui sont de nature discrètes. Cette identification s'appuie sur l'application de certaines méthodes numériques à calcul matriciel (algorithmes). Le principe dans ces méthodes base sur l'optimisation d'un critère minimisant l'erreur entre une sortie d'un système réellement mesurée et la même sortie du système obtenue à partir de son modèle équivalent en fonction de ces paramètres.

Pour notre étude, pour la modélisation nous choisissons la méthode d'identification paramétrique basant tandis que pour le l'estimation des paramètres du modèle nous choisisant l'algorithme de moindres carrés récursif.

II.5.3.3 Algorithmes de moindres carrés récursif appliqués à la décharge pointe plan positive

Nous avons vu que le principe de base de cet Algorithme est d'estimer des paramètres d'un modèle qui minimisent l'erreur entre les deux sorties (réelle mesurée et calculée), de ce dernier.

Pour mieux comprendre ce principe, nous détaillons par la suite son mécanisme de fonctionnement.

La sortie modèle d'un système donné peut être exprimée sous la forme suivante :

$$Y(t) = a_1 x_1(t) + x_2(t) b_1 = \theta^T(t) \varnothing(t) \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Avec :} \quad \theta(t) = [a_1, b_1] ; \quad \varnothing(t) = [x_1(t), x_2(t)] \quad (\text{II.8})$$

Dans notre cas selon le modèle de la décharge couronne pointe plan DC positif qui est donné par l'équation : $i_d(t) = -\frac{1}{c_{d(t)*r_{d(t)}} q(t) + \frac{1}{r_{d(t)}} u_d(t)$ (II-9)

On peut considérer $i(t)$ qui est le courant de la décharge comme étant une sortie système et donc du modèle équivalent tel qu'il est montré sur la figure (II.11).

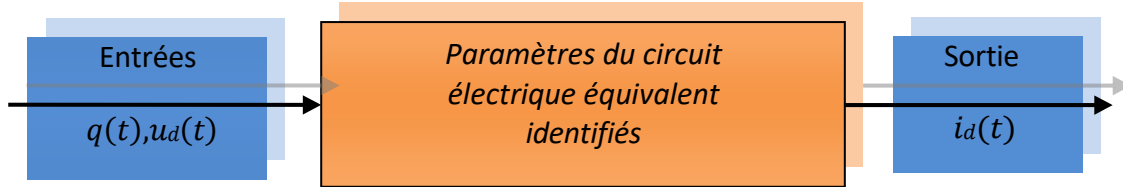


Figure II-11: Représentation schématique du système à identifier [1].

$\theta(t)$: représente le vecteur des paramètres tel que :

$$\theta^T = [a_1, b_1] \Rightarrow \theta^T(t) = \left[\frac{1}{c_{d(t)r_{d(t)}}, \frac{1}{r_{d(t)}} \right] \quad (\text{II.10})$$

On a aussi le vecteur des grandeurs observées expérimentalement (mesurées) $\emptyset^T$ qui est donné comme suit :

$$\emptyset(t)^T = [x_1(t), x_2(t)] \Rightarrow \emptyset(t)^T = [q(t), u_d(t)] \quad (\text{II.11})$$

$\emptyset(t)$: représente le vecteur des mesures ou des observations.

$q(t)$, $u_d(t)$ représentent les entrées de notre système de décharge.

Le modèle de prédiction (*a priori*) sera décrit dans ce cas par :

$$\hat{i}(t) \approx \hat{\emptyset}(t) \hat{\theta}(t) = -\frac{1}{\hat{c}_{d(t)*\hat{r}_{d(t)}} q(t) + \frac{1}{\hat{r}_{d(t)}} u_d(t) \quad (\text{II.12})$$

Présentation d'algorithme de moindres carrés

L'objectif recherché est que l'algorithme d'estimation trouve le vecteur de paramètres θ qui minimise l'erreur entre la sortie du procédé Y et la sortie du modèle de prédiction $f(x, \theta)$, selon l'expression suivante :

$$\min \sum (y_i - f(x_i, \theta))^2 = \min \sum (y_i - \theta(t)\phi(t))^2$$

ϕ : le vecteur des observations (données des mesures)

- La sortie système électrique est le courant de la décharge
- Le vecteur des observations est composé des données de la tension et de la charge accumulées.
- Le vecteur des paramètres à estimer est composé de l'inverse des valeurs de la résistance et l'inverse du produit des valeurs de la résistance et de la capacité de la décharge

Le critère des moindres carrés à minimiser est donné par :

$$L(D, \theta) = \|Y - \phi(t)\theta(t)\|^2$$

Notez que D est l'ensemble de toutes les données modèle.

$$L(D, \theta) = (Y - \phi(t)\theta(t))^T (Y - \phi(t)\theta(t)) = YY^T - Y^T\phi\theta - \phi^T\theta^TY + \phi^T\phi\theta^2$$

Le gradient du résiduel est :

$$\frac{dL(D, \theta)}{d\theta} = -2\phi^TY + 2\phi^T\phi\theta$$

En fixant le gradient du résiduel à zéro et en résolvant pour θ , nous obtenons :

$$\frac{dL(D, \theta)}{d\theta} = 0 \rightarrow -2\phi^TY + 2\phi^T\phi\theta = 0$$

On aura : $\theta = (\phi\phi^T)^{-1}\phi^TY$

L'erreur est donc : $e = [\phi\theta - Y]$

e : représente physiquement le bruit de mesure.

Les expressions de récurrences qui résument l'algorithme de la méthode des moindres carrés récursive sont les suivantes [35, 36] :

$$\hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N-1} + K_N(y_N - \phi_N^T\hat{\theta}_{N-1})$$

$$K_N = P_{N-1}\phi_N(\phi_N^TP_{N-1}\phi_N + \lambda)^{-1}, \quad P_N = \frac{1}{\lambda}(P_{N-1} - K_N\phi_N^TP_{N-1})$$

λ est une pondération généralement introduite pour limiter l'influence des observations passées dans l'estimation du vecteur des paramètres à l'instant t correspondante à l'itération N .

II.5.3.4 Paramètres électriques estimés

La simulation du modèle électrique équivalent de la décharge à travers l'application de l'algorithme RLS modèle électrique nous permet après ajustement d'obtenir les paramètres électriques du modèle. Il s'agit de la résistance et la capacité de la décharge, que nous les présentés ci-après.

Nous présentons sur les figures (II-12, II.13), la variation de résistance et celle de la capacité de la décharge identifiée par l'algorithme RLS pour le points opératoires :

($d=5\text{mm}$, $E_{app}=5\text{KV}$) .

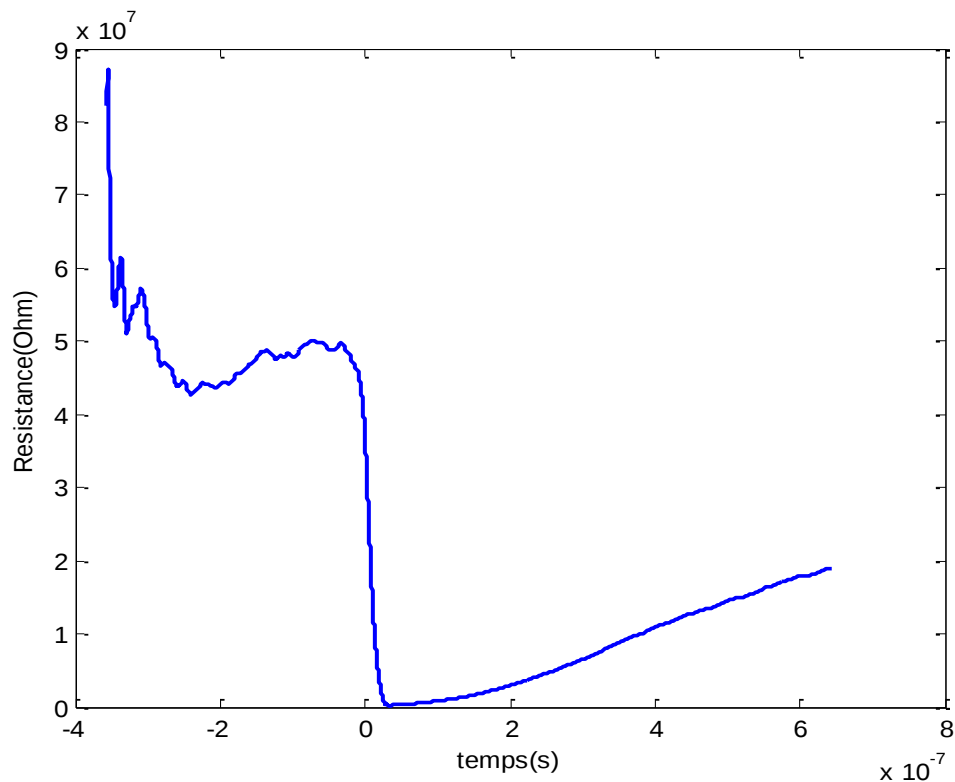


Figure II-12 : Courbe de la résistance de la décharge estimée dans les conditions opératoires : ($E_{app}=5\text{KV}$ et $d=5\text{mm}$).

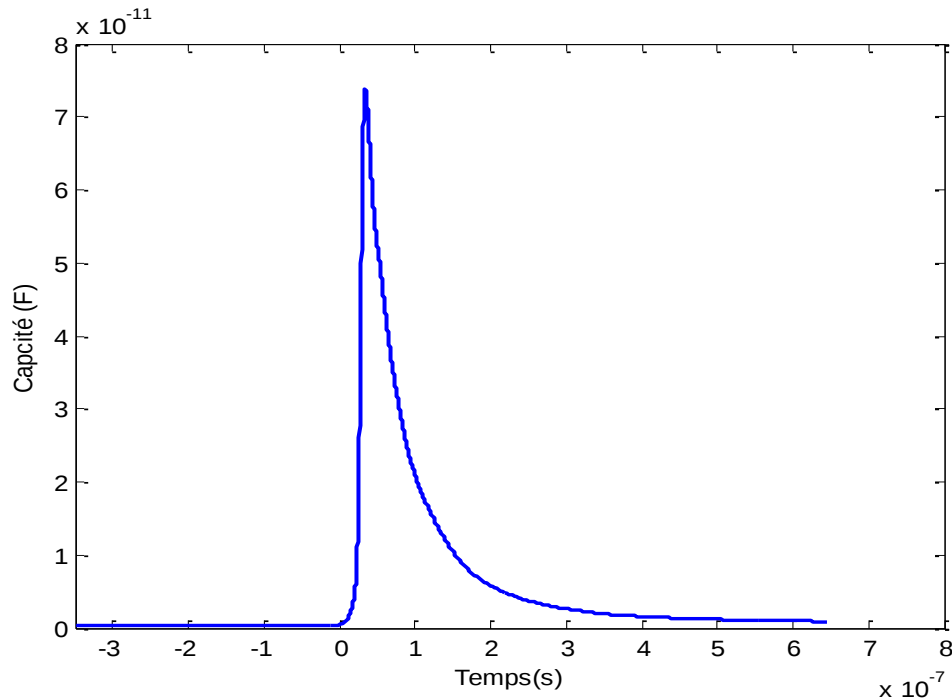


Figure II-13 : Courbe de la capacité estimée dans les conditions opératoires :
($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).

1. Résistance de la décharge.

Sous l'effet de la tension appliquée, la résistance du gap inter-électrodes décroît rapidement. Ce phénomène s'explique par l'apparition et la propagation de streamers depuis la pointe de l'anode jusqu'à la surface de la cathode. Lorsque la décharge atteint la cathode, le gap est entièrement court-circuité et la résistance atteint sa valeur minimale, $R_{min} = 3,8387 \times 10^5 (\Omega)$. À ce stade, la décharge s'arrête, le courant diminue, et la résistance remonte progressivement vers sa valeur initiale. Les résultats de simulation collent étroitement aux prédictions théoriques, ce qui confirme la pertinence du modèle et la fiabilité de sa représentation mathématique.

2. Capacité de la décharge

La capacité suit la tendance théorique attendue dans ce type de configuration. L'amplification de la décharge engendre une augmentation de la densité de charges, ce qui accroît naturellement la capacité. Par ailleurs, la formation de canaux de décharge réduit la distance entre l'extrémité des streamers et la cathode, contribuant à une capacité encore plus élevée. Lorsque la décharge arrive à la cathode, la capacité atteint sa valeur maximale, $C_{max} = 1,5680 \times 10^{-15} (F)$. Ensuite, l'effet capacitif s'estompe progressivement à mesure que

les charges dans le gap disparaissent, traduisant une décroissance de la courbe de capacité. Cette dynamique est clairement illustrée par le graphe de la figure II-13.

