

*RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE*

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

*FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE*



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

THÈME

**Analyse de l'évolution Spatio-temporelle du
champ électrique et les densités dans une
décharge DBD homogène d'hélium.**

Préparé par :
**BOUAMEUR MERIEM
RABAH GHALIA**

Devant les Jury:

<i>Nom et prénoms</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>
K.BELHACEL	MAA	Président
H. BOURENANE	MAA	Examineur
Y. BEKAOUAL	MAA	Examineur
M. BEDOUI	MCB	Encadreur

Promotion 2022

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous remercions notre encadrant Madame M. BEDOUI, et dont les idées, les conseils, les critiques, mais aussi les encouragements, nous ont été une aide précieuse. Elle a fait beaucoup plus de son devoir et c'est pourquoi elle a nos reconnaissances la plus profonde.

À tous nos enseignants qui nous ont suivis à ce jour.

Nous tenons particulièrement à remercier madame K.BELHACEL, qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Nous tenons aussi à remercier Madame H.BOURENANE et madame Y.BEKAOUEL, pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Merci à tous pour le temps consacré à la lecture de ce document et les améliorations suggérées.

Nous remercions également nos familles et en particulier nos parents qui nous ont offert toutes les conditions nécessaires.

Nos reconnaissances envers eux est inexprimable.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des acronymes

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé quelques abréviations, constante physique et symboles dont nous rappelons la signification ci-dessous :

Symboles

v : Vitesse.

f : Fonction de distribution.

f_i et **f_e** : sont respectivement les fonctions de distribution pour les ions et les électrons.

n_i et **n_e** : Densités ioniques et électroniques.

e : charge d'électron.

w : Pulsation.

n_i : Nombre des ions.

n_e : Nombre des électrons.

∇ : Operateur Nabla.

E : Champ électrique réduit.

m_e : Masse d'électron.

n_e : Densité des électrons.

n_i : Densité des ions.

n* : Densité des atomes.

T : Flux des particules.

T_e : Flux des électrons.

T_i : Flux des ions.

T* : Flux des atomes.

T_e : Flux d'énergie moyenne.

S : Terme source pour les particules

α : Premier coefficient d'ionisation de Townsend.

T_e : Température électronique.

T_i : Température des ions.

n : Vecteur unité normale.

ξ_k : Energie moyenne.

ρ : Densité de charge.

μ_k : Mobilités des espèces chargées.

D_k : Coefficient de diffusion.

K_B : Constante de Boltzmann.

q : Charge d'électron.

n_ε : Densité d'énergie.

$V_{e,th}$: Vitesse thermique d'électron.

γ_p : Coefficient de l'émission secondaire.

E_1 et E_2 : Désignent le champ électrique à l'interface gaz et diélectrique.

ε_1 et ε_2 : Permittivité relative du gaz et du diélectrique, respectivement.

V_0 : Valeur maximale de la tension appliquée.

v_e : Vitesse moyenne des électrons.

ν_i : Fréquence moyenne d'ionisation,

ν_a : Fréquence moyenne d'attachement,

ν_{detac} : Fréquence moyenne de détachement,

r_e : Coefficient de recombinaison,

n_n : Densité des ions négatifs.

N_{pr} : Nombre de particules d'espèce p créées dans la réaction r.

R_r : Taux de réaction.

K_r : Coefficient du taux de réaction.

v_i : vitesse moyenne ionique.

ε_r : Constante diélectrique.

V_g : Tension dans le gaz.

V_m : Tension mémoire.

V_{APP} : Tension appliquée.

I_d : Courant de décharge.

C_{ds} : Condensateur.

V_{ds} : Tension aux bornes du condensateur C_{ds} .

Abréviations

DBD : Décharge à Barrière Diélectrique.

PE : Polyéthylène.

PET : Polyéthylène Téréphtalate.

COV : Composés Organiques Volatils.

PIC-MCC : Particle-In-Cell Monte-Carlo Collision.

ACL : Approximation du Champ local.

AEL : Approximation de l'Energie Locale.

MC : Monte Carlo.

VDBD : Décharge à barrière diélectrique Volumique.

OAUGDP: One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma.

UV : Ultra-Violet.

PDP : Plasma Display Panels.

ACC : Structure coplanaire d'électrodes.

ACM : Structure d'électrode.

Constante physique

K_B = $1.38 * 10^{23}$ J/k : Constante de Boltzmann.

e = $1.602 * 10^{-19}$ C : La charge de l'électron.

ϵ_0 = $8.854 * 10^{-12}$ Fm⁻¹ : Permittivité du vide.

m_e = $9.1093 * 10^{-31}$ Kg : Masse de l'électron.

eV: Electron Volt (**1eV** = $1.602 * 10^{-19}$ **J** = 11604.5 **K**).

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I- 1 : Expérience de Théodose Du Moncel ; première Décharge à barrière diélectrique AB& HG : feuille d'étain ; CD & EF : plaques de verre .	5
Figure I- 2 : Dispositif de Werner Von Siemens pour la production d'ozone	6
Figure I- 3 : Principe de fonctionnement d'une DBD :	7
Figure I- 4 : Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques	8
Figure I- 5 : Configurations de décharges de surface.	9
Figure I- 6 : Systèmes d'électrodes les plus couramment utilisés pour la production des décharges : DBD volumique et surfacique.	9
Figure I- 7 : Exemples de micro décharges.	10
Figure I- 8 : Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement d'eau.	12
Figure I- 9 : Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique de plastiques.	13
Figure I- 10 : Configurations des électrodes coplanaires (ACC) et la matrice (ACM) des afficheurs à écran plasma.	15
Figure I- 11 : Cellules de pixels électrodes opposées (a) ; coplanaires (b) et (c) Cellule élémentaire ou pixel.	15
Figure I- 12 : Configuration complète d'un afficheur à écran plasma	16

Chapitre II

Figure II- 1 : Schéma d'un modèle complet de réacteur DBD.	19
---	----

Chapitre III

Figure III- 1 : Modèle 1D de la DBD.	29
Figure III- 2 : Modèle 3D de la DBD.	29
Figure III- 3 : Évolution temporelle du courant de décharge, de la tension de gaz et la tension mémoire pendant deux cycles de tension appliquée dans hélium $V_{app} = 1kV$, $f = 50kHz$ et un espace plasma de 1mm.	31
Figure III- 4 : Variations spatiales du champ électrique, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1kV$, $f=50kHz$ et un espace de 1mm d'épaisseur, à différentes instants.	32
Figure III- 5 : Variations spatiales de la densité électronique, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1kV$, $f=50kHz$ et un espace de 1mm d'épaisseur, à différentes instants.	33
Figure III- 6 : Variations spatiales de la densité ionique, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1kV$, $f=50kHz$ et un espace de 1mm d'épaisseur, à différentes instants.	33
Figure III- 7 : Variations spatiales de la densité métastable, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1kV$, $f=50kHz$ et un espace de 1mm d'épaisseur, à différentes instants.	34
Figure III- 8 : Courbe de Lissajous pour une tension appliquée de 1kV, une fréquence de 50 kHz et une épaisseur de l'espace plasma 1 mm pour DBD d'hélium.	35
Figure III- 9 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour l'amplitude de tension appliquée 1k, 2k, et 3kV, $f = 50 kHz$ et un espace plasma de 1mm.	36
Figure III- 10 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour des valeurs de fréquence variant de 50k à 100 kHz et un espace plasma de 1mm.	36
Figure III- 11 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour des valeurs de l'espace plasma variant de 0.635 à 1mm.	37

Figure III- 12 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour d la permittivité relative de diélectrique $\epsilon_r=5$, $\epsilon_r=7$, $\epsilon_r=4.2$ et $\epsilon_r=9.6$ 38

Liste des Tableaux

Chapitre II

<i>Tableau II- 1 : Processus de collision importants dans la décharge d'Hélium.</i>	<i>26</i>
<i>Tableau II- 2 : Bilan des réactions de la surface.</i>	<i>27</i>

Chapitre III

Tableau III- 1 : Paramètres de simulation.	30
--	-----------

Table des matières

Remerciements

Liste des acronymes

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I: Revue bibliographique

I.1 Introduction..... 3

I.2 Aperçu sur la décharge à barrière diélectrique 3

 I.2.1 Définition de la décharge à barrière diélectrique..... 3

 I.2.2 Historique 4

 I.2.2.1 Premières décharges à barrière diélectrique..... 4

 I.2.2.2 La guerre contre les microbes 6

I.3 Principe de fonctionnement d'une DBD..... 6

I.4 Différentes configurations de DBD 8

 I.4.1 Configurations des DBDs volumiques 8

 I.4.2 Configurations des DBDs surfaciques..... 8

 I.4.3 Géométries courantes des DBDs 9

I.5 Différents régimes de DBD 10

 I.5.1 Régime filamentaire..... 10

 I.5.2 Régime homogène 10

I.6 les applications de la DBD..... 11

 I.6.1 Domaines industrielle 11

 I.6.1.1 Génération d'ozone 11

 I.6.1.2 Traitement des surfaces 12

 I.6.1.3 Excilampes 13

 I.6.2 Domaine Médical 16

 I.6.3 Domaine de l'aéronautique..... 17

I.7 Conclusion 17

Chapitre II: Modèle physique et Mathématique de la DBD

II.1 Introduction 18

II-2 Présentation du modèle numérique d'une décharge électrique 19

 II-2-1 Modèle cinétique 19

 II-2-2 Modèle fluide..... 19

 A. Approximation du champ locale (ACL) 20

 B. Approximation de l'énergie locale (AEL)..... 20

II-2-3 Modèles Particulaire (microscopiques)	20
II-2-4 Modèle hybride	21
II-3 Modélisation numérique d'une décharge plasma	21
II.4 Modèle mathématique de la décharge électrique à la pression atmosphérique	21
II.5 Modèle électrique	22
II.6 Modèles non auto- cohérents	23
II.7 Modèles auto-cohérents	23
II.8 Description de l'approche fluide	24
II.8.1 Equation de continuité	24
II.8.2 Equation de transfert de la quantité de mouvement	24
II.8.3 Equation de l'énergie	24
II.8.4 Equation de Poisson	25
II.9 Conditions aux limites	25
II.10 Conditions initiales	26
II.11 Processus de collision importants dans la décharge d'Hélium	26
II.12 Conclusion	27

Chapitre III: Résultats et discussions

III.1 Introduction	28
III.2 COMSOL Multiphysics	28
III.4 Modèle physique et équations de base d'une décharge DBD	29
III.6 Résultats de simulation et discussion	30
III.7 Influence des Paramètres du réacteur DBD	35
III.7.1 Effet de l'amplitude de la tension appliquée	35
III.7.2 Effet de la fréquence	36
III.7.3 Effet de la distance inter-diélectrique	37
III.7.4 L'influence de la constante diélectrique ϵ_r	37
III.7 Conclusion	38
Conclusion générale	39
Références Bibliographiques	

Introduction Générale

Introduction générale

Les décharges à barrières diélectriques (DBD) sont des dispositifs, dont le principe repose sur la création d'un plasma : elles sont constituées de deux électrodes métalliques recouvertes par une couche diélectrique qui est au contact avec le gaz, dans lequel il s'agira de créer ce plasma, ce diélectrique destiné à éviter la transition du plasma vers le régime d'arc. En effet, lorsque le courant traverse le plasma, il charge également ces diélectriques : leurs tensions augmentent, tandis que celle appliquée au plasma diminue, jusqu'à l'extinction totale de la décharge. Les plasmas ainsi obtenus sont qualifiés de « plasmas froids ». Cette dernière propriété rend ces dispositifs particulièrement attractifs dans diverses applications qui nécessitent l'emploi de plasmas à température peu élevée : lampes UV à excimères, contrôles d'écoulement du gaz, dépôts de couches minces, traitements de surface ...[1]

Les décharges habituellement établies à haute pression sont, de type corona ou décharge contrôlée par barrière diélectrique (**DBD**). Cette dernière peut être produite lorsqu'au moins l'une des électrodes est recouverte par une couche diélectrique, comme le verre, le quartz, la céramique...etc. Une source de tension alternative ou pulsée peut être utilisée pour alimenter la cellule DBD. La charge déposée sur le diélectrique limite le courant en y induisant une chute de tension qui s'oppose à la tension appliquée[2].

Notre travail est structuré dans ce mémoire en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les décharges à barrières diélectriques (DBD) pour définir les plasmas froids à pression atmosphérique, Leur principe de fonctionnement, les différents régimes caractérisant les DBD et les différents domaines d'applications.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le modèle physique et mathématique, cette modélisation dite fluide. Ce modèle prend en compte la cinétique de formation des espèces chargées du plasma (électrons, ions et métastable) ainsi que leurs transports couplés à l'équation de Poisson pour le champ électrique. Nous décrivons le système d'équations mathématiques mis en jeu. A la fin nous présenterons les réactions chimiques du gaz utilisé l'Hélium.

Le troisième chapitre s'articule autour deux axes : le premier est consacré aux résultats de la simulation du modèle unidimensionnelle (1D) de la décharge à barrière diélectrique. La présentation des conditions aux limites et conditions initiales qui constituent l'étape essentielle de la simulation numérique est aussi détaillée dans ce travail et la deuxième partie sera dédiée à l'étude de l'influence des paramètres du réacteur DBD sur le comportement dynamique de la DBD.

Enfin, Nous concluons ce travail par une conclusion générale permettant de synthétiser les résultats obtenus et ainsi que les perspectives qui peuvent être ouvertes par ce travail.

Chapitre I:

Revue Bibliographique

I.1 Introduction

Les DBD concilient une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation avec les propriétés d'un plasma hors équilibre. En travaillant à la pression atmosphérique, il est possible d'effectuer des traitements à grande échelle, économiques et compatibles avec une production en ligne. Les plasmas hors équilibre, que l'on rencontre généralement dans les procédés plasma sous vide, permettent un traitement de surface sans altérer le matériau et sa surface grâce à une température de gaz comparable à la température ambiante ($T_{ions} \sim 300 \text{ K}$ $T_e \sim$ quelques eV). De plus, l'utilisation de la barrière diélectrique homogénéise la répartition des charges en surface des électrodes et empêche toute transition à l'arc et tout échauffement local important. Ce procédé permet donc le traitement de films polymères tels que le polyéthylène (PE) ou le polyéthylène téréphtalate (PET) sans risque d'altération (trou, échauffement, etc.). L'exploration, dans le cadre du présent travail, d'une nouvelle gamme de pressions allant de 10 à 1000 mbar pour ce procédé offre une ouverture vers de nouvelles applications.

Dans ce premier chapitre, nous essayons de faire une revue bibliographique sur les décharges à barrière diélectrique. Nous consacrons la première partie de ce chapitre à la définition succincte de la décharge à barrière diélectrique (DBD) et leur historique.

Dans la seconde partie, nous ferons, dans un premier temps, une présentation de leur principe de fonctionnement, leurs différentes configurations ainsi que les différents régimes de DBD. Nous terminons le chapitre par une brève étude bibliographique concernant les différents domaines d'applications de la DBD.

