

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie électrique et Informatique
Département d'Electrotechnique



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur d'état en Electrotechnique
Option : Réseau électrique

Thème

*Réalisation d'un réacteur de décharge
plasma pour la stérilisation de
Matériel médical*

Présenté par :

M^{elle} TOULEB LAMIA

M^{elle} ZEMOURIN NASSIMA

Dirigé par :

M'M.A. HANDALA

Promotion : 2010/2011

REMECIEMENTS

Nos sincères remerciements vont à Mr M.A.HANDALA pour le thème intéressant qu'il nous a proposé ; il a su encadrer et diriger ce travail avec beaucoup de compétences et de sympathie. Sous sa direction, nous avons pu apprécier sa rigueur, sa franchise et surtout la patience dont il a fait preuve. Toute notre reconnaissance pour ses précieux conseils.

Nous tenons à témoigner reconnaissance et gratitude au Dr HAOUCHINE, maitre-assistante au CHU de TIZI OUZOU pour sa précieuse contribution.

Nous remercions vivement Mr MOUDOUD pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet.

Nos remerciements vont aussi à l'équipe technique de la bibliothèque ETH, en particulier le service thèses.

Nous exprimons également nos remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici toute notre reconnaissance.

Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

J'aimerais exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à Dieu tout puissant pour les deux « F » qu'il m'a offert : la force et la foi.

A mes très chers parents, vous qui êtes là pour moi durant toutes ces longues années d'études, ce travail vous est dédié.

A ma très chère mère pour le précieux soutien qu'elle a su m'apporter pendant les moments difficiles. A mon papa chéri source de ma volonté, merci d'être là pour me pousser vers l'avant et garder confiance en moi.

Je dédie ce modeste travail aux plus merveilleux frères au monde, mes frères à moi HAKIM et KARIM.

A la pupille de mes yeux, ma seule et unique sœur THANINA.

A tous mes oncles et tantes ainsi que leurs enfants. A mes Grand - mères Fatima et fatma.

A la mémoire de mon grand père « SAID »

A toutes les personnes formidables que j'ai pu rencontrer durant mes études qui ont contribué à mon épanouissement.

Ce mémoire est dédié à toutes mes amies et particulièrement à ma meilleure amie, mon binôme M^{ELLE} TOUILEB Lamia, merci pour tous les moments de bonheur et de folie, merci pour ta sympathie.

NASSIMA

Dédicaces

Mes remerciements avant tout à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études. C'est à vous que ce travail est dédié. Merci pour votre soutien et pour tout ce que vous m'avez transmis.

A PAPA : pour avoir été fier de moi avant même que je ne prouve quoi que ce soit. Il m'a appris que je peux accomplir mes ambitions professionnelles bien que lui-même l'ai payé trop cher.

A MAMA : qui a su m'apprendre à surpasser mes efforts, elle a toujours répondu présente dans mes moments de doute.

A Mes chers frères : YOUCEF, KARIM, PETIT ANGE MOHAMED, vous êtes ma source inépuisable de bonheur et de motivation.

A la mémoire de mes grands-parents « MOHAMED » et « Si_RABAH » ; ma grand-mère « FATIMA », mon oncle « LOUNES » et mon cousin « RABAH ». Que Dieu les accueille en son vaste paradis INCHALAH.

A ma très chère grand-mère, que dieu la protège de tout mal.

A toute ma famille TOUILEB et HADDAD ; mes oncles et tantes, cousins et cousines et mes ami(es).

A ma meilleure amie, mon binôme NASSIMA pour tous les moments inoubliables passés ensemble, ainsi que toute sa famille.

LAMIA

SOMMAIRE

Introduction générale.....

Chapitre I : Généralités sur les décharges électriques dans les gaz

I.1.Introduction	
I.2. Généralités	
I.3. Les différents types de décharges électrique dans les gaz.....	
I.3.1. Décharges autonomes à faibles pression	
• Décharge de Townsend	
• Loi de paschen	
I.3.2. Décharges autonomes à pression élevée (Théorie des streamers).....	
• Limite de théorie de Townsend	
I.3.3. Décharge pointe négative-plan	
I.3.4. Les décharges partielles	
• Les décharges thermiques	
• Les décharges internes	
I.3.5. Les décharges couronnes	
I.3.6. Décharges luminescentes	
I.3.7. Les décharges superficielles	
I.3.7. Les décharges arborescentes	
I.3.8. Les décharge de foudre	
I.4.Conclusion	

Chapitre II : Décharges à barrière diélectriques

II.1. Introduction	
II.2. Généralités sur les plasmas	
II.2.1. Paramètres physiques des plasmas	
II.2.1.1. Densité électroniques	
II.2.1.2. Taux d'ionisations	
II.2.1.3. Température électronique	
II.2.1.4.Libre parcours moyen	
II.2.1.4. Libre parcours de Debye	
II.2.2. Les trois grandes catégories de plasma	
II.2.2.1. Les plasmas chauds (étoiles, plasma de fusion)	
II.2.2.2. Les plasmas thermiques (arc électrique)	
II.2.2.3. Les plasmas froids (décharges électriques dans les gaz)	
II.2.3. Mécanisme de formation d'un plasma	
II.3. Les décharge à barrière diélectrique.....	
II.3.1. Caractéristiques d'une D.B.D	
II.3.2. Les paramètres définissant la nature de la barrière	

SOMMAIRE

II.3.2.1. La résistance de l'isolement	
II.3.2.2. La résistivité transversale.....	
II.3.2.3. Constante diélectrique ou permittivité relative	
II.3.2.4. La résistivité superficielle	
II.3.2.5. Rigidité diélectrique	
II.3.2.6. Relaxation	
II.3.2.7. Les pertes diélectriques	
II.4. Différents types de configuration d'une D.B.D	
• Configuration d'une décharge à barrière diélectrique en géométrie pointe-plan	
II.5. Types de décharge à barrière diélectrique	
II.5.1. Décharge à barrière diélectrique volumique	
II.5.1.1. La décharge silencieuse	
II.5.1.2. Décharge à barrière diélectrique lumineuse homogène	
II.5.2. Décharge à barrière diélectrique surfacique	
II.6. Paramètres influençant la D.B.D.....	
II.6.1. Influence du diélectrique	
II.6.2. Influence de l'épaisseur de la barrière et de la permittivité	
II.6.3. Influence de la polarité de l'électrode pointe	
II.6.4. Influence de la position de la barrière dans l'intervalle d'air	
II.6.5. Influence de la pollution	
II.6.6. Influence de la largeur de la barrière	
II.7. Conclusion	
 Chapitre III : Application des décharges électriques	
III.1. Introduction.....	
III.2. Applications industrielles des décharges.....	
III.2.1. Production d'ozone.....	
• Générateurs d'ozone par décharge couronne.....	
• Générateurs à U.V.....	
• Générateurs avec décharge couronne à oxygène pur.....	
• Générateurs avec décharge à coefficient réduit.....	
III.2.2. Traitement de surface.....	
• Dépôt en surface d'une couche mince d'un matériau donné (métal, semi-conducteur, diélectrique, polymère).....	
• Gravure.....	
• Modification de la chimie de surface.....	
III.2.3. Ecrans plasma.....	
III.2.4. Eclairage.....	
III.3. Application des décharges dans la dépollution.....	
• Traitement des NOX.....	
III.4. Application des décharges dans la stérilisation	

SOMMAIRE

III.4.1. Techniques de stérilisation.....	
III.4.1.1. Radiations ionisantes.....	
III.4.1.2. Stérilisation par chaleur sèche dans un four Poupinel.....	
III.4.1.3. Stérilisation par chaleur humide.....	
III.4.1.4. Stérilisation par plasma.....	
III.4.2. Plasmas de décharge : mode d'action et espèces actives.....	
III.4.2.1. Les premiers pas de la stérilisation par plasma.....	
• Mode d'action d'un plasma de décharge et d'identification des particules actives.....	3
1. Composition du mélange gazeux.....	4
2. Rôle des U.V.....	4
3. Influence de la densité énergétique dans la zone.....	4
3. Rôle des atomes d'oxygène.....	4
4. Influence de type de micro-organismes.....	5
III.4.3. Intérêt des plasmas froids dans la stérilisation.....	5
III.5. Autres applications.....	6
III.5.1. Elimination de l'électricité statique.....	6
III.5.2. Contrôle actif d'un écoulement.....	6
III.6. Conclusion.....	7

Chapitre IV : Réalisation du dispositif de stérilisation

IV.1. Introduction.....	
IV.2. Le réacteur à plasma froid.....	8
IV.3. Choix des matériaux.....	0
IV.3.1 Choix des matériaux des électrodes.....	0
IV.3.1.1. Choix de matériaux de l'électrode de haute tension.....	1
IV.3.1.2. Choix du matériau de l'électrode mis à la terre.....	1
IV.4. Dimensionnement du réacteur.....	2
IV.5. Calcul du champ électrique.....	
• En géométrie pointe hyperbolique-plan.....	
• En géométrie coaxiale (fil-cylindre).....	
• Seuil d'apparition de l'effet couronne.....	
IV.5.1. Calcul du champ électrique pour une configuration fil-cylindre sans barrière.....	1
IV.5.2. Calcul du champ électrique pour une configuration fil-cylindre avec barrière.....	
• Interprétation des résultats.....	7
• La distance de contournement dc.....	7
IV.6. Création d'un plasma au labo.....	
IV.7. Déroulement des essais.....	
Conclusion générale.....	
Bibliographie	

Introduction générale

Les méthodes de stérilisation médicales demeurent inchangées depuis quarante ans. La stérilisation par chaleur humide est toujours considérée comme la technique de référence. Cette technique n'est cependant pas dénuée d'inconvénients car il s'agit d'un traitement très lent qui consomme non seulement beaucoup d'énergie mais qui produit également une quantité de déchets.

La stérilisation par plasma en post- décharge est une suite de différents mécanismes permettant d'éliminer les spores bactériennes grâce aux diverses espèces actives formées dans une décharge électrique « plasma ». Différentes conditions opératoires du plasma (la nature du gaz, sa pression, la température, la géométrie du réacteur et le diamètre du tube à décharge) doivent être prises en considération afin d'atteindre ces objectifs de destruction totale des microorganismes. Ce procédé utilise de basses températures afin de pouvoir stériliser les matériaux biomédicaux thermosensibles. Les méthodes utilisant les décharges de plasma froid ciblent les trois types de contaminants les microorganismes, les pathogènes et les toxines. Une décharge de plasma est un gaz contenant des particules fortement excitées et ionisées, obtenues lorsqu'un courant électrique allume le gaz. Les particules excitées dans le plasma réagissent avec les biomolécules et les détruisent.

Dans le présent travail, nous nous sommes fixé comme objectif la conception et la réalisation d'un dispositif à décharge électrique produisant un plasma froid à pression atmosphérique que nous utiliserons pour la décontamination/ stérilisation de matériel médical.

L'approche choisie est essentiellement expérimentale, c'est un travail qui rentre dans le projet de recherche CNEPRU dirigé par Mr M.A.HANDALA au sein de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Le travail que nous présentons dans cette thèse sera structuré en quatre chapitres. Dans le premier nous rappelons des notions de base sur les décharges électriques dans les gaz. L'objectif du second chapitre est de donner des généralités ainsi que les paramètres influant

sur les décharges à barrière diélectriques. Le troisième chapitre porte sur les différents domaines d'application des décharges électriques. Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation d'un dispositif expérimental et l'interprétation des résultats obtenus lors des essais. Nous clôturons notre travail par une conclusion générale ou nous citerons les avantages et les inconvénients de la méthode de stérilisation par plasma froid.

I.1.Introduction:

L'étude des décharges électriques présente de l'intérêt d'un point de vue industriel pour les problèmes liés à l'isolement et à la protection des réseaux de transport et de distribution d'énergie (ligne à haute tension, transformateurs, générateurs....) ainsi plusieurs ouvrages se sont intéressés à leur compréhension.

I.2.Généralités :

Une décharge électrique telle qu'on la voit n'est qu'un éclair de très courte durée (quelque millisecondes) s'accompagnant d'un claquement sec et violent ; mais en réalité c'est un phénomène plus compliqué et plus lent qu'il ne le paraît, il correspond au passage de l'isolant d'un état isolant vers un état conducteur. La durée d'une décharge électrique dépend essentiellement de la valeur de la distribution du champ électrique et son évolution dans le temps ainsi que d'autres facteurs qui sont liées à l'environnement.

Ø Le terme décharge électrique désigne plusieurs phénomènes :

Un élément ou composant électrique chargé (batterie d'accumulateurs, condensateur...) perd sa charge plus ou moins lentement, en transférant sa charge électrique à un consommateur d'électricité (lampe, moteur...).

Lorsqu'un humain est soumis à une électrisation, généralement accidentelle, on dit qu'il subit une décharge électrique.

Les nuages d'orages se déchargent violemment, entre eux ou avec la terre, sous forme de foudre.

