

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère De L'Enseignement Supérieur et De La Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Électrique & D'Informatique
Département D'Électrotechnique



Mémoire

De Fin D'Études

En Vue de L'Obtention Du Diplôme D'Ingénieur D'État En Électrotechnique
Option Réseau Électrique

Thème

Etude d'un réacteur à décharge plasma pour la décontamination de surface

Proposé et Dirigé Par:

Mr M.A.HANDALA

Réalisé par :

M^{elle} : BELKHIR Meriem

M^{elle} : MACHANE Wassila

PROMOTION JUIN 2012

Thèse

Etude d'un réacteur à décharge plasma pour la décontamination de surface

Meriem BELKHIR, Wassila MACHANE.

Remerciements

Dans le cadre de la réalisation de notre étude sur la décontamination de surface par plasma, nous tenons à remercier :

Monsieur M.A.HANDALA, maître de conférences A à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de nous encadrer, et mis à notre disposition l'ensemble des informations nécessaires à la bonne réalisation de notre mémoire, ainsi que sa disponibilité à notre égard.

Le docteur D. HAOUCHINE, maître-assistante au laboratoire «Microbiologie» du CHU de Tizi-Ouzou, pour avoir mis à notre disposition tout le matériel nécessaire à la réalisation de nos études expérimentales.

M^{elle} KIRECHE, M^{elle} ZEBOUJ, M^r BELHITECHE, M^r GOUDJIL, doctorants au sein de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour l'aide qu'ils nous ont apporté.

M^{elle} F. HAOUCHINE, biologiste au sein du laboratoire de Microbiologie.

Les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail.

Dédicaces

*Nous dédions notre travail à toutes les
personnes qui nous sont chères*

Nos parents.

Nos frères et sœurs.

Nos ami(e)s.



SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE I : méthodes de décontamination

I.1.Introduction	3
I.2.Rappel sur la décontamination	3
I.3.Les décontaminations usuelles	3
I.3.1.Moyens physiques de décontamination	4
I.3.1.1.Introduction	4
I.3.1.2.Décontamination par la chaleur sèche dans un four Poupinel	4
I.3.1.3.Décontamination par la chaleur humide dans un autoclave	5
I.3.1.4.Décontamination par les radiations ionisantes.....	7
I.3.2.Moyens chimiques de décontamination.....	8
I.3.2.1.Introduction.....	8
I.3.2.2.Décontamination par immersion à froid dans une solution antiseptique	8
I.3.2.3.Décontamination par les gaz	8
Stérilisation par l'oxyde d'éthylène	8
I.4.Décontamination par plasma froid.....	9
I.4.1.Définition et caractéristique du plasma.....	10
I.4.1.1.Introduction.....	10
I.4.1.2.Les plasmas froids.....	10
I.4.1.3.Plasmas, gaz ionisés et décharges électriques.....	11
I.4.1.4.Le rayonnement et le flux de post-rayonnement d'un plasma.....	12

CHAPITRE II : Description et caractérisation des réacteurs plasma

II.1.Plasmas de décharges : mode d'action et espèces actives	15
II.1.1.Les premiers pas de la stérilisation par plasma	15
II.1.2.Mode d'action d'un plasma de décharge et identification des particules actives.....	16
a. Rôle du gaz ou du mélange de gaz	16
b. Influence de la densité énergétique dans la zone de décharge	16
c. Rôle des Ultraviolets	17
d. Rôle des atomes d'oxygène	17
e. Influence du type de microorganismes	18
II.1.3.Pouvoir stérilisant d'un plasma	19
a. Erosion de la paroi par les molécules neutres	19
b. Action des UV sur l'ADN bactérien	19
c. Erosion de la paroi des bactéries par les UV	20

I NTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Anthrax, maladie de la vache folle, armes biologiques, ces mots ont rempli les manchettes, ce qui augmente l'anxiété dans le monde entier. La menace d'un tel risque biologique, naturel et artificiel, a créé des défis sans précédent pour les établissements de santé publics et hôpitaux. Ces risques biologiques exigent des techniques de décontamination rapides et efficaces.

Les méthodes de décontamination médicales demeurent inchangées depuis un certain moment. La décontamination par chaleur humide est aujourd'hui considérée comme la technique de référence.

Il existe différentes méthodes de décontamination. Elles se divisent en deux catégories:

- Les techniques utilisant des températures de traitement élevées.
- Les techniques utilisant des températures ambiantes ou quasi-ambiantes, dites « à froid ».

Les techniques utilisant des températures élevées, et en particulier les procédés à « vapeur saturée » (autoclave) sont actuellement les techniques de référence.

Ces techniques possèdent néanmoins quelques limites, à savoir leur agressivité vis à vis d'instruments thermosensibles (endoscopes...), ainsi que leur pouvoir fortement oxydant préjudiciable au long cours pour les instruments chirurgicaux.

Les techniques « à froid » utilisent jusqu'à présent l'oxyde d'éthylène. Les limites de ces techniques sont à l'heure actuelle, la toxicité des produits pour le manipulateur ainsi que leur inactivité vis à vis des Agents Transmissibles Non Conventionnels.

Introduction générale

Des techniques alternatives ont été développées afin de pallier ces problèmes, avec au centre des recherches depuis les années 1990 l'utilisation des plasmas froids.

Les physiciens considèrent le plasma comme étant le quatrième état de la matière, avec par ordre d'énergie croissante : l'état solide, l'état liquide, l'état gazeux et enfin le plasma. Ce dernier état est retrouvé dans la composition des étoiles, il prend la forme d'un gaz uniquement formé d'ions et d'électrons libres. Les plasmas utilisés en décontamination sont plus froids que les plasmas « naturels » et sont des gaz ionisés qui comprennent aussi d'autres particules non chargées comme des atomes, des molécules mais aussi des radicaux libres, c'est à dire un atome ou une molécule hautement instable possédant un électron non apparié.

La première partie de ce travail fait un état des lieux des techniques actuellement employées dans le cadre de la décontamination. Nous établissons un bilan des caractéristiques de ces différentes techniques dans le but de faire une comparaison avec la technique « plasma froid ».

La deuxième partie traite des conditions nécessaires à la formation d'un plasma, les mécanismes physico-chimiques qui confèrent à cette technique son pouvoir décontaminant ainsi qu'une description du réacteur plasma utilisé.

La troisième partie de ce travail présente les expériences réalisées dans le but de tester l'efficacité du procédé plasma.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

1

Méthodes de décontamination

"On ne connaît bien une science que

lorsqu'on en connaît l'histoire"

Auguste Comte

I.1. Introduction

En de multiples occasions de la vie de tous les jours, les bactéries peuvent constituer une nuisance ou même un danger. Nous avons donc besoin de méthodes pour les éliminer ou pour les empêcher d'agir [1].

I.2. Rappel sur la décontamination

La décontamination est la destruction de tous les micro-organismes (bactéries, virus et spores) présents sur un support. Les supports dont il est question sont surtout les objets (par exemple : instruments chirurgicaux, aiguilles, surfaces...) [2]. On emploie soit des méthodes physiques (utilisation de la chaleur, sèche ou humide, comme dans l'étuve de Poupinel, ou l'autoclave, emploi de rayonnements ultraviolets, de rayons gamma ou d'électrons accélérés), soit des méthodes chimiques (application d'un produit chimique liquide ou gazeux, tel le formol).

I.3. Les décontaminations usuelles

Les méthodes de décontamination des instruments ou autres incluent :

- la chaleur, sèche ou humide,
- les composés chimiques,
- les plasmas,
- les radiations ionisantes.

L'efficacité de chacune de ces méthodes de décontamination dépend du nombre, du type et de la résistance des micro-organismes présents sur les objets à décontaminer ou de la présence de substances comme l'huile qui peut jouer un rôle de bouclier et rendre inefficace le processus de décontamination [2].