I.2 Aperçu sur la décharge à barrière diélectrique

I.2.1 Définition de la décharge à barrière diélectrique

Une décharge à barrière diélectrique est un plasma froid hors équilibre généré à la pression atmosphérique entre deux électrodes recouvertes de diélectrique. Ce plasma faiblement ionisé ($n_e = 10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) est caractérisé par une température électronique de quelques électronvolts bien supérieure à celle des espèces neutres qui sont majoritaires.

Cette décharge se caractérise par la présence d'un composant diélectrique sur au moins une des deux électrodes. Différentes configurations d'électrodes, ayant toutes en commun l'insertion d'une couche diélectrique couvrant au moins l'une des deux électrodes sont proposées. Ces dispositifs sont nombreux et variés avec une géométrie homogène ou hétérogène.

La largeur de l'espace inter-électrode varie de 0,1 mm à plusieurs centimètres en fonction de l'application souhaitée.

Pour transporter un courant autre que capacitif dans l'espace de décharge, le champ électrique se doit être assez intense pour causer l'effondrement du gaz. Or, pour des valeurs élevées de pression (et de distance inter-électrodes : loi de Paschen), l'augmentation du courant entre deux électrodes métalliques entraîne généralement le passage vers un régime d'arc. La présence d'un diélectrique entre les électrodes peut être considérée comme une capacitance en série avec l'espace du gaz. Le principal rôle de ce diélectrique est d'éviter le passage à l'arc lors de l'établissement de la décharge. Ceci résulte de l'accumulation de charges sur le matériau isolant. Ces charges de même polarité que l'électrode opposée provoquent une chute du champ et une extinction de la décharge. Le diélectrique étant un isolant sa constante diélectrique et son épaisseur, en combinaison avec la dérivée dans le temps de la tension appliquée dU/dt , pour déterminer la quantité de courant qui peut passer à travers le diélectrique. Il ne laisse pas passer le courant DC. C'est pourquoi, lorsqu'on travaille avec telles décharges, il est impératif qu'elles soient alimentées par une tension alternative. Dans ce cas, la présence des charges va accélérer la formation des streamers par augmentation du champ dans l'alternance suivante.

Des différences de potentiel de l'ordre de dizaines de kV sont nécessaires pour allumer les décharges dans un espace inter-électrodes de quelques millimètres. Puisque à haute fréquence, la limitation du courant par la barrière diélectrique devient de moins en moins efficace, la DBD est normalement utilisée entre des fréquences de 50 Hz à 10 MHz.

La configuration géométrique des électrodes dans ce type de décharge volumique, qui est la plus utilisée, peut-être de nature plan-plan, pointe-plan, multi pointes-plan, lame-cylindre, fil - cylindre et cylindre-cylindre [3].

I.2.2 Historique

Les décharges à barrière diélectrique constituent l'un des procédés plasma parmi les plus anciens, mais ont toutefois connu un développement plus chaotique que les plasmas fonctionnant à basse pression. Les industriels lui prêtent toutefois un intérêt plus important depuis la deuxième moitié du XXème siècle et plus particulièrement encore depuis 20 ans.

I.2.2.1 Premières décharges à barrière diélectrique

Les premiers écrits relatant la réalisation d'une décharge à barrière diélectrique semblent converger vers l'expérience mise au point par Théodose Du Moncel, en 1853. Ce montage consistait en un positionnement en vis-à-vis de deux plaques de verre, à l'extérieur desquelles des feuilles d'étain avaient été déposées. L'espace les séparant était de l'ordre de 2 mm. Les pôles d'une bobine de Ruhmkorff(1) étaient chacun reliés à l'une des feuilles d'étain. La

décharge produite fut décrite comme un « flux lumineux bleuâtre », ou encore une « pluie de feu de couleur bleue ». C'est la première fois que le « feu électrique » était observé entre deux matériaux isolants. L'absence apparente de création de chaleur et le caractère silencieux de la décharge par rapport aux arcs habituellement créés, amenèrent les scientifiques à lui donner le nom particulier d'effluve électrique [4].

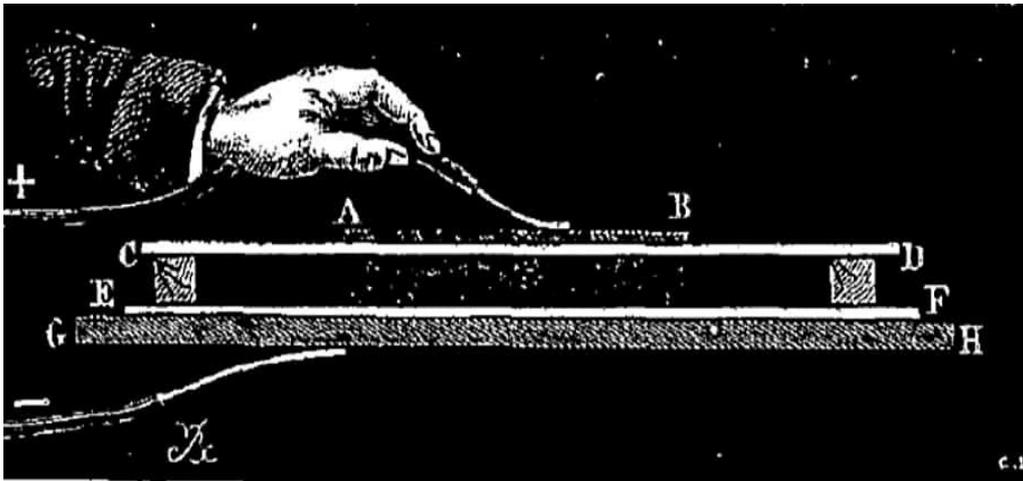


Figure I- 1 : *Expérience de Théodore Du Moncel ; première Décharge à barrière diélectrique AB & HG : feuille d'étain ; CD & EF : plaques de verre [4].*

Andrews et Tait la nommèrent en 1860 décharge silencieuse, dénomination qui est toujours d'actualité aujourd'hui dans certaines publications.

L'expérience qui a donné ses premiers titres de noblesse à ce type de décharge n'est cependant pas celle-là. Le réacteur de l'industriel allemand Werner Von Siemens permet de démontrer l'efficacité des DBD pour la production d'ozone. Le schéma de son dispositif est présenté dans la figure (I-2). Comme dans le système développé par Théodore Du Moncel, la tension était appliquée par le biais d'une bobine de Ruhmkorff. Le verre était utilisé comme diélectrique et les électrodes étaient en étain.

Les savants firent le rapprochement entre les décharges et le feu du fait de la production de lumière et de chaleur dans chacun des phénomènes. Des expériences avaient même montré l'influence d'une décharge sur des flammes.

Cet industriel est également connu pour ses nombreuses innovations dans le domaine électrique : développement de grandes lignes télégraphiques, esquisse de la première dynamo, alimentation du métropolitain par un 3ème rail, et des tramways par voie aérienne... L'unité de la conduction électrique porte son nom.

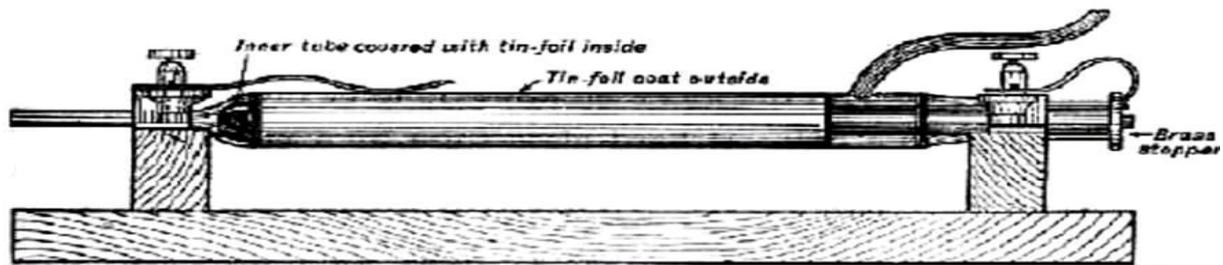


Figure I- 2 : Dispositif de Werner Von Siemens pour la production d'ozone [4]

I.2.2.2 La guerre contre les microbes

Le XIX^{ème} siècle fut également celui de l'avènement de la microbiologie. En un peu plus de trente ans, les scientifiques admirent l'existence des microbes, virus et champignons, ainsi que leur responsabilité dans les épidémies rencontrées au cours du XIX^{ème} siècle.

Aussitôt, des techniques pour purifier les eaux furent développées. Les systèmes de filtrage démontrèrent dans un premier temps une certaine efficacité. Celui de Chamberland en particulier connut un grand succès. Mais aucun filtre n'était efficace contre les virus. Ces derniers étaient trop petits ($< 1 \mu\text{m}$) pour être récoltés, les porosités les plus fines étant micrométriques. L'utilisation de l'hypochlorite de sodium permit de résoudre ce problème. L'ébullition était plus efficace mais ne pouvait pas être transposée aux grandes quantités d'eau [4].

I.3 Principe de fonctionnement d'une DBD

Quand la tension appliquée sur le gap gazeux est suffisamment élevée et égale à la tension d'amorçage (définie par la courbe de Paschen), on observe la formation d'un canal conducteur (figure I-3.a). Compte tenu du faible libre parcours moyen à pression atmosphérique, ce canal de décharge présente un rayon typiquement de l'ordre de la centaine de μm , on parle alors de micro-décharge. Celle-ci peut être représentée par le schéma équivalent de la figure (I-3.d). Le diélectrique en vis-à-vis de la micro-décharge se comporte alors comme l'isolant d'un condensateur, C_{ds} , dont les armatures sont d'un côté la décharge et de l'autre l'électrode. Notons que ce schéma équivalent n'a de sens que si l'on considère uniquement une seule micro-décharge ou une décharge homogène sur toute la surface des électrodes. Par la suite, nous noterons V_a la tension appliquée sur la cellule de décharge V_g celle sur le gaz et enfin V_{ds} celle sur le diélectrique. Le passage du courant induit une accumulation de charge sur la surface du diélectrique solide en vis-à-vis du canal de décharge qui conduit à une augmentation de la tension V_{ds} .

Si l'augmentation de cette tension au fur et à mesure du développement de la décharge est plus rapide que l'augmentation de la tension appliquée V_a à l'endroit où s'est initiée la micro

décharge, elle entraîne une chute de la tension appliquée sur le gaz V_g , ce qui conduit à l'extinction de la décharge. Ainsi, la micro-décharge est bloquée bien avant d'avoir atteint un degré d'ionisation suffisant pour transiter en régime d'arc. Si la tension appliquée sur les électrodes continue d'augmenter, des micro-décharges s'initient à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles en surface du diélectrique diminue le champ électrique vue par le gaz aux positions où les micro-décharges se sont déjà développées (figure I-3.b). Au changement de polarité (figure I-3.c), les charges précédemment déposées sur le diélectrique permettent un claquage du gaz sous un champ électrique plus faible que lors de la première alternance : $V_g = V_a - V_{ds}$ (avec V_a et V_{ds} de signes contraires lors du changement de polarité).

La fonction première du diélectrique est de limiter la charge déposée sur les électrodes et par voie de fait le courant transitant dans le canal afin que la décharge ne devienne par un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à pression atmosphérique. De plus l'utilisation du diélectrique a également pour conséquence de tendre vers une répartition plus uniforme des micro-décharges sur toute la surface des diélectriques. En contrepartie, la présence d'un diélectrique impose l'utilisation d'une excitation électrique alternative afin de décharger le condensateur (le courant qui circule dans la décharge doit présenter une valeur moyenne nulle)[2].

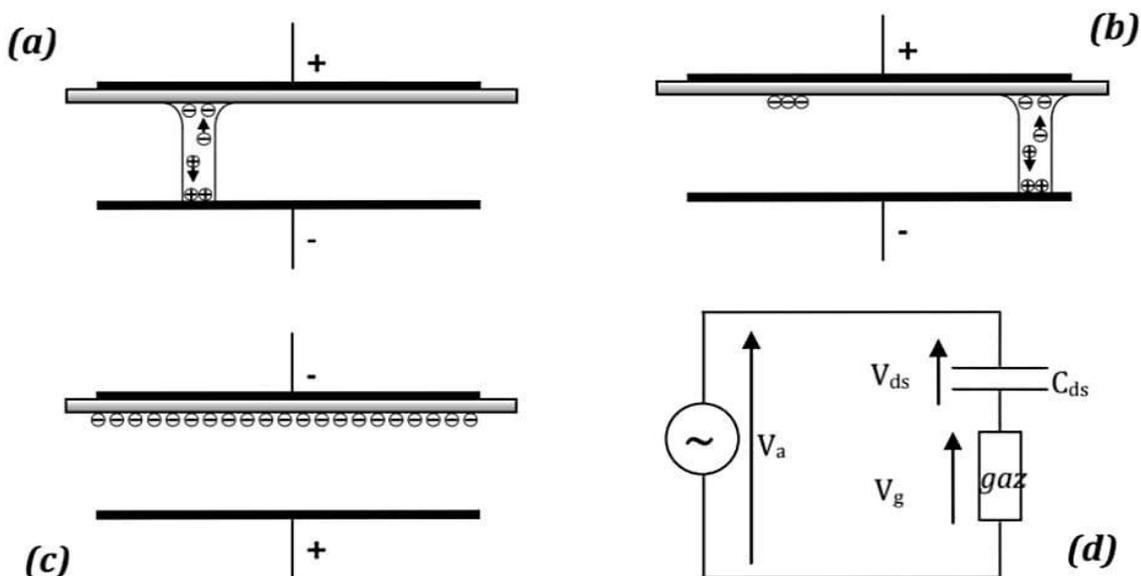


Figure I-3 : Principe de fonctionnement d'une DBD :

- (a) établissement d'une première micro-décharge,
- (b) extinction de la première micro-décharge et amorçage d'une nouvelle
- (c) changement de la polarité de la tension appliquée sur les électrodes,
- (d) schéma électrique équivalent d'une micro-décharge[2].

I.4 Différentes configurations de DBD

I.4.1 Configurations des DBDs volumiques

Il existe d'autres configurations couramment utilisées. En effet, le terme de DBD regroupe toutes les configurations de cellule de décharge pour lesquelles un courant transite entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant. Suivant l'application visée, deux couches isolantes peuvent y être placées. Les configurations coplanaires et cylindriques typiques d'électrodes sont données dans figure (I-4) [3].

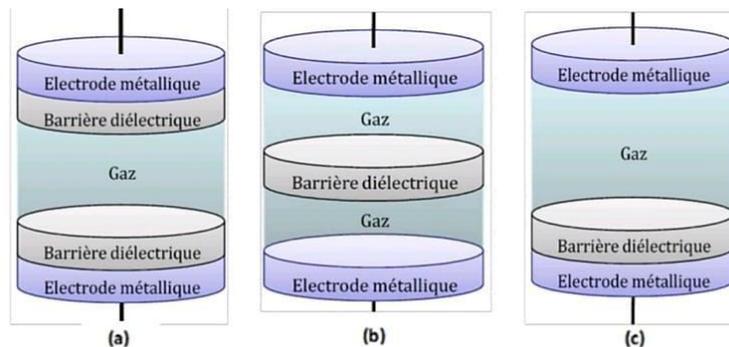


Figure I- 4 : Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD) [3].