Si on établit une tension suffisante entre deux électrodes placées dans un gaz, il se produit une décharge électrique (passage d'un courant électrique). Les manifestations de cette décharge varient avec la pression du gaz (Loi de Pasch en). L'étude de ce phénomène relève de la physique des plasmas. Au XIX^e siècle, les expériences sur les décharges électriques dans les gaz raréfiés ont conduit à la découverte de l'électron et des rayons X. Dans ce cas, on parle aussi fréquemment d'arc électrique.(1)

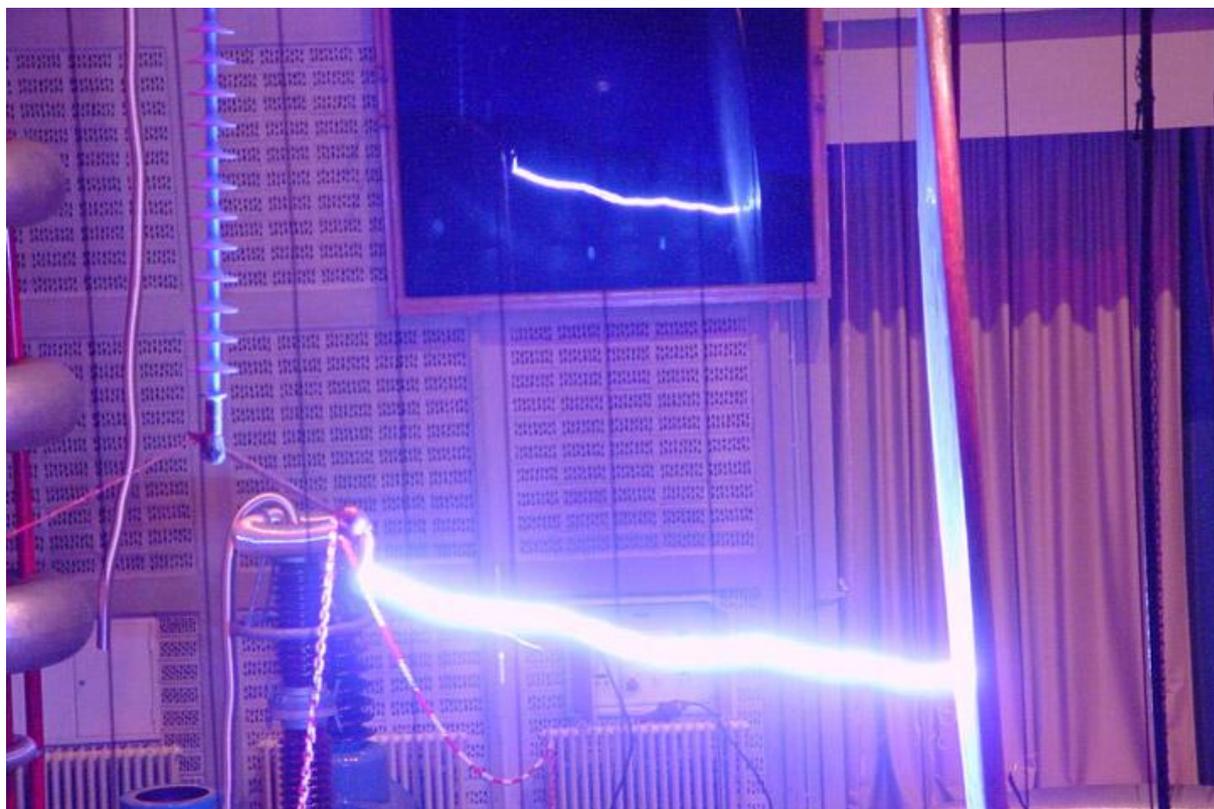


Figure I.1. : Phénomène de décharge électrique dans un laboratoire de haute tension

I.3. Les différentes décharges électriques dans les gaz:

Les gaz sont en général de bons isolants électriques. Ils constituent un des éléments de base de l'isolation des matériels électriques. Mais dans certaines conditions ils peuvent devenir conducteurs et être le siège d'une décharge électrique. Les caractéristiques de celle-ci dépendent de divers facteurs : pression, nature de la tension, forme des électrodes.

Dans ce chapitre, nous traitons des décharges à faibles pressions et des décharges à pression élevées (≥ 1 atmosphère), les plasmas froids pouvant être obtenus dans ces deux catégories de pressions.

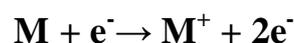
Une décharge électrique suppose toujours la présence des charges électrique et l'application d'un champ électrique. Ces charges libres sont produite soit dans un volume du gaz ou à la surface des électrodes à l'aide d'un agent ionisant extérieur : rayonnement de particules ou électromagnétique, chaleur, etc. Quant au champ électrique il peut être continu ou alternatif, uniforme ou non. Lorsque les charges libres sont soumises à l'effet d'un champ électrique suffisamment élevé ; elles se multiplient, augmentant ainsi le courant de la

décharge. Quand cette multiplication de charges se fait de manière autonome c'est-à-dire que l'intervention de l'agent ionisant extérieur devient inutile on dira alors que la décharge est autonome. Par contre une décharge est dite non autonome si elle est dépendante de l'agent ionisant extérieur. On note que quelque se soit la décharge ; autonome ou non autonome la pression est un facteur très important. Les décharges autonomes apparaissent lorsque la tension appliquée aux électrodes dépasse une valeur minimum. Au-delà de cette valeur, le gaz devient le siège d'un ou plusieurs phénomènes produisant les électrons nécessaires à l'entretien de la décharge sans intervention d'un agent ionisant extérieur.(2)

I.3.1. Décharges autonomes à faibles pression

- **Décharges de Townsend :**

L'énergie acquise par un électron placé entre deux électrodes dépend de son libre parcours moyen (la distance moyenne que peut parcourir un électron entre deux chocs successifs) ; et du champ électrique auquel il est soumis ($E=V/d$ dans le cas d'un champ uniforme, V étant la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes tandis que d représente la distance inter électrode). L'excitation du gaz nécessite un nombre suffisant d'électrons obtenus par le mécanisme de multiplication. Ce dernier se produit si l'énergie d'un électron est supérieure à l'énergie d'ionisation d'une molécule M , alors un choc inélastique est susceptible de libérer un électron, ce que traduit l'expression suivante :



L'efficacité d'ionisation est estimée à **10 %** pour un électron possédant une énergie trois fois supérieure au potentiel d'ionisation de l'espèce considérée (par exemple, les énergies d'ionisations de certains gaz couramment utilisés sont : **15,6 eV** pour N_2 , **12,2 eV** pour O_2 , ou **13,7 eV** pour CO_2).

Les deux électrons obtenus par ionisation sont alors accélérés par le champ électrique et peuvent à leur tour ioniser de nouvelles molécules. **Townsend** a proposé en **1914** d'introduire un coefficient d'ionisation α (appelé premier coefficient de **Townsend**) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation. Son inverse $1/\alpha$ représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de $e^{\alpha d}$ électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé "**avalanche électronique**". La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

Avec

I: courant (A)

I_0 : Courant initial dû aux électrons primaires (A)

d : distance inter électrode (m)

α : premier coefficient de Townsend ($1/m$)

Townsend a supposé l'existence d'électrons secondaires en dehors du mécanisme de multiplication ; ils peuvent être émis par la cathode sous l'impact des ions positifs.

D'où l'introduction d'un second coefficient de Townsend :

γ = Nombre d'électrons extraits de la cathode par un ion positif.

Le critère d'auto-entretien de la décharge (nombre adimensionnel) s'écrit alors:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1$$

Ø Phénomène d'attachement :

Dans certaines conditions un électron libre peut s'attacher à un atome neutre du gaz. Comme ce mécanisme est consommateur d'électrons, il est compétitif du mécanisme d'ionisation. Pour prendre en compte ce phénomène, il convient alors d'introduire dans la relation de **Townsend** une probabilité d'attachement électronique **η** :

$$I = I_0 e^{(\alpha - \eta)d}$$

• Loi de Paschen :

La **loi de Paschen**, énoncée par le physicien allemand Friedrich Paschen en 1889, indique que l'apparition d'un arc électrique dans un gaz, à un certain champ électrique de claquage (dit champ disruptif), est une fonction généralement non linéaire du produit de la pression p du gaz par la distance d entre les électrodes

Allure de Paschen



FIGURE I.2. Courbe de Paschen, en abscisse le produit pression distance, en ordonnée la tension

Ø Minimum de Paschen :

Cette relation montre que pour une certaine distance inter-électrodes existe une tension minimale permettant la décharge du courant électrique dans le gaz. Cette valeur est nommée le **minimum de Paschen**.

Aux conditions normales, à pression élevée, l'air est un très bon isolant disposant d'une tension de claquage élevée. Cela veut dire la diminution d'électrons libres et leurs libres parcours moyen devient faible ce qui entraîne l'insuffisance de la quantité d'énergie cinétique pour ioniser le gaz. Plus la pression de l'air diminue et plus la décharge électrique apparaît soudainement à des tensions faibles, la courbe de Paschen atteint une valeur minimale appelée minimum de Paschen (quelques torrs pour l'air, où la tension à appliquer est minimale à environ 330 volts, pour des distances très faibles de l'ordre du millimètre).

Un minimum crédible pour l'air est par exemple 350V au point d'abscisse 0.73 kPa.mm. Pour le SF₆ (gaz utilisé dans les installations électriques) le minimum est pour 500V à 0.35 kPa.mm environ.

Par contre, si la pression continue de descendre sous ce minimum de Paschen alors la tension évolue de façon inversement proportionnelle à la pression. Dans ce cas le libre parcours

moyen des électrons devient trop grand : il n'y a plus assez d'atomes sur leur chemin pour déclencher, par collisions avec ceux-ci, le phénomène d'avalanche électronique qui transforme le gaz en plasma.

I.3.2. Décharges autonomes à pression élevée (Théorie des streamers)

Ø Limite de théorie de Townsend

La théorie de Townsend ne peut expliquer complètement la décharge par étincelle ou arc. En effet, Raether, Meek et Loeb ont remis en cause cette théorie après avoir fait les observations suivantes :

- Ø Certains résultats expérimentaux montrent que la tension de claquage dans l'air à quelques atmosphères de pression ne varie pas beaucoup avec la nature de la cathode.

Le courant de décharge pour des surtensions importantes atteint des valeurs notables avant même que la première avalanche se soit écroulé.

- Ø La décharge n'est plus diffuse, comme celle de Townsend, mais concentrée en canal étroit avec des ramifications et des changements de direction (étincelle).

Ø Décharge par streamer

Une première avalanche de Townsend faiblement luminescente se forme. Sous l'effet de la photoionisation due aux rayonnements émis par cette avalanche, de nouvelles avalanches prennent naissance et donnent naissance à leur tour à d'autres avalanches dans le volume du gaz. Au cours de leur développement, les divers avalanches se rattrapent les autres et se confondent en donnant un canal bon conducteur du streamer. Ce canal à grande conductivité constitué décharges positives et de charges négatives formées dans le gaz court-circuitera les deux électrodes et conduira les charges en provenance de la source pour former l'arc électrique.

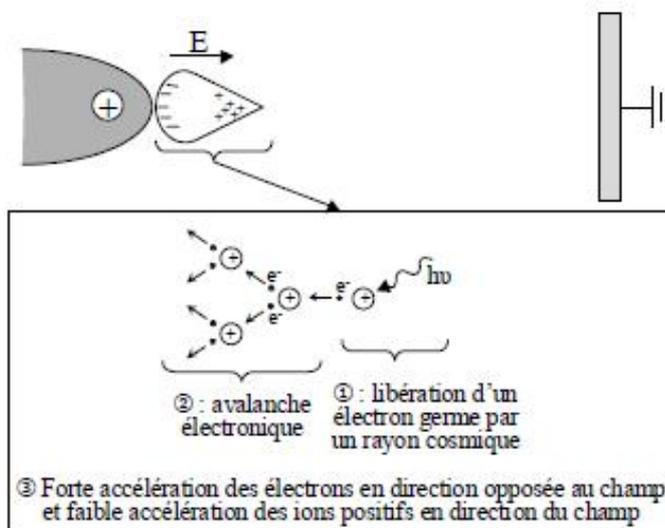


Figure I.3. Mécanisme de développement du premier streamer proposé par Townsend

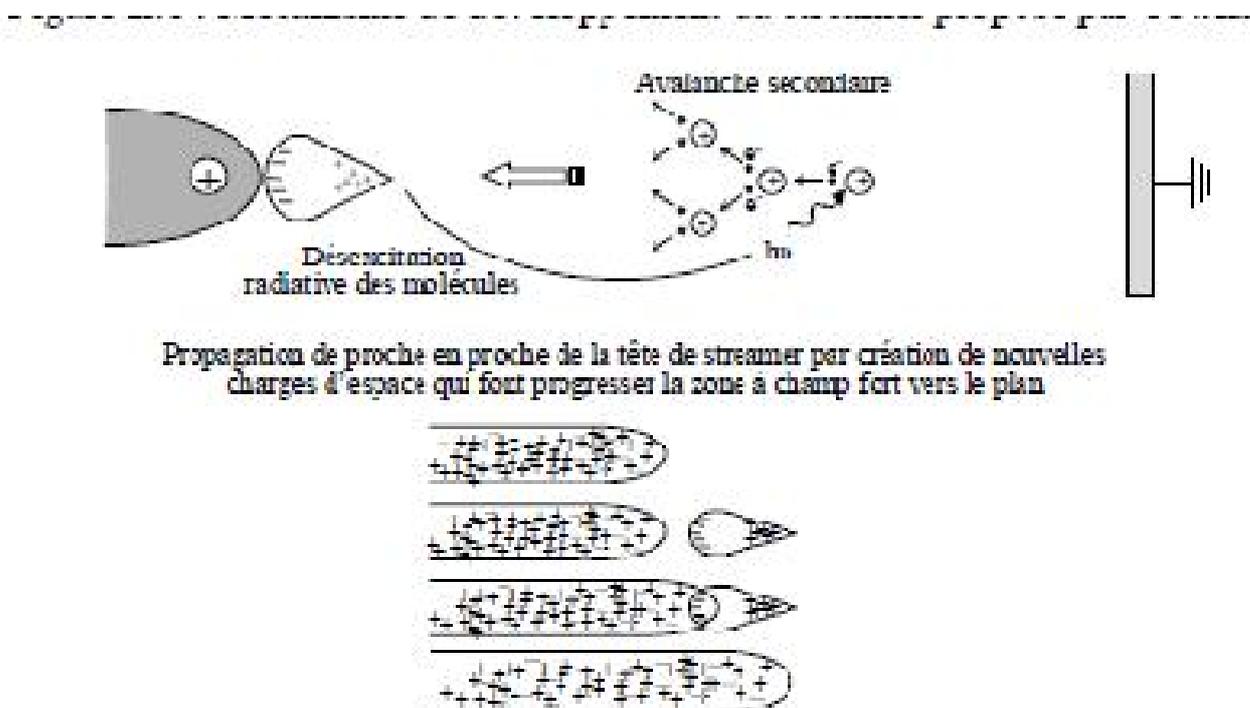


Figure I.3. Mécanisme de propagation du streamer par photo ionisation

I.3.3. Décharges pointe négative-plan :