I.3.1. Moyens physiques de décontamination

I.3.1.1. Introduction

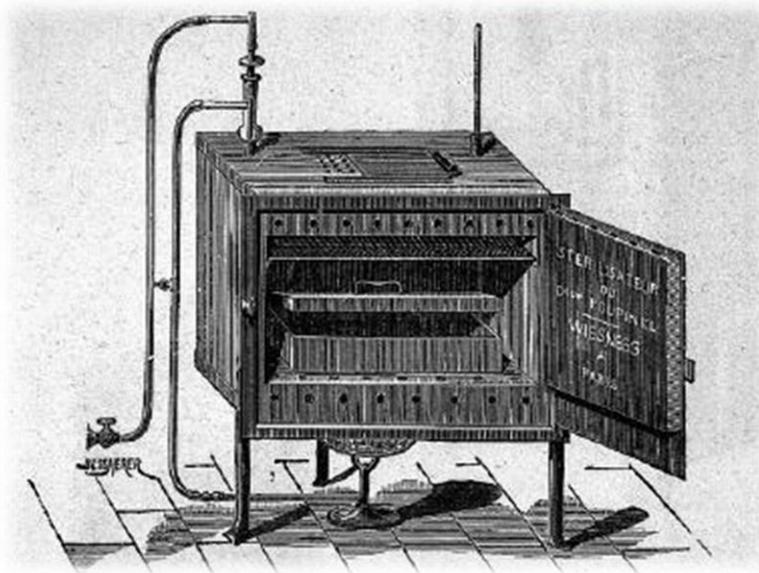
Les méthodes physiques sont employées souvent pour réaliser les décontaminations, les désinfections et les stérilisations microbiennes. La chaleur, le rayonnement et la filtration peuvent détruire ou éliminer les micro-organismes indésirables. Ces méthodes empêchent les développements microbiens ou permettent de décontaminer des secteurs ou des matériaux hébergeant des microbes [3].

I.3.1.2. Décontamination par la chaleur sèche dans un four Poupinel

Cet appareil est utilisé pour la décontamination des objets résistants à la chaleur, comme la verrerie propre, les instruments chirurgicaux en acier inoxydable ou les compresses. On y maintient une température de 160 à 170 °C pendant 60 à 90 minutes, ce qui dénature les protéines, dessèche le cytoplasme et oxyde divers composants de tout organisme présent. L'air à l'intérieur du four devrait être maintenu en circulation au moyen d'un ventilateur, afin d'assurer que la température requise soit atteinte en tout endroit. Et le matériel à décontaminer devrait être disposé de manière telle qu'il n'empêche pas l'air de circuler [1]. C'est le mode de décontamination le plus répandu car son coût est peu élevé mais il présente des inconvénients :

- Procédé lent (le four n'atteint pas immédiatement les 170°C requis : il faut donc en moyenne placer les instruments 1h30 au four) [2].
- La stérilisation du linge par cette méthode le fragilise très vite, ce qui lui fait perdre ses qualités de barrière vis-à-vis des germes [2].

- L'air est un mauvais conducteur de chaleur, les objets sont comme isolés par un coussin d'air, ils ne sont donc pas toujours portés à une température suffisante. Ce défaut de conduction de chaleur est par ailleurs aggravé lors de surcharge du four, ou lorsque les charges sont mal réparties [2].



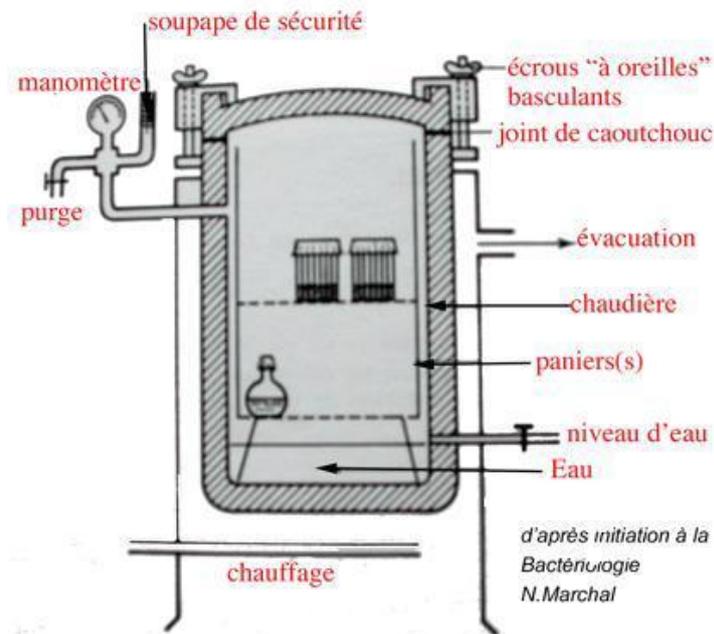
Etuve sèche de Poupinel

I.3.1.3. Décontamination par la chaleur humide dans un autoclave

La décontamination par la chaleur humide aboutit à une hydrolyse des protéines bactériennes par action conjuguée de la chaleur, de l'humidité et d'une pression élevée, qui permet d'atteindre des températures de vapeur d'eau saturante plus haute qu'à pression atmosphérique [2].

L'autoclave doit donc être capable de supporter de fortes pressions. En comparaison avec la chaleur sèche, la chaleur humide permet à une température plus basse, une élimination plus rapide des micro-organismes. On explique ces performances par le fait que l'eau est un meilleur conducteur de chaleur que l'air [2].

SCHEMA AUTOCLAVE VERTICAL



Trois paramètres sont à prendre en compte lors de décontamination à l'autoclave (2):

- La pression.
- La température.
- Le temps de décontamination.

Cette méthode est rapide et arrive à décontaminer presque tout le matériel chirurgical : linge, bistouris électriques, drains en caoutchouc, moteurs pneumatiques contrairement au four Poupinel, néanmoins elle présente plusieurs inconvénients :

- Toutes les surfaces à décontaminer doivent être exposées à la vapeur. La présence de poches d'air, l'utilisation de contenants hermétiques ou la présence de corps gras à la surface des matériaux sont les principales restrictions à la décontamination par autoclave.

- Cette méthode ne tolère aucune imprécision lors de son utilisation.

En effet, l'air doit être éliminé en intégralité de l'enceinte. Si de l'air est mélangé à la vapeur d'eau, cette dernière n'est plus saturante et on ne peut atteindre les mêmes températures qu'avec de la vapeur d'eau seule. Ceci est à l'origine d'un non-respect des conditions efficaces de décontamination. De plus, comme nous l'avons vu précédemment, l'air est un isolant thermique, sa présence est donc un frein aux transferts de chaleur [2].

I.3.1.4. Décontamination par les radiations ionisantes

Les radiations ionisantes par exemple, les rayons beta (électrons), les rayons gamma, les rayons X- décontaminent en fournissant l'énergie pour toute une variété de réactions chimiques létales dans les organismes contaminants [1]. La radiation ionisante produit des électrons e^- , des radicaux d'hydroxyle, OH et des radicaux libres H. Chacune de ces molécules, fortement réactives, est capable de changer et de perturber des bio-polymères tels que l'acide désoxyribonucléique (ADN) et les protéines. L'ionisation et la dégradation de ces bio-polymères mènent à la mort des cellules irradiées [3]. Les rayons gamma (provenant habituellement d'une source de cobalt) sont largement utilisés pour la décontamination d'équipements biologiques préemballés, les boîtes de Petri en plastique et les seringues [1].

La technique de décontamination par radiations ionisantes peut atteindre des temps de fonctionnement extrêmement courts et ne génère pas une chaleur excessive, ce qui permet la décontamination du matériel thermosensible. Cependant, il existe beaucoup de limitations et de complexités dans l'utilisation des radiations ionisantes. Ce manque de souplesse de la méthode la contraint pour l'heure au domaine industriel [2].

I.3.2. Moyens chimiques de décontamination

I.3.2.1. Introduction

Les produits chimiques utilisés pour la décontamination sont nécessairement très réactifs et endommagent les tissus vivants. Ils exigent, par conséquent, une manipulation prudente, et ne sont guère employés que par les grandes firmes disposant de l'équipement et du personnel requis [1].