Les configurations coplanaires sont plutôt utilisées pour les applications de traitements de surface tandis que les cylindriques sont plus adaptées aux traitements des gaz. L'arrangement plan-plan (a) et (c) de la figure (I-4) présente l'avantage d'éviter tout contact entre le plasma et les électrodes métalliques, condition parfois utile lors de l'utilisation de plasma corrosif par exemple.

La configuration (b) permet l'obtention simultanée d'une décharge de part et d'autre du diélectrique, propriété intéressante si, par exemple, la barrière diélectrique est réalisée à l'aide du matériau à traiter. Dans ce cas, le matériau est traité sur les deux faces simultanément.

La configuration (c) regroupe les propriétés des deux types précédés ce qui donne une forte décharge beaucoup plus et aussi bien uniforme que les deux autres.

I.4.2 Configurations des DBDs surfaciques

A la fin des années 90 aux Etats-Unis, le Pr Roth met au point une nouvelle configuration de DBD de surface et qu'il nomme « OAUGDP » (One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma). Cette décharge est établie entre au moins deux électrodes placées de part et d'autre d'un diélectrique et est dite surfacique car il n'y a plus, comme précédemment, d'espace gazeux entre les électrodes (le diélectrique occupant tout l'espace inter-électrodes) figure (I-5).

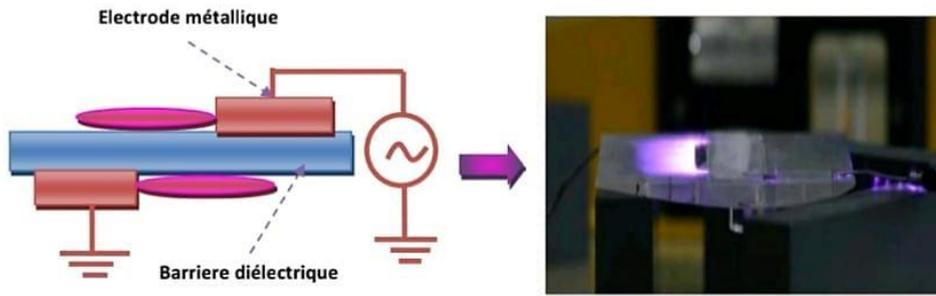


Figure I- 5 : Configurations de décharges de surface[3].

I.4.3 Géométries courantes des DBDs

Des configurations typiques cylindriques ou planaire des électrodes des décharges à barrière diélectrique sont montrées sur la figure (I-6) : les DBDs sont caractérisées par la présence d'une ou plusieurs couches de diélectrique dans le chemin du courant entre les électrodes métalliques.

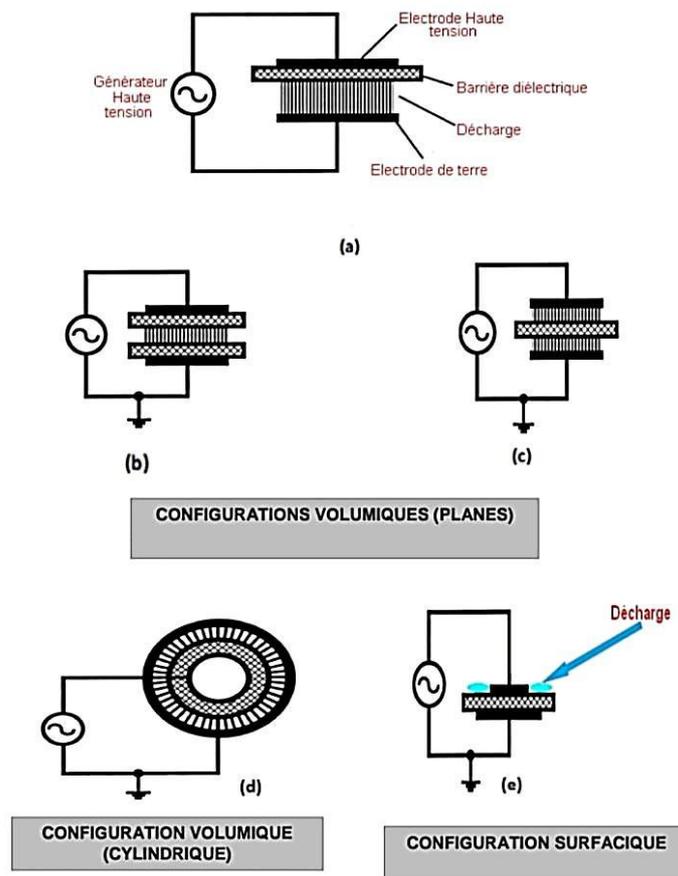


Figure I- 6 : Systèmes d'électrodes les plus couramment utilisés pour la production des décharges :

DBD volumique et surfacique.[3]

- a) et d). DBD caractérisée par la présence du matériau diélectrique au contact d'une électrode,
- b). Au contact des deux électrodes,
- c). Au centre de la zone de décharge.
- e). DBD caractérisée par la présence du diélectrique de part et d'autre des deux électrodes.

I.5 Différents régimes de DBD

Dans cette partie, nous présentons les caractéristiques des deux principaux régimes de décharges à barrières diélectriques.

I.5.1 Régime filamentaire

Le régime filamentaire est le régime dominant des DBD. Il se compose de multitudes de micro décharges désynchronisées spatialement et temporellement, c'est donc un régime non uniforme. Macroscopiquement, on peut alors observer un phénomène de répulsion des filaments entre eux. La densité de micro décharges est proportionnelle à l'amplitude de la tension appliquée voir la figure (I-7). Pour des tensions proches de la valeur de claquage (et à fréquence élevée), les micro-décharges ont tendance à apparaître au même endroit ou les charges résiduelles sur le diélectrique facilitent l'apparition d'un nouveau filament en ces points de la surface après le changement de polarité. À l'inverse, à tension élevée (et fréquence faible) les micro-décharges changent de position sur la surface de manière aléatoire, la répartition des charges résiduelles étant dans ce cas quasi homogène.

Toutefois, les dépôts de charges sont également responsables de différents types d'interactions entre les micro décharges et notamment la génération de formes et les effets collectifs [5].

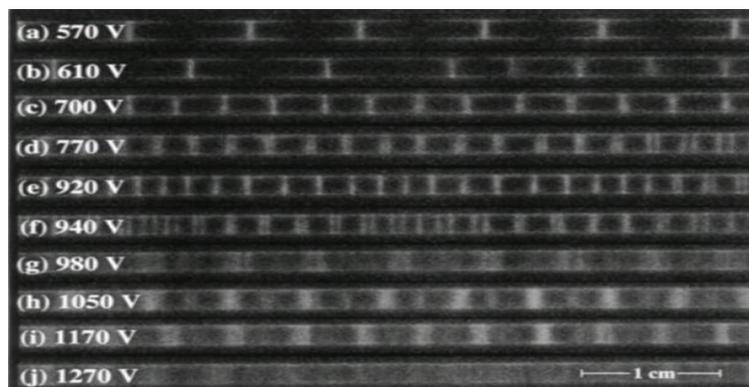


Figure I- 7 : Exemples de micro décharges.

I.5.2 Régime homogène

Le régime homogène nécessite des conditions particulières. Il est atteint par génération d'une décharge de Townsend (dans l'azote par exemple) ou luminescente (pour les gaz rares). Différents moyens d'arriver à une décharge DBD homogène ont été proposés.

L'aspect filamentaire étant lié à des dépôts de charges ponctuels sur la surface du diélectrique, un moyen d'accéder à une DBD homogène est de parvenir à une répartition homogène des charges sur la surface. La décharge homogène est possible si la densité d'électrons de pré ionisation est suffisante pour causer la synchronisation des têtes d'avalanches primaires aux étapes où des micro-décharges isolées devraient autrement se produire. La nature des

diélectriques (par la valeur des coefficients d'émission secondaire selon le gaz), peut favoriser l'apparition d'une décharge homogène préférentiellement au mode filamentaire.

De même les conditions de surface et les propriétés de polarisation influençant l'accumulation des charges peuvent stabiliser la décharge. La nature du mélange de gaz est également un facteur important, par sa capacité ou non à produire un nombre suffisant d'électrons germes entre chaque décharge permettant le rallumage de la décharge sur toute la surface et pour un faible champ. La présence d'impuretés ou d'espèces réactives et/ou électronégatives (comme l'oxygène), même en faible quantité peut amener la décharge dans un régime filamentaire. Les signaux électriques, et notamment la tension appliquée et la fréquence influencent l'allure de la décharge. Du fait du dépôt de charges à la surface, une alimentation haute tension, faible fréquence générera une distribution des micro décharges sur toute la surface du diélectrique, alors qu'une opération en faible tension, haute fréquence se traduira par un rallumage des canaux des précédentes micro décharges à chaque demi-période. Les propriétés des micro décharges sont globalement indépendantes de la forme des signaux appliqués, à l'exception des courts temps de montée de tension. Si le temps de montée de la tension est suffisamment court, il est possible d'initier un grand nombre de micro décharges simultanément, voire de synchroniser les micro-décharges. On a alors une décharge quasi-homogène issue d'un claquage filamentaire[5].

I.6 les applications de la DBD

Dans cette section, nous traitons les plasmas DBD à pression atmosphérique qui sont de plus en plus adoptés à diverses applications en raison de leurs propriétés physiques et chimiques. Parmi ces propriétés nous citons : le claquage du gaz qui conduit à la génération d'une décharge électrique et la création d'espèces chimiquement actives tels les électrons, les ions, les métastables, les radicaux libres et les espèces excitées qui entrent en contact direct avec les objets placés entre les électrodes et conduisent à des modifications dans leur propriétés de surface. La grande diversité d'applications offertes par les plasmas DBD est un point motivant, qui peut être appliqué dans différents Domaines.

I.6.1 Domaines industrielle

I.6.1.1 Génération d'ozone

La génération d'ozone est l'une des anciennes méthodes et la plus importante pour le traitement de l'eau et de l'air. Elle a été la première application industrielle des plasmas DBD pour la désinfection des eaux, en éliminant les bactéries, les virus et les odeurs désagréables.

La formation de l'ozone (O_3) à pression atmosphérique dans les plasmas DBD est basée sur la réaction chimique à trois corps:



Où:

- M peut être une molécule d'oxygène O_2 ou une molécule d'azote N_2 , si l'air est utilisé.
- O_3^* désigne une molécule d'ozone dans un état excité.

La plupart des installations utilise une configuration cylindrique avec du verre comme diélectrique comme le montre la figure (I-8) ; qui présente le schéma de principe d'un ozoniseur alimenté en oxygène. Dans cette figure la DBD est constituée de deux barrières diélectriques coaxiales, la décharge est effectuée dans le volume dans lequel le gaz circule. Le courant électrique va convertir une partie du gaz entrant en ozone.

De façon générale, la génération d'ozone par le DBD permet plusieurs usages particulièrement en chimie, dans le traitement des eaux usées et également le traitement de l'air notamment les composés organiques volatils (COV)[6, 7].

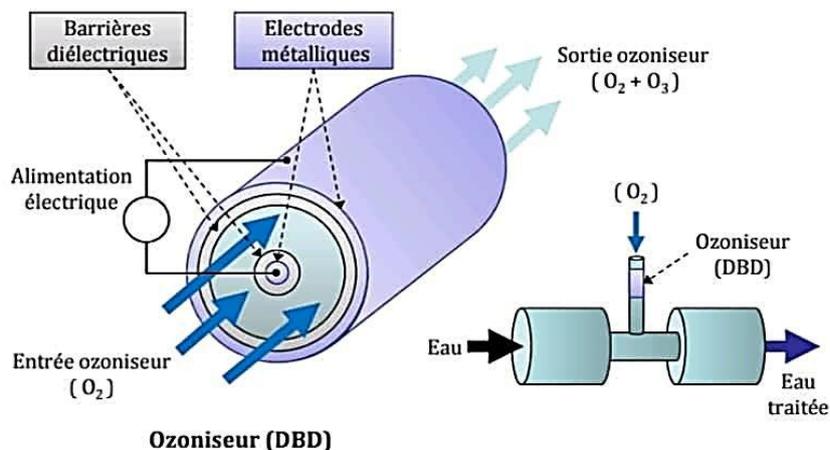


Figure I- 8 : Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement d'eau[6, 7].

I.6.1.2 Traitement des surfaces

Le traitement de surface d'un matériau a pour objectif de lui donner de nouvelles propriétés de surface et comme la décharge est « froide » le risque de déformation de la surface est minimisé cependant elle conserve les propriétés volumiques de base. L'utilisation des plasmas DBD pour les traitements de surface couvre un large intervalle. Nous pouvons en citer entre autres les applications suivantes :

- Modification des propriétés de la surface d'un matériau.
- Amélioration des propriétés d'adhésion et/ou de mouillabilité.

- Traitement des textiles.
- Traitement de polymères.
- Dépôts de couches minces.
- Nettoyage de surfaces (silicium, aciers...).
- Désinfection et la stérilisation.

Tous ces traitements peuvent être résumés en trois types de procédés plasma de traitement de surface : **la gravure** (ou ablation) où un matériau est enlevé, **le dépôt** où un matériau est ajouté et **l'activation** où des liaisons non satisfaites sont créées sur la surface du matériau traité.

La Figure(I-9) présente un banc de traitement de films plastiques par une décharge créée entre les rouleaux constituant les électrodes de la haute tension recouvertes par un diélectrique et les rouleaux de la masse[6, 7].

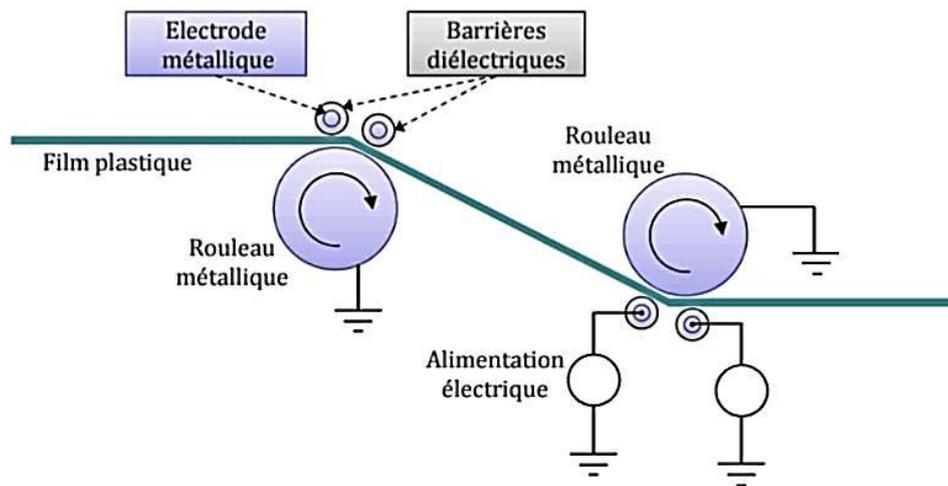


Figure I- 9 : Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique de plastiques [6, 7].