3. Comparaison entre le courant mesuré et les courants calculés en fonction des paramètres électriques de la décharge

1^{er} cas

Les figures (II.14, II.15) présente une comparaison entre le courant de décharge mesuré et les courants calculés en fonction des paramètres électriques obtenus par simulation montre une bonne similitude entre les deux.

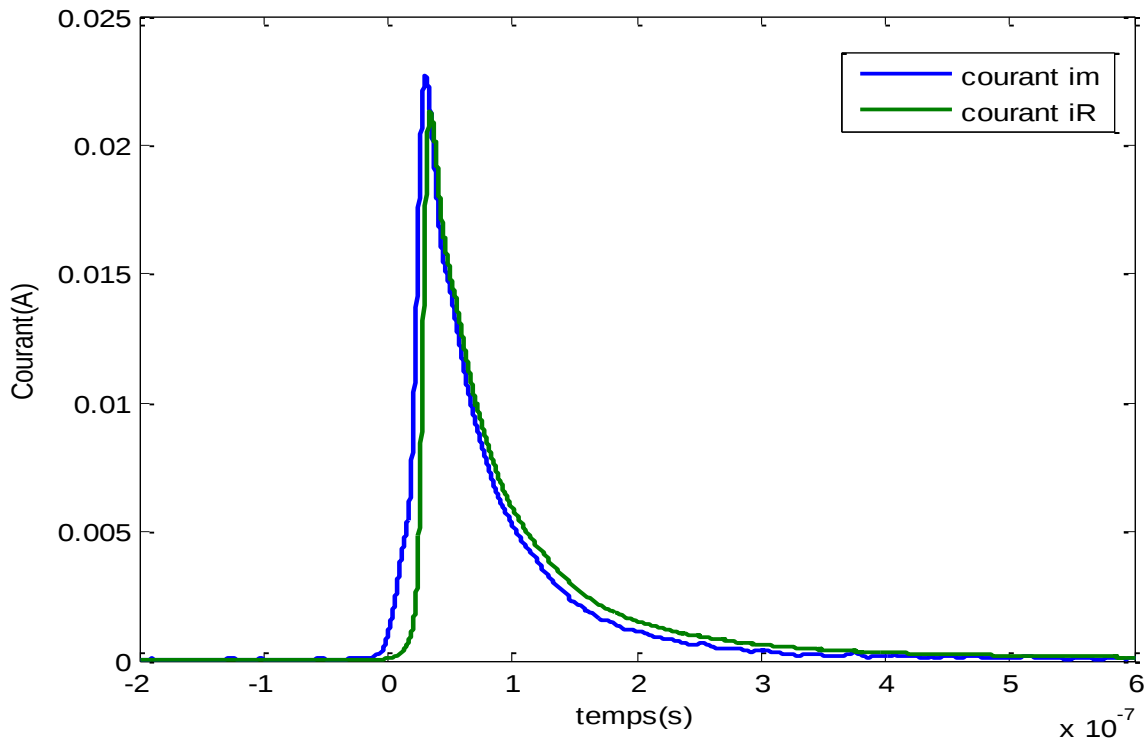


Figure II.14 : Comparaison entre le courant de la décharge mesurer et le courant résistif estimé au point opératoire : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).

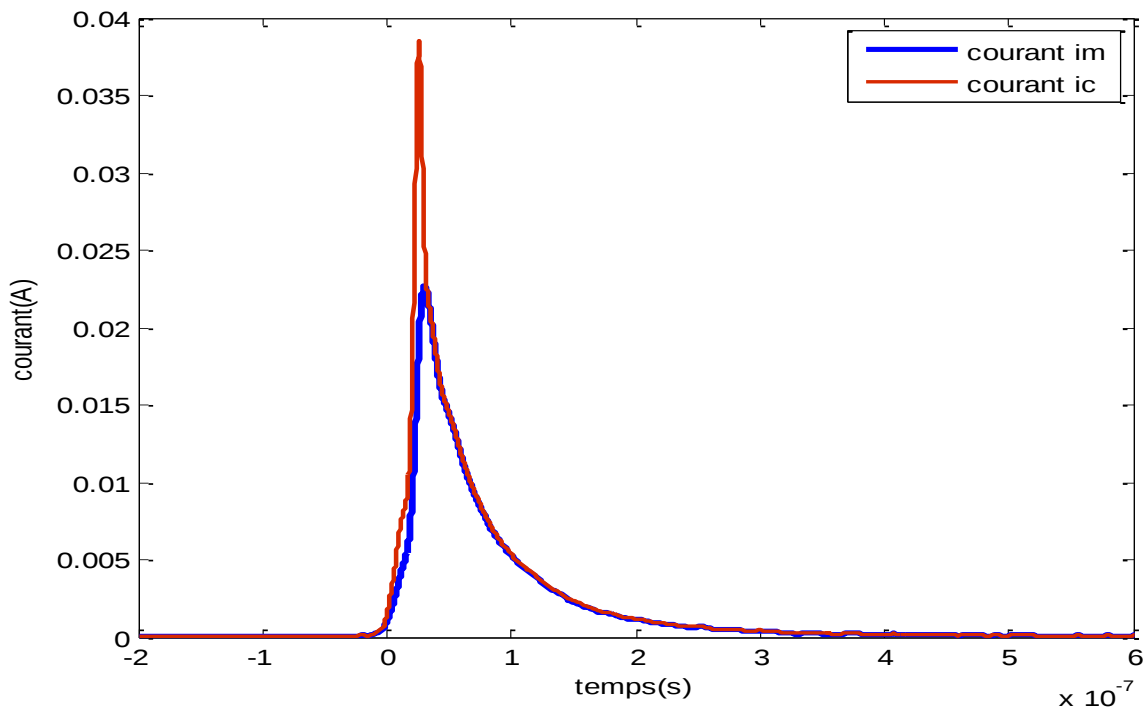


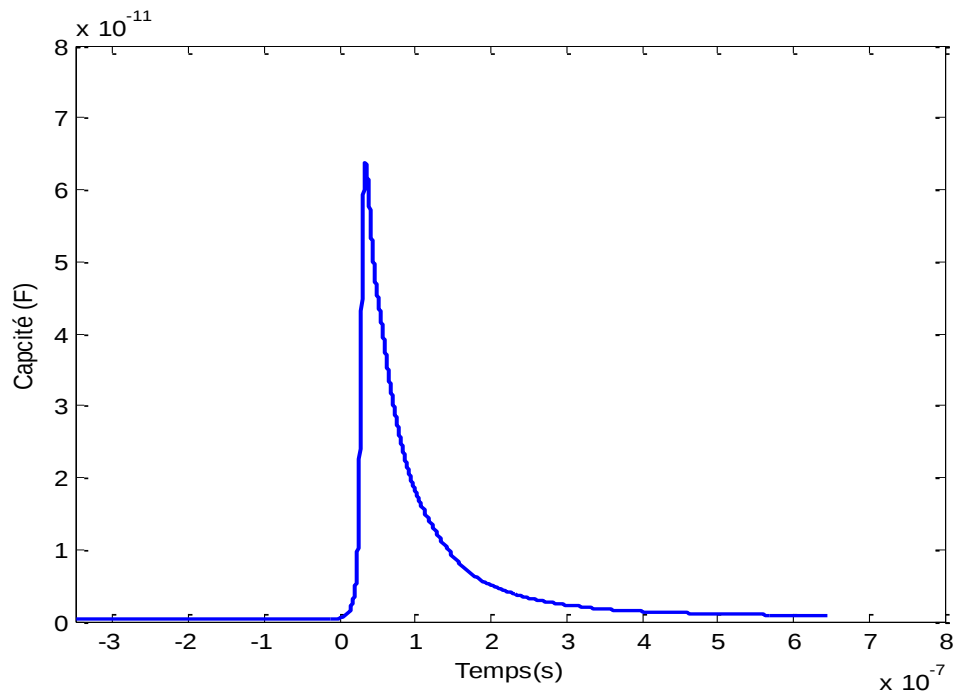
Figure II.15 : Comparaison entre le courant de décharge mesurer et le courant capacitif estimé au point opératoire : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).

De même, les courbes des courants calculés en fonction de ces deux paramètres sont superposées sur le courant de décharge réel mesuré. Néanmoins, malgré l'amélioration sérieuse réalisée jusqu'à cette étape, il est à noter qu'un appréciable écart en amplitude entre les courants calculés et le courant mesuré est toujours observé. En réalité, ce problème est causé par l'existence d'une faible densité de points de mesures en données d'entrées dans certaines phases de la décharge due à l'évolution très rapide du phénomène dans ces endroits. Cependant, les moyens de mesures se trouvent dépassés par la dynamique exceptionnelle du phénomène. Dans notre cas par exemple, la variation du courant de décharge ne peut pas être suivie convenablement notamment entre le début du front montant et le pic de la courbe. Cette insuffisance de données dans ces phases empêche l'algorithme d'assurer une bonne estimation des paramètres avec cet handicap [1].

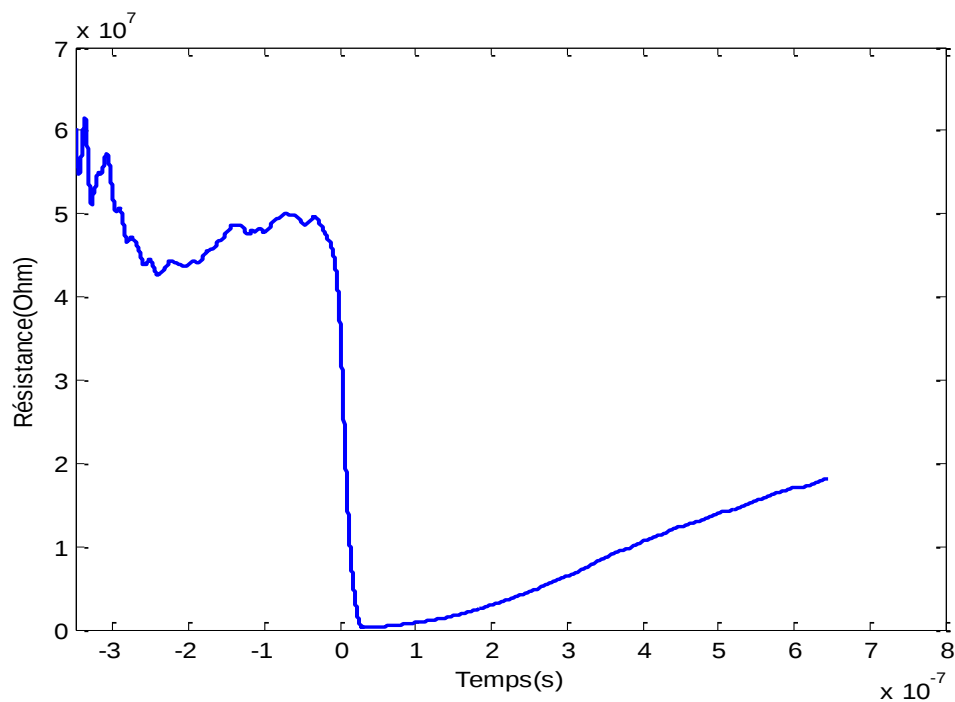
D'après la bibliographie en ce qui concerne ce point, il reste une dernière piste à suivre afin de combler ce problème, c'est bien l'enrichissement de la séquence d'entrée. Dans ce qui suit nous allons représenter l'effet de l'enrichissement de la séquence d'entrée sur la précision et la convergence de la sortie de notre modèle identifié.