Lorsque une pointe est soumise à une tension négative (pointe cathodique), une avalanche électronique qui se développe en champs divergent peut se produire dès qu'un électron germe apparaît à proximité de cette pointe. La cathode accélère alors les ions positifs qui la percutent

et lui arrachent des électrons secondaires. Ce phénomène, propre à l'utilisation d'une pointe cathodique, entraîne un abaissement de la tension d'amorçage de la décharge par rapport à la configuration pointe positive-plan. (5)

I.3.4. Les décharges partielles :

Dans un isolant qui comporte des cavités, des décharges électriques peuvent se manifester pour une tension qui excède une valeur critique : on parle alors de décharges partielles. L'effet de couronne en est un exemple visible lorsqu'il se manifeste autour d'un conducteur d'une ligne à haute tension humide. Il se traduit par une perte de puissance. Plusieurs études lui ont été consacrées. (3)

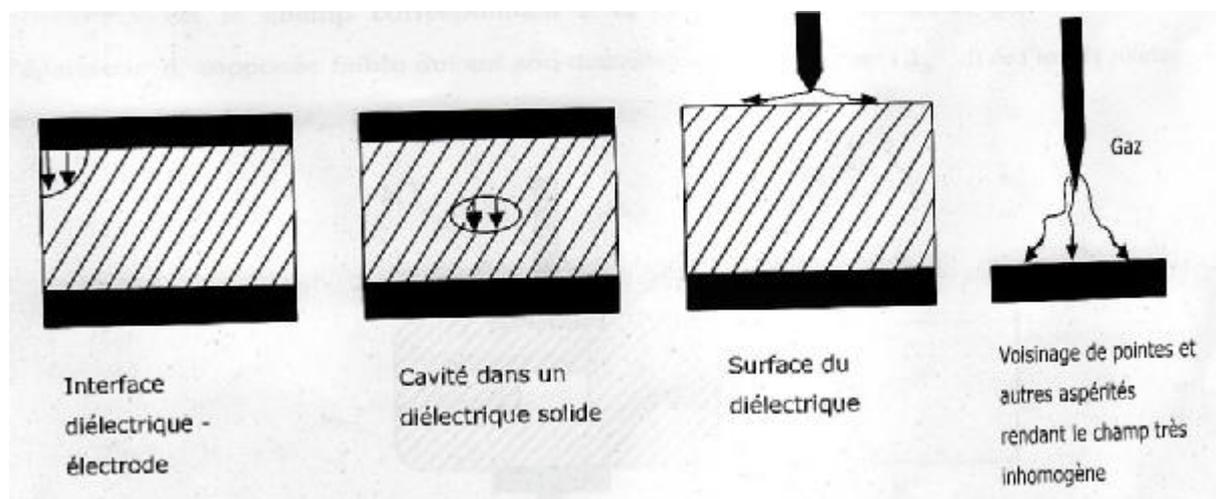


Figure I.4. Quelques exemples de lieux où peuvent se produire des décharges partielles

On peut distinguer plusieurs types de décharges partielles auxquelles sont soumis effectivement les matériaux isolants dans les isolations en service.

- **Les décharges thermiques :**

La décharge thermique se distingue de la décharge partielle par le fait que sa durée est supérieure (de 1 minute environ à plusieurs heures ou même plusieurs années). La conductivité non nulle des diélectriques causant des pertes diélectriques qui génère une énergie thermique inférieure, égale ou supérieure aux possibilités de transfert thermique par conduction ou convection ; dans le cas où cette énergie est supérieure à la dissipation du

diélectrique aux conditions de refroidissement données ;le diélectrique aura une température très élevée ce qui provoque sa décomposition chimique et sa fusion.(8)

- **Les décharges internes :**

Les décharges partielles internes se produisent dans les inclusions gazeuses emprisonnées dans la masse d'un isolant solide. Lorsque les isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, la permittivité relative des solides étant plus élevée que celle des gaz par conséquent le champ électrique dans les vacuoles sera plus grand que dans les isolants solides, la rigidité diélectrique des gaz étant plus faible entraîne des décharges internes dans les vacuoles ce qui engendre le claquage du matériau.(4)

I.3.5. Les décharges couronnes:

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité suite à l'ionisation d'un gaz entourant un conducteur porté à une haute tension.

L'appellation de l'effet couronne vient du fait qu'autour d'un fil apparaît, à partir d'une certaine valeur du potentiel, une gaine lumineuse de couleur bleu-violet dont l'épaisseur augmente avec l'augmentation de la tension.

L'effet couronne est lié à l'apparition d'avalanches électroniques localisées au voisinage immédiat du conducteur soumis à une haute tension. Au voisinage de fil plus épais, comme les câbles industriels, les avalanches prennent les formes d'aigrettes dont la longueur peut atteindre une dizaine de centimètres. Ces avalanches sont toujours issues des diverses aspérités portées par les conducteurs, éraflures, pollution, insectes, gouttes d'eau quand il pleut, où il existe un renforcement de champs électrique.

La décharge couronne peut se produire non seulement autour des conducteurs filiformes mais aussi près de tout conducteur présentant une forte courbure telles que les pointes, les arrête.

Le phénomène couronne est à l'origine de quatre manifestations gênantes :

- Les pertes de puissance par effet couronne.
- Les perturbations radioélectriques.
- Le bruit engendré par les chocs ions – molécules.
- Corrosion dans l'air du à la présence de l'ozone.

- Ø Parmi les configurations très variées de systèmes d'électrodes utilisés, les plus courantes sont les, systèmes pointe/plan, multipointes/plan, couteau/cylindre, fil-plan, fil/cylindre ou cylindre/cylindre. La distance inter électrodes est habituellement inférieure au centimètre

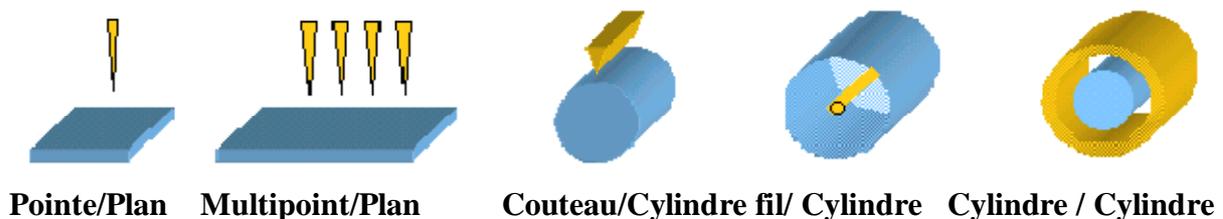


Figure I.5. Systèmes d'électrodes couramment utilisés pour la production de décharges :

I.3.6. Décharges lumineuses :

Les décharges lumineuses sont le plus souvent générées à basse pression (inférieure à 10 torrs) entre deux électrodes planes à des tensions d'alimentation valant quelques centaines de volts et un courant variant de 10^{-4} à 10^{-1} ampère. On peut avoir des décharges lumineuses à Pression atmosphérique mais avec d'autres géométries de réacteur et sous des tensions d'alimentation beaucoup plus importantes (plusieurs kV) ; le régime de décharge lumineuse, est très utilisé dans les tubes d'éclairage (Tubes néon, tubes fluorescent), est aussi employé pour le traitement de polluants comme les COV (Chlorofluoro carbonés ,méthane ou les NO.(5)

I.3.7. Les décharges superficielles :

La décharge électrique de surface, désigne une décharge qui se produit lorsqu'un isolant solide est placé dans un milieu liquide, ou gazeux ; si la composante tangentielle du champ électrique est élevée, le claquage peut se produire le long de l'interface solide/liquide ou solide/gaz. De bonne illustration sont obtenues par la méthode de **Lichtenberg** qui consiste à mettre un film photosensible sur la surface du solide isolant. (6)

I.3.8. Les décharges arborescentes

Les isolants solides utilisés en haute tension, ne sont pas parfaits, ils contiennent toujours des défauts qui sont à l'origine de la distorsion et la concentration locale du champ électrique qui conduit à la formation des canaux appelés arborescences.(7)

I.3.9. Les décharge de foudre :

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui se produit lorsque de l'électricité statique s'accumule entre des nuages orageux ou entre un tel nuage et la terre. La différence de tension entre les deux points peut aller jusqu'à 100 millions de volts et produit un plasma lors de la décharge ;causant une expansion explosive de l'air par dégagement de chaleur.(9)

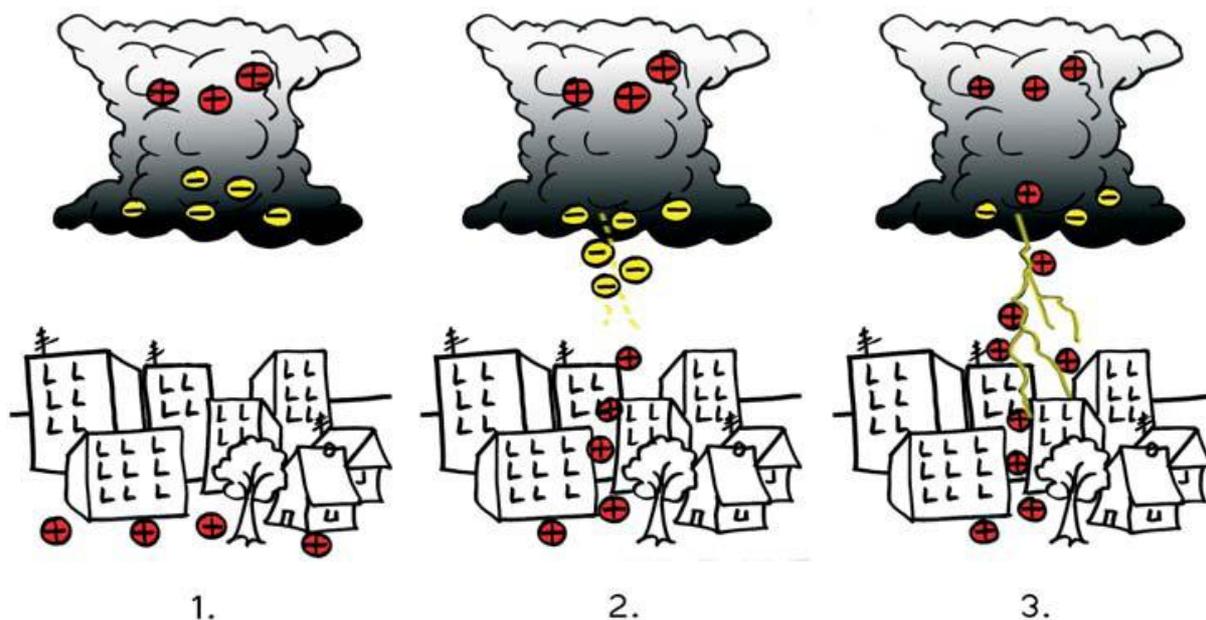


Figure I.6. Phénomène de coup de foudre

Principes de formation de la foudre :

- Des charges négatives s'accumulent à la base du cumulonimbus. à la base du cumulonimbus. Au sol, à l'aplomb du nuage, des charges positives se regroupent.

- La tension entre le sol et le nuage augmentant, quelques charges négatives quittent le nuage et se dirigent vers le sol. Elles forment le traceur descendant. Arrivées à proximité de la terre ferme, elles font jaillir du sol des charges négatives. C'est le traceur ascendant.
- Traceurs descendant et ascendant se rejoignent et forment un canal conducteur par lequel s'écoule un intense courant électrique. C'est le coup de foudre. Durée totale du phénomène de quelques millisecondes.

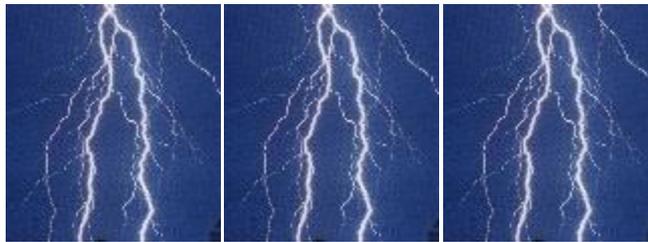


Figure I.7. L'image d'un coup de foudre

I.4. Conclusion :

Ce premier chapitre a été consacré à des rappels sur les décharges électriques. Dans un premier lieu nous avons défini les décharges, par la suite nous avons étudié les différents types de décharges électriques .

II.1. Introduction

Ce chapitre est composé de deux parties :

Dans la première nous présenterons une brève synthèse sur les plasmas qui portera quelques généralités et les différents paramètres mis en jeu dans les plasmas permettant leur classification. La seconde partie consistera à l'étude des décharges à barrières diélectriques.