I.6.1.3 Excilampes

Le principe de ce type de lampes est basé sur la décharge DBD créée dans certains gaz rares ou dans des gaz rares et halogènes. Généralement, la production du rayonnement ultraviolet (UV) d'une lampe à DBD repose sur l'émission de photons par des molécules instables connues sous le nom d'excimères (contraction de «Excited» et «Dimer») ou d'exciplexes (contraction de «Excited» et «Complex»). Ces molécules se forment suite à des collisions à trois corps, respectivement selon les réactions suivantes:



Où Gr représente un atome de gaz rare et Hl un atome d'halogène

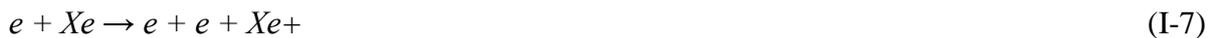
➤ Excimères

L'excimère est une molécule excitée et instable, formée par deux atomes d'un gaz rare. Cette molécule libère une énergie en forme de photon avec une durée de vie assez faible, lors de son retour à l'état fondamental (deux atomes), avec une longueur d'onde qui dépend de la nature du gaz. Par exemple, les réactions chimiques présentées ci-dessous, sont celles qui vont créer l'excimère et ensuite émettre un rayonnement dans l'UV dans le cas du xénon :



➤ Exciplexe

L'exciplexe est une molécule excitée instable, constituée par deux atomes différents, par exemple, un atome de gaz rare et un atome d'halogène. L'état fondamental de cette molécule est encore une fois anti-liant donc auto-dissociatif. Le processus de génération de la lumière est similaire à celui d'un excimère. Les réactions qui correspondent à la formation de l'exciplexe $XeCl^{*}$ sont données ci-dessous :



Parmi les nombreuses applications des excilampes à base de DBD nous citons :

➤ Les écrans plasmas (PDP: Plasma Display Panels)

Les afficheurs à écran plasma AC utilisent le rayonnement VUV à xénon pour exciter le phosphore. Cette idée est l'œuvre de deux professeurs de l'Université de l'Illinois, Bitzer et Slottow et fut inventée en 1964. Un afficheur à écran plasma est constitué de deux verres parallèles entre un mélange de gaz rares, en général des mélanges binaires ($Ne-Xe$) ou ternaires ($Ne-Xe-He$) capable d'émettre des rayonnements UV séparés par un gap d'environ 100 μ m. Une matrice d'électrodes est couverte par des couches fines de diélectrique de 20 μ m à 40 μ m d'épaisseur posées sur chaque lame de verre. Dans le commerce on trouve deux types de géométrie des électrodes : la structure coplanaire d'électrodes (ACC) et la structure d'électrode(ACM)(figure I-9)[6].

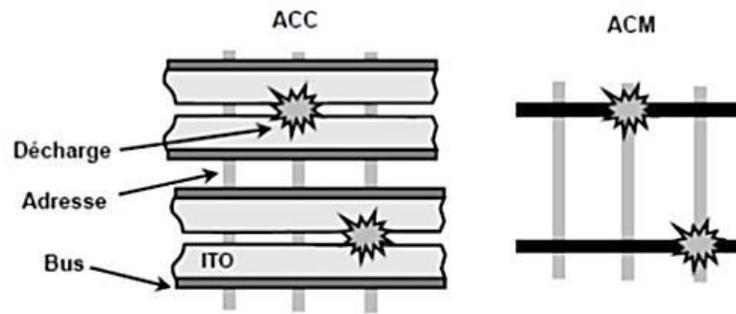


Figure I- 10 : Configurations des électrodes coplanaires (ACC) et la matrice (ACM) des afficheurs à écran plasma[6].

Pour chaque cellule, le rayonnement VUV excite les revêtements phosphoriques internes en (RGB) : rouge (R=Red), vert (G=Green), ou bleu (B=Blue). Dans ce cas, chaque cellule agit comme une lampe fluorescente miniaturisée. Ces cellules de décharge sont regroupées en triplet RGB ou en quadruplet RGBR de couleurs. Un afficheur à grande dimension peut comporter 1280 par 1024 points. Sur (la figure I-11), nous présentons un schéma avec deux dispositions d'électrodes : (a) électrodes opposées et (b) électrodes coplanaires.

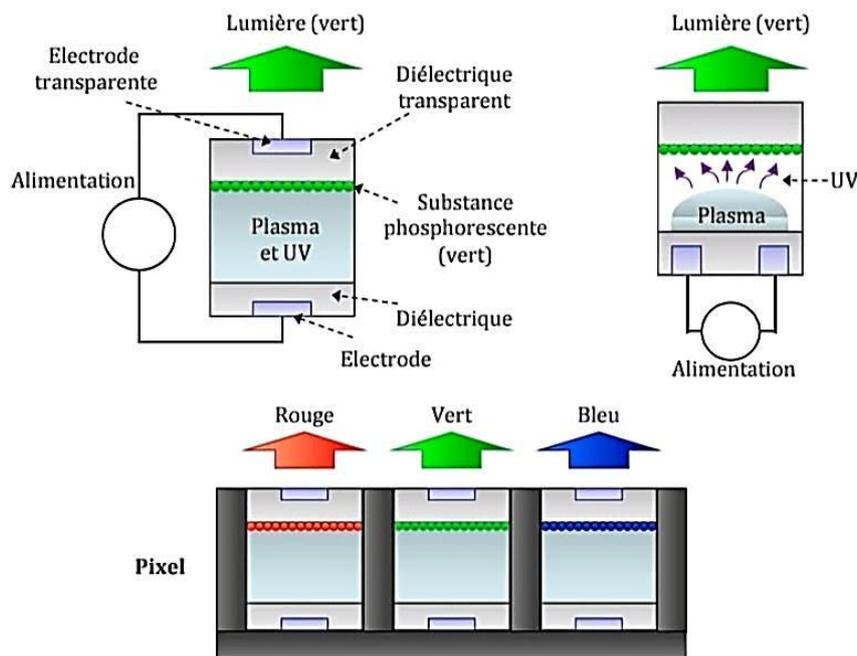


Figure I- 11 : Cellules de pixels électrodes opposées (a) ; coplanaires (b) et (c) Cellule élémentaire ou pixel[6, 7].

Dans ces afficheurs plasmas, toutes les électrodes sont couvertes par des couches de diélectriques et d'un revêtement d'une couche résistive de MgO (Oxyde de Magnésium). Ce matériau (MgO) protège les couches diélectriques du bombardement ionique et augmente le coefficient d'émission secondaire, de telle sorte que la tension de claquage diminue. Le schéma de la figure I-12 présente une configuration complète d'un afficheur à écran plasma.

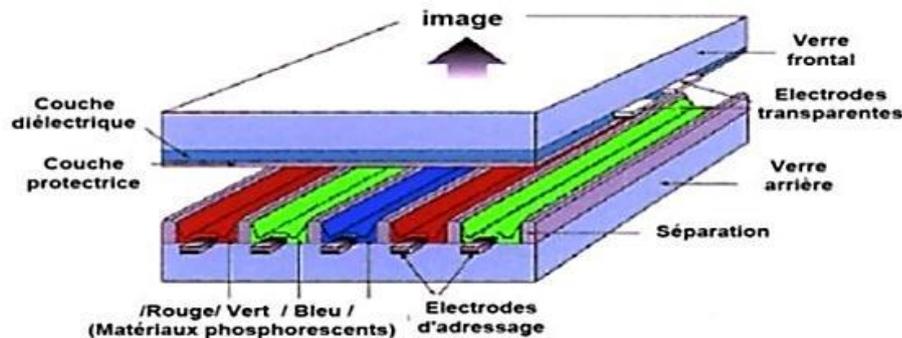


Figure I- 12 : Configuration complète d'un afficheur à écran plasma[6].

➤ Eclairage (Production de la lumière)

Aujourd'hui, les DBD possèdent des propriétés lumineuses qui sont exploitées dans divers domaines, notamment l'éclairage, où on cherche à obtenir des caractéristiques d'éclairages précises comme la longueur d'onde et l'intensité lumineuse. La majeure partie des lampes à décharge pour l'éclairage intérieur produit un rayonnement visible par le biais d'une conversion du rayonnement UV du mercure (tubes fluorescents, lampes fluo compactes). Ce métal lourd est considéré comme toxique et polluant et il est actuellement soumis à une réglementation stricte, la tendance étant de l'éliminer de tout produit ou de tout procédé industriel dans lequel on peut trouver un produit de remplacement. De nombreuses études tendent aujourd'hui à substituer le mercure par du xénon dans les lampes pour l'éclairage intérieur. Osram a mis sur le marché une lampe plane, baptisée « Planon », basée sur une décharge à barrière diélectrique dans du xénon. La structure adoptée est de type coplanaire avec des électrodes dotées de pointes dans le même plan, régulièrement agencées.

I.6.2 Domaine Médical

Le domaine de la médecine par plasma est l'un des plus innovants qui combine la physique des plasmas, les sciences de la vie et la médecine clinique. Les plasmas froids non thermiques créés à la pression atmosphérique, comme les décharges DBD et grâce à leur fonctionnement à des températures proches de l'ambiante et leur capacité à produire des radicaux, des ions, des électrons, des UV et un champ électrique, ont permis ces dernières années le développement de nouvelles applications. Parmi les applications biologiques les plus étudiées, nous citons [7] :

- Inactivation et la destruction de bactéries.
- Régénération de la peau et d'autres applications dermatologiques.

- Coagulation du sang.
- Décontamination des agents chimiques et biologiques dans le domaine militaire.
- Désinfection et la guérison des plaies
- Hygiène dentaire.
- Traitements en cancérologie et de cellules/tissus vivants.

I.6.3 Domaine de l'aéronautique

Les dispositifs DBD sont également étudiés pour le contrôle d'écoulement d'air dont la principale application se situe dans l'aéronautique. La décharge s'effectue parallèlement à l'écoulement du fluide. Le vent électrique généré par la décharge permet de modifier les propriétés de l'écoulement afin de le faire passer du régime turbulent au régime laminaire. Ceci permettrait de réduire les pertes aérodynamiques au niveau des ailes des avions. Autres ces actionneurs plasma peuvent aussi être utilisés pour[6] :

- Contrôle du décollement de la couche limite sur une surface portante
- Amélioration de la vitesse et de la portance d'une aile
- Contrôle actif du bruit
- Contrôle de certains éléments aux vitesses supersoniques et hypersoniques.
- Contrôle de l'écoulement de jeu d'aube dans les rotors de turbines et de compresseurs.

I.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les notions essentielles permettant de comprendre les mécanismes de décharge se produisant dans le gaz d'un dispositif de décharge à barrière diélectrique, Nous avons, d'abord, introduit la définition de la décharge DBD et leur historique, puis nous avons expliqué leur principe de fonctionnement et les différents configurations, Nous avons rappelé les différents régimes de la DBD de la façon générale ainsi que leurs applications.

Suite à ce chapitre qui se voulait purement descriptif, nous intéressons dans le second chapitre aux systèmes d'équations qui régissent le fonctionnement des décharges à barrière diélectrique à travers la présentation des équations de continuité, de conservation de la charge et de Poissons qui est en générale utilisée pour déterminer le champ électrique dans la décharge.

Chapitre II :

Modèle Physique et Mathématique de la DBD

II.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le modèle mathématique utilisé pour décrire le comportement de la décharge électrique à la pression atmosphérique, dans l'hélium. Il s'agit d'un modèle fluide auto-cohérent capable de décrire le couplage entre le transport des particules chargées, le champ électrique et la cinétique des espèces neutres et excitées. Les modèles numériques représentent un outil de recherche dont l'intérêt et les avantages sont bien connus, ils sont complémentaires aux expériences, en permettant d'approfondir ou d'élargir l'étude, leur utilisation étant en principe beaucoup plus souple. De plus, lorsque l'expérience à mettre en place est lourde financièrement et /ou matériellement[8], une étude numérique peut lui être substituée. Ainsi, grâce aux modèles numériques, nous pouvons obtenir des données de bases mais également des résultats physiques qui pourront être exploités.

En effet, une description complète de ce type de réacteur doit reposer sur l'association de plusieurs modèles :

- Modèle électrique permettant une bonne description du couplage entre les phénomènes de transport des particules chargées (électrons, ions) et le champ électrique.
- Modèle thermique ou hydrodynamique décrivant l'évolution du gaz porteur à l'intérieur de l'enceinte.
- Modèle chimique décrivant l'interaction et l'évolution des concentrations des différentes espèces actives présentes dans le plasma.
- Modèle des réactions de surface permettant d'évaluer les vitesses de dépôt et de gravure sur l'échantillon.

Le modèle complet, représenté Figure (II-1), est encore trop complexe à mettre au point. C'est pourquoi, en fonction de l'objectif de la modélisation, on peut retirer un ou plusieurs modèles.

Le modèle électrique peut être considéré comme le noyau principal de la modélisation, et beaucoup d'auteurs se sont limités à ce seul modèle pour décrire leur décharge. Les autres modèles peuvent être vus comme des modules supplémentaires afin d'améliorer la modélisation.

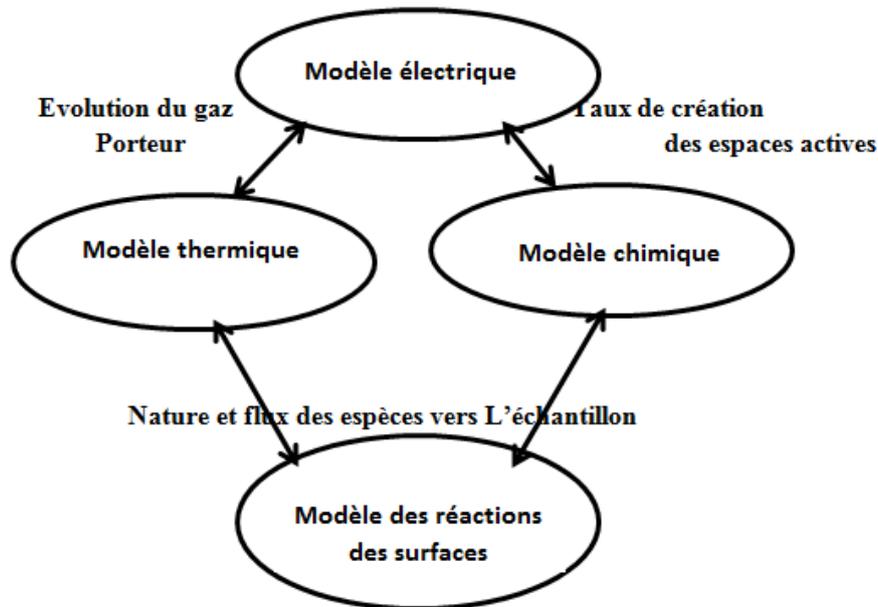


Figure II- 1 : Schéma d'un modèle complet de réacteur DBD[8].