Cas 2^{ème} ($E_{app}=7KV$ et $d=7mm$)

a)



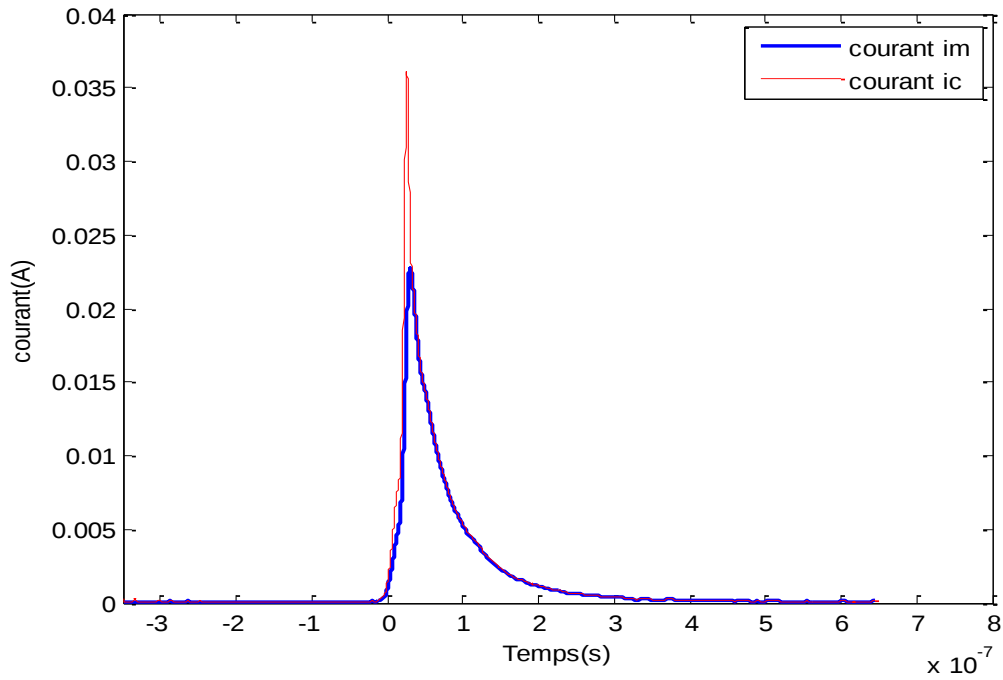
b)



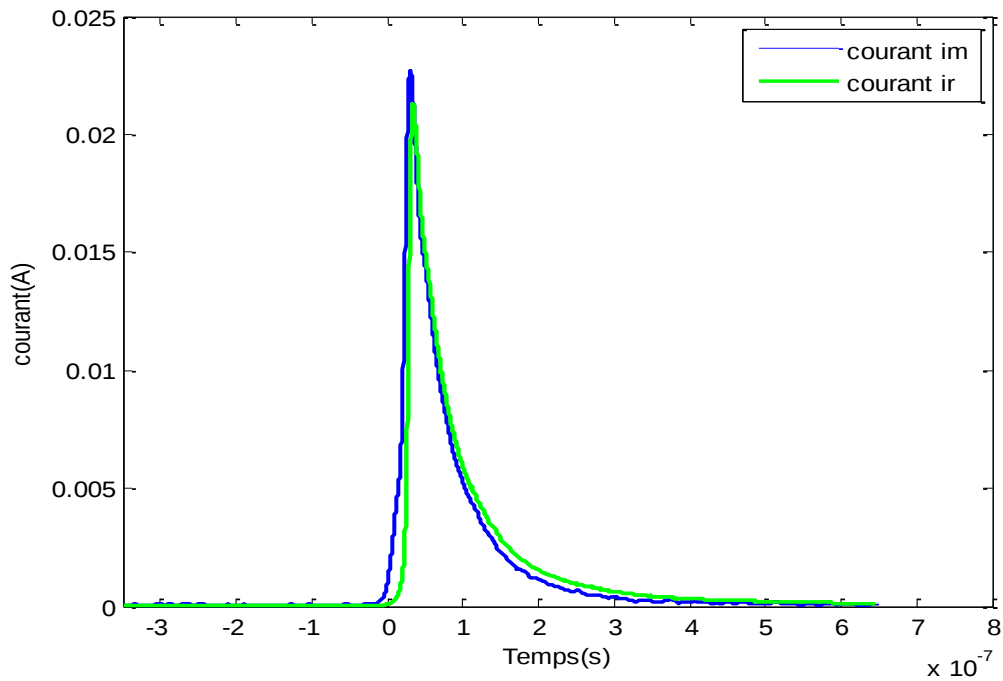
Le Figure III.16 : Allures des paramètres estimés au point opératoire :
($E_{app}=7KV$ et $d=7mm$).

a) Courbe de capacité et b) Courbe de résistance

c)



d)

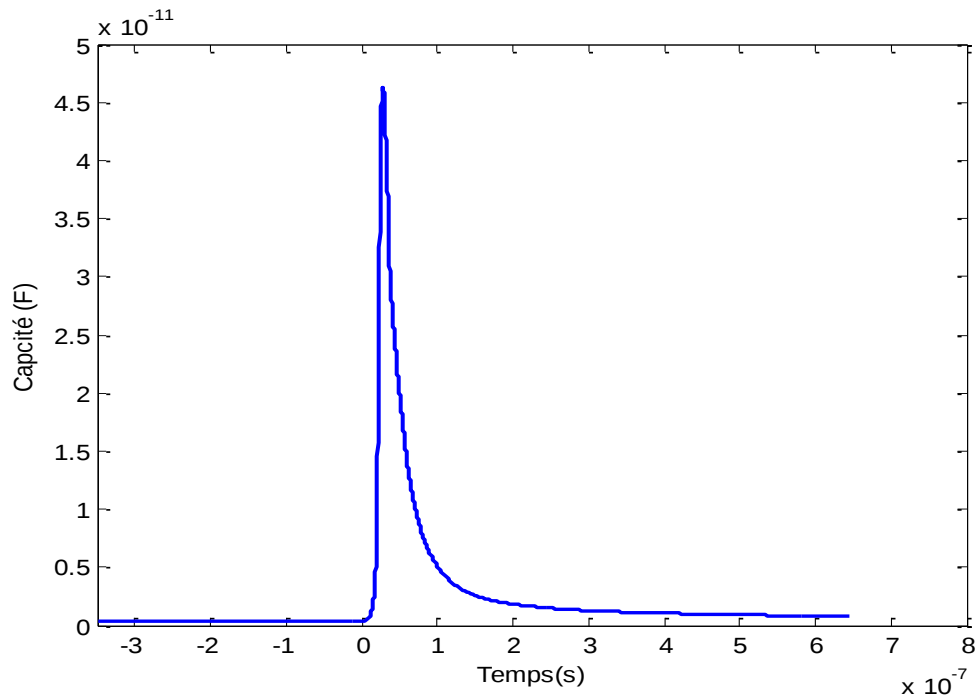


Le Figure III.17 : Comparaison entre le courant de décharge mesuré et les courants obtenu des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=7KV$ et $d=7mm$).

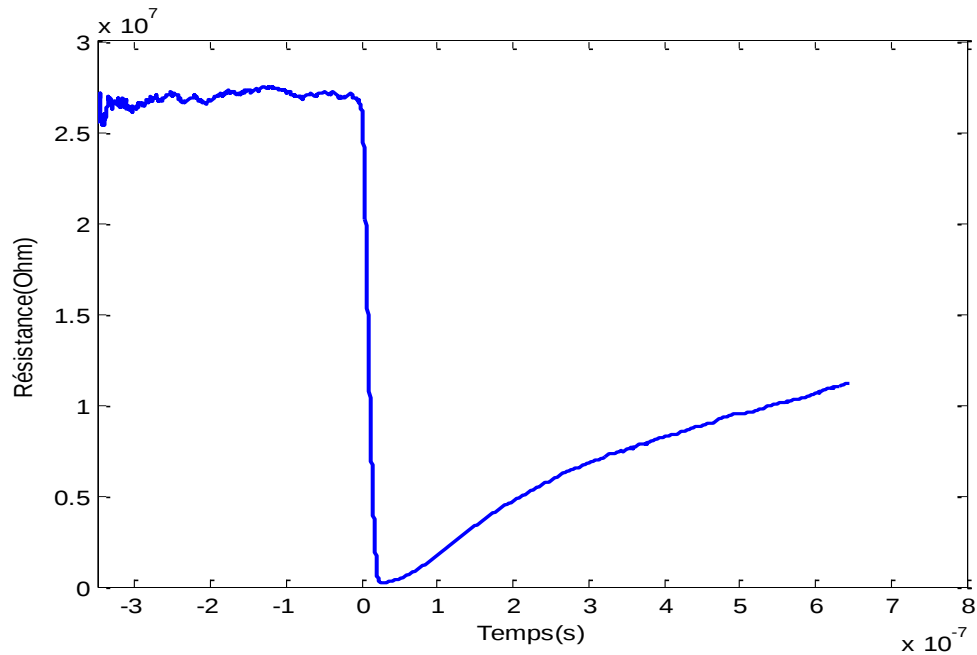
b) Comparaison avec le courant capacitif et c) Comparaison avec le courant résistif.

Cas 3^{ème} ($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$)

a)



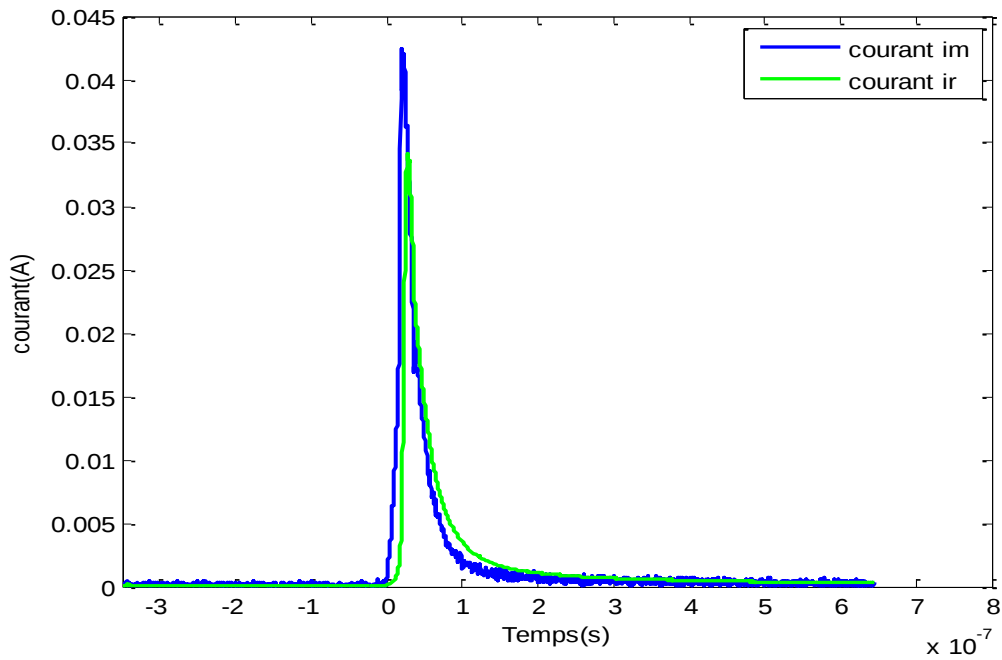
b)



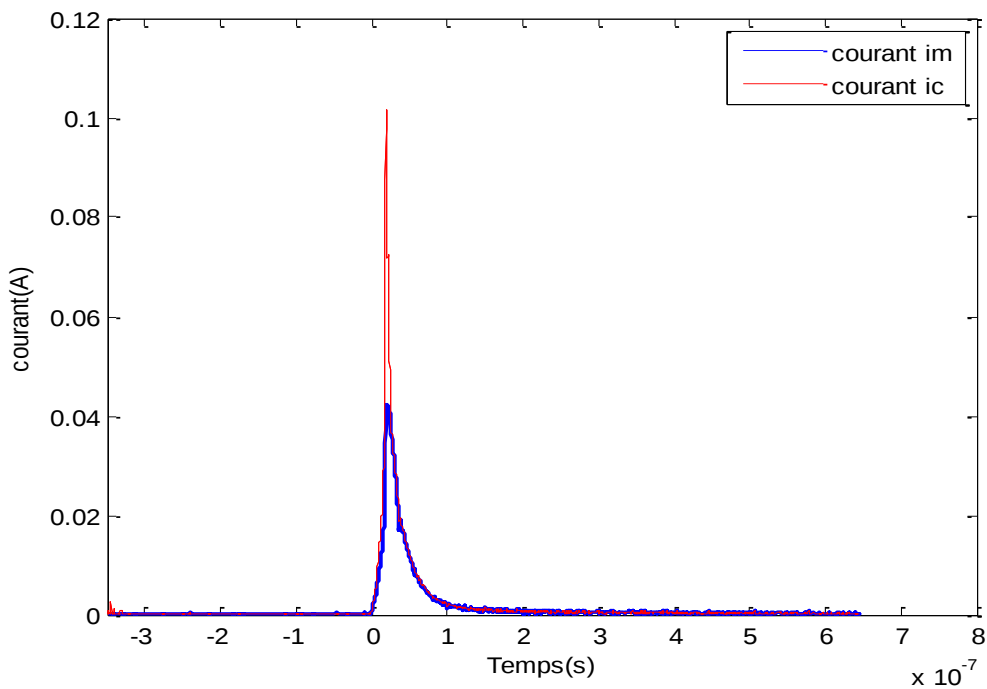
Le Figure III.18 : Allures des paramètres estimés au point opératoire :
($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$).

a) Courbe de capacité et b) Courbe de résistance

c)



d)

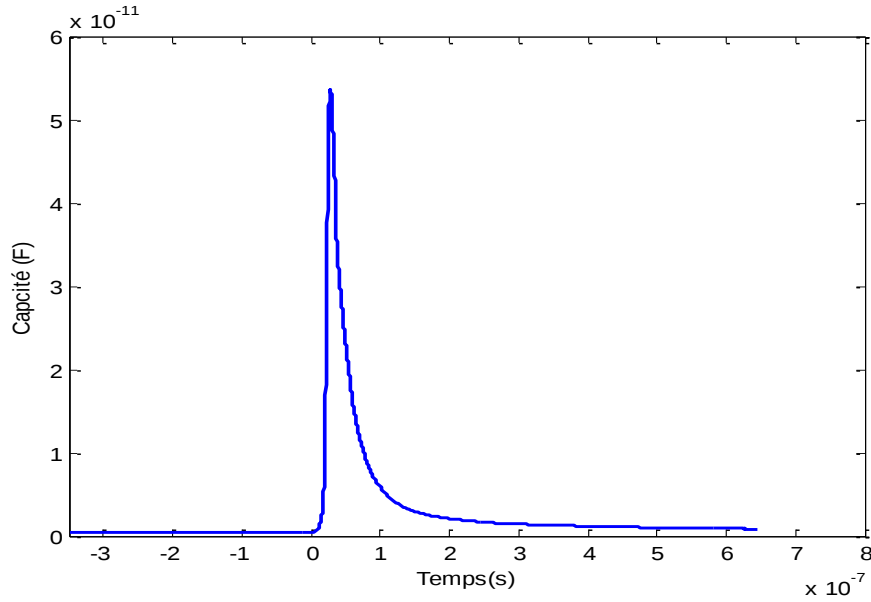


Le Figure III.19 : Comparaison entre le courant de décharge mesuré et les courants obtenu des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$).