Le développement industriel exige de plus en plus une grande consommation d'énergie. Pour le transport d'une puissance électrique élevée, il est nécessaire d'utiliser des distances d'isolement assez importantes engendrant ainsi des contraintes économiques et pratiques. par ailleurs, l'un des moyens les plus utilisés, pour réduire ces distances d'une part et d'augmenter la tension d'autre part, est l'emploi des barrières isolantes entre les parties sous tension et la terre des petits et moyens intervalles. Les barrières sont particulièrement employées dans les appareils de coupure notamment dans les systèmes d'isolement en SF₆ et les bornes de traversée. Ainsi l'insertion d'une barrière isolante dans un intervalle Pointe /plan affecte la tension de claquage et la tension disruptive. En effet, la barrière isolante permet d'uniformiser le champ électrique entre la barrière et le plan mis à la terre et améliore la rigidité du système pointe plan.(10)

II.2.Généralités sur les plasmas :

Les décharges électriques sont considérées comme un plasma. Les plasmas sont désignés comme étant le quatrième état de la matière faisant suite dans l'échelle des températures aux trois états classiques : solide, liquide et gaz. Le terme de « plasma » (du grec « matière informe ») a été introduit la première fois en 1923 par les Physiciens américains I. Langmuir et L. Tonks pour désigner, dans les tubes à décharge, certaines régions équipotentielles contenant un gaz ionisé électriquement neutre. Ainsi, un plasma est défini comme étant analogue à un gaz mais constitué de particules chargées, tandis qu'un gaz pur est un isolant parfait. Un gaz pur est ionisé s'il est soumis à :

- Ø Un champ électrique de forte intensité.
- Ø Des températures élevées.
- Ø Un bombardement de particules.
- Ø Un champ électromagnétique important.

Lorsque le gaz est totalement ionisé, le nombre d'électrons par unité de volume est comparable à celui des molécules neutres donc le gaz devient PLASMA.(15)

La physique des plasmas joue un rôle très important en astrophysique puisque l'on estime que près de 99 % de l'univers est constitué par de la matière à l'état plasma. Les plasmas présentent un vif intérêt aussi bien dans l'industrie (torche à plasma) que dans la vie quotidienne (téléviseurs à écran plasma). (13)

II.2.1. Paramètres physiques des plasmas

Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être ainsi classifiés en fonction de certains paramètres précis. Ces paramètres sont essentiellement : la densité électronique, le taux d'ionisation, la température électronique, le libre parcours moyen, la longueur de Debye.

II.2.1.1. Densité électronique :

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

II.2.1.2. Taux d'ionisation :

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

$$\tau_i = \frac{n_e}{n_e + N}$$

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

II.2.1.3. Température électronique

T_e Correspond à la température absolue en Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique kT_e (en électron- Volt (eV) avec k la constante de Boltzmann, sachant que :

$$1 \text{ kTe} \approx 1,4 \times 1000 \text{ k.}$$

II.2.1.4. Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen λ correspond à la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions successives. Il dépend de la vitesse des particules, ainsi que de la probabilité de collision.

II.2.1.5. Longueur de Debye:

La longueur de Debye λ_d définit la longueur à partir de laquelle le champ électrique coulombien issu d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signes opposés dans le volume environnant. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 K T_e}{n_e e^2}}$$

Avec ε_0 la permittivité du vide ($8,84 \times 10^{-12}$ F/m) et e la charge élémentaire d'un électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)

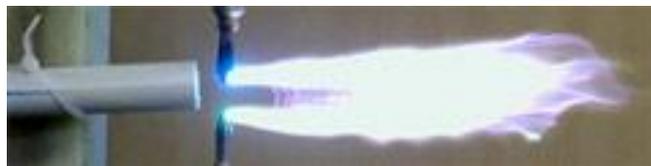
II.2.2. Les trois grandes catégories de plasma

II.2.2.1. Les "plasmas chauds" (étoiles, plasma de fusion...)

La température des ions et des électrons est supérieure à 10 millions de degrés. Le gaz est complètement ionisé. (Equilibre thermodynamique)

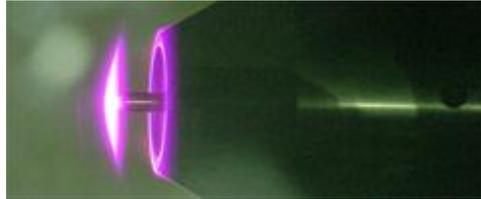
II.2.2.2. Les "plasmas thermiques" (arc électrique)

Les électrons, les ions et les neutres ont une température voisine de 10000 à 30000 degrés.



II.2.2.3. Les "plasmas froids" (décharges électriques dans les gaz)

Les électrons ont une température supérieure à 10000 degrés. Les particules lourdes neutres ou ioniques ont une température de l'ordre de 300 à 1500 degrés K. Le gaz est faiblement ionisé avec un taux d'ionisation compris entre 10^{-6} et 10^{-2} (Plasma hors équilibre)



II.2.3. Mécanisme de formation d'un plasma

La formation d'un plasma est due à un transfert d'énergie cinétique par collision entre un électron accéléré par un champ électrique et les molécules neutres du gaz. Ces collisions peuvent être de deux types :

- Les collisions élastiques,
- Les collisions inélastiques.

Dans les chocs élastiques, les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. Globalement, l'énergie cinétique du système reste inchangée. Mais ils sont responsables de phénomènes thermiques (conduction et diffusion de chaleur au sein du gaz) et hydrodynamiques. Par contre, dans les chocs inélastiques, l'énergie interne des particules change l'énergie de la particule incidente, dans ce cas, si son énergie cinétique est suffisante, un électron peut lors d'une collision inélastique, ioniser ou exciter la molécule neutre rencontrée. Les chocs inélastiques sont donc la source d'un nombre important de réaction physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz.

La réactivité du milieu plasmagène dépend des paramètres suivants:

- Composition du gaz introduit,
- Pression et température du gaz introduit,
- Tension appliquée (responsable de l'intensité du champ électrique).
- Géométrie des électrodes (responsable de la forme des lignes de champ). (16)

II.3. Les décharges à barrières diélectrique (DBD)

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) sont connues depuis plus d'un siècle et les premières expériences sur ces décharges ont été reportées par Siemens. Ce type de décharge a un domaine d'application vaste tel que la génération d'ozone, le traitement d'effluents gazeux l'activation et le traitement de surface, le laser CO₂, les écrans plasmas, etc. Il touche de nombreux domaines industriels : électronique, textile, emballage, automobile.

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 est caractérisé par une température électronique de quelques électron- volts (eV) bien supérieure à celle des espèces neutres (300 K) qui sont majoritaires.(15)

II.3.1.Caractéristiques d'une DBD

- Ø Pression de travail élevée (autour de la pression atmosphérique).
- Ø Une tension de l'ordre du kilovolt.
- Ø Une fréquence d'excitation de l'ordre du kilohertz.
- Ø Au moins une électrode recouverte par un diélectrique.
- Ø Distance inter-électrodes étant de l'ordre de quelques millimètres.

II. 3.2.Les paramètres définissant la nature de la barrière

Les paramètres définissant les propriétés isolantes varient d'un diélectrique à un autre, on cite :

II.3.2.1. La résistance de l'isolement

Elle est définie comme étant le rapport entre la tension appliquée aux électrodes au courant qui les traverse.

II.3.2.2. La résistivité transversale

C'est la résistance d'un élément du matériau, détermine le courant de fuite à travers l'isolant. La résistance dépend de deux facteurs qui sont l'humidité et la température.

$$\rho_t = \frac{S_t R_t}{d} \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

II.3.2.3. Constante diélectrique ou permittivité relative

L'énergie emmagasinée dans la capacité du diélectrique nous renseigne sur l'efficacité de ce dernier qui est exprimé par sa constante diélectrique par rapport à celle du vide le tableau ci-dessus présente quelques valeurs de permittivités de quelques matériaux.

Matériaux	Permittivité relative
Air	1
Ps	2,4 à 2,6
PMMA	3 à 4
SAN	5
pétrole	2
Verre	3 à 5
Porcelaine	5 à 7
Mica	5 à 8
Eau	77 à 84
Titane de Paryum	1750

II.3.2. 4. La résistivité superficielle

C'est la résistivité de la surface, détermine le courant de fuite à la surface. Elle dépend de l'humidité et de l'état de la surface. La résistivité de surface est exprimée en (Ω) par unité de surface.(12)

II.3.2.5. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique est le champ maximal que peut supporter l'isolant sans claquage. On parle aussi de tension disruptive ou de claquage de la barrière. La rigidité diélectrique peut être influencée par plusieurs paramètres dont l'épaisseur, la forme des électrodes et leurs polarités ainsi que la forme et la durée d'application de la tension.(12)

II.3.2.6. Relaxation

La relaxation est due au fait que pour un isolant réel avec perte, il existe un déphasage entre le déplacement électrique

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{E} \quad (\text{As/m}^2)$$

Où :

$\boldsymbol{\varepsilon}$ est la permittivité complexe absolue du diélectrique, définie comme

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 \boldsymbol{\varepsilon}_r \quad (\text{As/Vm})$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_r$ est la permittivité complexe relative du diélectrique, définie comme par :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_r = \boldsymbol{\varepsilon}_r'' - j\boldsymbol{\varepsilon}_r' \quad (12)$$

II.3.2.7. Les pertes diélectriques

Les isolants soumis à des champs électriques alternatifs sinusoïdaux sont le siège des pertes d'énergies actives sous formes thermique due à la conductivité diélectrique ainsi qu'au phénomène de relaxation.

II.4. Différents types de configuration d'une DBD

L'utilisation des formes et dispositions du diélectrique- électrode dépend du type d'application envisagée. Les électrodes cylindriques sont mieux adaptées aux traitements des gaz par contre les structures coplanaires sont utilisées pour le traitement de surface. Lorsque le matériau à traiter est le diélectrique lui-même, il est intéressant de le placer au milieu de l'espace inter-électrode, afin que la décharge se produise de part et d'autre de celui-ci, permettant ainsi le traitement des deux faces simultanément. Lorsque le gaz est de nature corrosive, placer un diélectrique sur chacune des électrodes permet d'éviter tout contact entre le gaz et les électrodes. Mais la configuration la plus utilisée « classique » consiste simplement à déposer le diélectrique sur l'une des deux électrodes.(10)

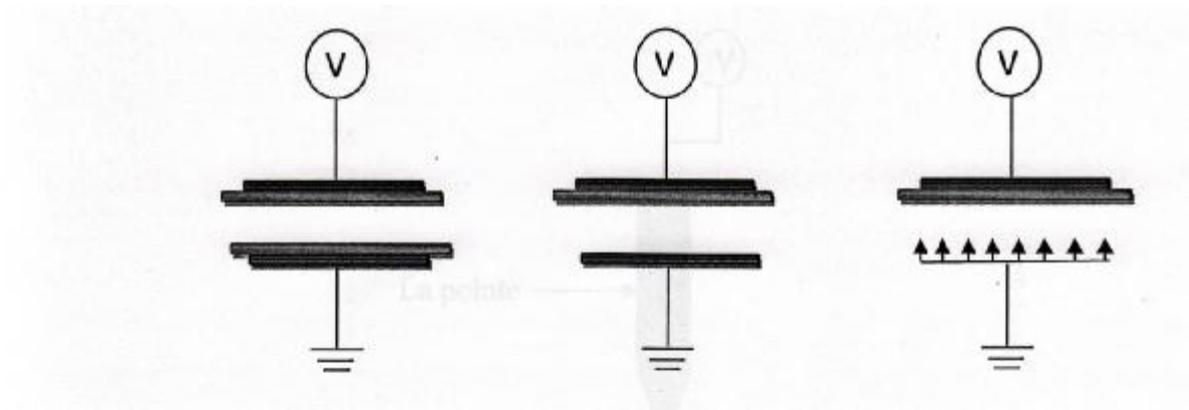


Figure II.1. Différentes configurations de la décharge à barrière diélectrique

Ø Configuration d'une décharge à barrière diélectrique en géométrie pointe -plan

En introduisant une barrière diélectrique dans un système pointe plan, on observe des décharges couronnes dues au champ élevé au niveau de la pointe. Par conséquent, des charges électrostatiques s'accumulent à la surface de la barrière. Simultanément une charge opposée apparaît sur la face inverse de la barrière. De là le système pointe barrière plan est analogue à deux systèmes pointe-plan et plan-plan.(13)

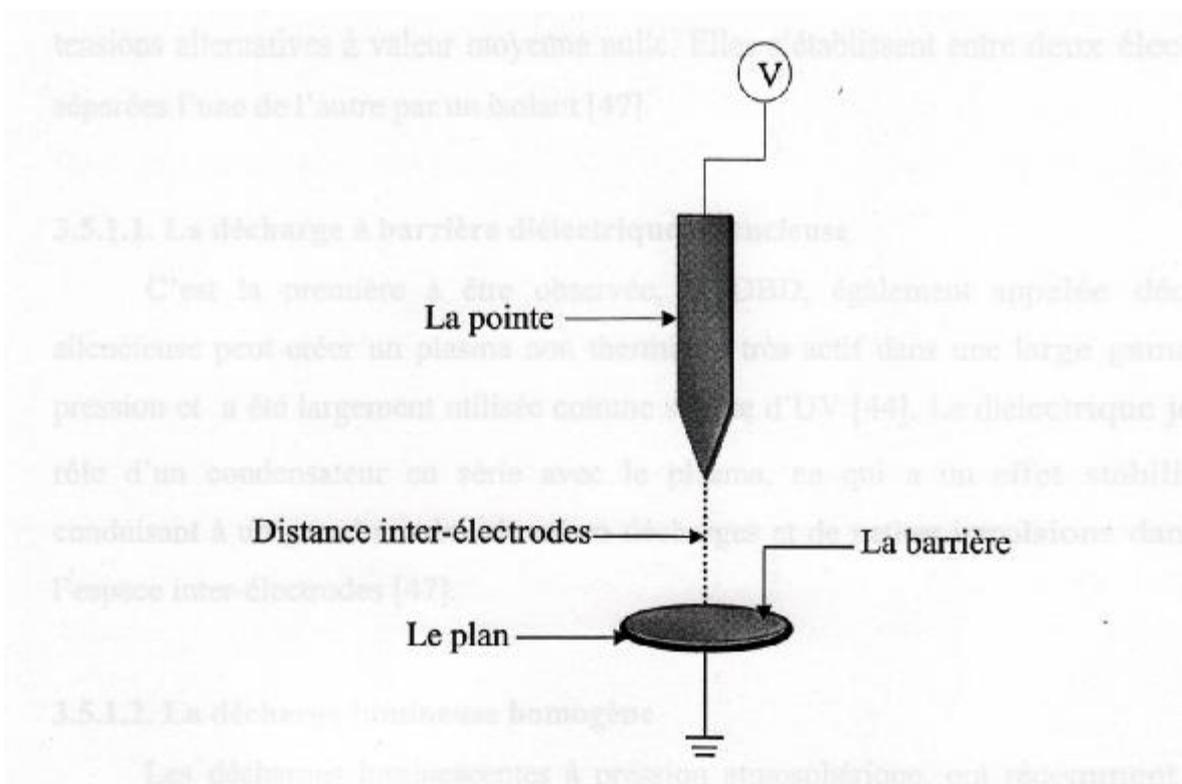


Figure II.2. Système pointe-plan avec barrière

II.5.Types de décharge à barrière diélectrique

La pression des électrons libres dans un milieu électrode diélectrique quelconque provoque des réactions d'ionisation et d'excitation dépendant de la forme de la dimension des électrodes des diélectriques de la distance inter électrodes de la tension appliquée de la nature du gaz et sa pression . Les phénomènes physiques entrant alors en jeu seront différents et donneront naissance à diverses formes de décharges.