I.3.2.2. Décontamination par immersion à froid dans une solution antiseptique

Les solutions commerciales, qui sont de plus en plus utilisées pour la décontamination et la désinfection de matériel non stérilisable par des moyens physiques, contiennent en plus des inhibiteurs de la corrosion. Une solution de glutaraldéhyde à 2% est adéquate pour la décontamination des instruments chirurgicaux, ils y sont complètement immergés pendant une heure. Les instruments doivent être soigneusement rincés avant tout contact avec des tissus vivants et ensuite séchés (avec une compresse stérile par exemple), avant d'être utilisés, le plus rapidement possible après la décontamination [2].

I.3.2.3. Décontamination par les gaz

- Stérilisation par l'oxyde d'éthylène

L'oxyde d'éthylène compte parmi les gaz décontaminant le plus efficace. C'est un gaz au pouvoir bactéricide, virucide et sporicide puissant par dénaturation des acides nucléiques et des protéines des micro-organismes.

C'est un procédé chimique de décontamination à basse température (55°C) applicable à des objets thermosensibles qui ne supportent ni la chaleur sèche, ni la chaleur humide (matériel électronique, caméras, microscopes, appareils photos,...).

Utilisée pour le matériel thermosensible (PVC, caoutchouc), la décontamination par l'oxyde d'éthylène est un mode de décontamination contraignant, pratiqué uniquement en service spécialisé (unité centrale de décontamination et surtout en industrie). Ce procédé est complexe à mettre en œuvre. Il nécessite une installation particulière et d'importantes précautions. Il possède une toxicité immédiate et retardée. Il est toxique pour le personnel par inhalation et par contact. Il est toxique pour les malades par voie entérale et par réactions avec différents corps chimiques.

Il forme un mélange explosif en se combinant avec l'oxygène de l'air [4].

I.4. Décontamination par plasma froid

Les études sur la décontamination par plasma ont débuté au cours des années 1990. La recherche porte sur l'application des plasmas pour la décontamination d'objets médicaux mais également des produits alimentaires.

L'avantage principal de cette technique réside dans le fait que l'essentiel de l'énergie introduite est utilisée pour la génération d'électrons hautement énergétiques conduisant à la production d'espèces réactives, ce qui minimise l'énergie perdue dans le chauffage du volume gazeux [5]. La mise en œuvre du plasma s'effectue ainsi à température inférieure à 70°C (voire ambiante) ce qui convient tout particulièrement à la décontamination des objets ou des matières thermosensibles, qui risqueraient de se détériorer sous l'effet des hautes températures qu'impliquent certains procédés traditionnels; les plasmas froids permettent, par ailleurs, d'éviter un certain nombre d'autres agressions physicochimiques pouvant parfois être constatées avec ces derniers, notamment à l'égard d'objets en matériaux polymères.

Enfin, la décontamination par plasma froid présente l'avantage de ne générer que des effluents gazeux aussi bien inoffensifs pour l'opérateur, que totalement respectueux de l'environnement.

I.4.1.Définition et caractéristique du plasma

I.4.1.1.Introduction

La notion de plasma a été introduite par Langmuir en 1923. Ce 4ème état de la matière, que l'on retrouve dans les étoiles et le milieu interstellaire, constitue la majorité de notre univers (environ 99%). Le plasma est défini comme étant un milieu gazeux ionisé électriquement neutre contenant des ions (cations et anions), des électrons et des neutres (atomes, molécules et radicaux).

On distingue deux types de plasma, selon sa température :

- les plasmas "chauds" : plasma thermonucléaire dont la température est de l'ordre de 5.10^7 K.
- les plasmas "froids" dont la température est inférieure à 50 000 K [6].

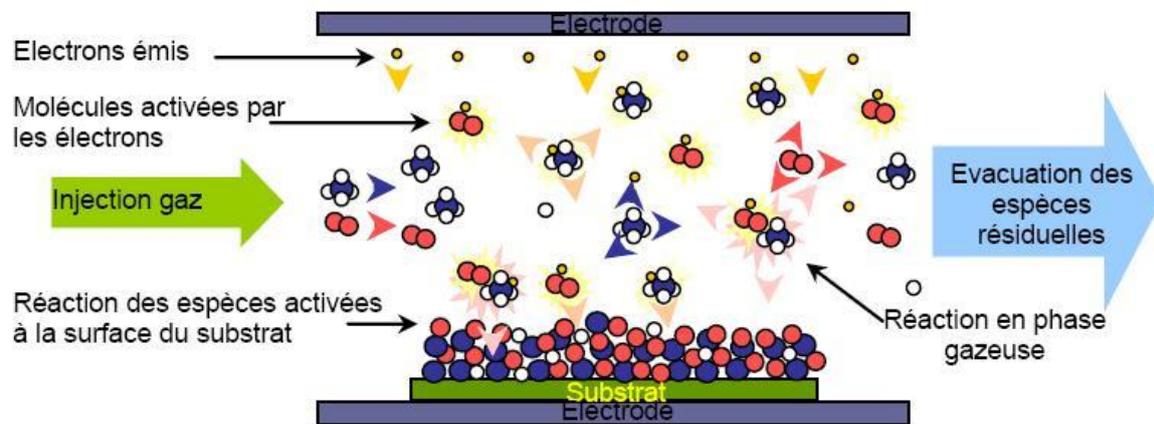
I.4.1.2. Les plasmas froids

Les plasmas froids sont des milieux ionisés obtenus par l'excitation d'un gaz (en général sous un vide primaire) sous l'effet d'une décharge électrique : les plasmas radiofréquence (kHz au MHz) et micro-onde (2.45 GHz) sont les plus couramment utilisés.

On obtient ainsi un mélange constitué de molécules neutres (majoritaires) d'ions (négatifs et positifs), d'électrons, d'espèces radicalaires (chimiquement très actives) et d'espèces excitées.

Ces plasmas sont dits "froids" car ce sont des milieux hors équilibre thermodynamique où l'énergie est captée essentiellement par les électrons mais où la température "macroscopique" du gaz reste voisine de la température ambiante [7].

Le processus réactionnel est décrit dans le schéma ci-dessous :



I.4.1.3. Plasmas, gaz ionisés et décharges électriques

Les plasmas utilisés pour la décontamination sont beaucoup plus froids et sont actuellement des gaz ionisés : en plus d'ions et d'électrons, les gaz ionisés comportent des particules neutres (atomes, molécules) et des radicaux libres (atome ou ensemble d'atomes possédant un électron non apparié, chimiquement réactif) que l'on regroupera sous le nom de neutrals [2].

Les ions et les neutrals possèdent une grande énergie interne et se caractérisent par une haute instabilité (l'énergie étant nulle dans un état de stabilité maximal). Le retour à un état plus stable de moindre énergie (vers lequel la particule considérée tend spontanément à revenir) peut se faire soit en émettant un photon, soit en transmettant une partie de l'énergie lors d'une collision avec une autre particule ou une surface. La collision avec une surface peut aboutir à une perte énergétique matérialisée sous la forme d'un composé volatil (qu'il conviendra d'extraire de l'enceinte) ou à l'absorption de la molécule activée par la molécule cible (protéine de surface d'un micro-organisme).

Les photons émis lorsque les composés activés retournent à un niveau de moindre énergie, peuvent eux-mêmes induire des réactions chimiques, les photons UV étant particulièrement efficaces à cet égard [2].

Les plasmas fabriqués par l'homme sont le plus souvent issus d'un gaz ou d'un mélange de gaz (air, O₂) soumis à un champ électrique (entre deux électrodes), ce champ peut être généré soit en courant continu, soit en courant alternatif. La zone où les gaz sont soumis au champ électrique est appelée zone de « décharge-électrique », le flux gazeux émanant de ce mélange se trouvant dans la zone « de post-décharge » [2].

Le champ électrique accélère les particules chargées, et plus spécifiquement les électrons, les ions étant beaucoup plus lourds, et l'énergie de ce champ est instantanément transmise au plasma par le biais des collisions entre les électrons et les particules lourdes qui constituent le gaz originel [2].

I.4.1.4. Le rayonnement et le flux de post-rayonnement d'un plasma

Comme il est de règle dans les plasmas de décharge, le volume gazeux soumis au champ électrique devient assez lumineux (libération de photons UV), c'est pourquoi les physiciens parlent de décharge rayonnante [2].