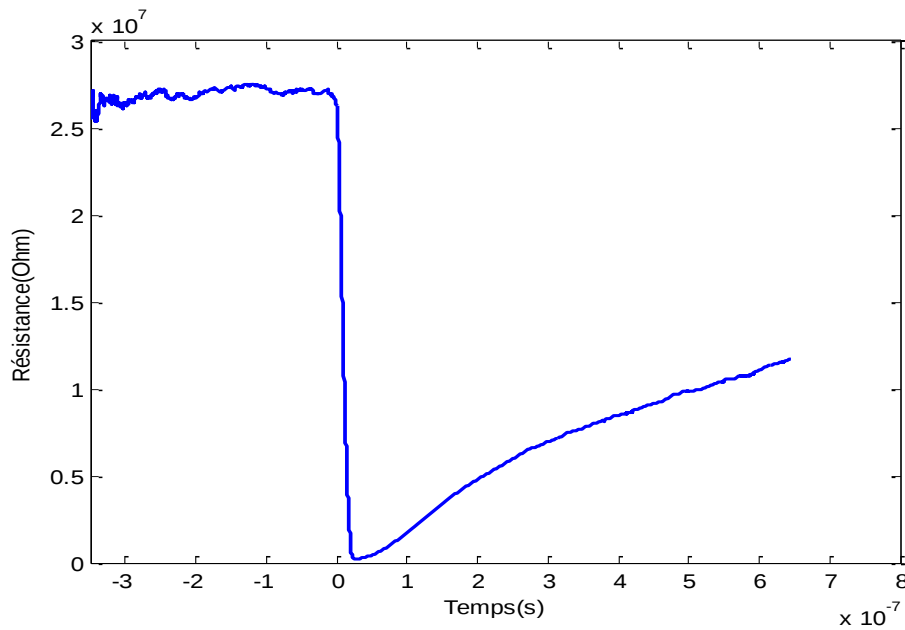
b) Comparaison avec le courant capacitif et c) Comparaison avec le courant résistif.

Cas 4^{ième} ($E_{app}=5.5KV$ et $d=5mm$)

a)



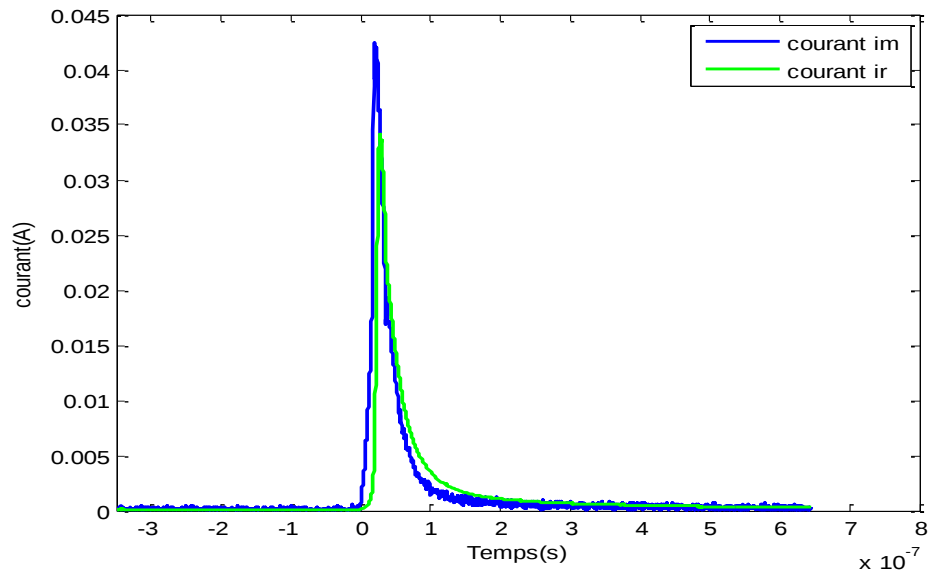
b)



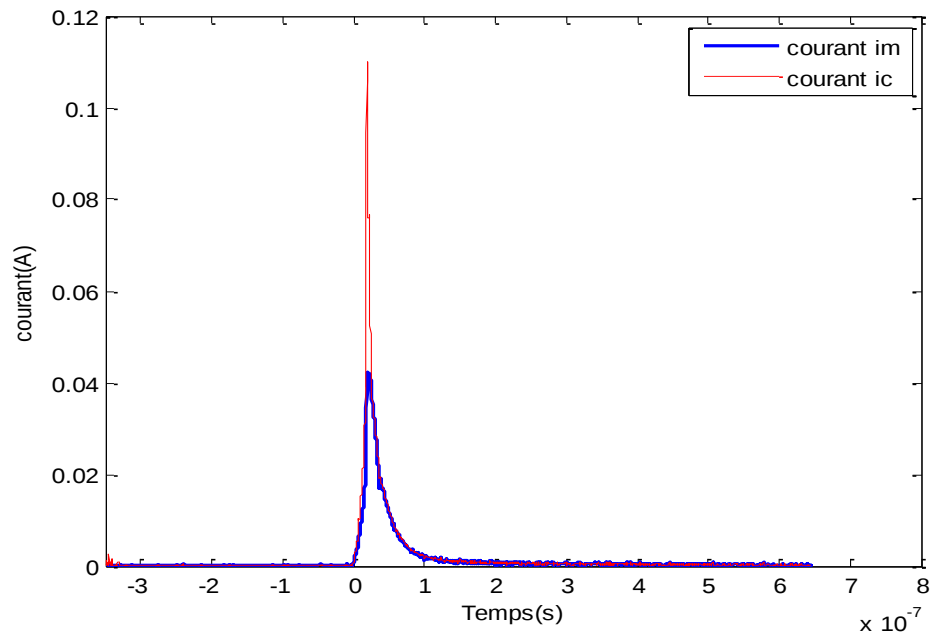
Le Figure III.20 : Allures des paramètres estimés au point opératoire :
($E_{app}=5.5KV$ et $d=5mm$).

a) Courbe de capacité et b) Courbe de résistance.

c)



d)



Le Figure III.21: Comparaison entre le courant de décharge mesurer et les courants obtenu des paramètres estimés au point opératoire : ($E_{app}=6.5KV$ et $d=7mm$).

b) Comparaison avec le courant capacitif et c) Comparaison avec le courant résistif.

II.5.3.4 .1 Interprétation physique des résultats de la simulation

1) la résistance :

En commençant par la résistance de la décharge, en général, on peut distinguer sur leurs courbes de variation trois phases distinctes.

Une première phase stationnaire enregistrée au début de ces courbes suit d'une deuxième phase très courte dont la résistance chute à sa valeur minimale puis elle entame une dernière phase qui est la plus longue parmi les trois où la résistance augmente progressivement vers sa valeur initiale qui est celle de la première phase.

Commencent par la phase stationnaire. A partir des courbes de la résistance avec des différentes valeurs de tension que la décharge dans cette phase est caractérisée par une résistance à valeur infinie puis une valeur stationnaire qui représente la valeur initiale (résistance géométrique) due à la faible courant dans l'espace inter-électrode par la loi d'ohm $R=V/I$.

La deuxième phase est caractérisée par la chute ultra rapide des valeurs de la résistance en un temps record de quelques dizaines de ns.

A cet instant où les résistances atteignent leurs minimums, le comportement électrique de la décharge peut être considéré en régime continu car le canal plasma est complètement établi et bien stable. Les valeurs des minimums sont inversement proportionnelles aux valeurs des tensions et proportionnelles aux valeurs des courants à cet instant si on considère la relation $R=V/I$.

Ceci peut être logique et justifiable car l'augmentation en tension implique une augmentation en courant. L'augmentation en courant est due à une forte activité d'ionisation au premier streamer causée par un champ fort créé sous une tension importante forçant l'intervalle inter-électrodes d'être plus conducteur [1].

La troisième phase correspond à la phase de relaxation du courant de la décharge. Durant cette phase les charges électriques présentes sont à l'origine de la phase précédente. Cela veut dire que l'impulsion sera riche en charges produites par le premier streamer et éventuellement par une autre quantité produite par le second streamer qui contribue à ralentir l'évacuation de la totalité des charges dans l'espace inter-électrodes. Cette dernière phase si la tension est suffisamment forte et capable de le provoquer.

Par conséquent, le temps d'évacuation de cette quantité globale de charges produite devient relativement long et la résistance demeure encore faible et reprend moins rapidement sa valeur initiale [1].

2) La capacité

Une première phase enregistrée avant la montée de la capacité vers son maximum.

Dans cette phase la capacité reste égale à la valeur de la capacité géométrique calculée sans décharge.

Une seconde phase commence avec la montée très rapide de la capacité de la décharge jusque aux maximal.

La dernière phase est caractérisée par une courbe exponentielle décroissante correspondante à la phase de relaxation du courant de la décharge.

Pour la première phase, la capacité reste constante dans les limites de la capacité géométrique de système d'électrode qui est de valeur fixe quel que soit la tension appliquée.

La deuxième phase, présent une augmentation en capacité de la décharge vers le maximum.

Cette augmentation peut être justifiée en mettant en cause la relation $c(t) = \frac{q(t)}{vc(t)}$, à cet instant la quantité de charges produites atteins la valeur maximale possible puisqu'elle représente la fin de la phase du développement du premier streamer. Cette quantité de charge dépend strictement de la valeur du champ électrique locale qui dépend impérativement et uniquement du niveau de la tension.

En troisième phase on n'observe que la valeur de capacités décroissant vers leurs valeurs initiales.

Le temps de décroissance des capacités est proportionnel aux quantités des charges produites suite au passage du premier streamer et éventuellement d'un second streamer. Or, la force du premier streamer et l'éventualité de la création d'un second streamer et sa force, dépendent bien évidemment du niveau de la tension appliqué [1].

3) Les courants résistifs et capacitifs

Les courbes des courants calculés en fonction des deux paramètres sont superposées au courant de décharge réel mesuré. Toutefois, un écart notable en amplitude est observé entre les courants calculés et le courant mesuré. Cet écart s'explique par une faible densité de points de mesure dans les données d'entrée, en particulier durant certaines phases de la décharge où le phénomène évolue très rapidement. Dans ces conditions, les instruments de mesure sont dépassés par la dynamique exceptionnelle du processus.

Néanmoins, le calcul fournit une estimation fiable du comportement électrique de la décharge pointe-plan sous une tension continue positive. On peut donc considérer que ce modèle est suffisamment abouti pour être utilisé dans le cadre de notre étude énergétique.

II .6 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle électrique de la décharge pointe-plan alimentée sous mode de tension continu été élaboré dans des conditions normalisées, à savoir en air sec, à température ambiante et sous pression atmosphérique. L'élaboration de ce modèle s'appuie sur une approche pluridisciplinaire, articulant l'analyse des phénomènes physiques mis en jeu, les données issues de campagnes expérimentales, ainsi que l'application rigoureuse d'une méthode d'identification paramétrique permettant de caractériser les paramètres du système avec précision.

Tout d'abord, nous avons progressivement déterminé le comportement électrique général de la décharge.

Dans une première étape, nous nous sommes concentrés sur l'exploitation des données physiques présentées au premier chapitre, ainsi que sur les données expérimentales (mesures et observations). La deuxième étape a consisté à appliquer la méthode d'identification en utilisant l'algorithme RLS, ce qui nous a permis de déterminer les paramètres électriques du modèle proposé.