II.2 Présentation du modèle numérique d'une décharge électrique

La modélisation des plasmas de décharge électrique est aujourd'hui considérée comme un outil complémentaire à l'analyse expérimentale. La majorité des modèles de décharge de gaz sont établis sur l'équation de Boltzmann dont la résolution numérique directe, sans lui porter des simplifications considérables, est relativement complexe. Selon l'ordre de complexité et d'exactitude, les plasmas peuvent être modélisés en considérant quatre types de modèles que nous décrivons dans la partie suivante[6].

II.2.1 Modèle cinétique

Pour modéliser l'évolution de particules dans une décharge plasma, le modèle cinétique est l'approche la plus précise mais la plus difficile à mettre en œuvre dans le cas des géométries complexes. On utilise la description cinétique, où les particules du plasma sont décrites par une fonction de distribution $f = f(t, x, v)$, avec v la variable de vitesse. La fonction de distribution contient une information supplémentaire par rapport aux grandeurs fluides, puisqu'elle inclut les détails de la répartition des vitesses des particules.

II.2.2 Modèle fluide

Le modèle que nous utilisons dans cette étude, est du type de modèles le plus employés dans le cas des plasmas froids. Il s'agit d'un modèle fluide auto-cohérent capable de décrire le couplage entre le transport des particules chargées, le champ électrique et la cinétique des espèces neutres et excitées. Cette approche, a pour but de décrire le comportement d'une DBD à la pression atmosphérique établit dans l'Hélium et est généralement basée sur la résolution des deux premiers moments de l'équation de Boltzmann et sur l'équation de Poisson. Elle

permet de calculer les densités d'espèces à l'intérieur du plasma mais également les flux de particules sur les électrodes. Par conséquent, cette approche semble la mieux adaptée à notre cas du point de vue qu'elle donne une vision détaillée du plasma ce qui aboutit à une meilleure compréhension des phénomènes physiques à l'intérieur de la décharge.

A. Approximation du champ locale (ACL)

Dans ce cas, les coefficients de transport (les mobilités μ_s , et les coefficients des diffusions D_s) et les fréquences moyennes de collision ne dépendent que de l'intensité du champ électrique réduit local (E/P) [6].

B. Approximation de l'énergie locale (AEL)

Dans l'Approximation de l'énergie locale (AEL), les coefficients de transport des électrons et les taux des réactions sont en fonction de l'énergie moyenne des électrons calculée par l'équation de continuité de l'énergie dans le modèle fluide. Suite à l'évolution dans le domaine de modélisation des plasmas, un accord général a fait que les modèles fluides comprennent l'équation de continuité, l'équation de transport d'énergie moyenne des électrons et l'équation de Poisson. Pour une résolution du problème à une dimension 1D ou deux dimension 2D. Souvent, les équations de transport dans les modèles fluides sont encore simplifiées en adoptant l'approximation de drift diffusion (ADD), qui décrit les flux de particules chargées comme la somme d'une dérive plus un terme de diffusion, en ignorant tous les autres termes. Cependant, les modèles fluides ne peuvent pas prendre en considération les fonctions de distribution des espèces (par exemple, la distribution d'énergie des ions), mais seulement des moyennes sur les distributions. Cet inconvénient est souvent compensé par des codes hybrides. Pour valider les modèles fluides, les résultats de simulations obtenus doivent être confrontés avec les données expérimentales et les résultats de modèles particuliers correspondants[6]. L'avantage exceptionnel des modèles fluides, qui jusqu'à présent ne peuvent pas être remis en cause par des modèles statistiques en dimensions équivalentes, c'est leur convergence rapide.

II.2.3 Modèles Particulaire (microscopiques)

La méthode PIC-MCC (Particle-In-Cell Monte-Carlo Collision) est un outil très Performant et efficace pour l'étude des plasmas froids car il permet de décrire l'évolution dans le temps et dans l'espace, des particules chargées sous l'effet des champs et des collisions. Dans un cas purement électrostatique, la méthode consiste à suivre les trajectoires d'un nombre représentatif de particules chargées, des électrons et des ions, dans l'espace des

phases, et de décrire l'interaction collective de ces particules par la résolution de l'équation de Poisson.

La détermination des trajectoires des particules dans l'espace sous l'effet du champ électrique, tenant en compte tous les types de collision existants et pour un nombre de particules important devient relativement difficile, du fait que la méthode PIC-MC demande un traitement individuel de chaque particule[6, 9, 10].

II.2.4 Modèle hybride

Lorsqu'on associe un modèle de type fluide à un code Monte Carlo, cela nous donne un modèle hybride. Ces modèles désignent la technique MC pour modéliser les électrons de haute énergie (les électrons rapides) qui sont capables d'ioniser et d'exciter les particules lourdes et le modèle fluide pour gérer les électrons de faible énergie du plasma[11]. La méthode de type Monte Carlo peut aussi être utilisée pour obtenir les coefficients de transport des espèces du plasma qui sont ensuite employés dans un modèle fluide. Avec cette intégration entre les deux méthodes, les modèles hybrides peuvent décrire des effets qui ne sont pas pris en compte par les modèles fluides et même d'acquérir des résultats similaires à ceux des modèles PIC mais le temps de calcul peut être d'un ordre de grandeur inférieur, ce qui rend ces modèles très intéressants[6].

II.3 Modélisation numérique d'une décharge plasma

De nos jours, les applications industrielles de la décharge plasma à barrière diélectrique ont fait l'objet de plusieurs études expérimentales et théoriques [6, 12, 13]. La modélisation numérique de ce type de décharges permet de bien assimiler leur comportement d'où le contrôle et l'optimisation des réacteurs à plasma dans les différents secteurs. Elles ont pris des domaines d'importance, tels que, la production d'ozone, les lampes, les écrans à plasma, la stérilisation et le contrôle d'écoulement. L'analyse théorique implique généralement un couplage entre différents types de modèles pour étudier les différents phénomènes se produisant dans le plasma.

Dans cette étude nous intéressons au modèle fluide.

II.4 Modèle mathématique de la décharge électrique à la pression atmosphérique

Il est indispensable de développer des modèles numériques de simulation des mécanismes rencontrés lors d'une décharge. En effet, la modélisation joue un rôle assez important dans le développement de la théorie des plasmas.

L'étude des plasmas peut être abordée suivant deux angles distincts qui sont la description sous forme de fluide qui nous intéresse principalement et l'aspect cinétique. De façon générale, ces modèles permettent la détermination :

- Des paramètres électriques de la décharge, c'est-à-dire les variations spatio-temporelles du champ électrique, du courant et du potentiel
- Des profils des densités et des fonctions de distribution en énergie des espèces chargées, avec les variations spatio-temporelles correspondantes.
- Des taux (ou fréquences) des divers processus de collision tel l'ionisation, l'attachement, l'excitation ou la dissociation...etc [14].

II.5 Modèle électrique

La modélisation électrique d'un plasma hors équilibre thermodynamique dans une décharge luminescente basse pression (de L'ordre du Torr) nécessite de décrire le couplage entre les phénomènes de transport des particules chargées et le champ électrique. En fait, les différents coefficients de transport d'un modèle macroscopique dépendent du champ électrique qui lui dépend directement de la charge d'espace. Il faut donc pour une bonne description avoir auto cohérence entre ces différents phénomènes.

Au niveau microscopique, le transport des particules chargées est parfaitement bien décrit par l'équation de Boltzmann.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{w} \cdot \vec{\nabla}_r f + \vec{a}(r, t) \cdot \vec{\nabla}_w f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{collision}} \quad (\text{II-1})$$

L'équation (II-1) est une équation de continuité dans l'espace des phases position vitesse (r,w) pour les fonctions de distribution $f(r,w,t)$ des différentes particules présentes dans le plasma sous l'effet :

- Des forces extérieures

$$\vec{a}(r, t) = \frac{e\vec{E}}{m} \quad (\text{II-2})$$

- Des collisions électron-neutre ou ion-neutre.

Dans une décharge luminescente, la charge d'espace modifie le champ \vec{E} qui agit sur les fonctions de distributions (électronique et ionique). Pour déterminer à chaque instant le champ électrique, on couple aux équations de Boltzmann pour chaque espèce, l'équation de Poisson :

$$\vec{\nabla}_r \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \quad (\text{II-3})$$

n_i et n_e : Densités ionique et électronique.

Ainsi le modèle idéal pour décrire ce type de décharge serait formé d'une équation de Boltzmann (II-1) pour chaque espèce de particule présente dans le plasma couplé à l'équation de Poisson (II-3).

Ce qui donnerait le système d'équations Suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial f_e}{\partial t} + \vec{w}_e \cdot \vec{\nabla}_r f_e + \vec{a}(r, t) \cdot \vec{\nabla}_w f_e = \left(\frac{\partial f_e}{\partial t} \right)_{\text{collision}} \\ \frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{w}_i \cdot \vec{\nabla}_r f_i + \vec{a}(r, t) \cdot \vec{\nabla}_w f_i = \left(\frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{\text{collision}} \\ \vec{\nabla}_r \cdot \vec{E} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

La résolution d'un tel système est extrêmement difficile et n'est pas toujours nécessaire.

C'est pourquoi nous sommes amenés suivant les conditions et le niveau de précision requis, à faire des applications simplificatrices des phénomènes mis en jeu. Permettant ainsi de passer à une description macroscopique. Ces approximations conduisent généralement à distinguer deux grandes catégories de modèles physiques : modèles microscopiques et modèles macroscopiques (ou fluides). Nous venons par la suite que pour la modélisation électrique, le choix entre une approche microscopique et une approche macroscopique dépendra essentiellement de la gamme de pression ou l'on se situe.

II.6 Modèles non auto-cohérents

Les modèles non auto-cohérents, dans lesquels on estime indépendamment (modèle ou mesure expérimentales) les variations spatio-temporelles du champ électrique, sont bien entendu beaucoup moins rigoureux, mais sont plus simples et donc plus rapides.

II.7 Modèles auto-cohérents

Dans le cas de modèles dits « auto-cohérents », l'équation de Poisson, qui détermine le champ électrique, doit être couplée à l'équation de Boltzmann. En effet, les différentes fonctions de distribution des espèces chargées dépendent de la valeur du champ électrique qui dépend lui-même des densités et de l'énergie des espèces chargés. Dans la pratique, la résolution de l'équation de Boltzmann est extrêmement délicate et son couplage avec l'équation de Poisson ne fait que compliquer le problème. Pour cette raison, plusieurs types de modèles auto-cohérents, correspondant à différents niveaux d'approximation, ont été développés[10, 15].

II.8 Description de l'approche fluide

II.8.1 Equation de continuité

Cette équation est appelée aussi équation de conservation de la quantité de charge, elle représente le premier moment de l'équation de Boltzmann qui décrit le transport des particules (électrons, ions et neutres), leur flux sous l'influence du champ électrique et des collisions [16-18].

Elle s'écrit sous la forme:

$$\text{➤ Pour les électrons : } \frac{\partial n_e}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{T}_e = S_e \quad (\text{II-5})$$

$$\text{➤ Pour les ions : } \frac{\partial n_i}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{T}_i = S_i \quad (\text{II-6})$$

$$\text{➤ Pour les métastables : } \frac{\partial n_*}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{T}_* = S_* \quad (\text{II-7})$$

Les indices **e**, **i** et ***** désignent les électrons, les ions positifs et les atomes excités. **n** et **T** représentent la densité et le flux des particules (**e**, **i** et *****), respectivement. **S** désigne le terme source pour les particules (**e**, **i** et *****) du aux diverses réactions dans lesquelles les espèces sont créées ou perdues.

II.8.2 Equation de transfert de la quantité de mouvement

L'équation de la quantité de mouvement pour toutes les espèces est exprimée par l'approximation de dérive diffusion [18, 19]:

$$\alpha = e, i \begin{cases} \vec{T}_e = n_e \vec{V}_e = -n_e \mu_e \vec{E} - \vec{\nabla} (n_e D_e) \\ \vec{T}_i = n_i \vec{V}_i = n_i \mu_i \vec{E} - \vec{\nabla} (n_i D_i) \end{cases} \quad (\text{II-8})$$

Pour les métastables, on ne considère que le terme de diffusion

$$\vec{T}_* = -\vec{\nabla} (n_* D_*) \quad (\text{II-9})$$

Où **E** est le champ électrique, μ_k et D_k désignent la mobilité et le coefficient de diffusion des espèces chargées. Ces deux coefficients sont reliés par la relation d'Einstein :

$$\frac{D_k}{\mu_k} = \frac{K_B T_k}{q} = \frac{2}{3} \frac{\xi_k}{q} \quad (\text{II-10})$$

Avec ξ_k l'énergie moyenne, donné par la relation [19] :

$$\xi_e = \frac{2}{3} K_B T_e \quad (\text{II-11})$$

II.8.3 Equation de l'énergie

Elle représente le troisième moment de l'équation de Boltzmann. Dans cette simulation le bilan énergétique n'est résolu que pour les électrons :

$$\frac{\partial (n_e \varepsilon)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{T}_s) + \vec{E} \cdot \vec{T}_e = S_e \quad (\text{II-12})$$

$$\vec{T}_e = -n_e \mu_e \vec{E} - \vec{\nabla}(n_e D_e) \quad (\text{II-13})$$

$$n_e = n_e \varepsilon \quad (\text{II-14})$$

Avec n_e ; la densité d'énergie T_e ; le flux d'énergie moyenne, T_e la température électronique, S_e ; le terme source. μ_e et D_e représentent la mobilité et le coefficient de diffusion pour le flux d'énergie, respectivement.

II.8.4 Equation de Poisson

Le couplage de l'équation de Boltzmann avec l'équation de Poisson est nécessaire pour décrire la décharge car cette équation donne les variations du champ électrique en fonction de la charge d'espace. L'équation de Poisson s'écrit :

$$\Delta V = \frac{q}{\varepsilon_0} (n_e - n_i) \quad (\text{II-15})$$

Où

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (\text{II-16})$$

Le système d'équations aux dérivées partielles (II-4) et (II-15) est fortement couplé. Sa résolution nécessite des conditions aux limites adéquates.

II.9 Conditions aux limites

Lorsque la décharge est créée, il y a production de charges électriques (électrons et ions), dans l'espace inter électrodes avec création d'un champ électrique. Les électrons étant les particules les plus énergétiques et les plus rapides dans la décharge, les conditions sur leur évolution au niveau des limites de l'espace de la décharge sont représentées par :

- ✓ Le flux des électrons vers les électrodes et les parois du réacteur qui est représenté par l'expression :

$$-\vec{n} \cdot \vec{T}_e = \frac{1}{2} V_{e,th} n_e - \sum_p \gamma_p \cdot (\vec{T}_p \cdot \vec{n}) \quad (\text{II-17})$$

$$V_{e,th} = \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} \quad (\text{II-18})$$

Avec γ_p le coefficient d'émission secondaire des électrons par les électrodes, \vec{n} est le vecteur unité normal à la paroi, $V_{e,th}$ représente la vitesse thermique des électrons, k_B la constante de Boltzmann et m_e la masse de l'électron.