Quand la décharge a lieu dans un flux de gaz, certaines des espèces chimiques formées dans la zone de rayonnement peuvent être repoussées dans une enceinte dépourvue de champ électrique, on obtient alors ce que l'on appelle un flux de post-rayonnement, ce qui correspond à un flux de gaz issu de la zone de décharge, mais qui n'est plus soumise au champ électrique [2].

La décontamination peut être obtenue soit dans la zone de rayonnement (zone de décharge), on utilise alors les vertus décontaminant du plasma lui-même, soit on utilise le flux gazeux émanant du plasma (flux de post-rayonnement) au niveau de la zone de post-décharge. La zone de décharge se caractérise par la présence de particules chargées (ions et électrons), extrêmement réactives. Comparée à la zone de rayonnement, celle de post-rayonnement contient peu de particules chargées, on trouvera dans cette dernière essentiellement des atomes neutres, des radicaux libres et des molécules (certains de ces composants étant dans un état d'excitation). Les espèces qui nous intéressent sont les particules qui ont une durée de vie courte, c'est-à-dire des molécules instables et actives en l'occurrence ce que l'on nomme :

espèces réactives d'oxygène Réactive Oxygène Species et d'azote Réactive Nitrogène Species (on retrouvera les ROS et les RNS dans un plasma issu d'un mélange gazeux O_2+N_2).

Pour tirer profit de la potentielle activité des particules néoformées, une condition est nécessaire : le flux de plasma doit avoir une vitesse suffisamment élevée afin de permettre la projection des particules actives sur la cible (si la vitesse de flux est inférieure à un certain seuil, les molécules actives qui ont une durée de vie courte auront disparu avant l'impact).

On trouve parmi les ROS : l'atome d'oxygène O, l'ozone O_3 , le radical hydroxyle $OH\bullet$, et parmi les RNS : l'atome d'azote N, le monoxyde d'azote NO, et le dioxyde d'azote NO_2 .

Ce sont les électrons qui sont à l'origine de l'initiation de la réaction en chaîne, ils transmettent une partie de leur énergie lors de collisions avec les molécules qui composent le mélange gazeux initial. C'est cet apport d'énergie qui autorise la rupture de liaisons stables et engendre la formation d'atomes libres d'oxygène et d'azote [2].

Ces atomes libres sont dans un état instable caractérisé par une haute valeur d'énergie potentielle.

Ils tendent naturellement à retourner vers un état de moindre énergie et doivent pour cela en libérer. Cette libération peut se faire de deux façons différentes :

- soit en établissant une nouvelle liaison à l'origine de la formation de nouvelles particules (O va réagir avec O_2 et former de l'ozone O_3).
- soit en libérant de l'énergie sous forme d'un photon (à l'origine du rayonnement) [2].

2

Description et caractérisation du réacteur plasma

"A l'origine de toute connaissance, nous rencontrons la curiosité !

elle est une condition essentielle du progrès. "

Alexandra David-Néel

II.1. Plasmas de décharges : mode d'action et espèces actives

II.1.1. Les premiers pas de la stérilisation par plasma

Les premiers pas de la décontamination par plasma ont été rappelés par différents auteurs.

La mise au point du premier stérilisateur par plasma se situe, chronologiquement, bien

après le développement du premier stérilisateur à vapeur d'eau (autoclave) par

Chamberland (1880) et du premier stérilisateur à air chaud par Poupinel (1884). De fait, les

premiers travaux remontent à un brevet de Menashi en 1968 qui utilisait un champ RF

pulsé pour entretenir un plasma d'argon à la pression atmosphérique et décontaminer

l'intérieur d'un récipient, par exemple une bouteille. Une électrode linéaire était insérée

dans le récipient, tandis qu'un autre conducteur enroulé autour du récipient servait

d'électrode de masse. Ce système permettait de décontaminer des bouteilles contenant des

dépôts de 10^6 spores en moins d'une seconde.

L'action biocide résidait selon Menashi en un chauffage intense des spores en un temps

suffisamment court pour ne pas endommager le récipient. Ce mécanisme fut plus tard

appelé micro-incinération par Peebles et Anderson.

Au milieu des années 1990, Laroussi utilisa une décharge à barrière diélectrique (DBD) en

mode diffus à la pression atmosphérique pour décontaminer des surfaces. Parallèlement, de

nombreux dispositifs de décontamination par plasma ont été mis au point avec différentes

configurations géométriques et modes d'action, à la fois à pression réduite et à la pression

atmosphérique. L'un des travaux majeurs pendant cette période fut celui de Lerouge et al,

qui ont notamment démontré que la composition du gaz est un facteur déterminant de

l'efficacité biocide d'un plasma [8].

II.1.2.Mode d'action d'un plasma de décharge et identification des particules actives.

Étudier les mécanismes de décontamination par plasma consiste principalement à déterminer l'efficacité biocide de chacune de ces espèces. Ce point n'est pas trivial car il est parfois difficile de trouver des conditions opératoires permettant d'isoler certaines espèces uniquement. Les espèces biocides d'un plasma sont principalement les rayons ultra-violet (UV) et les radicaux.

a. Rôle du gaz ou du mélange de gaz

L'utilisation du gaz plasma représente une alternative intéressante pour la décontamination grâce à ses propriétés intrinsèques. Dans cette méthode, le ou les gaz n'ont pas d'effet biocide avant d'avoir été activés par une décharge électrique. Les réactions de ces particules ne se produisent que quelques millisecondes après l'application du champ électrique. Cela signifie qu'il n'y a pas nécessité de phase d'aération, ce qui présente moins de risque pour le personnel.

Ratner et ses collègues (1990) ont montré que la décontamination au plasma est efficace avec la plupart des gaz testés: O₂, N₂, air, H₂, halogènes, N₂O, H₂O, H₂O₂, CO₂, SO₂, SF₆, aldéhydes, acides organiques etc. [9]

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

L'augmentation de la puissance provoque une hausse de la densité électronique donc, de la densité d'espèces actives. Ainsi, Boucher (1985) et Khornisch et al. (1997) ont montré une hausse de l'activité sporicide en augmentant la puissance.

Ceci est tout à fait logique puisque l'on augmente ainsi la densité de toutes les espèces actives. La puissance doit cependant rester limitée pour diminuer les coûts et surtout pour ne pas chauffer le matériel à décontaminer [10].

c. Rôle des Ultraviolets

Il a été clairement établi que l'effet des photons ultraviolets sur les micro-organismes varie selon leur longueur d'onde (c'est à dire leur énergie), ce qui est représenté par le spectre d'action où l'efficacité à produire un certain effet est reporté en fonction de la longueur d'onde de la radiation (Giese, 1968 ; Parrish, 1978). Il a ainsi été montré pour de nombreux micro-organismes que le maximum des spectres d'inactivation des ultraviolets entre 200 et 400 nm se situait autour de 260 nm, ce qui correspond à un pic d'absorption de l'ADN et de l'ARN (Giese, 1968 ; Munakata et al ; 1986 ; Parrish et al; 1978; Russell, 1993 ; Tortora et al ; 1994).

De 220 à 320 nm (UV-C et UV-B), le spectre d'inactivation des micro-organismes suit de près le spectre d'absorption de l'ADN (Moan et Peak, 1989)' indiquant que l'ADN est le principal chromophore dans cette région spectrale, c'est à dire que les dommages à l'ADN (brisures de chaîne, réticulations, et accumulation de photo-produits) sont la cause principale de mortalité induite par ces photons UV (Panish et al ; 1978 ; Russell, 1993 ; Tortora et al ; 1994) [10].

d. Rôle des atomes d'oxygène

Baier et al. (1992) montrèrent que le plasma d'argon pouvait détruire 99% de micro-organismes en quelques minutes. Il est cependant vite apparu que la présence d'espèces actives oxygénées est fondamentale pour l'efficacité de la décontamination puisque les plasmas contenant de l'oxygène sont beaucoup plus efficaces.