Cependant, le calcul et la simulation des paramètres puis l'interprétation des résultats qui sont nécessaires pour notre prochaine étude dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Calcul de l'énergie de la décharge couronne pointe-plan

III.1 Introduction

L'énergie consommée par une décharge corona correspond à la puissance électrique déposée au sein d'elle. De façon générale cette énergie est en relation directe avec la tension appliquée et le courant de corona généré.

Avec une tension croissante, le courant de décharge augmente, entraînant une consommation d'énergie allant d'un comportement quasi linéaire à une relation quadratique, jusqu'à l'amorçage d'un arc. Electriquement cette énergie est gérée en fonction du comportement électrique de cette décharge.

Pratiquement pour les applications de ces décharges, le rendement des procédés réalisés dépend strictement de la répartition de l'énergie totale entre les éléments électriques composant ce comportement. Autrement dit les éléments électriques forment le circuit fictif équivalent modélisant la décharge.

Dans ce chapitre nous détaillons l'aspect énergétique de la décharge pointe plan sous une tension continu positive.

III.2 Energie et comportement électrique de la décharge

Nous avons constaté d'après le deuxième chapitre que le comportement de notre dispositif de décharge à électrodes pointe-plan sous une tension continue se compose d'élément résistif en série avec un élément capacitif en séries.

Théoriquement un élément résistif joue un rôle important énergétiquement en la perte d'énergie surtout sous forme thermique. Au sein du milieu plasma ce rôle est considéré d'un côté comme défavorable par apport au rendement énergétique d'une décharge alors qu'il est considéré comme un agent catalyseur en vers les processus réactionnels lors des procédés des applications.

De plus ce comportement résistif limite l'écoulement des courants de décharge et par conséquence la consommation totale d'énergie dissipée au milieu plasma créé par la décharge. En ce qui concerne l'élément capacitif, ce dernier est catégoriquement lié à la charge (positive ou négative), créée par la décharge lors de sa propagation. Cette charge est impliquée dans les processus réactionnel des applications de ces décharges. Il est donc évident que cette portion énergie qui est la plus bénéfique et souhaitable pour augmenter la performance et le rendement de notre décharge.

La quantification de l'énergie de ces éléments électriques suit des principes de calcul d'énergie distincts : l'énergie dissipée dans une résistance est liée à l'intensité du courant et à la résistance elle-même, selon la loi de Joule, tandis que l'énergie stockée dans un condensateur dépend de sa capacité et de la tension appliquée entre ses bornes. Nous évaluons et nous comparons entre l'énergie réelle totale de la décharge calculée directement et l'énergie calculée en fonction des paramètres du modèle électrique proposé.

L'objectif est de comprendre comment ces composants influencent la gestion de l'énergie et d'identifier les contextes où leur utilisation est optimale.

III.3 L'énergie de décharge électrique

Chaque type de décharge possède une caractéristique courant-tension, cela confirme que la puissance mise en jeu par cette décharge dépend du temps alloué à la consommation de cette puissance. Selon le comportement de cette décharge cette énergie est répartie entre les paramètres qui représentent son circuit électrique équivalent. Il est donc possible de calculer cette énergie de deux manières différentes, soit indirectement en fonction des paramètres électriques obtenus par simulation, soit de manière directe basant sur les grandeurs globales courant-tension mesurées aux bornes de la décharge. Dans ce travail, nous présenterons les deux méthodes précitées pour premièrement déterminer la quantité d'énergie déposée au sein de notre décharge couronne et deuxièmement pour pouvoir les comparer.

III.3.1 Energie de décharge couronne pointe-plan, calculée en fonction des grandeurs caractéristiques courant-tension

Le calcul consiste dans ce cas à déterminer la quantité d'énergie libérée ou dissipée au sein de la décharge sous une tension appliquée drainant un courant électrique dans l'espace inter-électrode pendant un temps donné. Ce calcul dépend des variations des grandeurs électriques, v pour la forme de tension appliquée et i pour le courant obtenu.

On peut utiliser la formule de l'énergie électrique conventionnelle donnée par :

$$E = \int_0^T v(t) \times i(t) dt \quad (\text{III.1})$$

- E est l'énergie en joules (J),
- $v(t)$ est la tension inter-électrode en volts (V),
- $i(t)$ est l'intensité du courant de décharge en ampères (A),
- T est la durée du temps d'impulsion de décharge en secondes (s).

Interprétation physique de la formule

- **Tension (V)** : Elle représente la différence de potentiel entre deux points du circuit, qui agit comme une "force" pour pousser les charges électriques à traversées la distance inter-électrode d.

- **Intensité du courant (I)** : L'intensité est la quantité de charges électriques s'écoulant lors d'une impulsion de décharge couronne par unité de temps. Elle mesure le flux de charges traversant le filament de la décharge.

- **Temps (t)** : Le temps enregistré marquant le passage de l'impulsion du courant de décharge.

Conditions opératoires

Dans ce travail nous présentons les résultats d'étude obtenus dans le cas d'une décharge couronne pointe plan DC positive. Nous considérons les conditions opératoires suivantes :

- ✓ Alimentation positive continue appliquée (E_{app})
- ✓ Air synthétique sec (80% N_2 , 20% O_2)
- ✓ Pression atmosphérique

Résultats et discussions

La figure (III.-1) représente la courbe de l'énergie électrique obtenue dans le cas du point opératoire ($E_{app}=5KV$, $d=5mm$).

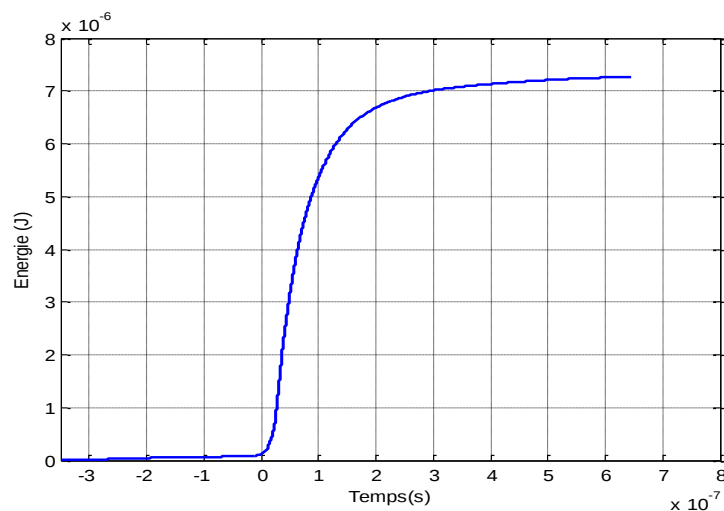


Figure III.1: Variation d'énergie de décharge aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV$, $d=5mm$).

On observe dans la figure (III.1) la variation de la quantité d'énergie consommée pendant la décharge, est caractérisée par trois phases.

Dans la première phase, la variation est très lente et la quantité d'énergie consommée est très faible et presque nulle, en raison de la faible présence de particules chargées dans la zone inter-électrode. Dans cette phase l'espace inter-électrodes présente une résistance infinie vis à vis la progression de l'onde ionisante qui se forme initialement au niveau de la pointe. Par conséquent, cela correspond à une faible consommation d'énergie. À ce stade, le régime de la décharge qui règne est connu sous le nom d'**onset streamer**.

Dans la deuxième phase, on observe une variation très rapide de l'énergie sur quelques dizaines de nanosecondes. Cela est dû à une production importante de charges en mouvement, causée par une forte activité d'ionisation du premier streamer. Cette phase se caractérise par l'écoulement d'un fort courant et correspond à une consommation d'énergie très importante.

La Figure (III.2), montre pour le même point opératoire, l'évolution de la charge durant ces phases et confirme l'évolution de l'énergie consommée par la décharge.

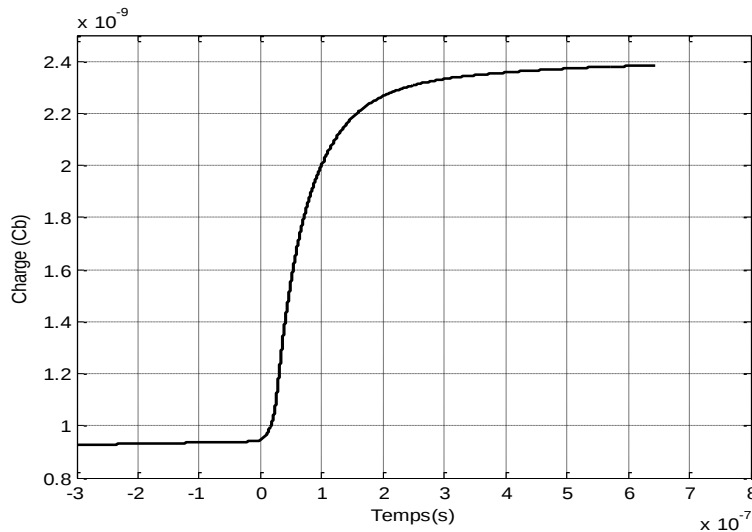


Figure III.2: Evolution de la charge électrique durant la phase d'une décharge couronne au point opératoire : ($E_{app}=5KV$, $d=5mm$).

À partir de la courbe d'évolution de la charge électrique, il est clair que la quantité d'énergie consommée est proportionnelle à la quantité de charge transférée.

La phase finale présente une variation moins importante que la phase précédente, en raison de la relaxation du courant de décharge associée au second streamer.

L'énergie totale consommée pendant la durée de la décharge est déterminée à partir de la valeur finale de la variation d'énergie. Dans ce cas l'énergie totale de la décharge est estimée égale à $E_{totale} = 7.237 \mu J$.

III.3.2 Energie de décharge en fonction des paramètres électrique

Le calcul d'énergie de la décharge en fonction des paramètres dépend du circuit équivalent sachant que ce circuit est lié en sa structure au type d'alimentation appliqué. Le modèle de la décharge présente une disposition série entre la capacité et la résistance de la décharge qui sont les deux variables.

Nous calculons l'énergie appropriée pour chaque paramètre électrique du circuit équivalent.

III.3.2.1 Calcul de l'énergie de la résistance de décharge

En général, l'énergie dissipée dans une résistance est la quantité d'énergie transformée en chaleur en raison du passage d'un courant électrique à travers la résistance. Cette dissipation d'énergie est décrite par la **loi de Joule**, et elle est généralement exprimée à travers une ou plusieurs formules en fonction des paramètres connus (comme l'intensité du courant, la résistance, la tension, et le temps).

Formule basée sur la loi d'Ohm

La **loi d'Ohm** montre que la tension V aux bornes d'une résistance R est liée à l'intensité du courant I par la relation :

$$V(t) = I(t) \times R(t) \quad (III.2)$$

En utilisant cette relation, on peut remplacer V dans la formule de l'énergie :

$$E = (I \times R) \times I \times \Delta t \quad (III.3)$$

Ce qui simplifie à :

- $I^2 \times R$ représente la **puissance dissipée** sous forme de chaleur dans la résistance (en watts, W),
- t est le temps pendant lequel cette puissance est dissipée.

Formule alternative avec la tension et la résistance

Si nous connaissons la **tension** V et la **résistance** R , nous pouvons aussi exprimer l'énergie dissipée à l'aide de la formule suivante :

$$E = \frac{V^2}{R} \times \Delta t \quad (\text{III.4})$$

- $\frac{v^2}{R}$ est la puissance dissipée sous forme de chaleur dans la résistance,

L'énergie dissipée pendant une durée t est donnée par :

$$E_r(t) = \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) \cdot r(t) dt \quad (\text{III.5})$$

Ou on peut aussi utiliser :

$$E_r(t) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{v(t)^2}{r(t)} dt \quad (\text{III.6})$$

III.3.2.2 Calcul de l'énergie de capacité

Un **condensateur** est un composant électrique capable de stocker de l'énergie sous forme de champ électrique entre ses plaques. L'énergie stockée dans un condensateur dépend de la **capacité du condensateur** et de la **tension** appliquée entre ses bornes. Cette énergie est libérée lorsque le condensateur se décharge.

Formule décrivant l'énergie de capacité est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (\text{III.7})$$

- E est l'énergie stockée dans le condensateur, en **joules (J)**,
- C : est la **capacité** de décharge, en **farads (F)**,
- V : est la **tension** aux bornes du condensateur, en **volts (V)**.

L'énergie est emmagasinée dans le **champ électrique** entre les plaques. Lorsque la tension V est appliquée, une charge Q s'accumule sur les plaques du condensateur, et la relation entre la charge Q , la capacité C et la tension V est donnée par la formule :

$$Q = C \times V \quad (\text{III.8})$$

$$dv = \frac{q}{c} \quad (\text{III.9})$$

La relation entre la charge et l'énergie stockée peut alors être réécrite comme :

$$\partial E = dv dq \leftrightarrow E = \int_0^Q \frac{q}{c} dq = \frac{Q^2}{2c} \quad (\text{III.10})$$

Cette formule est utilisée pour calculer l'énergie d'un condensateur lorsqu'on connaît la charge accumulée.