- ✓ Le flux d'énergie des électrons vers les électrodes et les parois du réacteur est donné par :

$$\vec{n} \cdot \vec{T}_e = \left(\frac{5}{6} V_{e,th} n_e \varepsilon\right) - \sum_p \varepsilon_p \gamma_p (\vec{T}_p \cdot \vec{n}) \quad (\text{II-19})$$

Où ϵ_p est l'énergie moyenne des électrons secondaires. Le second terme de l'équation (II-19) représente le flux d'énergie des électrons secondaires.

✓ Accumulation de charges en surface :

$$\vec{n} \cdot (\vec{E}_1 \epsilon_1 - \vec{E}_2 \epsilon_2) = \rho \tag{II-20}$$

Où E_1 et E_2 désignent le champ électrique à l'interface gaz / diélectrique et ϵ_1 et ϵ_2 sont la permittivité relative du gaz et du diélectrique, respectivement. ρ est la densité de charge.

✓ Enfin, le potentiel électrique appliqué à l'électrode est donné par :

$$V = V_0 \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \tag{II-21}$$

Où V_0 est la valeur maximale de la tension appliquée et f sa fréquence.

II.10 Conditions initiales

Nous considérons, pour l'instant $t=0$, les conditions initiales suivantes :

- Une densité initial d'électrons $n_{e,0}$ qui représente un petit nombre d'électrons germes, supposes être présents dans l'espace inter électrode, égale à : $n_{e,0}=10^6$ (1/m³).
- Un potentiel nul : $V=0$ (V)
- Une énergie électronique initiale $\bar{\epsilon}_0 = 5(eV)$

II.11 Processus de collision importants dans la décharge d'Hélium

La chimie de plasma simple pour l'hélium pur consistant seulement 3 réactions et 4 espèces :

Tableau II- 1 : Processus de collision importants dans la décharge d'Hélium.

Réactions	Formules	Type	$\Delta\epsilon(eV)$
1	$e + He \rightarrow e + He$	Elastique	0
2	$e + He \rightarrow e + He^*$	Excitation	19.5
3	$e + He \rightarrow e + He^+$	Ionisation	24.5

En plus des réactions volumétriques, les réactions superficielles suivantes sont mises en œuvre :

Tableau II- 2 : Bilan des réactions de la surface.

Réactions	Formules	Stiking coefficient
1	$\text{Hes} \rightarrow \text{He}$	1
2	$\text{He}^+ \rightarrow \text{He}$	0

Les données de la section efficace des collisions électron-hélium nécessaires pour réaliser la simulation sont obtenues à partir du code BOLSIG [20].

II.12 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de développer un modèle mathématique simple de la décharge contrôlée par barrières diélectriques à la pression atmosphérique, et les différentes équations déduites du modèle. Ce modèle est basé sur la résolution de l'équation de Boltzmann. La mise au point de ce modèle est très difficile à cause de la capacité des calculateurs. C'est la raison pour laquelle, nous avons présenté les deux premiers moments de l'équation de Boltzmann couplée de façon auto cohérente à l'équation de Poisson. Il s'agit de l'équation de continuité et de transfert de la quantité de mouvement.

Dans le prochain chapitre nous présentons la méthode numérique de résolution de ces équations, ainsi que les résultats obtenus.

Chapitre III:

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Les décharges à barrières diélectriques (DBD) sont des plasmas froids hors équilibre thermodynamique générés généralement à des pressions élevées, ils sont caractérisés par la présence, d'au moins, d'une couche diélectrique entre les deux électrodes métalliques. Le fonctionnement de ces décharges à la pression atmosphérique est particulièrement intéressant pour un certain nombre d'applications, y compris principalement la génération d'ozone provenant de l'air ou de l'oxygène, le traitement des matériaux, la stérilisation et les actionneurs à plasma pour le contrôle d'écoulement aérodynamique...etc.

Nous consacrons ce chapitre à la présentation des résultats des travaux effectués sur les décharges plasmas à barrière diélectrique (DBD). Nous exposons, dans une première partie les résultats de la simulation unidimensionnelle (1D) de décharges DBD dans le cas de l'hélium pur, crée à pression atmosphérique, pour une tension d'alimentation de forme sinusoïdale. La seconde partie du chapitre est consacré au résultat du comportement de la décharge en fonction des différents paramètres (L'influence de la tension appliquée, fréquence et la constante diélectrique ϵ_r).

III.2 COMSOL Multiphysics

Le logiciel COMSOL Multiphysics 4.3b, est un outil très employé dans des secteurs divers de recherche, car il facilite les étapes de modélisation et de simulation, soit : la définition de la géométrie, des propriétés physiques des matériaux présents et des conditions aux frontières, le maillage, la résolution et l'affichage des résultats. Par ailleurs, l'utilisation de logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques[21].

III.3 modèle de notre étude

Un schéma du réacteur DBD considéré dans ce travail est représenté sur la Figure III-1. Dans cette modélisation DBD, on suppose que la région de décharge est remplie du plasma d'Hélium distribué uniformément le long des plans parallèles à la surface de l'électrode, ce qui permet d'utiliser une approche 1-D pour la description de la formulation théorique.

La simulation numérique traite le réacteur DBD à plaques parallèles avec des doubles barrières diélectriques de 0,635 mm d'épaisseur et sont séparées par une région de plasma dont la distance d est de 1 mm. La permittivité relative du matériau de barrière diélectrique est $\epsilon_r=9.6$.

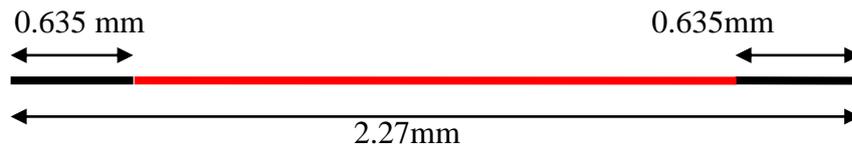


Figure III- 1 : Modèle 1D de la DBD.

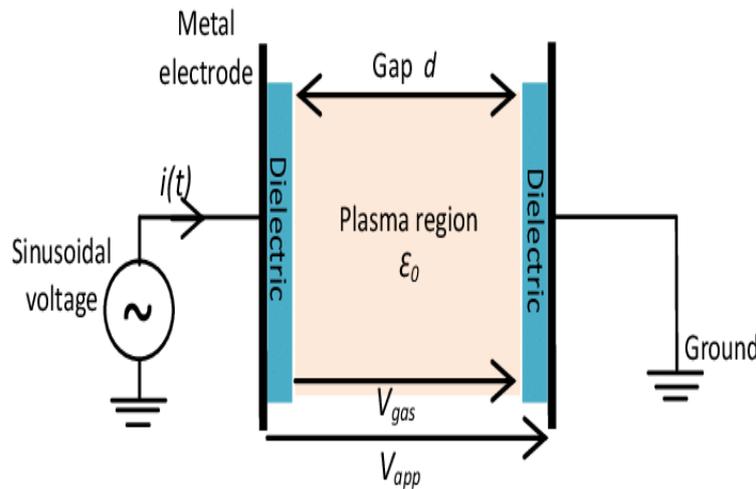


Figure III- 2 : Modèle 3D de la DBD.

III.4 Modèle physique et équations de base d'une décharge DBD

Comme nous l'avons développé dans le chapitre deux, les modèles élaborés dans le cadre de notre étude, sont de type fluide[22] , auto-cohérents et basés sur la résolution des trois premiers moments de l'équation de Boltzmann couplés à l'équation de Poisson. L'adaptation du modèle de simulation, élaboré sous COMSOL Multiphysics, à la structure étudiée se fait à travers l'introduction des conditions aux limites et les conditions initiales qui lui sont inhérentes, et nous avons déjà présentés dans le deuxième chapitre, Le modèle développé pour la décharge à barrière diélectrique est unidimensionnel. Il est résolu par la méthode des éléments finis qui permet de discrétiser le problème étudié en découpant les différents domaines en mailles élémentaires [23].

Le module de simulation approprié « Plasma » a été choisi selon les équations de base de la décharge plasma à barrière diélectrique présentées précédemment. Une fois la géométrie du modèle créée et les valeurs des constantes et variables prédéfinies, le choix des conditions aux limites est indispensable. La détermination du maillage, du temps de calcul et du pas du temps optimise la précision de la simulation. A travers ce logiciel, on peut visualiser à la fois la résolution et le taux de convergence utilisés pour notre système d'équations, ce qui nous permet de réduire le temps de calcul et la détection des erreurs du programme au fur et à

mesure de la résolution. Après avoir suivi toutes ces instructions, les résultats de simulation sont prêts pour l'analyse.

III.5 Paramètres de simulation

La simulation est effectuée avec une décharge à barrière diélectrique créé entre deux électrodes séparées par un diélectrique, en utilisant les données du tableau (III-1).

Tableau III- 1 : Paramètres de simulation.

Paramètres	Désignation
Gaz	Hélium
Distance diélectrique	1mm
Amplitude de tension appliquée	1000 V
Fréquence d'excitation	50000 Hz
Surface et formes des électrodes	Rectangulaires ($S=9\text{cm}^2$)
Permittivité relative du diélectrique	$\epsilon_r = 9.6$
Epaisseur du diélectrique	0.635mm
Pression du Gaz	P=1atm
Pas du temps	0.0001s

III.6 Résultats de simulation et discussion

Les caractéristiques spatio-temporelles de la DBD d'hélium ont été étudiées numériquement à pression atmosphérique, avec une température de gaz de 300 K, un coefficient d'émission d'électrons secondaires de 0,01. L'amplitude et la fréquence de la tension appliquée sont fixées, dans un premier temps, à 1kV et 50 kHz, respectivement. Un espace plasma de 1 mm est choisi.

La figure III-3 présente les résultats de simulation des DBD en termes d'évolution temporelle des caractéristiques électriques: tension dans le gaz $V_g(t)$, tension mémoire $V_m(t)$ qui représente la différence ($V_a(t) - V_g(t)$), courant de décharge $I_d(t)$ durant deux périodes du signal appliqué.

D'après la figure III-3, nous remarquons que le profil du courant et de la tension de gaz présentent un seul pic par demi-période de la tension appliquée, ce qui signifie que la décharge se produit deux fois dans chaque période. Nous remarquons aussi que le courant est reproductible d'une décharge à l'autre.

Ainsi, d'après l'allure des courants de décharge de la figure III-3, nous pouvons conclure que pour les conditions de décharge considérées à pression atmosphérique, le plasma créé dans le gaz hélium est en régime homogène. En effet, ce régime est caractérisé par un seul pic de courant par demi-alternance.

Plusieurs travaux numériques et expérimentaux sur les décharges homogènes à barrières diélectriques, dans l'hélium ou dans d'autres gaz avec différentes conditions de travail ont observé le même régime [24, 25].

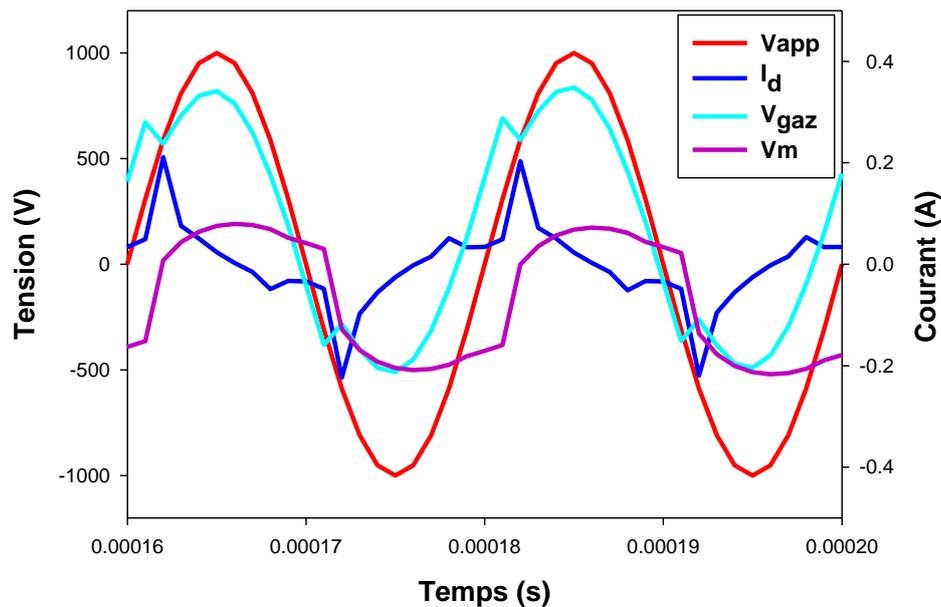


Figure III- 3 : Évolution temporelle du courant de décharge, de la tension de gaz et la tension mémoire pendant deux cycles de tension appliquée dans hélium $V_{app} = 1kV$, $f = 50kHz$ et un espace plasma de $1mm$.

Il est clairement observé, dans la figure (III-3) qu'au début de chaque alternance de la tension appliquée, la tension du gaz $v_g(t)$ et la tension mémoire $v_m(t)$ ne sont pas nulles et elles évoluent avec un certain déphasage. La tension $v_m(t)$ est due à la charge accumulée sur le diélectrique du fait de la décharge précédente. En outre, nous remarquons aussi que l'évolution de la tension de gaz suit la variation du courant de décharge. Les caractéristiques

de la tension de gaz présentent une chute rapide au même instant où le pic de courant apparaît et augmente de nouveau après l'impulsion de courant.

Ce mécanisme va se succéder pour tous les cycles qui suivent et cela signifie l'effet mémoire qui caractérise la décharge DBD. Cet effet assure la stabilité de la décharge et le plasma reste homogène pour toute la durée de la décharge.

Les figures III-4, III-5, III-6 et III-7 illustrent l'évolution spatiale de la densité électronique, ionique, métastable et du champ électrique dans l'hélium, à différents instants de la première alternance présentée sur la figure III-3.

Dans ce cas, la cathode étant à droite, les figures III-4, III-5, III-6 mettent en évidence la formation d'une zone à champ constant au niveau de l'anode. Cette zone s'étend progressivement vers la cathode à cause du déplacement des ions dans ce même sens. Le champ varie uniformément et initialement la densité électronique est inférieure à 10^{14} cm^{-3} . Ensuite l'augmentation de la tension appliquée induit une augmentation du champ électrique. La densité ionique (figure III-6) croît légèrement du côté de l'anode et de façon beaucoup plus marquée à 0.8 mm de la cathode.

La mobilité des ions étant beaucoup plus faible que celle des électrons, nous pouvons considérer que l'ionisation a lieu à l'endroit où la densité ionique augmente : l'ionisation initiale se fait donc au centre de la décharge et non pas dans la zone des électrodes. En outre, le déplacement rapide des électrons induit une charge d'espace positive et provoque une augmentation du champ électrique et donc la construction, près de la cathode d'une zone à champ fort de $1.4 \cdot 10^6 \text{ V/m}$.