En 1986, Lin considère exclusivement le type de radicaux libres créés dans le plasma (sans les déterminer expérimentalement) pour expliquer les différences observées entre les différents gaz testés : il en déduit que les radicaux OH et HO₂ sont les plus efficaces (Addy, 1989 ; Lin, 1986). Nelson et Berger (1989), quant à eux, attribuèrent la bonne efficacité du plasma O₂ à l'action de l'oxygène atomique, très réactif. L'oxygène moléculaire excité peut également jouer un rôle destructeur : Maugh (1973) a montré qu'il s'agit d'un agent bactéricide efficace, dont il présente les différents mécanismes possibles de destruction sur les cellules.

e. Influence du type de microorganismes

Les bactéries sont des organismes vivants unicellulaires dépourvus de noyau: l'ADN est libre dans la cellule. Elles ont des dimensions de quelques micromètres de longueur, variables d'un genre à un autre, et peuvent présenter différentes morphologies: sphériques (coques), allongées ou en bâtonnets (bacilles), plus ou moins spiralées [3]. L'état sporulé est un état de latence dans lequel la bactérie a un métabolisme très réduit voire nul. Cette forme lui procure une résistance extraordinairement élevée aux procédés de décontamination comparativement aux autres types de micro-organismes (champignons, virus etc.) et aux cellules car l'enveloppe et l'ADN de la bactérie sont protégés par une succession d'enveloppes c'est pourquoi les endospores bactériennes sont en général utilisées pour tester et valider l'efficacité des procédés de décontamination.

II.1.3. Pouvoir stérilisant d'un plasma

a. Erosion de la paroi par les molécules neutres

Les espèces actives formées dans la zone de post-décharge amènent une érosion des micro-organismes. Lerouge et al ont démontré l'importance de l'effet de la volatilisation de la matière organique en décharge en utilisant un plasma réactif (un mélange O_2/CF_4 connu pour son efficacité à éroder les polymères) [8]. Cette érosion, atome par atome appelée «gravure» entraîne une lyse de la membrane provoquant une fuite du cytoplasme dans le milieu extracellulaire et facilitant ainsi l'exposition du matériel génétique à l'action délétère des UV. Il est à mentionner que la gravure est encore plus puissante dans la zone de décharge où les molécules actives sont des ions et des électrons. Néanmoins, l'inactivation des micro-organismes par l'érosion due aux espèces actives est à l'origine de l'altération des matériaux que l'on cherche à décontaminer.

b. Action des UV sur l'ADN bactérien

Comme nous l'avons vu précédemment, les UV jouent un rôle essentiel dans le mécanisme de décontamination par les plasmas. En effet, il a été démontré que les bases puriques et pyrimidiques de l'ADN absorbent fortement les UV avec un maximum à la longueur d'onde de 260 nm, ces derniers grâce à leur énergie peuvent induire un maximum de dommage à l'ADN des micro-organismes [8]. Moisan et al montrent que seules les post-décharges produisant des UV, ont une action stérilisante efficace. Les post-décharges produisant uniquement des atomes d'oxygène gravent les bactéries, atome par atome, mais ne permettent pas d'atteindre une inactivation de 6 log [11].

c. Erosion de la paroi des bactéries par les UV

En plus de son efficacité directe sur les micro-organismes, le rayonnement UV pourrait aussi accélérer la gravure par un éventuel effet synergétique avec les autres espèces actives du plasma. Les UV se matérialisent sous forme de photons hautement énergétiques, lorsqu'ils frappent la bactérie, une partie de leur énergie est absorbée par les molécules qui composent la paroi des micro-organismes, cet apport d'énergie est suffisant pour briser certaines liaisons covalentes (Morosoff, 1990) provoquant ainsi la destruction atome par atome de la paroi.

II .2 .Montage expérimental

La géométrie proposée pour réaliser ce type de réacteur est une configuration coaxiale, c'est-à-dire que l'électrode haute tension est située au centre d'un tube en verre, et que la deuxième électrode, mise à la terre, est située à l'extérieur du tube.

II.2.1. Description du réacteur plasma

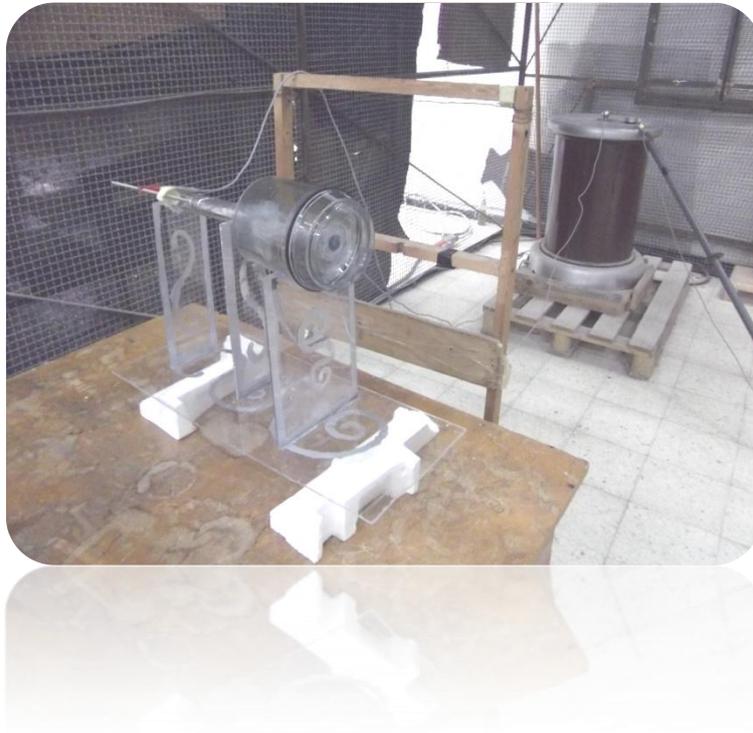
Le réacteur plasma qui a servi à cette étude est composé de quatre parties:

- l'alimentation électrique
- les électrodes
- la barrière diélectrique
- la chambre de traitement.

Il a été développé et construit au sein du laboratoire Haute tension de notre département.

La géométrie de décharge à barrière diélectrique choisie est de type tige-cylindre il s'agit là d'une décharge en volume.

L'ensemble du dispositif expérimental est représenté sur la photo



Pour une plus grande compréhension, la figure ci-dessous représente ce dispositif de manière simplifiée

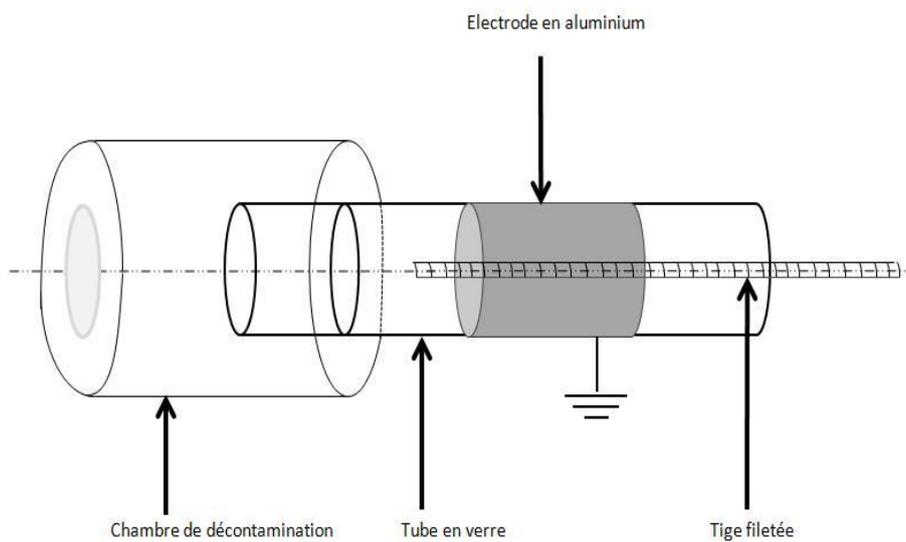


Schéma du dispositif utilisé

➤ L'alimentation électrique

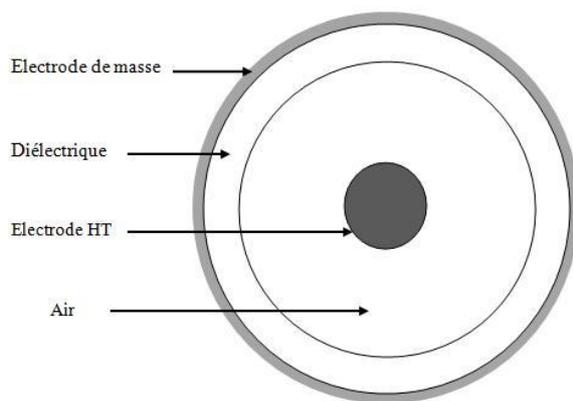
L'alimentation électrique est fournie par un générateur alternatif à haute tension allant de 0kV à 100kV, la fréquence étant de 50 Hz



➤ Les électrodes

L'électrode à champ fort est fabriquée à partir d'une tige filetée en acier inoxydable usinée de saignées longitudinales, de manière à créer autant de "pointes" sur lesquelles s'accrochent les décharges. Elle est longue de 350 mm et a un diamètre de 4 mm. Elle est placée au centre du tube en verre.