III.3.3 Calcul de l'énergie électrique dans le circuit électrique équivalent de la décharge.

D'après le schéma du modèle électrique équivalent proposé dans le cas d'une alimentation continue et détaillé dans le deuxième chapitre, on a une disposition série entre la capacité et la résistance variables de la décharge. Cette disposition implique que l'équation décrivant le potentielle dans l'espace inter-électrode regroupe la somme des potentielle des deux paramètres ce qui nous amène à la formule d'énergie suivante :

$$E_d(t) = E_r(t) + E_c(t) \quad (\text{III.11})$$

$E_d(t)$: est l'énergie de décharge

$E_r(t)$: est l'énergie dissipé par la résistance

$E_c(t)$: est l'énergie de capacité

III.3.3.1 Simulation et résultat de calcul

Les résultats présentés et discuté par la suite sont obtenus par simulation du modèle électrique équivalent de la décharge qui nous permet de remonter dans un premier temps aux paramètres électriques résistance et capacité variable de la décharge et de calculer leurs énergies et l'énergie globale par la suite.

Les Figures III.3, III.4 présente l'allure de l'énergie consommée par la résistance et capacité respectivement.

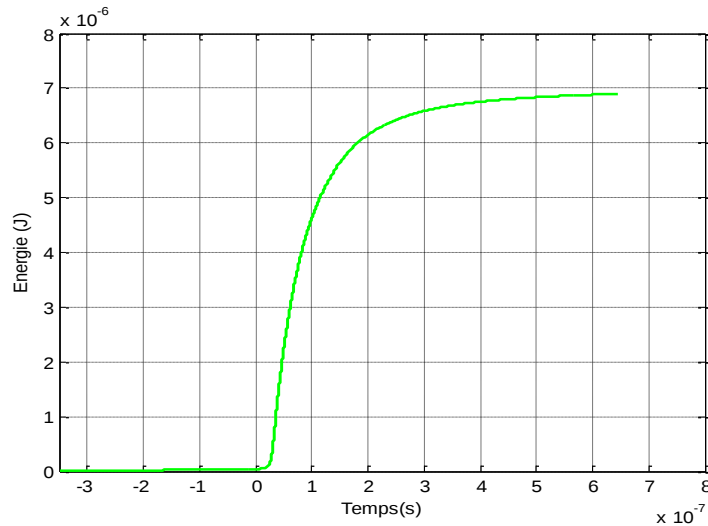


Figure III.3 : Courbe de l'énergie de résistance aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV, d=5mm$).

La courbe (III.3), présente une variation qui se manifeste en trois phases distinctes. Une première phase qui précède l'instant de déclenchement de la décharge notée $t=0$. L'énergie déposée dans le milieu plasma décharge est presque nulle. Une deuxième phase relativement courte mais très dynamique localisée entre $t=0$ et $t= 2e-8$ s, cette dernière est marquée par une augmentation rapide et importante en quantité d'énergie consommée par la décharge.

Les variations inscrites dans ces trois phases sans évidentes est compatible avec l'évaluation de l'impulsion de décharge et le développement du courant résultant.

La figure (III- 4), présente la variation de l'énergie acquise par la capacité. On remarque pour cette courbe que la variation d'énergie dans ce cas présente des changements remarquable =s en plusieurs instants. Tout d'abord au premier instant $t=-3.5e-7$ s, où la courbe apparait et présente une variation rapide bien qu'elle atteinte une faible valeur $E=0.5e-7J$. Cette variation peut être expliquée par le fait qu'une faible activité d'ionisation commence suite à l'application de la tension et qui provoque un très faible courant de fuite. Une deuxième étape commence directement après cet instant jusqu'à l'instant de déclenchement de l'impulsion de décharge avec une augmentation lente qui s'explique par un accroissement faible et linéaire du courant généré. A l'instant $t=0$ une augmentation brusque correspond à la phase du développement du streamer où le courant augmente brusquement à son tour vers son maximum dont l'énergie atteint une valeur de $2.1 e-7$ J. Une dernière phase commence à partir de l'instant où le courant atteint son maximum cela est marqué par augmentation progressive de l'énergie relativement faible qui correspond à une phase de relaxation de système de décharge.

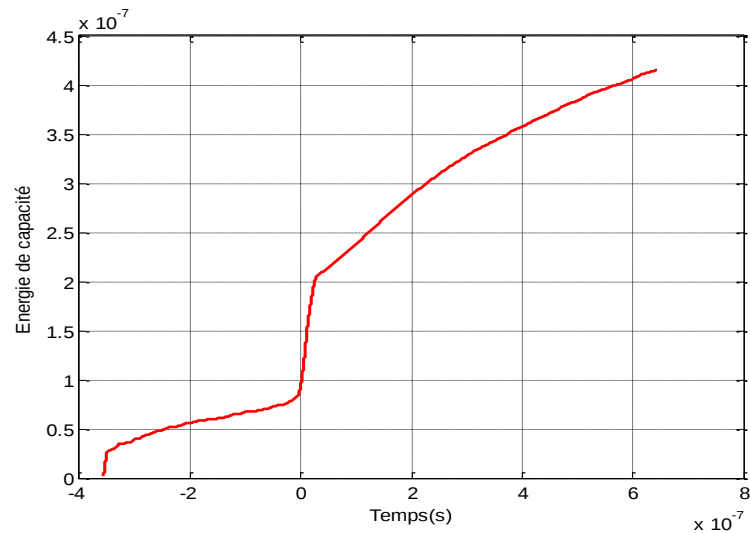


Figure III.4 : Courbe de l'énergie de capacité aux conditions opératoires :
($E_{app}=5KV, d=5mm$).

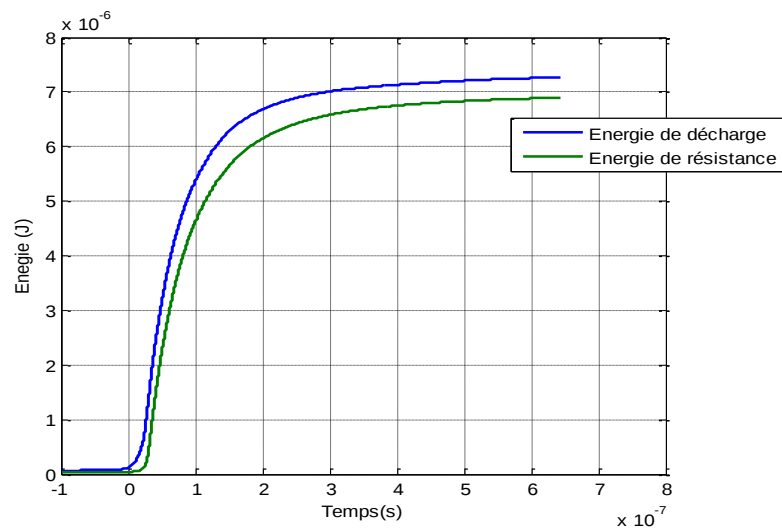


Figure III.5: Comparaison entre l'énergie dissipée par la résistance et l'énergie de la décharge aux conditions opératoires : ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).

Une première lecture des deux courbes montre que l'élément résistive dans le circuit équivalent consomme la majeure quantité d'énergie allouée au système de décharge.

Plusieurs remarques peuvent être ressorties de ce résultat. Premièrement il est convenable que pour augmenter la performance de système de décharge de minimiser la quantité de l'énergie consommée par la résistance par rapport à la quantité totale de l'énergie déposée au système.

Il est aussi que cette énergie résistive joue un rôle catalyseur favorisant les processus réactionnels en compétition qui sont en général endothermique car cette énergie est de caractère thermique.

La figure (III-6), regroupe les énergies paramétriques (résistive et capacitive) et l'énergie totale calculée directement via le produit courant tension et temps de décharge.

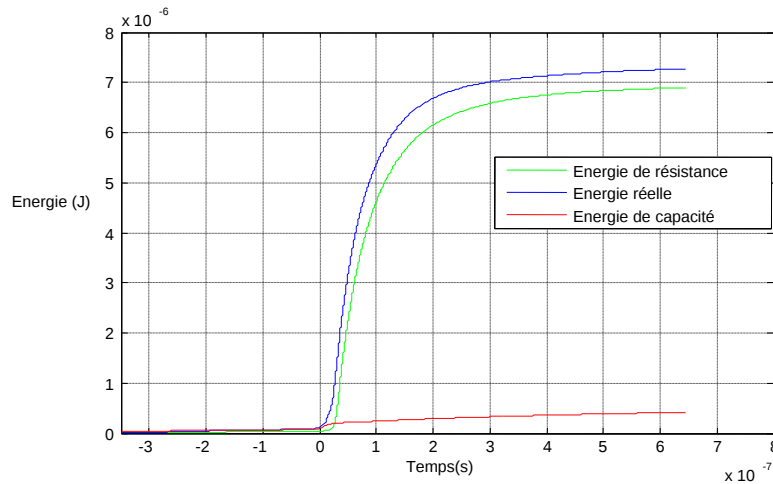


Figure III.6 : Comparaison entre les énergies des paramètres (résistance, capacité) et l'énergie de la décharge réelle aux conditions opératoires ($E_{app}=5KV$ et $d=5mm$).

Le résultat présente une vue panoramique sur les dimensions d'échelle entre les énergies paramétriques et l'énergie totale calculée en fonction des grandeurs mesurables. Ce résultat montre une dominance en l'énergie consommée par la résistance par rapport à celle consommée par la capacité.

A partir de cette constatation on peut dire que pour augmenter l'efficacité de la décharge il est judicieux d'augmenter l'apport de l'énergie capacitive par rapport à l'énergie résistive du système de décharge.

La Figure (III-7), présente une comparaison entre l'énergie totale calculée en fonction des grandeurs mesurable et celle totale calculée en fonction des paramètres électrique du modèle.

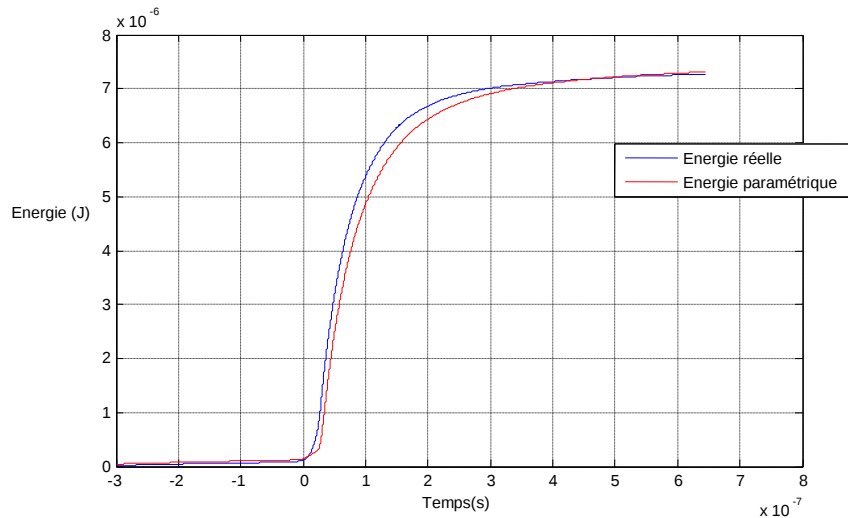


Figure III.7 : Comparaison entre l'énergie de la décharge en fonction des paramètres estimés et l'énergie réelle au point opératoire : ($E_{app}=5KV, d=5mm$).

Les courbes montrent une grande similitude en forme et une grande convergence en valeurs des deux énergies. Cela valide et confirme et valide notre modèle proposé ainsi que la bonne et l'exactitude en l'estimation de ces paramètres.

Les résultats obtenus montrent que l'énergie calculée est globalement en accord avec l'énergie réelle. Toutefois, l'analyse révèle que la majeure partie de cette énergie est dissipée par la résistance, tandis qu'une fraction relativement faible est consommée par la capacité. Ce comportement est cohérent avec la configuration en série du modèle électrique équivalent, où le courant traversant la résistance engendre des pertes par effet Joule. Par ailleurs, la capacité ne contribue que faiblement à la consommation énergétique totale. Cela suggère que l'optimisation de l'efficacité énergétique du système passerait principalement par la réduction des pertes résistives.

Ce constat souligne l'importance de la recherche du point de fonctionnement optimal, dans lequel l'efficacité énergétique est maximisée.

III.3.3.2 Effet du niveau de la tension appliquée sur l'énergie

L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'impact des paramètres opératoires, (la tension appliquée et la distance inter-électrodes), sur la distribution de l'énergie consommée entre les paramètres du système. Pour étudier l'influence de la tension appliquée sur l'énergie de la

décharge, nous comparons les valeurs d'énergie totale obtenues à différentes valeurs de tensions appliquées pour une distance inter-électrodes donnée, fixe.