II.5.1.Décharge à barrière diélectrique volumique

Les décharges à barrières diélectriques (DBD) utilisent généralement des tensions alternatives à valeur moyenne nulle. Elles s'établissent entre deux électrodes séparées par le diélectrique sachant que la barrière est superposée sur l'une des deux électrodes.

II. 5.1.1.La décharge silencieuse

C'est la première qui a été observée, obtenue par insertion d'un diélectrique entre les deux électrodes. Ce dernier joue un rôle d'un condensateur en série avec le plasma, ce qui donne naissance à des micros décharges ayant un diamètre de quelques centaines de micromètre et une durée de vie 100n.s.

La figure II.3 montre que les deux électrodes recouvertes d'un isolant forment un nuage suivi d'un filament de charges positives recueillies lors des avalanches (figure II.3.a) L'accumulation des charges négatives sur la surface du diélectrique entraîne la formation d'un champ électrique inverse stoppant les avalanches (figure II.3.b) (14)

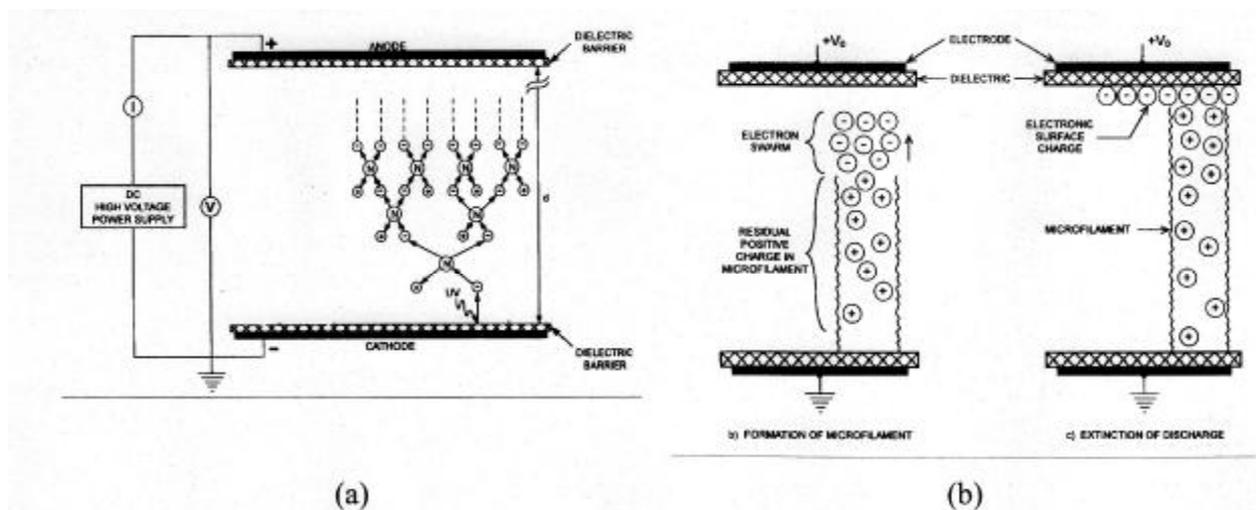


Figure II.3. Etapes de la formation d'une micro décharge dans une DBD (Roth, 2001)

II.5.1.2. Décharge à barrière diélectrique lumineuse homogène

La décharge silencieuse est remplacée par un régime lumineux homogène, dans l'air à pression atmosphérique en appliquant des champs électriques valant quelques dizaines de kV/cm, à des fréquences de l'ordre kHz, avec des distances inter-électrodes variant de 0,5 à 3 cm (Roth 2001) Okazaki et al en 1993, ont observé une décharge lumineuse avec une fréquence de 50 Hz, en remplaçant l'électrode plane par une grille. La décharge est contrôlée par une barrière diélectrique qui rend cette dernière de courte durée et fait que les micro-décharges soient rares en agissant sur la répartition des charges. Elle est caractérisée par un courant périodique. (Messines et Al 1998). (14)

II.5.2. Décharge à barrière diélectrique surfacique

Mr Roth a mis en œuvre une nouvelle configuration d'une décharge diélectrique de surface nommée (OAUGDP) One Atmosphère Uniforme Glow Décharge Plasma au U.S.A à la fin des années 1990 destinée à fonctionner comme actionneur pour le contrôle d'un écoulement. La décharge est établie entre au moins deux électrodes de très mince distance valant quelques millimètres; placées de part et d'autre d'un diélectrique occupant tout l'espace inter-électrode, cause pour laquelle est appelée « surfacique » Les électrodes posées sur la face supérieure du diélectrique sont soumises à une haute tension sinusoïdale de valeur moyenne de plusieurs kV avec des fréquences variant 1 à 20 kHz tandis que les électrodes placées sur la face inférieure du diélectrique sont mises à la terre.

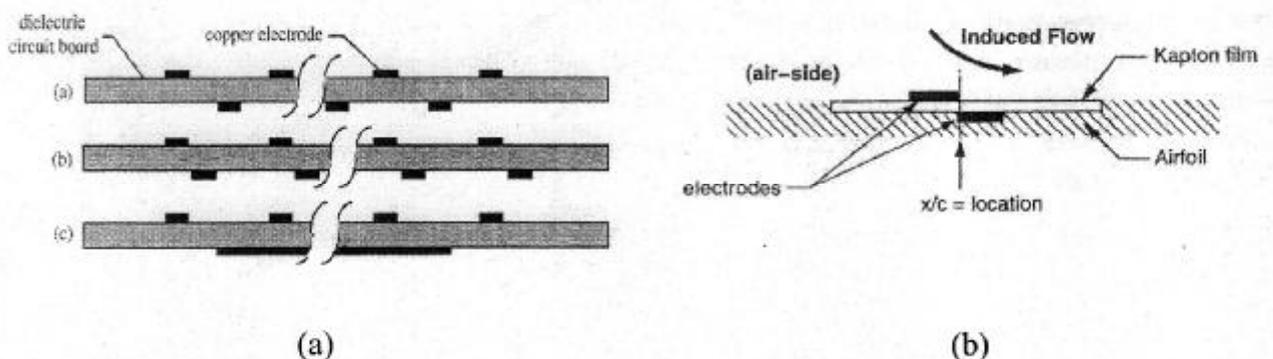


Figure II.4. Configuration géométrique des électrodes utilisées par Roth pour établir la « OAUGDP » (a) (Roth et Sherman, 1998) et sens de l'écoulement induit (b) (Post et Corke, 2003)

II.6. paramètres influençant la DBD

Les barrières stabilisent les décharges en évitant le passage à l'arc. L'influence de la barrière dépend de plusieurs paramètres, on cite : la position de la barrière par rapport au plan, son épaisseur et ses dimensions ainsi que la tension appliquée aux électrodes.

II.6.1. Influence du diélectrique

La charge à la surface de la barrière diélectrique permet l'auto-extinction de la décharge après la chute de potentiel du gaz et son écoulement en surface agit sur les caractéristiques de cette dernière. Le diélectrique influe sur le comportement de la décharge à travers l'émission d'électrons secondaires extraits du matériau et il intervient aussi de part et d'autre sur les réactions chimiques qui découleront. (11)

II.6.2. Influence de l'épaisseur de la barrière et de la permittivité

Ces deux paramètres ont une influence sur la distribution des porteurs de charge positives et sur la tension à la surface de la barrière. Quand ces deux paramètres ont des valeurs importantes, le champ entre la barrière et le plan devient de plus en plus uniforme, le courant diminue linéairement avec l'augmentation de l'épaisseur de la barrière pour les deux polarités.

II.6.3. Influence de la polarité de l'électrode pointe

Avec la polarité négative ; la décharge se déroule par étape pour toutes les positions de la barrière sans aucune amélioration de la tension disruptive. L'amélioration n'a été mentionnée que pour la polarité positive de la pointe.(10)

II.6.4. Influence de la position de la barrière dans l'intervalle d'air

Des travaux antérieurs ont montrés que la position optimale de la barrière se situe entre 0 et 20% à partir de la pointe. La tension de décharge passe par un maximum pour une position de la barrière de 20%.

II.6.5. Influence de la pollution

La pollution s'accumule sur la surface de la barrière et dès que la conductivité superficielle des couches semi conductrices dépasse $1,6\mu S$, on aura pratiquement les mêmes résultats que la barrière métallique. (10)

II.6.6. Influence de la largeur de la barrière

En augmentant la largeur de la barrière isolante, les streamers provenant de la pointe ne pouvant pas atteindre l'électrode plane, ce qui fait augmenter la tension appliquée à la pointe. Les charges issues des streamers s'accumulent sur la barrière et le plan s'accroît graduellement, le claquage est accompli lorsque le champ entre la barrière et le plan atteint une valeur critique à laquelle de nouveaux streamers sont générées entre la barrière et le plan.

II.7. Conclusion

L'objectif principal de l'insertion d'une barrière isolante entre les électrodes est la réduction du champ électrique et de la densité de courant entre ces dernières et d'éviter la transition à l'arc électrique.

L'avantage des décharges avec barrière diélectrique est l'établissement d'un plasma hors équilibre à pression atmosphérique, en outre elle est appliquée dans plusieurs domaines : production d'ozone, traitement d'effluents gazeux, traitement de surface ...etc. L'étude de ces domaines d'applications sera l'objet du troisième chapitre.

III.1. Introduction

Les premières expérimentations connues sur les décharges à barrière diélectrique sont de Siemens en 1857.

Les applications principales étaient la production d'ozone ou d'oxyde d'azote. En 1932 Buss décrit le caractère filamentaire de cette décharge dans l'air à travers les premiers clichés photographiques et mesures à l'oscilloscope réalisés sur les DBD. Dans les années septante, les premières simulations et recherches sur les DBD permettent d'élargir le champ d'application de ces décharges à la modification de surface, à la déposition assistée par plasma, aux lasers puis, plus tard, aux écrans plats, au traitement d'effluents gazeux. Il faut attendre 1988 pour découvrir l'existence d'un régime de DBD homogène à la pression atmosphérique grâce aux recherches des japonais Kanazawa et al. Depuis, de nombreuses recherches ont été menées afin de comprendre les phénomènes physiques régissant les DBD.

III.2. Applications industrielles des décharges

Vu les avantages pratiques que présentent les D.B.D. elles sont devenues un moyen d'excitation important ; notamment dans la production d'ozone, (éclairage), comme cellules élémentaires des écrans plasmas ; laser et traitement de surface.

III.2.1. Production d'ozone

L'ozone est un puissant germicide et l'un des plus forts oxydants. Il est moins nocif que le chlore pour l'environnement ; car en présence de matière organique, il se transforme en CO_2 , ou éventuellement en O_2 , de plus il est modérément stable. Il peut remplacer le chlore dans certaines applications. Le domaine de production d'ozone a suscité le plus de publications ces dernières années du point de vue théorique et expérimental. La production d'ozone est l'application industrielle la plus ancienne, elle est à l'origine des premières études sur les DBD dans l'air. Elle demeure pour longtemps la seule application pour ces décharges qui n'étaient considérées que comme des décharges ozonisantes. Le traitement par l'ozone est principalement utilisé dans le traitement de l'eau pour la rendre potable, dans l'industrie agro-alimentaire comme désinfectant ou conservateur ainsi que dans l'industrie du papier et le traitement des effluents gazeux. (16)

III.2.1.1. Générateurs d'ozone par décharge couronne

Il existe trois types générateurs pour la production artificielle d'ozone qui emploient des méthodes différentes

- Ø Générateur à U.V
- Ø Générateur avec décharge couronne à oxygène pur.
- Ø Générateur avec décharge couronne à coefficient réduit.

- **Générateur à U.V**

Il réplique le mécanisme de production d'ozone par le soleil.