L'électrode à champ faible est constituée d'une feuille d'aluminium étroitement enroulée autour du diélectrique. La distance inter-électrodes est de 11.5 mm. Une coupe transversale du réacteur est donnée sur la figure qui suit.



Coupe transversale du réacteur, tige filetée.

➤ La barrière diélectrique

Un tube en verre de diamètre intérieur 20mm, d'épaisseur 3.5 mm et de longueur 240mm constitue la barrière diélectrique. L'avantage apporté par la barrière diélectrique est la tolérance aux disparités géométriques. Il n'y a pas de passage à l'arc de la décharge.

➤ La chambre de traitement

les échantillons biologiques sont déposés à l'intérieur d'une chambre de 1000 cm³ entièrement en Plexiglas, elle contient deux ouvertures, dans la première nous avons introduit le tube en verre que nous avons scellé avec du silicone pour permettre la décontamination en poste décharge. La deuxième nous donne l'accès à la chambre pour y déposer les lamelles en verre contaminées.

3

Applications pratiques des gaz plasmas « désinfection de surface »

"Ne me dites jamais qu'un problème est difficile :

s'il n'était pas difficile, ce ne serait pas un problème. "

Maréchal Foch

III.1.Introduction

L'intégralité de ce chapitre est destinée à l'application pratique des gaz plasmas sur des bactéries et pour cela nous avons fait appel à un organisme de santé "le laboratoire MICROBIOLOGIE du CHU de Tizi-Ouzou où nous avons réalisé toutes les analyses biologiques, l'ensemble des essais de décontamination ont été réalisés dans le laboratoire de haute tension de notre département.

III.2.Création du plasma dans le laboratoire

Dans les conditions de température et de pression que nous appelons normales parce que ce sont celles dans lesquelles nous vivons, les atomes se trouvent sous forme neutre, atomique ou moléculaire. Dans le reste de l'Univers pourtant, le plasma qui est le quatrième état de la matière est l'état normal. Pour créer un plasma dans un laboratoire à partir d'un gaz neutre, il faut fournir une énergie suffisante pour arracher un ou plusieurs électrons à chaque atome comme l'a montré I. Langmuir en 1928, en réalisant une décharge électrique dans un gaz [12].

En effet, les électrons sont indispensables à la formation des plasmas, ils sont à l'origine des ruptures de liaisons des espèces initialement stables, en permettant d'élever suffisamment le niveau énergétique des molécules provoquant la formation d'ions et de radicaux. Les premiers filaments de plasma se forment lorsque la tension appliquée crée dans le volume de gaz un champ électrique suffisamment important pour générer une avalanche électronique. La tension de claquage dépend de la nature du gaz contenu entre les deux électrodes [13].

Le processus de transmission énergétique par collision permet des rendements énergétiques de bonne qualité, et limite les pertes d'énergie sous forme de chaleur, ceci permet de s'affranchir des problèmes de refroidissement et autorise l'utilisation de simples chambres de décharge en verre ou en métal.

III.3.Calcul du champ électrique

III.3.1.Calcul du champ critique d'apparition de l'effet couronne «théorique»

Il s'agit du champ électrique d'apparition de l'effet couronne calculé à partir des caractéristiques du conducteur sous tension. Pour déterminer le champ critique d'un conducteur cylindrique, on emploie généralement la formule de Peek, qui est la plus connue [14]. Elle a pour expression :

$$E_c = E_0 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot m_2 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r \cdot \delta}}\right)$$

Avec :

$E_0 = 30$ kV/cm, valeur de crête du champ électrique aux conditions normales.

r : rayon du conducteur (cm).

m_1 : coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur concernant les irrégularités géométriques.

$m_2 = 1$, coefficient qui dépend de la pollution des conducteurs.

δ : facteur de correction de la densité de l'air.

$$\delta = \frac{P}{P_0} \frac{273+t_0}{273+t}$$

$P_0 = P = 76$ cm.Hg, pression atmosphérique normale.

$t_0 = 25^\circ\text{C}$ température normale.

$t = 22^\circ\text{C}$, température enregistrée au laboratoire haute tension.

$\left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{r \cdot \delta}}\right)$: facteur de correction de Peek.

Nous allons faire varier m_1 dans l'intervalle $[0,3 \quad 0,8]$ car l'état de surface de la tige filetée est inconnu.

Les résultats sont portés sur le tableau suivant :

m_1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
E_c (kV_{eff}/cm)	10,83	14,44	18,05	21,66	25,27	29	32,5	36,1

III.3.2.Calcul du champ critique d'apparition de l'effet couronne
«pratique»

Il s'agit du champ électrique calculé à partir de la valeur de tension d'apparition de l'effet couronne mesurée.

$$U_{c \text{ mesurée}} = 8,5 \text{ kV}_{\text{eff}}$$

$$E_{c \text{ mesuré}} (x) = \frac{U}{\epsilon_{rj} x \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\epsilon} \ln \frac{R_{i+1}}{R_i}} \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{c \text{ mesuré}} = \frac{8,5}{1,0,2 \left(\ln \frac{10}{2} + \frac{1}{5} \ln \frac{13,5}{10} \right)}$$

$$E_{c \text{ mesuré}} = 25,45 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$$

Sachant qu'en réalité en appliquant une tension de 8,5 kV_{eff} à une tige filetée, le champ à la surface de celle-ci sera supérieur à 25,45 kV_{eff}/cm.

Pour la valeur de $m_1 = 1$ nous trouvons $E_c = 36,1 \text{ kV}_{\text{eff}}/\text{cm}$ (selon Peek), on calcule la valeur de U qui correspond à E_c à l'aide de la formule (1), on trouve : $U = 12 \text{ kV}_{\text{eff}}$ c'est-à-dire qu'en système cylindrique parfait on doit appliquer 12kV_{eff} pour avoir l'effet couronne, or dans notre cas 8,5 kV_{eff} suffisent. Ceci est dû au fait que la surface du cylindre intérieur n'est pas lisse (tige filetée), et il y a la barrière isolante qui intensifie le champ.

III.3.3. Calcul du champ électrique pour la tension appliquée

➤ Tension appliquée

On dit que le contournement se produit sur la surface de l'isolateur, lorsqu'une décharge électrique s'établit entre ses extrémités et contourne la surface de l'isolateur [15].

La tension de contournement a été obtenue par la méthode "augmentation de tension", c'est-à-dire une tension quelconque est appliquée au réacteur, si le contournement ne se produit pas, on augmente cette tension jusqu'à ce qu'on obtienne le contournement.

Les résultats de cette expérience ont montré que le contournement se produit pour une valeur moyenne de la tension de 20 kV.

Dans la suite des essais, nous avons maintenu la tension à 15kV inférieure à la tension de contournement.