Les Figures (III.8, III.9) présentent les valeurs des énergies déposées au sein de la décharge pendant un impulsion de courant pour une distance inter-électrodes maintenues fixe en variant les tensions appliquées pour les deux cas suivants respectivement ($d=8\text{mm}$, $E_{app}=7, 7.5, 8$ et 8.5 KV) et ($d=9\text{mm}$, $E_{app}=7.5, 8, 8.5, 9.5\text{ KV}$).

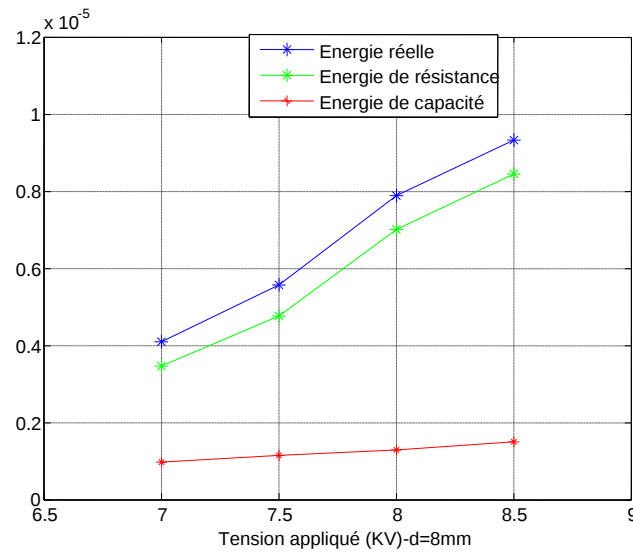


Figure III.8 : Comparaison des valeurs de l'énergie totale réelle et l'énergie calculé on fonction des paramètres sous différents valeurs de la tension appliquée (7,7.5, 8 et 8.5 KV) et une distance inter-électrode fixe ($d=8\text{mm}$).

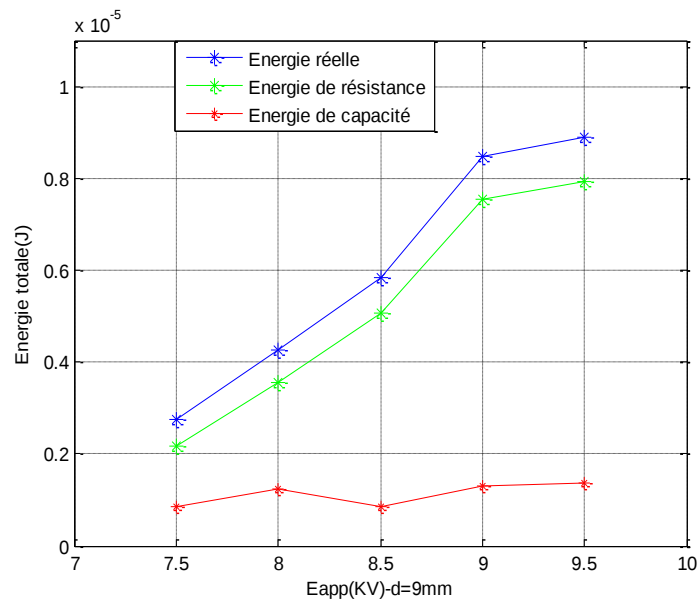


Figure III.9 : Comparaison des valeurs de l'énergie totale réelle et l'énergie calculée en fonction des paramètres sous différents valeurs de la tension appliquée (7.5, 8, 8.5 et 9.5 KV) et une distance fixe ($d=9\text{mm}$).

D'après les figures (III.8 III.9) l'augmentation de la tension appliquée entraîne une élévation de l'énergie totale consommée par le circuit. Toutefois, l'analyse montre que la contribution de la capacité à la consommation de l'énergie reste marginale, tandis que la majorité de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur au niveau de la résistance, conformément aux lois de Joule.

D'autre part, on remarque que plus la tension augmente, l'énergie consommée par la résistance augmente et entraîne avec elle une augmentation en énergie totale car elle est dominée par la composante résistive.

Néanmoins, l'élévation en valeur de tension appliquée n'influe pas de même rigueur sur l'énergie capacitive qui au-delà d'une tension donnée ($E_{app}=7.5KV$ et $E_{app}=8 kV$), pour ($d=7mm$, $d=8mm$), respectivement. Les énergies capacitatives au-delà de ces valeurs de tension restent pratiquement stables malgré l'augmentation d'avantage en valeur de la tension appliquée.

On peut conclure qu'il est inutile d'augmenter la tension après une valeur de tension donnée car cela n'a comme effet que d'augmenté l'énergie résistive (considérée comme énergie perdue), au détriment de l'énergie capacitive qui est la utile pour les procédés d'application des décharges.

III.3.3.3 Effet de la distance inter-électrodes sur l'énergie paramétrique et totale de la décharge.

Le Figure (III.10) représente la distribution de l'énergie totale et paramétrique pour une tension fixe ($E_{app}=7.5KV$), et distance inter-électrodes appliquées variables ($d=8, 9, 10 mm$).

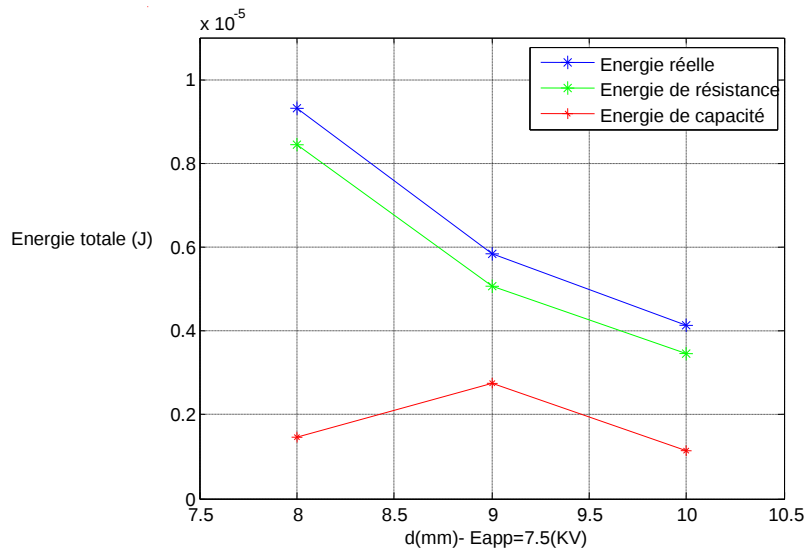


Figure III.10 : Comparaison des valeurs d'énergie totale de l'énergie réelle et l'énergie calculée en fonction des paramètres électriques sous différentes distance inter-électrodes ($d=8,9$ et 10 mm) et une tension appliquée ($E_{app}=7.5\text{KV}$).

Premièrement, on constate que l'énergie consommée par la résistance représente comme on a vu précédemment un apport dominant par rapport à celui d'énergie capacitive parmi l'énergie totale de la décharge et cela pour l'ensemble des distances inter-électrodes considérées. Deuxièmement, il est évident que plus la distance inter-électrodes augmente, les énergies totale et résistive diminuent, contrairement à l'énergie capacitive qui augmente puis elle décroît. Cela s'explique par le fait qu'une plus grande distance inter-électrodes induit une augmentation de la résistance du système et par conséquent une diminution du courant de décharge.

Un point optimal où l'énergie capacitive augmente, tandis que l'énergie résistive diminue. Cela équilibre relativement la contribution des deux paramètres en l'énergie totale de la décharge, ce qui a comme effet l'amélioration de l'efficacité associée aux processus réactionnels lors des applications des décharges électriques.

III.4 Conclusion

Sachant que le comportement électrique de la décharge pointe-plan sous tension continue est modélisé par un circuit série résistance-capacité. Il a été constaté que :- La résistance entraîne des pertes thermiques, mais elle joue aussi un rôle catalyseur dans les processus

réactionnels du plasma. - La capacité, quant à elle, stocke une énergie utile à l'amélioration du rendement de la décharge.

Deux méthodes sont utilisées pour estimer l'énergie totale : directe (courant-tension-temps) et indirecte (paramètres du circuit équivalent). Les courbes obtenues montrent trois phases d'évolution de l'énergie pendant la décharge, avec une forte consommation durant la phase du streamer. Les simulations confirment que la majorité de l'énergie est dissipée par la résistance. Cela indique que pour augmenter l'efficacité, il faudrait réduire les pertes résistives et favoriser le stockage capacitif. Une bonne corrélation est observée entre l'énergie mesurée et celle simulée, validant le modèle proposé. L'analyse de l'effet de la tension appliquée montre que l'énergie consommée augmente avec la tension. Finalement, l'étude a permis d'identifier les conditions opératoires optimales pour un meilleur rendement énergétique.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons mené une étude approfondie sur le comportement énergétique et électrique d'une décharge couronne de type pointe-plan, en régime d'alimentation continue. L'objectif principal était d'analyser la manière dont l'énergie électrique est convertie, répartie et dissipée dans le milieu plasma généré par cette décharge, en vue d'optimiser son efficacité énergétique dans les applications industrielles et environnementales.

La première partie du travail a permis d'introduire les concepts fondamentaux des décharges électriques, notamment la nature du plasma froid, ses mécanismes de formation, et les différents régimes de fonctionnement de la décharge couronne. Une attention particulière a été portée à la caractéristique courant-tension, qui révèle les diverses phases de développement de la décharge, du régime onset streamer à celui de streamer de claquage, en passant par le régime glow.

Dans la seconde partie, nous avons élaboré un modèle électrique équivalent de la décharge à l'aide d'une configuration série entre une résistance et une capacité variables. Ce modèle a été validé expérimentalement à l'aide de mesures de tension et de courant, et renforcé par l'application de la méthode d'identification paramétrique utilisant l'algorithme des moindres carrés récurrents. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre les courants mesurés et ceux estimés, malgré quelques écarts liés à la limitation des instruments de mesure dans certaines phases rapides du phénomène.

L'analyse énergétique a montré que la majorité de l'énergie de la décharge est dissipée par la résistance, essentiellement sous forme de chaleur (effet Joule), tandis qu'une moindre part est stockée sous forme capacitive, cette dernière étant toutefois la plus bénéfique pour les applications. Cette constatation oriente clairement les futures stratégies d'optimisation vers la réduction des pertes résistives et la maximisation de la part capacitive de l'énergie.

De plus, l'influence des paramètres opératoires, tels que la tension appliquée et la distance inter-électrodes, a été étudiée en détail. Il a été démontré que l'augmentation de la tension entraîne une hausse de l'énergie totale consommée, mais qu'au-delà d'un certain seuil, cette énergie est principalement absorbée par la résistance, ce qui réduit l'efficacité globale du système. De même, une distance optimale entre les électrodes permet un meilleur équilibre

entre les énergies résistive et capacitive, conduisant à une amélioration du rendement énergétique de la décharge.

En conclusion, ce travail a permis de proposer un modèle électrique fiable et une méthode de calcul d'énergie applicable aux décharges couronne en régime continu. Il offre une base solide pour la compréhension et l'optimisation des processus de conversion d'énergie dans les plasmas froids. Les résultats obtenus ouvrent également des perspectives intéressantes pour les applications dans le traitement des gaz, la dépollution, et la génération de radicaux réactifs. Des travaux futurs pourraient étendre cette étude à d'autres géométries d'électrodes, à l'alimentation impulsionnelle, ou encore à la modélisation tridimensionnelle du champ électrique afin de mieux capter la dynamique complexe du phénomène de décharge.

Références

- [1] RAOUTI, Driss. Contribution a L'étude De La Dépollution Des Gaz Toxiques Par Décharges Électriques. 2015. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie d'Oran.
- [2] Alyen ABAHAZEM "Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz " Doctorat de l'université de toulouse, Le 01 Décembre 2009.
- [3] Mohamed MEZIANE "Modélisation 2D et 3D d'un écoulement gazeux instationnaire activé par décharges couronnes dans un réacteur multi-pointes plan dédiée a la décontamination des gaz ", L'université de toulouse, le Mardi 22/11/2011.
- [4] LAKEHAL Feriel, DRICI Hadjira. Etude d'applicabilité d'un modèle électrique à plusieurs lecteurs mathématique U n i v e r s i t é D r . T a h a r M o u l a y d e S aïda Faculté de la Technologie, Soutenu le 30/8/2020.
- [5] 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.
- [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] Daill Guillaume Fournaud Benot. Décharge couronne, applications et modélisation. Energétique Industrielle, projet utilisation rationnelle de l'énergie, université de Poitier, 2004/2005.
- [9] Lin, T.H., Belser, M. & Tzeng, Y. Pulsed microwave plasma etching of polymers in oxygen and nitrogen for microelectronic applications. IEEE Transactions on Plasma Science, 16(6), p.631-637. 1988.
- [10] Fünér, M., Wild, C. & Koidl, P. Simulation and développement of optimized microwave plasma reactors for diamond deposition. Surface and Coatings Technology, 116-119, p.853-862. 1999.
- [11] Villeger, Sandrine, Sarrette, Jean Philippe & Ricard, André,. Synergy Between N and O Atom Action and Substrate Surface Temperature in a Sterilization Process Using a Flowing N₂-O₂ Microwave Post Discharge. Plasma Processes and Polymers, 2(9), p.709-714, 2005.