- **Générateur avec décharge couronne à oxygène pur**

Ces appareils produisent une grande quantité d'ozone en présence indispensable de l'oxygène à l'état sec. Ils n'engendrent pas de sous-produits dangereux. Ces générateurs sont dix fois plus puissants qu'un générateur U.V et produisent une quantité de chaleur deux fois plus importante que celle produite par ce dernier. Ce type de générateurs est employé dans le domaine des traitements industriels de haut niveau et dans les villes pour rendre potable des millions de m³ d'eau par heure. (17)

- **Générateurs avec décharge à coefficient réduit**

Ils produisent l'ozone à travers le passage de l'air par l'intermédiaire d'un champ électrique de haute intensité. Ce type de générateurs n'exige que de l'air et il est immunisé contre toutes sous-productions de gaz nitrogène dangereux. Il est caractérisé par sa capacité de génération allant jusqu'à quatre fois celle des générateurs à U.V et de même puissance électrique. Il est employé généralement dans l'aviculture où la production demandée est très basse (8mg /h) mais suffit pour désinfecter les couveuses, chambres chaudes, et les salles et chambres ou fonctionnalisation jusqu'à 12 m³. (17)

III.2.2. Traitement de surface

Le traitement de surface par plasma consiste à modifier l'état d'une surface afin des de réaliser un dépôt, une gravure.

- **Dépôt en surface d'une couche mince d'un matériau donné (métal, semi-conducteur, diélectrique, polymère)**

Les premières études ont été faites par Okazaki et Al en 1950 où ils ont montré qu'une décharge homogène à pression atmosphérique pouvait être utilisée pour polymériser des films organiques de polytetrapoly-éthylène.

- **Gravure**

On peut à l'heure actuelle graver (réalisation de motifs dans le substrat par érosion de celui-ci) des plaques de silicium à des vitesses de $4000\mu\text{m}/\text{min}$ en utilisant les D.B.D pour plasma.

- **Modification de la chimie de surface**

Elle peut être la fonctionnalisation, le greffage et le dopage par implantation, diffusion ou stérilisation. Le traitement corona est une technique d'activation de surface par oxydation. Ce type de traitement nécessite une technologie assez complexe.

III.2.3. Ecrans plasma

Dans les écrans plasma, l'image est obtenue à partir de décharges électriques créées dans des cellules de quelques centaines de microns dont l'ensemble compose des panneaux de grande surface (plus d'un million de cellules pour un panneau de $42(1,07\text{m})$ de diagonale. Les cellules sont remplies d'un mélange de gaz à base de xénon, à une pression inférieure à la pression atmosphérique. Les photons UV émis par chaque micro-décharge excitent des luminophores qui réémettent, selon la cellule, des photons visibles dans l'une des trois couleurs fondamentales, rouge, vert et bleu. Cette technologie permet de réaliser des écrans plats de très grande dimension, d'une qualité d'image exceptionnelle, très contrastée et extrêmement lumineuse. Les écrans plasma sont en train de prendre une part croissante du marché global des téléviseurs dans le monde. (16)

III.2.4. Eclairage

Comme applications des gaz ionisés dans le domaine de l'éclairage, signalons, pour un fonctionnement à faible pression, les lampes à néon (tubes fluorescents domestiques, et à

vapeur de sodium (lampadaires) ; et à haute pression, les lampes à mercure qui sont des plasmas de très forte densité, le plus souvent, en régime d'arc électrique (lampadaires).

III.3. Application des décharges dans la dépollution

Aux cours des années 1980, les décharges électriques deviennent un sujet de recherche en vue de nouvelles applications, notamment la dépollution. Les premiers travaux concernent l'élimination de SO_2 et des oxydes d'azote NO_x des effluents gazeux. Le principal intérêt des décharges électrique est l'élimination simultanée des substances nocives et des poussières ainsi que les composés organiques volatiles (COV). Les applications des décharges pour l'environnement sont encore en phase d'étude et ce pour les raisons suivantes :

- ∅ La complexité des phénomènes impliqués combinant les effets chimiques ; physiques, électriques.
- ∅ Le coût énergétique associé au procédé.
- ∅ Les aspects législatifs sur la dépollution qui n'incitent pas les industriels à investir dans de nouvelles technologies. (17)

- **Traitement des NO_x**

Un procédé est purement « dé NO_x » s'il transforme les oxydes d'azote en oxygène et azote. Dans le domaine automobile, le respect des normes futures sur le taux admissible des émissions nocives des échappements des véhicules à incité les constructeurs à développer de nouveaux moyens de réduction de la teneur en NO_x de ces effluents gazeux. Le plasma froid en est un meilleur candidat, il contribue à la diminution des émissions tels que moteur diesel les composés nocifs : les NO_x , les hydrocarbures non brûlés, ou encore du CO_2 . Les décharges couronne avec barrière jouent un rôle déterminant dans la dépollution. (16)

III.4. Application des décharges dans la stérilisation

Il est par conséquent nécessaire de mettre en place des méthodes de stérilisation pour des usages multiples de ce matériel. L'instrumentation médicale a beaucoup évolué au cours de ces dix dernières années ; elle fait appel à la miniaturisation et intègre des éléments fragiles très sensibles aux agressions physico-chimiques. L'état stérile est défini par l'absence de micro-organismes vivants. C'est le résultat de la stérilisation qui est l'opération qui permet l'élimination des micro-organismes portés par milieux inertes contaminés.

Les méthodes traditionnelles - traitement par ultraviolets (UV), haute température et/ou oxydation à l'aide de substances chimiques, sont contraignantes et endommagent parfois le matériel médical. Elles s'avèrent même parfois inefficaces. C'est le cas des UV lorsque les bactéries sont regroupées en bio films, sortes de grappes de germes qui peuvent atteindre quelques millimètres d'épaisseur. C'est aussi le cas, quelle que soit la méthode de stérilisation utilisée, lorsqu'on tente d'éliminer les prions. (18)

III.4.1. Techniques de stérilisation

L'inactivation des micro-organismes peut se réaliser par plusieurs méthodes : radiation ionisantes ; chaleur sèche et humide (autoclave) ; les plasmas, les composés chimique.

III.4.1.1. Radiations ionisantes

Les radiations ionisantes constituent des photons ionisants les molécules présentes dans ou aux alentours des micro-organismes ; les molécules ainsi bombardées sont transformées en radicaux libres qui à leur tour provoquent la dégradation des protéines et des acides nucléiques ; les rayons utilisés sont de type « gamma ». On peut par ce procédé stériliser en continu de gros volume. Mais le coût et la complexité de l'installation, le fait réserver à l'industrie, essentiellement pour le matériel à usage unique.

III.4.1.2. Stérilisation par la chaleur sèche dans un four Poupinel

La chaleur tue les micro-organismes en combinant l'oxydation des protéines par l'oxygène de l'air ; ceci s'effectue dans une enceinte pourtant le nom de son inventeur le docteur « Poupinel ». Elle est cependant moins efficace que la chaleur humide, car sa diffusion se fait moins bien et il faut globalement des températures plus élevées et des temps d'exposition plus longs. Il faut par exemple pour atteindre l'état stérile :

1 heure à 170°C

2 heures à 160°C

24 heures à 125 °C

La chaleur sèche reste très efficace mais difficile à manier. A titre d'exemple la NASA a stérilisé les capsules spatiales à l'aide de la chaleur sèche à 150°C. Le Poupinel a beaucoup d'inconvénients :

Ø Les objets à stériliser sont placés dans une enceinte contenant de l'air, mais l'air est mauvais conducteur de la chaleur.

Ø Les charges sont inhomogènes, avec des métaux différents, qui conduiront différemment la chaleur.

On tente de pallier ces deux inconvénients par des systèmes de ventilateurs intégrés mais les résultats restent aléatoires, et l'on a pu mettre en évidence des différences de 30°C entre deux zones de l'enceinte.

De plus les températures supérieures à 150°C détrempe le matériel en acier et abîment considérablement les objets piquants ou tranchants.

Enfin les temps d'exposition sont plus longs car la montée en température est lente. La garantie de stérilité n'est pas suffisante.

III.4.1.3 .Stérilisation par chaleur humide

Les stérilisateur les plus fréquemment employés dans les cabinets médicaux et les unités hospitalières sont : l'autoclave qui soumet le matériel à une atmosphère hautement corrosive (vapeur d'eau sous pression) et à une température supérieur à 130°C pendant plus de 90 min, ces techniques possèdent néanmoins quelques limites à savoir leurs agressivité vis-à-vis d'instruments thermosensibles (endoscopes) ainsi que leurs pouvoir fortement oxydant en plus le stérilisateur à oxyde d'éthylène qui a l'avantage de fonctionner à basse température 55°C mais qui présente une toxicité pour le personnel ; les patients et l'environnement. (18)

III.4.1.4. Stérilisation par plasma

L'inefficacité des techniques de stérilisation habituelles à éliminer les agents transmissibles non conventionnels en particulier les prions ; nous impose la conception d'un stérilisateur comme solution alternative basé sur de nouveaux concepts afin de pallier ces problèmes. « La stérilisation par plasma froid permettrait non seulement de simplifier les procédures traditionnelles mais aussi d'en améliorer l'efficacité. En effet, un plasma conçu à partir d'hydrogène s'attaque plus efficacement aux bios films et éradique l'ensemble des biomolécules, prions y compris, le tout en réduisant le risque d'abîmer les instruments. (18)

III.4.2. Plasmas de décharge : mode d'action et espèces actives

III.4.2.1. Les premiers pas de la stérilisation par plasma

En 1968 Mr Menachi (18) a publié les premiers documents relatant l'utilisation des plasmas autant qu'un agent de stérilisation. Son principe était basé sur des champs électriques pulsés (1_100 MHz) générés par un solénoïde qui entoure un tube dans lequel baigne un mélange gazeux à base d'argon activé par ces champs. Cette technique pouvait stériliser jusqu'à 10^6 spores en une seconde. Néanmoins, l'élimination des bactéries ne peut être expliquée que par la chaleur générée par ce type de montage ; c'est pourquoi ce procédé fut rebaptisé ultérieurement « micro incinération » en utilisant les mêmes procédés dans l'investigation concernant la technique « plasma » seuls le mélange gazeux et les techniques de génération du champ ont été modifiés.

Mode d'action d'un plasma de décharge et d'identification des particules actives

Le mode d'action dépend de :

- Ø La composition, pression, la vitesse du flux du mélange gazeux et configuration.
- Ø La dimension et configuration de la chambre de décharge.
- Ø Le type de champ électrique appliqué.

Il s'agit de comparer les différents types de modèles expérimentaux, l'énergie captée par unité de volume (densité énergétique) et le paramètre le plus significatif. Dans cette partie nous détaillerons les premières observations concernant les espèces actives dans le mode d'action des plasmas. Les expériences de stérilisation par les plasmas ont été faites dans trois gammes de pression :

- Ø Basse pression
- Ø Moyenne pression
- Ø Pression atmosphérique

1. Composition du mélange gazeux

En 1985 Boucher (18) a observé que certains gaz (exemple CO_2) sont plus efficaces que d'autres (exemple argon) pour inactiver des spores bactériennes. Il a aussi déclaré que les

spores immergées au préalable dans l'eau pendant environ une heure sont plus facile à détruire. Rather et Al ont ajouté que la stérilisation par plasma est efficace avec la majorité des gaz des décharges : O_2 , N_2 , H_2 , air ; halogènes ; N_2O , H_2O ; CO_2 ; H_2O_2 ; SO_2 ; SF_6 ; aldéhyde, acides organiques et ce indépendamment du type de décharge. (16)

2. Rôle des UV

Boucher a décrit l'action des UV sur les micro-organismes dans son modèle breveté où il a énoncé que :

« Les photons UV de forte énergie (3,3_6,2 eV) ayant ainsi une longueur d'onde qui correspond à un maximum d'absorption par l'ADN, ce qui leurs permet d'exercer une action nocive sur le matériel génétique (ADN ; acide nucléique) ». Cependant, dans le cas des spores (qui peuvent atteindre 1mm de diamètre) , l'énergie du photon risque de se dissiper rapidement selon l'épaisseur de la paroi et donc restreint la réaction photochimique aux couches externes sans atteindre l'ADN... La limite d'action ou longueur d'absorption d'un photon UV est de 1 μ m. Autrement dit le rôle des photons est déterminé par leurs caractéristiques énergétiques et le réduit à des surfaces très fines et seront donc plus efficace sur des petites bactéries non sporulées. Dans le cas de spores très résistantes, l'action du photon va contribuer à une détérioration partielle des protéines de surface, possédant des ponts disulfures, et facilite ainsi la diffusion des molécules actives (les atomes et les radicaux libres) vers le noyau de la cellule. D'après Boucher la profondeur de pénétration des UV est de l'ordre de grandeur de la dimension d'une spore qui n'excède pas généralement 1 à 3 μ m mais ces spores peuvent former des accumulations, ce qui minimise d'avantage le rôle des UV. (16)

3. Influence de la densité énergétique dans la zone de décharge

En 1985, Boucher rapporte que l'efficacité du pouvoir stérilisant augmente avec la densité de puissance absorbé dans la zone de décharge.