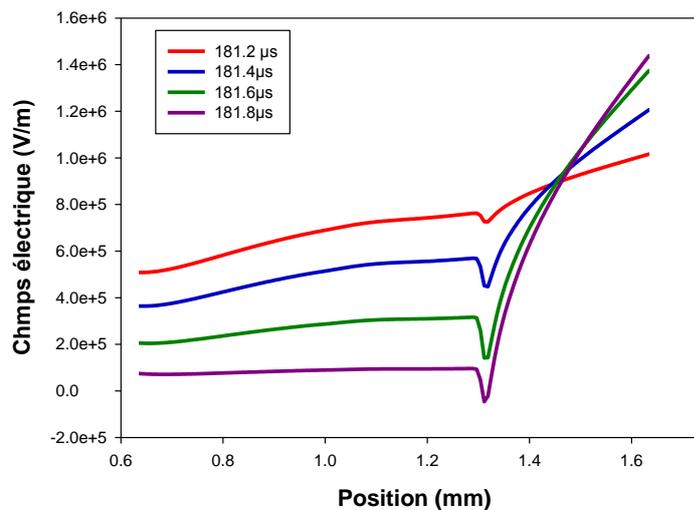


Figure III- 4 : Variations spatiales du champ électrique, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1\text{kV}$, $f=50\text{kHz}$ et un espace de 1mm d'épaisseur, à différents instants.

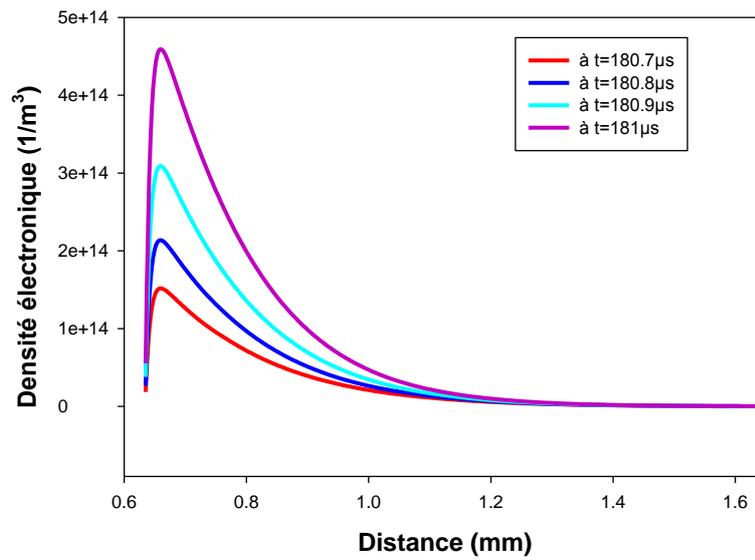


Figure III- 5 : Variations spatiales de la densité électronique, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1kV, f=50kHz$ et un espace de $1mm$ d'épaisseur, à différents instants.

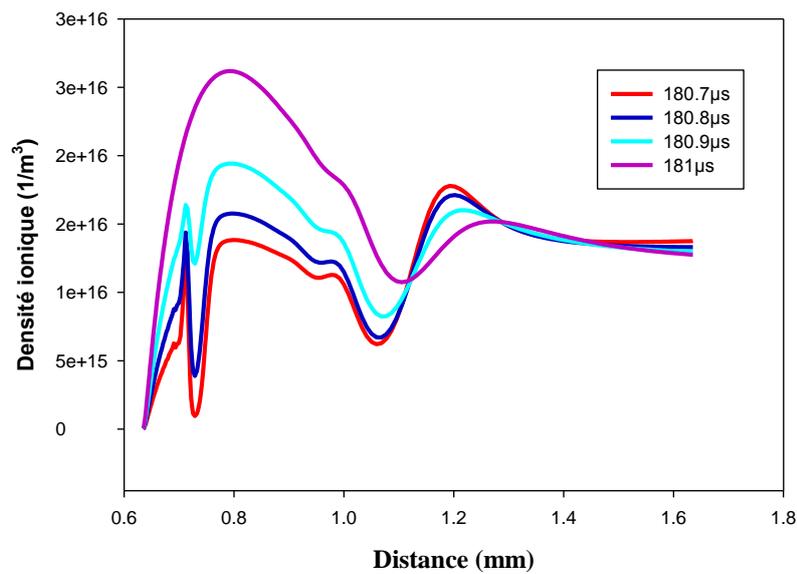


Figure III- 6 : Variations spatiales de la densité ionique, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1kV, f=50kHz$ et un espace de $1mm$ d'épaisseur, à différents instants.

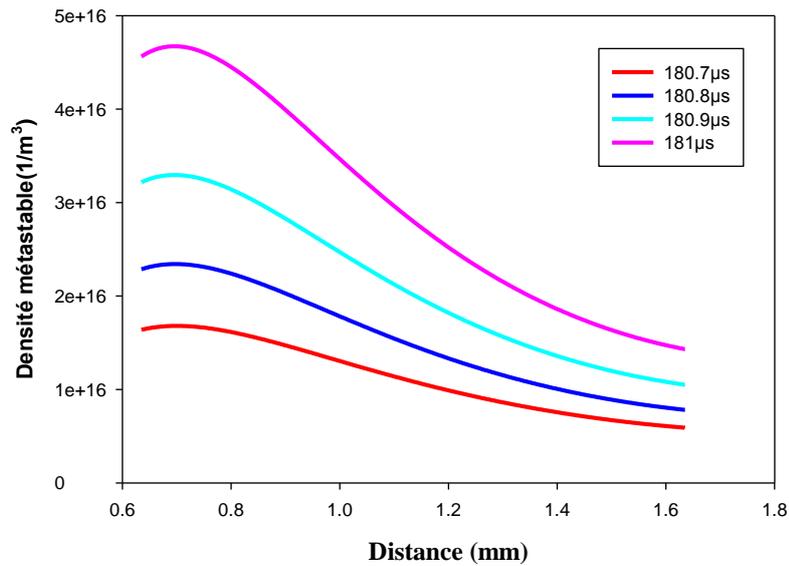


Figure III- 7 : Variations spatiales de la densité métastable, pour une DBD d'hélium, pour $V_a=1kV, f=50kHz$ et un espace de 1mm d'épaisseur, à différents instants.

Dans ce travail le modèle élaboré de telle sorte qu'on puisse également calculer l'évolution de la quantité de charge électrique en fonction de la tension appliquée. Cette caractéristique est connue sous le nom de « courbe de Lissajous » ou « figure de Lissajous ». A travers cette caractéristique, on peut obtenir des informations importantes concernant les paramètres de la décharge DBD (telles que : la quantité de charge transférées par le plasma ainsi que le calcul de la densité d'énergie dissipée). En générale, les figures de Lissajous prennent la forme d'un parallélogramme.

La courbe de Lissajous simulée pour une décharge DBD homogène dans l'hélium est illustrée sur la figure III-8. Cette courbe présente des étapes claires correspondant à la caractéristique du courant durant une période (alternances positive et négative). Les étapes (a-b) et (c-d) montrent l'existence d'un pic de courant qui se développe jusqu'à l'arrivée à la valeur maximale de la tension. Ceci correspond à la création du plasma (plasma on). Tandis que dans les étapes (b-c) et (a-d), la valeur de la tension diminue et le plasma s'éteint, il n'y a pas de décharge dans cette partie jusqu'à l'arrivée de l'alternance suivante.

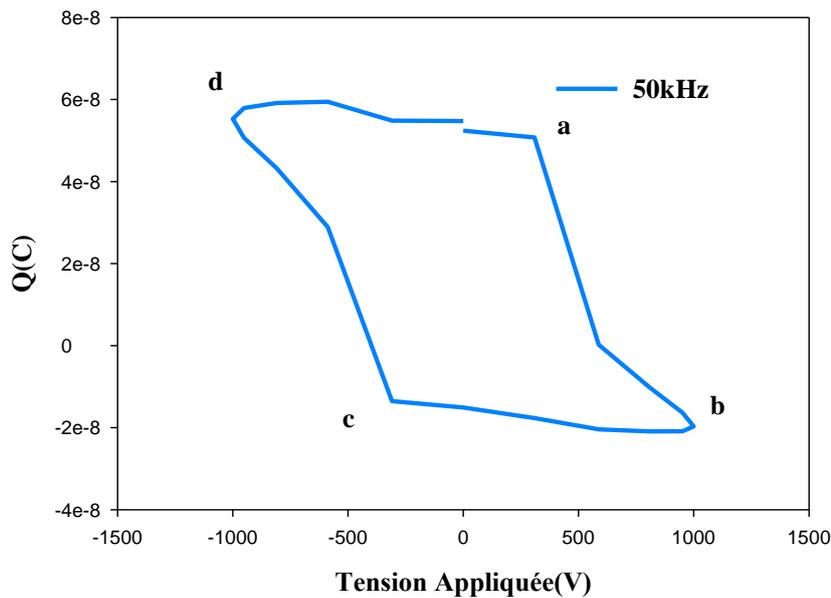


Figure III- 8 : Courbe de Lissajous pour une tension appliquée de 1kV, une fréquence de 50 kHz et une épaisseur de l'espace plasma 1 mm pour DBD d'hélium.

III.7 Influence des Paramètres du réacteur DBD

Le but de cette partie est l'étude de l'influence des différents paramètres du réacteur DBD, tel que l'amplitude de la tension appliquée, la distance inter-électrodes, l'épaisseur et la nature de la couche diélectrique ainsi que la fréquence de la tension externe sur le régime et les caractéristiques électriques de la décharge.

III.7.1 Effet de l'amplitude de la tension appliquée

Dans cette section, Nous effectuons les calculs pour les mêmes conditions du Tableau III-1 en faisant varier la valeur de l'amplitude de la tension appliquée entre 1,2 et 3 kV.

La figure III-9 montre la variation temporelle du courant de décharge et la tension pour différentes valeurs de tension appliquée, à pression atmosphérique. Le courant obtenu est caractérisé par des durées et des amplitudes différentes de l'impulsion de courant de décharge par demi-cycle pour différentes valeurs de tension appliquée. Généralement, le courant de décharge est appelé micro-décharges. Lorsque l'amplitude augmente, le nombre de pics augmente et la distance entre les micro-décharges diminue. Ce résultat montre que lorsque la valeur de la tension appliquée augmente la décharge tend vers le mode filamentaire.

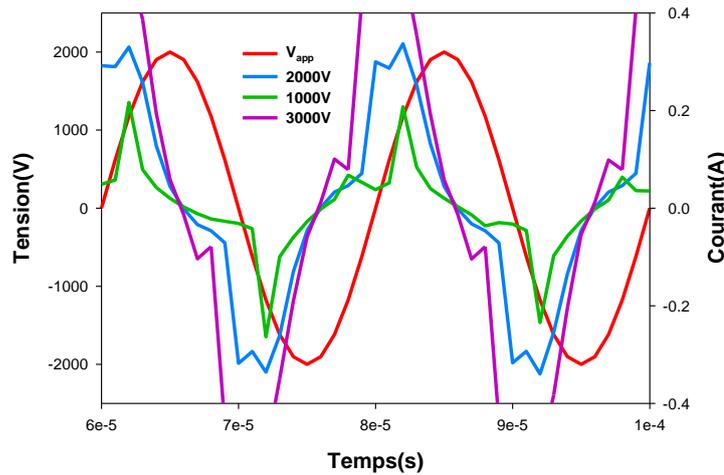


Figure III- 9 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour l’amplitude de tension appliquée 1k, 2k, et 3kV, $f = 50 \text{ kHz}$ et un espace plasma de 1mm.

III.7.2 Effet de la fréquence

De la même manière que pour la tension, Nous étudions l’influence de la fréquence sur le comportement dynamique des caractéristiques électriques de la décharge. Les caractéristiques électriques $I_d(t)$ et $V_{app}(t)$ sont calculées pour des valeurs de fréquences variant de 10 à 100 kHz, l’amplitude de la tension appliquée maintenue constante de 1kV et une épaisseur fixe de 1 mm de l’espace plasma.

Les résultats obtenus de la simulation sont présentés sur la figure III-10.

A partir de cette figure, nous pouvons observer la présence d’un pic de courant par demi – période de la tension appliquée. L’amplitude des pics de courant augmente lorsque la fréquence appliquée évolue de 10 à 50 kHz puis diminue avec la fréquence de 100 kHz.

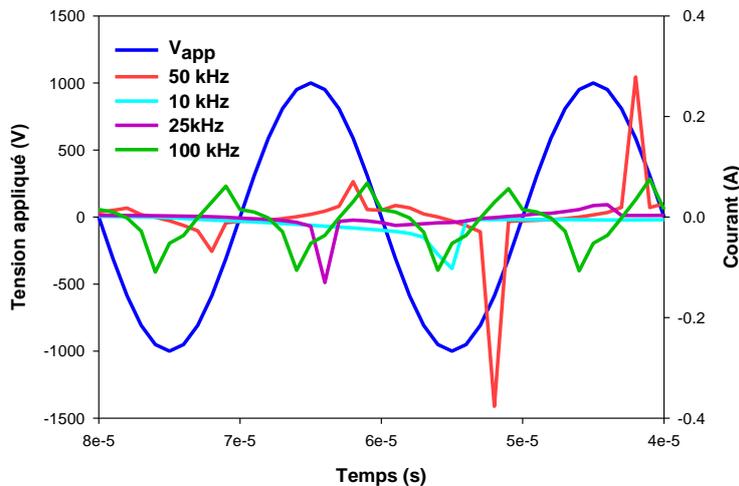


Figure III- 10 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour des valeurs de fréquence variant de 50k à 100 kHz et un espace plasma de 1mm.

III.7.3 Effet de la distance inter-diélectrique

L'effet de l'épaisseur de l'espace plasma sur les caractéristiques électriques de la décharge DBD pour des plasmas d'hélium est représenté, pour une distance variable de 0.635, 0.5, 0.75 et 1mm, sur la figure III-11, en termes de variation du courant de décharge I_d et la tension V_{app} , durant deux cycles de la tension appliquée.

D'après ces résultats nous constatons que, lorsque la distance d augmente, l'intensité des pics de courant augmente. De plus, cette variation de la distance entraîne une faible augmentation dans la largeur du pic de courant. Il est remarquable que le signal du courant reste reproductible d'une période à l'autre, confirmant la présence de décharges lumineuses successives. Ainsi, pour les épaisseurs de gaz considérées et avec les conditions de décharges utilisées, le régime de décharge est toujours homogène.