➤ Système avec barrière diélectrique

Le calcul du champ électrique est décrit par l'équation suivante :

$$E_1(x) = \frac{U}{\epsilon_{r1} x \left(\frac{1}{\epsilon_{r1}} \ln \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\epsilon_{r2}} \ln \frac{R_3}{R_2} \right)}$$

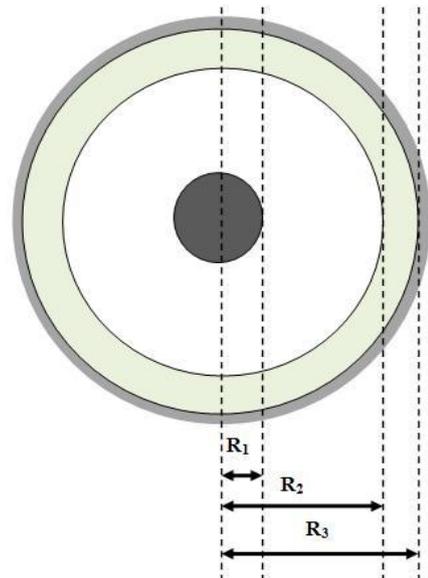
$R_1 = 0,2$ cm rayon de la tige.

$R_2 = 1$ cm rayon interne de la barrière diélectrique.

$R_3 = 1,35$ cm rayon externe de la barrière diélectrique.

$\epsilon_{r1} = 1$ permittivité relative de l'air.

$\epsilon_{r2} = 5$ permittivité relative du verre.



Pour $R_1 < x < R_2$

X (cm)	0,2	0,4	0,6	0,8	1
E_1 (kV/cm)	44,9	22,45	14,96	11,22	8,98

Pour $R_2 < x < R_3$

X (cm)	1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35
E_1 (kV/cm)	1,79	1,56	1,49	1,43	1,38	1,33

➤ Système sans barrière diélectrique

La distribution du champ électrique, en l'absence de diélectrique, est une fonction en $1/x$, continue sur l'intervalle $[R_1; R_3]$, son expression est la suivante :

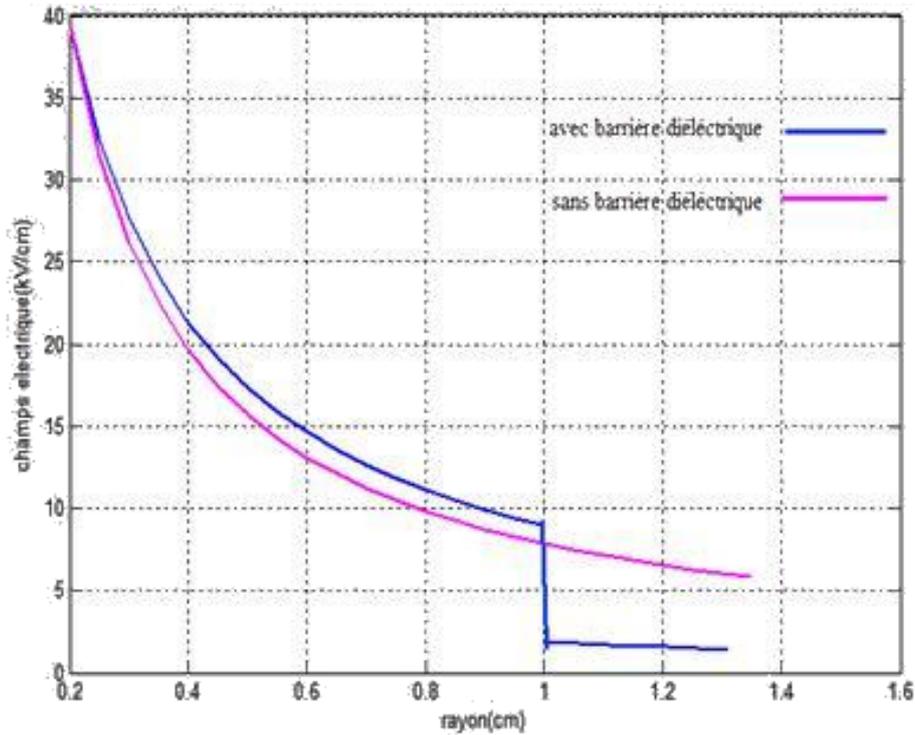
$$E_2(x) = \frac{U}{x \ln \frac{R_3}{R_1}}$$

Pour $R_1 < x < R_3$

X (cm)	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,35
E_2 (kV/cm)	39,25	19,62	13,08	9,81	7,85	5,81

Pour mieux illustrer nos résultats, nous avons introduit les valeurs du champ et du rayon sous

Matlab afin d'obtenir une représentation graphique, son allure est la suivante :



Résultats de simulation sous Matlab du champ électrique en fonction du rayon

à U = 15 kV avec et sans diélectrique

➤ Interprétation

La figure présente l'évolution du champ électrique avec et sans barrière diélectrique, elle montre que l'introduction d'un diélectrique sur l'électrode extérieur ne modifie pas l'allure du champ sur l'ensemble du parcours inter-électrode. Le champ électrique est rehaussé de 14% par la présence du diélectrique [16]. La barrière diélectrique, en plus du fait qu'elle empêche le passage à l'arc, intensifie le champ électrique dans l'isolant gazeux

$$\left. \begin{array}{l} E_{\text{moy avec barrière}} = 20,5 \text{ kV/cm,} \\ E_{\text{moy sans barrière}} = 17,9 \text{ kV/cm} \end{array} \right\} \frac{E_{\text{moy avec barrière}}}{E_{\text{moy sans barrière}}} = 1,14 \quad \text{d'où le 14\%}$$

III.4.Déroulement des essais

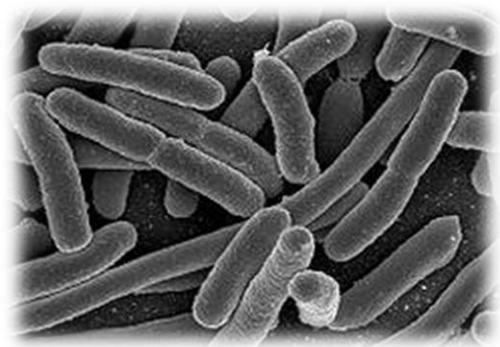
III.4.1.Choix des bactéries

La nature des micro-organismes influence bien entendu l'efficacité du plasma puisque la résistance des micro-organismes aux procédés de stérilisation est très variable, pour cela le Dr HAOUCHINE, maître assistante au sein du laboratoire «Microbiologie» du CHU de Tizi-Ouzou, a mis à notre disposition deux souches de bactéries.

Nous avons pris le soin de définir quelques notions microbiologiques pertinentes pour la compréhension de ce travail.

➤ Escherichia coli

Escherichia coli, également appelée colibacille et abrégée en E. coli, est une bactérie intestinale des mammifères, très commune chez l'être humain. En effet, elle compose environ 80 % de notre flore intestinale, elle se développe en 24h à 37°C sur des milieux géloses en donnant des colonies rondes lisses à bords réguliers qui sont généralement «lactose positif».

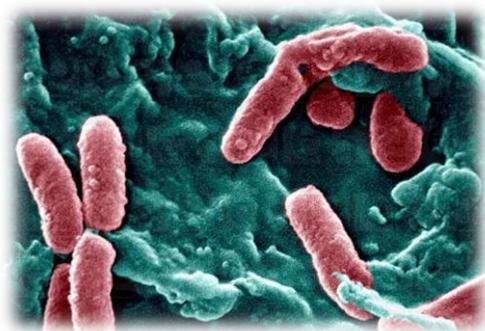


Grossissement × 15 000

➤ Pseudomonas aeruginosa

Pseudomonas aeruginosa, autrement connue sous le nom de bacille pyocyanique, est une bactérie gram-négative du genre Pseudomonas.

Les bacilles sont fins, droits et très mobiles grâce à un flagelle polaire.



Grossissement x 15 000

Elle vit normalement à l'état saprophyte dans l'eau et le sol humide ou sur les végétaux, elle résiste à la dessiccation.

Cette bactérie peut vivre en commensale dans le tube digestif de l'homme et de divers animaux. Considérée comme une bactérie opportuniste, c'est le germe type des infections hospitalières ou nosocomiales.

DEFINITIONS

Saprophyte : Un organisme est dit saprophyte s'il est capable de se nourrir de matière organique non-vivante.