4. Rôles des atomes d'oxygène

Nelson et Berger ont montré qu'un plasma issue de l'oxygène O_2 efficace comme bactéricide. Dans leurs études sur *Bacillus subtilis* et *Clostridium sporogenes*, le plasma était formé à base d'une décharge produite par un générateur ionique composé de deux conducteurs plans et parallèles soumis à un champ électrique de 13,6 MHz où les ions sont

accélérés et dirigés vers l'une des électrodes, sur laquelle se trouvaient les spores. Au bout de 5 min les spores étaient réduites de $3,5 \log_{10}$. La destruction des *B. Subtilis* à partir d'un plasma avait déjà été rapportée par Fraser et Al mais en un temps plus long en dépensant plus d'énergie (300 w). (17)

5. Influence de type de micro-organismes

D'après Boucher, pour valider l'efficacité d'un plasma en tant que méthode de stérilisation, il faut le confronter aux micro-organismes les plus résistants. L'agence Américaine de Protection de L'environnement (AAPE) préconise des tests sur deux types de spores aérobies et anaérobies, respectivement, *Bacillus Subtilis* et *Clostridium Sporogènes* alors que les tests standards pour valider les méthodes usuelles de stérilisation (autoclave et stérilisateur à l'oxyde d'éthylène) sont basés sur la destruction de *Bacillus Subtilis* et *Bacillus Stearother mophilus* Kelly_Winterberg et Al ; Hyry et al ; baier et Al ont poursuivi cette étude sur divers types de micro-organismes. (18)

III.4.3. Intérêt des plasmas froids dans la cadre de la stérilisation

Les différentes études visant à évaluer l'efficacité de la technique de stérilisation par plasma ont permis de répondre à de nombreuses questions. Les plasmas se montrent aussi efficaces que les techniques de stérilisation de référence (autoclave). Les températures nécessaires autorisent la stérilisation des objets thermosensibles, il faut cependant noter que le processus est d'autant plus rapide que la température est élevée. Les durées de stérilisation nécessaires sont inférieures à celles des techniques par chaleur humide.

L'efficacité du processus ne dépend pas de la pression, il est donc possible de travailler à des pressions inférieures à la pression atmosphérique empêchant ainsi la fuite hors de l'enceinte des gaz utilisés. Néanmoins, de nombreuses interrogations sont nées de ces études. Il semblerait que les durées de stérilisation nécessaires dépendent en partie de l'épaisseur des parois bactériennes. L'efficacité des techniques par plasma dépend en grande partie du gaz utilisé et des fractions de mélange. Les mécanismes mis en jeu sont encore incompris sur certains points (interaction oxygène /UV). L'efficacité sur les Agents Transmissibles Non Conventionnels (ATNC) n'a pas encore été étudiée. (18)

III.5. Autres applications

III.5.1. Elimination de l'électricité statique

L'électricité statique est, dans l'industrie, la source de dysfonctionnements gênants. Elle provoque des décharges néfastes aux dispositifs électroniques.

La société Valitic a développé un système utilisant l'injection supersonique d'ions afin d'éliminer l'électricité statique. Ces ions sont produits par effet couronne à l'intérieur d'une buse, constituée d'un tube alimenté en gaz pur sous pression et ouvert sur la veine à traiter à travers le col d'une tuyère supersonique, afin d'éviter les inconvénients de la production des ions par une décharge électrique dans un milieu susceptible d'exploser. (16)

III.5.2. Contrôle actif d'un écoulement

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

L'impact de telles recherches est immense pour l'industrie. Les enjeux économiques du contrôle de l'écoulement sont multiples dans de nombreux systèmes industriels, qu'il fasse intervenir des processus d'échange de chaleur, d'espèces chimiques, de stabilisation de structure ou bien qu'il s'agisse d'améliorer le mélange pour des problèmes de combustion interne ou de contrôle acoustique par exemple, réduire la trainée de (10%) d'un avion civil entrainerait une réduction de la consommation en carburant de l'ordre de 50 millions de litres durant sa durée de vie.

De nouveaux actionneurs sont donc à l'étude dont l'actionneur « électro aérodynamique ». Il utilise le phénomène qui consiste à induire un écoulement de gaz à partir d'une injection de charge en créant un plasma froid à l'aide d'une décharge de surface de couronne. (19)

II.6. Conclusion

Depuis une vingtaine d'années, la technique de stérilisation par les plasmas froids suscite beaucoup d'espoir. En effet son mécanisme d'inactivation des micro-organismes par effet de gravure combiné à l'action délétère des UV sur la paroi et le matériel des bactéries, lui confère un mode d'action unique qui devrait être actif sur les ATNC (Agents Transmissibles Non Conventionnels), tout en autorisant des conditions de fonctionnement à basse pression et basse température. De plus, aucune étude n'a pu à ce jour démontrer une quelconque toxicité des gaz plasma pour le manipulateur.

L'utilisation de la technologie des plasmas froids dans les procédés de dépollution offrirait de nombreux avantages par rapport aux méthodes classiques. En effet, d'une part, les coûts énergétiques mis en jeu dans les plasmas froids sont plus faibles, d'autre les plasmas froids permettent de traiter de faibles concentrations de polluants.

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons décrire un dispositif expérimental destiné à la stérilisation du matériel médical par plasma froid. Les résultats de diverses expériences menées au laboratoire Haute tension de notre département et d'analyses biologiques réalisées au laboratoire du CHU de T.O seront exposés.

IV.2. Le réacteur à plasma froid

Ce réacteur plasma est composé de trois parties ; l'alimentation électrique, les électrodes et une barrière diélectrique.

Ø L'alimentation électrique est fournie par un générateur alternatif à haute tension, la fréquence étant de 50 Hz.

Ø Dans le cas d'une décharge sans barrière, l'application d'une tension pulsée est nécessaire pour empêcher le passage en arc.



Figure IV.1. Générateur de tension alternatif

- Ø Pour traiter les microorganismes nous avons choisi un réacteur à décharge couronne avec barrière diélectrique. Ce type de décharge est obtenue par insertion d'un matériau à propriétés diélectriques entre les deux électrodes ; l'accumulation de charges à la surface de cette barrière entraîne une chute de potentiel entre les deux électrodes et évite le contournement. Le diélectrique permet également une répartition plus homogène du plasma.

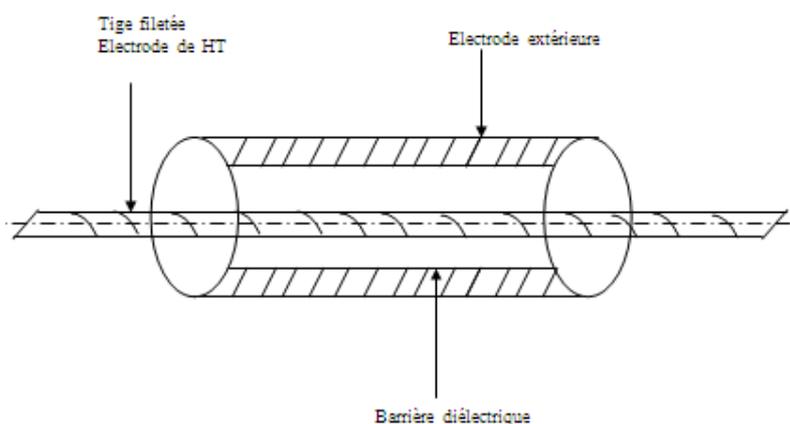


Figure.IV.2. Schéma du dispositif

- Ø Les électrodes dont la géométrie s'est portée sur la configuration tige filetée-cylindre. La tige a été choisie ainsi afin d'avoir des champs intenses au niveau des pointes.

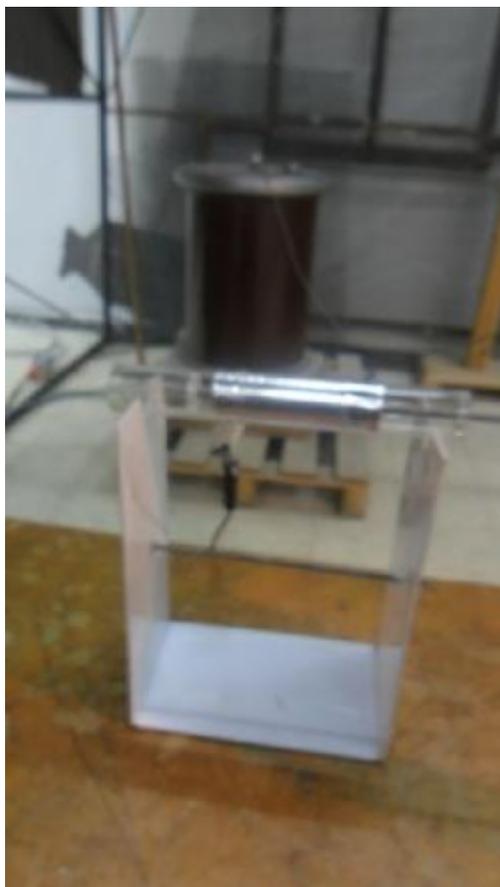


Figure IV.3. Réacteur connecté au générateur

IV.3. Choix des matériaux

Nous venons de voir que le choix du type de décharge et de son régime commande les mécanismes de production des espèces actives et oriente la nature des produits formés. Le choix des matériaux de l'électrode à champ fort offre un degré de liberté supplémentaire dans le contrôle des réactions.

IV.3.1. choix des matériaux des électrodes :

IV. 3.1.1. Choix du matériau de l'électrode haute tension :

La nature de l'électrode haute tension influence la tension de claquage (facilité plus ou moins à émettre des électrons secondaires par impact des ions sur les atomes de l'électrode). Les effets catalytiques ou des phénomènes de corrosion peuvent aussi intervenir au niveau des électrodes à champ fort. Dans notre travail nous avons utilisé une tige filetée en acier

inoxydable qui est un alliage de fer et de carbone auquel on ajoute essentiellement le chrome en surface qui a pour propriété de produire la résistance souhaitée à l'oxydation.



Figure IV.4. Tige filetée en acier inoxydable

IV. 3.1.2. Choix du matériau de l'électrode mise à la terre :

L'électrode extérieure est constituée par une couche d'aluminium entourant la barrière. Elle est au potentiel zéro c'est la terre. Pour assurer un bon maintien des électrodes et centrer la tige filetée, des supports d'électrodes en PMMA sont utilisés.

IV. 3.2. Choix du matériau de la barrière diélectrique :

Nous avons employé un cylindre en verre qui servira de barrière, ayant pour rôle d'éviter le passage à l'arc et l'apparition de plasmas parasites (micro décharges à haute pression ou « glow » à plus basse pression).

IV.4. Dimensionnement du réacteur :

Le dispositif expérimental réalisé au sien de notre laboratoire HT est composé d'un système d'électrodes tige filetée- cylindre dont les dimensions diffèrent d'un essai à l'autre. Pour le premier essai, l'électrode haute tension est dimensionnée comme suit ; 3.6 mm de diamètre, 27,5 cm de longueur. La distance inter-électrodes est estimée à 8,4mm La barrière diélectrique est un cylindre de 26 mm de diamètre sur 24,5 cm de longueur. Durant le deuxième essai nous avons adopté une électrode haute tension de 4 mm de diamètre avec 23 cm de longueur ; la distance inter-électrode étant de 9.8 mm

IV.5. Calcul du champ :

L'utilisation d'électrodes cylindriques entraîne la non homogénéité du champ électrique. Parmi les configurations les plus étudiées, nous trouvons les configurations pointe-plan, et coaxiales (cylindre-cylindre ou fil-cylindre) la distribution spatiale du champ électrique est donnée par les deux relations suivantes :

Ø En géométrie pointe hyperbolique –plan

$$E(x) = \frac{U}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln \frac{2d+r}{r}}$$

E(x) : Le champ (V/m)

U : la tension appliquée à la pointe (V)

x : la distance à la pointe sur l'axe pointe- plan (m)

d : distance inter-électrode (m)

r : courbure de la pointe à son extrémité (m).

Ø En géométrie coaxiale (fil – cylindre)

$$E(R_1) = \frac{U}{R_1 \ln \frac{R_2}{R_1}}$$

m_1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
E_c (kV/cm)	10,98	14,55	18,19	21,82	25,46	29,10
U_c (kV max)	37,5	49,5	124,4			

En prenant $m_1 = 0,3$ nous avons la tension d'apparition de l'effet couronne $U_c = 26,5$ kVeff or en pratique nous l'avons enregistré à $U_c = 11$ kVeff ce qui signifie que la tige filetée

$E(r)$: Champ électrique

U : tension appliquée à l'électrode centrale (V)

r : distance radiale du point considéré (m)

R_3 : rayon de l'électrode externe (m)

R_1 : rayon de l'électrode interne (m)

- **Le seuil d'apparition de l'effet couronne**

Pour évaluer le seuil d'apparition de l'effet couronne, Peek a suggéré une loi empirique en géométrie cylindrique dans l'air ambiant et en tension alternative ; appelée loi de Peek :

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \quad [A/cm].$$

$E_0 = 30$ kVmax /cm : valeur de crête du champ électrique en conditions normales

r : rayon du conducteur en (cm)

m_1 : Coefficient qui tient compte de l'état de surface.

$m_1 = 1$: pour un conducteur idéal ; parfaitement lisse

$m_1 = 0,9$: pour un conducteur normal

$m_1 = 0,8$: pour un conducteur présentant des arêtes vives.

m_2 : Coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs

$m_2 = 0,9$: pour un conducteur de propreté technique

$m_2 = 0,3$: pour un conducteur fortement pollué

δ : La densité de l'air.

$$\delta = \frac{P}{P_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad \text{avec} \quad p_0 = 76 \text{ cmHg}$$

$$t_0 = 25$$

Les conditions de pression et de température enregistrées au laboratoire haute tension étant :

$$T = 22 \text{ C}^\circ \quad \text{et} \quad P = 76 \text{ cmHg}$$

$(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}})$: correction de Peek, tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de conducteur car en s'éloignant du conducteur le champ décroît très rapidement.