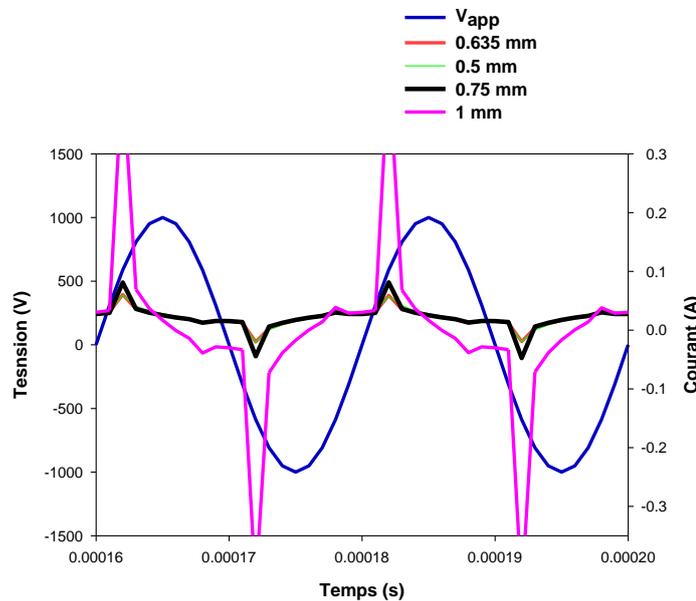


Figure III- 11 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour des valeurs de l'espace plasma variant de 0.635 à 1mm.

III.7.4 L'influence de la constante diélectrique ϵ_r

Le but de cette simulation est d'étudier l'influence de la nature du matériau diélectrique utilisé (à travers la valeur de sa permittivité) sur les caractéristiques électriques de la décharge DBD d'hélium.

Dans cette section, nous considérons un espace plasma fixe de 1mm d'épaisseur, une tension de 1 kV et une fréquence d'excitation 50 kHz. Nous prenons en considération les différents diélectriques généralement utilisés dans les dispositifs à DBD tel que le plexiglas (2.8), quartz (4.2), PVC(5), verre(7) et l'alumine (9.6) [26].

Nous pouvons remarquer, d'après les courbes obtenues dans la figure III-12, que l'intensité de pic du courant de décharge dans le verre est plus grande que les autres diélectriques (Alumine, Quartz et PVC).

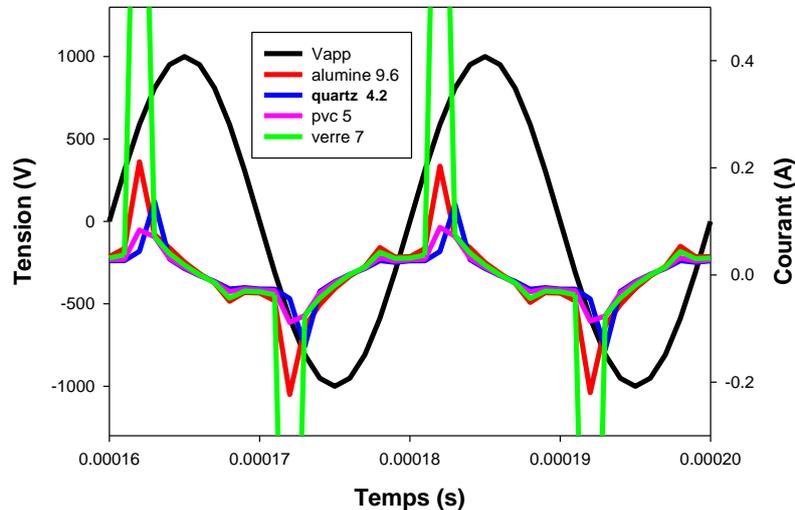


Figure III- 12 : Caractéristiques du courant de décharge et de tension pour la permittivité relative de diélectrique $\epsilon_r=5$, $\epsilon_r=7$, $\epsilon_r=4.2$ et $\epsilon_r=9.6$.

III.8 Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les résultats numériques des décharges à barrière diélectrique à pression atmosphérique.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les résultats issus de la modélisation pour des plasmas d'hélium. Le modèle théorique a été résolu par la méthode des éléments finis par l'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics. Ce modèle est élaboré pour illustrer l'évolution des différentes caractéristiques électriques et physiques de DBD en mode homogène par l'influence des différents paramètres liés à la production de la décharge. Les résultats de la simulation ont révélé que la caractéristique simulée de plasma DBD d'hélium est en accord avec les plasmas expérimentaux rapportés dans la littérature. La forme d'onde du courant est typique d'une DBD homogène qui est caractérisée par la présence d'un seul pic de courant de décharge pour chaque demi-période de la tension appliquée.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous avons étudié l'influence des paramètres du réacteur DBD sur les caractéristiques électriques de la décharge. Nous avons constaté que l'augmentation de l'espace plasma, entraîne une augmentation de l'intensité des pics de courant. Au contraire, cet effet est observé avec des valeurs de fréquences décroissantes de 100 à 50 KHz. Ainsi que la nature du diélectrique entraîne une variation de l'intensité du courant de décharge.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans ce manuscrit nous avons présenté une étude qualitative sur les décharges à barrières diélectriques (DBD) à pression atmosphérique qui sont, de nos jours, très fréquemment présentes dans des nombreuses applications industrielles. C'est un domaine de recherche très actif que ce soit du point de vue technique d'élaboration et utilisation ou du point de vue modélisation et simulation.

Dans notre travail nous nous sommes intéressées à l'étude des décharges plasmas à barrière diélectrique (DBD) en considérant l'aspect numérique. L'étude bibliographique que nous avons présentée nous a permis d'identifier les différents paramètres qui contrôlent la décharge homogène dans les DBD à pression atmosphérique ; ces derniers sont : la dimension de l'espace plasma entre les deux électrodes ; la fréquence d'excitation, l'amplitude de la tension appliquée ainsi que la composition du gaz et la nature du diélectrique.

L'objectif de ce mémoire consacré à l'élaboration d'un modèle unidimensionnel (1D) d'une décharge DBD à pression atmosphérique par l'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysics pour la description des différentes caractéristiques des plasmas qu'elles que soient physiques ou électriques.

Les résultats de la simulation numérique obtenus se résument dans ce qui suit :

Dans la première partie, pour la simulation électrique des décharges à barrière diélectrique DBD à pression atmosphérique :

Les caractéristiques simulées des DBD sont en accord avec les plasmas DBD expérimentaux rapportés dans la littérature. Les formes d'onde du courant sont typiques d'une DBD homogène qui est caractérisée par la présence d'un seul pic de courant de décharge pour chaque demi-période de la tension appliquée.

Dans la deuxième partie, d'après les résultats des distributions spatiales du champ électrique et des densités de particules (chargées et excitées) que la décharge est obtenue par générations successives d'avalanches qui se développent et conduisent l'augmentation du champ à la cathode. Cette augmentation induite par le déplacement rapide des électrons vers l'anode, le nombre d'électrons restant dans le gaz sera suffisant pour initier une nouvelle décharge à l'alternance suivante. Ainsi que la présence des métastables dans l'espace inter électrode constituent indirectement une réserve de particules chargées d'une décharge à la suivante, c'est-à-dire ces particules sont capables de fournir à travers des réactions indépendamment du champ électrique des particules chargées, et cette réserve de charges favorise l'amorçage de la décharge suivante sous un champ électrique faible. Une densité résiduelle d'électrons dans

l'espace inter électrode au moment de l'amorçage de la décharge, l'une des conditions d'obtentions du régime luminescent.

Dans la dernière partie, nous avons étudié l'effet de la tension et la fréquence du signal appliqué à la DBD, la nature de diélectrique et l'espace gazeux sur les caractéristiques électriques de la DBD.

Le travail ainsi présenté dans ce manuscrit pourrait être enrichi par une simulation bidimensionnelle (2D) de la décharge à barrière diélectrique dans l'oxygène, l'argon et l'azote ou mixture de l'hélium et l'azote.

Références bibliographiques

- [1] M. A. Diop, "Alimentation sans transformateur pour dispositif de décharge à barrière diélectrique (DBD)," Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2017.
- [2] A.SARIDJ, "Modélisation numérique du régime luminescent d'une décharge électrique à la pression atmosphérique," Thèse de Doctorat, USTO-MB, 2021.
- [3] A. CHEBBAH, "Contribution à l'étude de la production de l'ozone par décharge à barrière diélectrique à électrodes planes. Application au traitement des eaux polluées," 2018.
- [4] R. Maurau, "Etude de l'influence du régime d'une décharge à barrière diélectrique dans un mélange HMDSO/N₂, sur les propriétés d'un procédé de dépôt," Chimie ParisTech, 2009.
- [5] T. Beaudette, "Caractérisation et Optimisation de lampes planes sans mercure: décharges à barrières diélectriques et luminophores," Toulouse 3, 2009.
- [6] R. Abidat, "Contribution à l'étude des décharges plasmas à barrière diélectrique," Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri Constantine 1, 2018.
- [7] M.BEDOUI, "Modélisation Numérique d'une Décharge Luminescente contrôlée par une Barrière Diélectrique," Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF USTO-MB, 2022.
- [8] B. DEGDEG, "Modélisation de la Pollution des Eaux Souterraines, Cas de la Plaine Alluviale de Bir Kasd Ali. Wilaya de Bordj Bouariridj," Université M'sila, 2020.
- [9] S. M. Lee, Y. J. Hong, Y. S. Seo, F. Iza, G. C. Kim, and J. K. Lee, "Simulations of biomedical atmospheric-pressure discharges," *Computer Physics Communications*, vol. 180, pp. 636-641, 2009.
- [10] A. Bogaerts and R. Gijbels, "Numerical modelling of gas discharge plasmas for various applications," *Vacuum*, vol. 69, pp. 37-52, 2002.
- [11] P. Hartmann, H. Matsuo, Y. Ohtsuka, M. Fukao, M. Kando, and Z. Donkó, "Heavy-particle hybrid simulation of a high-voltage glow discharge in helium," *Japanese journal of applied physics*, vol. 42, p. 3633, 2003.
- [12] H. Loukil, A. Belasri, K. Khodja, and Z. Harrache, "Theoretical kinetics investigation of xenon dielectric barrier discharge for excimer lamp," *IEEE transactions on plasma science*, vol. 42, pp. 712-720, 2014.
- [13] Z. Fang, J. Lin, X. Xie, Y. Qiu, and E. Kuffel, "Experimental study on the transition of the discharge modes in air dielectric barrier discharge," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 42, p. 085203, 2009.
- [14] R. ARARIA, "Modélisation d'une décharge luminescente à pression atmosphérique," usto, 2013.
- [15] X. Yuan and L. L. Raja, "Computational study of capacitively coupled high-pressure glow discharges in helium," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 31, pp. 495-503, 2003.
- [16] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*: John Wiley & Sons, 2005.
- [17] A. Salabas, G. Gousset, and L. Alves, "Two-dimensional fluid modelling of charged particle transport in radio-frequency capacitively coupled discharges," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 11, p. 448, 2002.
- [18] G. Hagelaar and L. C. Pitchford, "Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 14, p. 722, 2005.
- [19] G. J. M. Hagelaar, *Modeling of microdischarges for display technology* vol. 109: Technische Universiteit Eindhoven Eindhoven, 2000.

- [20] G. Hagelaar, "BOLSIG+ Electron Boltzmann equation solver," ed: Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (LAPLACE), 2010.
- [21] v. L. ComsolMultiphysicsUser's guide, Burlington, ma : Comsol, Inc., Juin 2013.
- [22] Y. Kabouzi, D. Graves, E. Castaños-Martínez, and M. Moisan, "Modeling of atmospheric-pressure plasma columns sustained by surface waves," *Physical Review E*, vol. 75, p. 016402, 2007.
- [23] R. Abidat, F. Bouanaka, and S. Rebiai, "Computational Study of Surface Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator for Flow Control Using Comsol Multiphysics," in *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, 2018, pp. 1-5.
- [24] Z. Fang, S. Ji, J. Pan, T. Shao, and C. Zhang, "Electrical model and experimental analysis of the atmospheric-pressure homogeneous dielectric barrier discharge in He," *IEEE transactions on plasma science*, vol. 40, pp. 883-891, 2012.
- [25] Y. B. Golubovskii, V. Maiorov, J. Behnke, and J. Behnke, "Modelling of the homogeneous barrier discharge in helium at atmospheric pressure," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 36, p. 39, 2002.
- [26] Y.-N. Jaffré, "Optimisation de réacteurs à plasmas non-thermiques pour le traitement des oxydes d'azote," Ecole Centrale de Lyon, 2010.

ملخص

إن تصريفات الحاجز العازل هي مصادر للبلازما الباردة وتعمل تحت الضغط الجوي ، وهي بشكل عام تصريفات من النوع الخيطي ، ولكن في ظل ظروف معينة يمكن أن تكون متجانسة. يتكون العمل المقدم، من جهة، تطوير نموذج رقمي أحادي البعد لوصف الخصائص الفيزيائية (كثافة الشحنة ودرجة حرارة الإلكترون والمجالات الكهربائية) والخصائص الكهربائية لتصريفات الحاجز العازل (DBD) عند الضغط الجوي. لهذا، قمنا أولاً بتطوير نموذجاً باستخدام البرنامج التجاري Multiphysics COMSOL. يتم تطوير الدراسة في حالة DBD التي تغذيها إشارة جيبية ، في حالة بلازما الهيليوم ، مع الأخذ في الاعتبار تأثير بعض عوامل الجهاز المستعمل.

الكلمات المفتاحية

تصريفات الحاجز العازل (DBD) ، البلازما الباردة ، الضغط الجوي ، الخصائص الكهربائية ، نموذج السوائل ، COMSOL

Résumé

Les Décharges à Barrière Diélectrique sont des sources de plasma froid et fonctionnant à pression atmosphérique, sont des décharges généralement de type filamentaires, mais sous certains conditions elles peuvent être homogènes. Le travail présenté consiste à élaborer un modèle fluide numérique unidimensionnel pour décrire les propriétés physiques (densités de charge, température électronique, champs électriques) et les caractéristiques électriques des décharges à barrière diélectrique (DBD) à pression atmosphérique. Pour cela, nous avons tout d'abord élaboré un modèle en exploitant le logiciel commercial COMSOL Multiphysics. L'étude est développée dans le cas de DBD alimentées par un signal de forme sinusoïdale, dans le cas du plasma d'hélium, tout en considérant l'effet de certains paramètres du dispositif.

Mots clés :

Décharges à barrière diélectrique (DBD), plasma froid, pression atmosphérique, caractéristique électrique, modèle fluide, COMSOL.

Abstract

Dielectric barrier discharges are sources of cold plasma and operating at atmospheric pressure, are generally filamentary type discharges, but under particular conditions, they can be homogeneous. The work presented consists in developing a one-dimensional numerical fluid model to describe the physical properties (charge densities, electron temperature, and electric fields) and electrical characteristics of dielectric barrier discharges (DBD) at atmospheric pressure. For this, we first developed a model using the commercial software COMSOL Multiphysics. The study is being developed in the case of DBD fed by a sinusoidal signal, in the case of helium plasma, while considering the effect of some parameters of the device.

Keywords:

Dielectric barrier discharges (DBD), cold plasma, atmospheric pressure, electrical characteristic, fluid model, COMSOL.