- [12] Ricard, Andre. Optical spectroscopy on processing plasmas: cathode magnetron sputtering and flowing post-discharges for elastomer activation and medical sterilization. *Thin Solid Films*, 475(1-2), p.1-5, 2005.
- [13] Green, K.M. et al. Electronic excitation temperature profiles in an air microwave plasma torch. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 29(2), p.399-406. 2001.
- [14] Cardoso, R.P. Plasmas micro-ondes en cavité résonnante à la pression atmosphérique: étude des plasmas d'hélium et applications au traitement des matériaux. Lorraine: institut National Polytechnique de Lorraine 2007.
- [15] Tendero, C., 2005. Torche plasma micro-onde à la pression atmosphérique: application au traitement de surfaces métalliques. thesis. Limoges: Université de Limoges. Available at: <http://epublications.unilim.fr/theses/index.php?id=5506>.
- [16] O. EICHWALD Cours, "Introduction à la physique des plasmas froids créés par décharges électriques", 2003.
- [17] A. GOLDMAN, M. GOLDMAN "Les plasmas froids à pression atmosphérique", dans *Les plasmas dans l'industrie*, coll. Dopee, Ed. Electra, Paris, 1978.
- [18] B. HELD "Physique des plasmas froids", Masson, 1994.
- [19] S. LACHAUD Thèse UPPA, "Décharge pointe – plan dans les mélanges gazeux correspondant aux effluents industriels: étude électrique et physico-chimique, application à la destruction du dioxyde d'azote", 2002.
- [20] S. SAMSON Thèse Paris XI "Etude de la réactivité physico-chimique d'une décharge filamentaire à pression atmosphérique dans l'air. Application au contrôle de la pollution", 1997.
- [21] O Eichwald, O Ducasse, D Dubois, A Abahazem, N Merbahi, M Benhenni, and M Yousfi. Experimental analysis and modelling of positive streamer in air: towards an estimation of o and n radical production. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(23):234002, 2008.
- [22] YS Mok and SW Ham. Conversion of NO to NO₂ in air by a pulsed corona discharge process. *Chemical engineering science*, 53(9):1667-1678, 1998.
- [23] K.G. Donohoe. California institute of technology, pasadena,. PhD Thesis, CA (1976).
- [24] Nils Brenning, I Axnas, J Olof Nilsson, and Jan E Eninger. High-pressure pulsed avalanche discharges: formulas for required preionization density and rate for homogeneity. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 25(1):83-88, 1997.
- [25] J Tepper, M Lindmayer, and J Salge. Pulsed uniform barrier discharges at atmospheric pressure. *HAKONE VI contr. papers*, page 123, 1998.

- [26] E. Pfender. Thermal plasma technology: Where do we stand and where are we going? Plasma Chemistry and Plasma Processing, 19(1):1-31, 1999.
- [27] Ionut Enache. Etude expérimentale et modélisation du transfert de matière dans des décharges de Townsend à pression atmosphérique en mélange HMDSO-N₂O-N₂ et SiH₄-N₂O-N₂. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2007.
- [28] E. Marode. the mechanism of spark breakdown in air at atmospheric pressure between point and plane. i. experimental : Nature of streamer trake. journal of applied physics, vol 46N 05:2005, 1975.
- [29] N St J Braithwaite. Introduction to gas discharges. Plasma sources science and technology, 9(4):517, 2000.
- [30] Leonard B Loeb and John M Meek. The mechanism of spark discharge in air at atmospheric pressure. i. Journal of Applied Physics, 11(6):438-447, 1940.
- [31] I GALLIMBERTI "A computer model for streamer propagation", J. Phys. D: Appl. Phys. 5, 2179-2189, 1972.
- [32] YS Mok, SW Ham, and IS Nam. Evaluation of energy utilization efficiencies for SO₂ and NO removal by pulsed corona discharge process. Plasma chemistry and plasma processing, 18(4):535-550, 1998.
- [33] YS Mok. Efficient energy delivery condition from pulse generation circuit to corona discharge reactor. Plasma chemistry and plasma processing, 20(3):353-364, 2000.
- [34] UN Pal, AK Sharma, JS Soni, Sonu Kr, H Khatun, M Kumar, BL Meena, MS Tyagi, BJ Lee, M Iberler, et al. Electrical modelling approach for discharge analysis of a coaxial db dtube filled with argon. Journal of Physics D: Applied Physics, 42(4):045213, 2009.
- [35] D. Landau loan, Identification des systèmes, HERME Editions collection pédagogique d'automatique ISBN 2-86601-683-1 S. (1998)
- [36] Identification de modèles paramétriques à temps continu. Méthodes, outil logiciel et avantages. In Journées Identification et Modélisation Expérimentale (JIME'2006), page CDROM. -, 2006.
- [37] <https://www.advancedplasmasolutions.com/what-is-plasma/>

Résumé

Dans ce mémoire, une étude approfondie a été menée sur le comportement énergétique et électrique d'une décharge couronne de type pointe-plan en régime d'alimentation continue, dans le but d'analyser la manière dont l'énergie électrique est convertie, répartie et dissipée dans le plasma généré, afin d'en optimiser l'efficacité énergétique pour des applications industrielles et environnementales. La première partie du travail a permis de poser les bases théoriques en présentant les principes des décharges électriques, la nature du plasma froid, les mécanismes de sa formation ainsi que les différents régimes de fonctionnement observés dans une décharge couronne, avec une attention particulière portée à la caractéristique courant-tension révélant les transitions entre les régimes streamer, glow et de claquage. Dans la seconde partie, un modèle électrique équivalent a été proposé, basé sur une configuration série entre une résistance et une capacité variables, ce modèle ayant été validé expérimentalement grâce à des mesures de tension et de courant et renforcé par une identification paramétrique utilisant l'algorithme des moindres carrés récursifs. L'analyse énergétique a révélé que l'énergie de la décharge est principalement dissipée par la résistance sous forme de chaleur, tandis qu'une faible part est stockée par la capacité, bien que cette dernière joue un rôle plus utile dans les applications, ce qui oriente les stratégies d'optimisation vers la réduction des pertes résistives et l'augmentation de l'énergie capacitive. Par ailleurs, l'influence des paramètres opératoires tels que la tension appliquée et la distance inter-électrodes a été examinée, montrant que si une tension plus élevée augmente l'énergie totale consommée, elle tend aussi à accroître les pertes résistives au-delà d'un certain seuil, ce qui diminue l'efficacité du système, tandis qu'un ajustement optimal de la distance entre électrodes permet d'atteindre un meilleur compromis énergétique. En conclusion, ce travail a permis de proposer un modèle fiable et une méthode de calcul d'énergie applicable aux décharges couronne en régime continu, ouvrant des perspectives pour l'optimisation des procédés plasma dans des domaines tels que le traitement des gaz, la dépollution ou la génération de radicaux réactifs, avec des prolongements possibles vers d'autres géométries d'électrodes, des alimentations pulsées, ou encore des approches de modélisation tridimensionnelle du champ électrique.

Mots-clé : Décharge couronne – Plasma froid – Modèle électrique équivalent – Résistance – Capacité – Énergie dissipée – Rendement énergétique – Tension appliquée – Distance inter-électrodes – Méthode des moindres carrés – Optimisation – Traitement des gaz – Dépollution – Streamer – Régime continu – Champ électrique.

ملخص

في هذا البحث، أُجريت دراسة معمّقة حول السلوك الطاقوي والكهربائي لتفريغ كورونا من نوع رأس-سطح في نظام تغذية مستمر، بهدف تحليل كيفية تحويل الطاقة الكهربائية وتوزيعها وتبديدها في البلازما الناتجة، وذلك من أجل تحسين الكفاءة الطاقوية للتطبيقات الصناعية والبيئية. تضمنت المرحلة الأولى عرضاً نظرياً للمفاهيم الأساسية للتفريغات الكهربائية، مع التركيز على طبيعة البلازما الباردة وآليات تشكّلها والأنماط المختلفة التي يمكن أن تأخذها تفريغات كورونا، بالإضافة إلى دراسة منحني التيار-الجهد الذي يكشف عن المراحل الانتقالية بين الأنظمة المختلفة من بداية الستريمر إلى الستريمر الانهدامي مروراً بنظام التوهج. في المرحلة الثانية، تم تطوير نموذج كهربائي مكافئ يتكوّن من مقاومة وسعة متغيرتين موصولتين على التوالي، وتم التحقق من صلاحيته تجريبياً عبر قياسات للجهد والتيار، ودُعِم باستخدام طريقة التعريف البرامتري من خلال خوارزمية المربعات الصغرى التكرارية. أظهرت التحليلات الطاقوية أن معظم الطاقة يتم تبديدها عبر المقاومة على شكل حرارة بفعل تأثير جول، بينما تُخزّن كمية أقل في السعة، مع أنها أكثر فائدة من حيث التطبيقات، مما يوجه جهود التحسين نحو تقليل الخسائر في المقاومة وزيادة الحصة السعوية للطاقة. كما تم دراسة تأثير العوامل التشغيلية مثل الجهد المطبق والمسافة بين الأقطاب، حيث تبين أن ارتفاع الجهد يزيد الطاقة المستهلكة لكنه يؤدي أيضاً إلى زيادة الخسائر في المقاومة بعد حد معين، مما يضعف فعالية النظام، في حين أن اختيار المسافة المثلى بين الأقطاب يسمح بتحقيق توازن أفضل بين الطاقات وتحسين الأداء العام. في الختام، قدّم هذا العمل نموذجاً موثقاً وطريقة لحساب الطاقة قابلة للتطبيق على تفريغات كورونا المستمرة، ويفتح آفاقاً واعدة في مجالات مثل معالجة الغازات، إزالة التلوث، وتوليد الجذور النشطة، مع إمكانية توسيع هذا البحث ليشمل أشكالاً هندسية مختلفة للأقطاب، التغذية النبضية، أو حتى نمذجة ثلاثية الأبعاد للمجال الكهربائي لفهم أكثر دقة لديناميكيات التفريغ.

الكلمات المفتاحية : تفريغ كورونا – البلازما الباردة – نموذج كهربائي مكافئ – المقاومة – السعة – الطاقة المبددة – الكفاءة الطاقوية – الجهد المطبق – المسافة بين الأقطاب – طريقة المربعات الصغرى – التحسين – معالجة الغازات – إزالة التلوث الستريمر – نظام تغذية مستمر – المجال الكهربائي.

Summary

This thesis presents an in-depth study of the energetic and electrical behavior of a point-to-plane corona discharge under continuous power supply, with the aim of analyzing how electrical energy is converted, distributed, and dissipated within the generated plasma, in order to optimize energy efficiency for industrial and environmental applications. The first part introduces the fundamental concepts of electrical discharges, focusing on the nature of cold plasma, its formation mechanisms, and the different discharge regimes encountered in corona discharges, with special attention to the current-voltage characteristic that reveals the transitions between onset streamer, glow, and breakdown streamer regimes. In the second part, an equivalent electrical model was developed using a series configuration of variable resistance and capacitance, which was experimentally validated through voltage and current measurements and reinforced by a parameter identification method based on the recursive least squares algorithm. The energy analysis revealed that most of the discharge energy is dissipated through the resistance as heat due to the Joule effect, while a smaller portion is stored in the capacitance, although this latter part is more beneficial for practical applications, thus guiding optimization strategies toward reducing resistive losses and increasing capacitive energy share. Furthermore, the influence of operating parameters such as the applied voltage and the electrode gap was thoroughly investigated, showing that increasing the voltage raises the total energy consumption but also increases resistive losses beyond a certain threshold, which reduces overall efficiency, while an optimal inter-electrode distance allows for a better balance between resistive and capacitive energies and thus improves system performance. In conclusion, this work proposes a reliable electrical model and an applicable energy calculation method for continuous corona discharges, offering a solid foundation for understanding and optimizing energy conversion processes in cold plasmas, while opening promising perspectives for applications such as gas treatment, pollution control, and reactive species generation, with potential extensions to other electrode geometries, pulsed power supplies, or three-dimensional modeling of the electric field for a more accurate representation of the discharge dynamics.

Keywords : Corona discharge – Cold plasma – Equivalent electrical model – Resistance – Capacitance – Dissipated energy – Energy efficiency – Applied voltage – Electrode gap – Recursive least squares – Optimization – Gas treatment – Pollution control – Streamer – Continuous regime – Electric field.