Durant les essais le coefficient qui tient compte de la pollution a été fixé à 0.9 ; comme on a utilisé une tige filetée la valeur de m_1 est inconnue ; donc on détermine E_c en faisant varier les valeurs de m_1 dans l'intervalle [0,3 0,8] ; voir tableau ci-dessous :

IV.5.1. Calcul du champ électrique pour une configuration fil-cylindre sans barrière :

$$E_c = E_c m_1 \cdot m_2 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r\delta}}\right)$$

$$u_c = E_c \cdot R_1 \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}$$

1^{er} essai : r = 8.4 mm

	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
E_c (kV/cm)	10,98	14,55	18,19	21,82	25,46	29,10
U_c (kV)	8,56	11,35	14,18	17,02	19,85	22,69

2^{ème} essai : r = 9.8mm

m_1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
E_c (kV/cm)	10.60	14,35	17.67	21.21	24.74	28.28
U_c (kV max)	15.88	21.21	26.50	31.81	37.11	42.42

IV.5.2. Calcul du champ électrique pour une configuration fil-cylindre avec barrière :

Dans le cas où la décharge se fait par insertion de barrière, et si on estime que les charges d'espaces n'existent pas encore (juste avant l'apparition de l'effet couronne) ; le champ électrique se déterminera par la formule suivante

$$E_j(x) = \frac{U}{\epsilon_{rj} x \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\epsilon_{ri}} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}}$$

Le champ au point R_1 est donné comme suit :

$$E_c(R_1) = \frac{U_c}{\epsilon_{r0} R_1 \left(\frac{1}{\epsilon_{r0}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_{rv}} \ln \frac{R_3}{R_2} \right)}$$

$$\text{D'où : } U_c = E_c(R_1) \cdot \epsilon_{r0} R_1 \left(\frac{1}{\epsilon_{r0}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_{rv}} \ln \frac{R_3}{R_2} \right)$$

$\epsilon_{r_a} = 1$ la permittivité relative de l'air

$$\text{Soit } k = \epsilon_{r_a} R_1 \left(\frac{1}{\epsilon_{r_a}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_{r_v}} \ln \frac{R_3}{R_2} \right)$$

$$\text{Donc : } U_c = k \cdot E_c$$

Les valeurs de U_c seront représentées dans les tableaux ci-dessous suivant les dimensions de l'électrode HT et de la barrière.

- **1^{er} essai:**

m_1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
E_c (kV/cm)	10,98	14,55	18,19	21,82	25,46	29,10
U_c (kV max)	37,5	49,5	124,4	142,3	166,8	185,9

En prenant $m_1 = 0,3$ la tension d'apparition de l'effet couronne $U_c = 26,5$ kV eff, or en pratique nous l'avons enregistré à $U_c = 11$ kV eff ceci s'explique par le fait que la tige filetée possède un coefficient $m_1 < 0,3$.

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ f/m}$$

$$\epsilon_{r_v} = 5 \text{ sachant que } \epsilon_{r_v} \in [3, 5]$$

$$R_3 = 1,8 \text{ mm}$$

$$R_2 = 11,8 \text{ mm}$$

$$R_1 = 13 \text{ mm}$$

2^{ème} essai :

$$R_1 = 2 \text{ mm}$$

$$R_2 = 13,5 \text{ mm}$$

$$R_3 = 14 \text{ mm}$$

$E_c [kV/cm]$	10,60	14,35	17,67	21,21	24,74	28,28
$U_c [kV]$	8,08	10,94	13,43	16,18	18,87	21,57

- **Interprétation des résultats**

Au cours de la réalisation nous avons observé que pour la tige filetée de 3.6mm de diamètre ; l'effet couronne apparaît à une tension seuil de 11kV, accompagné d'un fort bruit. En augmentant la tension à 20 kV, on remarque que la décharge occupe un volume plus important et une couleur bleu violet répartie le long du cylindre en verre. La décharge demeure homogène jusqu'à 25 kV; au-delà de cette valeur le contournement se produit.

Durant un 2^{ème} essai où la tige filetée est remplacée par un fil de 1.20 mm de diamètre, la décharge devient plus homogène car la surface est plus lisse et la tension appliquée atteint 26 kV sans qu'il n'y ait contournement.

Dans le 3^{ème} essai l'électrode haute tension est une tige filetée de 4 mm de diamètre ; la décharge dans ce cas est glissante non uniforme avec plus d'aigrettes.

On remarque que les résultats théoriques s'accordent avec les résultats expérimentaux.

IV.5.3. Calcul de la distance de contournement dc:

Le contournement est un phénomène qui se produit sur la surface d'une isolation, une décharge électrique s'établit à ces extrémités. Pour éviter le contournement on détermine la distance entre les deux électrodes. Nous avons effectué des essais pour une distance de contournement donnée. Les résultats de cette expérience ont montré que le contournement se produit pour une valeur moyenne de la tension de 25 Kv. Dans la suite des essais nous avons maintenu la tension inférieure à cette valeur pour éviter le contournement.

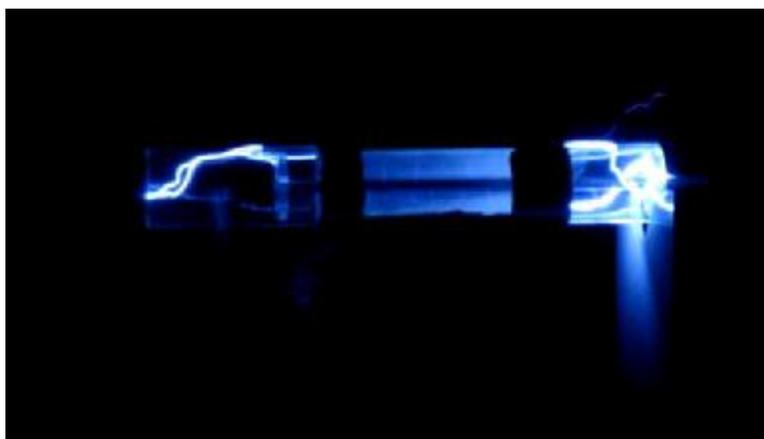


Figure IV.5. Contournement produit au laboratoire H.T

IV.6. Création d'un plasma au labo :

Sous l'effet du champ électrique qui règne à l'intérieur du cylindre des électrons sont accélérés dans le gaz, ils peuvent alors acquérir une énergie suffisante pour arracher d'autres électrons aux atomes neutres du gaz, ainsi ils se multiplient avant même d'être absorbés par l'anode.

Pendant leur chemin ces électrons abandonnent des ions gazeux chargés positivement qui remontent lentement vers la cathode et à chaque fois qu'un ion percute la cathode il libère un nouvel électron à la surface métallique qui va redescendre vers l'anode en se multipliant le long du trajet. Lorsque tous les électrons perdus à l'anode seront remplacés par les électrons émis par la cathode la décharge électrique devient autonome; elle peut alors fonctionner en continu sans l'intervention d'un agent ionisant extérieur.

En réalité tous les chocs entre les électrons et atomes ou molécules ne parviennent pas tous à libérer un électron. Lors du choc d'un électron libre, un électron des couches périphériques de l'atome percuté migre sur une orbitale extérieure plus énergétique; cette orbitale étant instable oblige l'électron à redescendre immédiatement sur son orbital d'origine en émettant des photons lumineux; lorsque le courant délivré est suffisant, la décharge devient luminescente.

En augmentant le courant qui traverse le plasma, un nouveau processus va se manifester: c'est la déformation du champ électrique local par la charge d'espace engendrée par le

plasma. Sachant qu'un plasma est électriquement neutre c'est à dire un volume contenant pratiquement autant d'électrons que d'ions positifs. Cependant il suffit d'un très faible écart à cette neutralité électrique pour que des champs électriques apparaissent localement, avec une intensité de même ordre que celle du champ appliqué.

Dans la décharge luminescente, le plasma étant électriquement conducteur va alors mettre à profit cette propriété pour refouler le champ électrique vers ses frontières. La chute de tension se localise ainsi dans une gaine sombre adjacente à la cathode. La décharge va ensuite se structurer en régions bien distincte en fonction de leur couleur et de leur luminosité.

IV. 7. Déroulement des essais

Notre réalisation qui s'est déroulée au sein du laboratoire Haute tension ; qui a pour intérêt de tester ce modèle de réacteur en faisant appel à un organisme de santé, le laboratoire « Microbiologie » au CHU de Tizi Ouzou.

Pour ce faire, le Dr HAOUCHINE maitre assistante au sein du même organisme ; a mis à notre disposition une souche de bactérie « Escherichia Coli » sur des lames de 4 cm de longueur et de 1 cm de largeur.

Ceci nous a permis de tester aisément le dispositif réalisé dont l'objectif est de mettre en évidence l'efficacité et la rapidité de la stérilisation par plasma froid.

La procédure expérimentale et les résultats obtenus sont illustrés dans les étapes ci-dessous:

- **1^{er} étape : Test d'efficacité**

Nous avons pris quatre lames stériles sous chaleur sèche sur lesquelles on a étalé un écouvillon rempli de bouillon infecté par la souche « Escherichia Coli », un témoin positif a étéensemencé aussi.

Les lames sont posées dans la zone de post décharge durant quatre temps différents ; et à la fin des essais les contenu des lames sont soumis à une culture qui a donné le diagnostic suivant :

Durée [mn]	30 mn	60 mn	90 mn	120 mn
Résultats	Culture négative	Culture négative	Culture négative	Culture négative

2^{ème} étape : Test de rapidité

Durant cet essai nous avons diminué le temps de stérilisation en suivant la même procédure que celle illustrée en haut.

Le diagnostic après culture a donné les résultats suivants :

Durée [mn]	5 mn	10 mn	15 mn	20 mn
Résultats	Culture négative	Culture négative	Culture négative	Culture Négative

Alors que l'analyse la lame témoin (non traitée dans le réacteur) a donné un résultat positif.

Conclusion générale

Le travail que nous avons entrepris dans le cadre de ce mémoire a pour objectif la réalisation d'un générateur à plasma froid pour la stérilisation des matériels médicaux en utilisant une décharge à barrière diélectrique, une technique qui repose sur le processus d'excitation des espèces moléculaires par interaction électronique. Elle est constituée principalement d'un système qui génère une haute tension, et d'un réacteur de traitement à électrodes coaxiales.

Nous avons utilisé ce dispositif pour produire un plasma froid que nous avons utilisé comme moyen alternatif aux méthodes classiques de décontamination/stérilisation qui présentent certains inconvénients et limites. Les résultats que nous avons obtenus sont probants. Nous estimons avoir atteint notre objectif puisque nous avons décontaminé à 100% en un temps très court des lames infectées avec un microbe capable de tuer (*Escherichia Coli*).

La technique que nous avons développée n'existe pas encore en Algérie, nous espérons qu'elle sera développée à l'avenir pour l'améliorer, mieux la maîtriser et l'appliquer le moment venu dans nos établissements de santé.

Références bibliographiques

- (1) www.techno.science.net (29_10_2010 à 14h)
- (2) Cours de haute tension (4eme année ETH) assuré par Mm HANDALA à l'université M. Mammeri de T.O .
- (3) Robert Fournié « Les isolants en électricité concepts et théories » ELT63 vol VI
- (4) M. Aguet, M Lanoz « Traité d'électricité » vol XXII
- (5) Axel VINCENT (conception et simulation d'un réacteur fil_cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans effluents marqués par un isotope) Thèse de doctorat de l'université de Paris ; année 2002.
- (6) M.M.A.Handala ;(Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50Hz) Thèse de doctorat 2007.
- (7) F.Lounes ;(Contribution à l'étude du vieillissement électrique d'interfaces isolantes air –solides) ;mémoire de fin d'études UMMTO,2007.
- (8) Université A.MIRA.Béjaia(Effet de l'épaisseur d'un écran pollue sur la rigidité dielectrique d'un système d'électrodes à champ non uniforme)
- (9) [www.service météorologique du canada](http://www.service.meteorologique.du.canada) (8.12.2010 à 21H51mn.
- (10) « Influence d'une barrière diélectrique sur une décharge couronne en géométrie pointe-plan », Thèse ING, ETH, 2006.
- (11) Hamouimeche Kaissa ; « Etude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan ;Thèse de Magister ;ETH ;2009.
- (12) B.Bouvier, « papier et papier imprégné », Techniques d'ingénieur, traité génie électrique, D280, pp. 1-22, 1983.
- (13) L.Mokhnache, « Contribution à l'étude de l'influence des barrières dans les intervalles d'air pointe-plan par le calcul numérique du champ à l'aide de la méthode des éléments finies avec et sans charge d'espace, Thèse Magister ; Université de Batna ; Juillet 1997.
- (14) Alexandre Labergue, « Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasma, application au contrôle de décollements. Novembre 2005.
- (15) Alban Suble, « Caractérisation de décharges à barrières diélectriques atmosphériques et sub-atmosphériques et application à la déposition de couches

d'oxyde de silicium » ; Thèse de doctorat, Université de Savoie, Annecy, France, juin 2007.

- (16) Mr BOULEGHLIMAT OUSSAMA « Traitement de surfaces de films de polymide par une décharge à barrière diélectrique » ; Thèse de Magister ; Université MENTOURI DE CONSTANTINE, Année 2009.
- (17) DAILL GHILLAUME ; FOURNAUD BENOIT « Décharges couronnes, Applications et modélisation » ; Thèse de magister ; Année 2004_2005.
- (18) ANTOINE COUDERT « Technique de stérilisation par les plasmas froids » ; Thèse de Doctorat ; Ecole Nationale Vétérinaire d'Alfort, Année 2007.
- (19) PH 106, Physiques des plasmas ; volume 5. Stérilisation et désinfection des instruments : III ; La stérilisation. Mignard JP.