Commensale : La flore commensale est un ensemble complexe de bactéries et protozoaires, se situant sur la peau et sur une grande partie des muqueuses. Elle est présente dès la naissance.

Nosocomiale : Une infection nosocomiale est une infection contractée dans un établissement de santé.

Bouillon nutritif : c'est un milieu liquide d'ordre général pour la culture des micro-organismes non exigeants.

Écouvillon : désigne la petite brosse servant à effectuer des prélèvements dans les cavités naturelles, ressemblant à des cotons tiges.

Inoculum : échantillon contenant des germes vivants, destiné à être introduit au sein d'un milieu favorable à sa multiplication.

III.4.2.Préparation des inoculums et des lames à décontaminer

Une suspension bactérienne d'*Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa* a été effectuée dans des bouillons d'enrichissement (nutritifs), des lames préalablement stérilisées sont contaminées à l'aide d'écouvillons stériles imbibés dans les bouillons respectifs puis placés dans des boîtes de Petri stériles, qui sont ensuite acheminées pour être décontaminées.

III.4. 3.Mode de traitement des micro-organismes par plasma

Les opérations de traitement des lames par plasma sont effectuées au niveau du laboratoire de Haute tension du département Electrotechnique de l'université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou.

Pour chaque bactérie nous avons effectué 10 essais, 5 à l'intérieur du tube en verre avec des lames de 1,5 cm de largeur et 4 cm de longueur et 5 autres dans la chambre de décontamination avec des lames de 3 cm de largeur et 8 cm de longueur pour différents temps. Après décontamination, les lames sont replacées dans des boites de Petri à l'aide d'une pince stérile, afin d'éviter une éventuelle contamination.

III.4. 4.Vérification de l'efficacité du procédé de décontamination

Cette étape qui s'effectue au laboratoire de microbiologie a pour but de savoir si le procédé après traitement plasma avait un effet d'inactivation sur les bactéries. Les lames sont imbibées d'une solution de bouillon nutritif, puisensemencées sur des géloses, milieu propice à la croissance des bactéries. Ces géloses sont incubées dans des conditions de température adaptées à la bactérie (37°C) et sur une durée de 24 à 48 heures. Les résultats après incubation sont visibles sur les boites de Petri et interprétés de la manière suivante :



E-coli culture négative



E-coli culture positive



Pseudomonas culture négative



Pseudomonas culture positive

III.4. 4.1.Résultats obtenus

➤ **Escherichia coli**

Dans la décharge (intérieur du tube)

Durée (mn)	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn
Résultats	Culture négative				

Dans la poste décharge (intérieur de la chambre de décontamination)

Durée (mn)	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn
Résultats	Culture négative	Culture négative	Culture positive	Culture négative	Culture positive

Pour la durée de 3 mn et 5 mn nous avons refait les essais, et les résultats sont «culture négative».

➤ **Pseudomonas aeruginosa**Dans la décharge (intérieur du tube)

Durée (mn)	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn
Résultats	Culture négative				

Dans la poste décharge (intérieur de la chambre de décontamination)

Durée (mn)	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn
Résultats	Culture positive	Culture négative	Culture négative	Culture négative	Culture négative

Pour la durée de 1 mn, l'essai a été refait, le résultat obtenu est «culture négative»

III.4. 4.2. Interprétation des résultats

Les travaux précédents ayant permis la validation du procédé de décontamination à moins de 5 minutes, nous avons diminué la durée d'exposition des micro-organismes au plasma pour montrer qu'il est possible de décontaminer des surfaces au contact direct et indirect de la décharge dans un temps plus court.

Au vu de ces observations expérimentales, nous pouvons supposer que la culture positive (présence de bactéries) pour la durée de 3 mn et 5 mn est due à une mauvaise manipulation de notre part. Quant à la bactérie pseudomonas, la culture est positive à 1 mn car la chambre de décontamination n'a pas été parfaitement ionisée.

III.4.5. Essais sur d'autres surfaces

A titre expérimental, nous avons testé notre système sur des boîtes de pétri en plastique contaminées avec E-coli et Pseudomonas ainsi que sur des gants chirurgicaux, nous les avons placés dans la chambre de décontamination et les avons soumis au plasma pendant une durée de 15 minutes pour les boîtes de Petri et des durées de 10,15 et 20 minutes pour les gants.

Après traitement et enrichissement des échantillons au laboratoire de microbiologie, les résultats obtenus sont tous «culture négative».

Nous concluons donc, que la décontamination de matériel médical à usage unique est possible.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons présenté dans ce manuscrit une approche conduisant à la mise au point ainsi qu'à l'optimisation d'un réacteur à décharge plasma destiné à la décontamination de surface. Ce travail peut être divisé en deux grandes parties principales:

La réalisation du réacteur et la détermination de l'efficacité biocide des espèces contenues dans le plasma, ensuite l'application pratique du procédé de décontamination.

Le dispositif expérimental est composé essentiellement d'une source électrique reliée à deux électrodes qui permettent d'engendrer des électrons, des ions et surtout des espèces actives qui réagissent avec des bio-polymères et les détruisent, rendant inoffensifs les micro-organismes.

Nous avons conçu, caractérisé, et évalué les performances d'un stérilisateur plasma sur des surfaces contaminées par deux souches de bactéries différentes dont l'une peut être à l'origine de maladies nosocomiales. L'ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail, permet d'affirmer que nous disposons désormais d'un système capable de décontaminer efficacement des surfaces en des temps très courts.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] PAUL SINGELTON « Bactériologie pour la médecine la biologie et les biotechnologies » 6^e édition, pp 448-447, juillet 2008.
- [2] ANTOINE COUDERT « Technique de stérilisation par les plasmas froids » thèse pour le doctorat vétérinaire, pp 16-17-18-24-26, 2007.
- [3] MICHAEL MADIGAN et JOHN MARTINKO, Biologie des micro-organismes 11^e édition, pp 687-688-690, 2006.
- [4] MICHAU MARIE-PIERRE spécialiste en pédiatrie Professeur responsable : Dr .ERPICUM. « Travail de chirurgie : la stérilisation », pp 7-8
- [5] Laure MARTIN, « Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Marquage isotopique et simulation du procédé ». thèse de doctorat de l'université PARIS VI Pierre et Marie CURIE, Spécialité : Génie Des Procèdes et Haute Technologie, pp 42, 4 juillet 2005.
- [6] GRENOBLE d'ARNAUD BAZIN « Analyse de procédés de traitement plasma des résines photosensibles à 193 nm pour le développement de technologies CMOS sub-65 nm », thèse pour obtenir le grade de docteur de l'institut polytechnique, 21 septembre 2009.
- [7] COATING PLASMA INDUSTRIE « Traitement de surface par plasma froid ».
- [8] JEROME POLLAK « Développement et utilisation de sources plasma pour stériliser des instruments médicaux », thèse en vue de l'obtention de grade de philosophia doctor janvier 2009.
- [9] Recommandations de biosécurité relatives au traitement et aux méthodes d'inactivation des déchets biologiques contaminés. Section Biosécurité et Biotechnologie Institut Scientifique de Santé Publique, Bibliothèque Royale de Belgique, numéro de dépôt légal: D/2006/2505/33
20 décembre 2006.
- [10] SOPHIE LEROUGE, « Stérilisation par plasma à basse pression : mécanisme et effets sur les polymères biomédicaux », institut de génie biomédical école polytechnique de MONREAL, thèse en vu de l'obtention du diplôme de philosophiae doctor Mai 2000.

-[11] SANDRINE VILLEGGER « Optimisation d'une poste décharge de N₂-O₂ en vue d'une application à un procédé de stérilisation », thèse présentée en vue de l'obtention du titre de docteur de l'université TOULOUSE III 24 juin 2004.

-[12] L. Rezeau et G. Belmont « QUELQUES PROPRIETES DES PLASMAS » pp 1, 5 janvier 2007.

- [13] NICOLAS DUBUS, « Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique », thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'université de Poitiers, pp29, 27 novembre 2009.

-[14] Cours dirigés par Mr HANDALA, haute tension (4^{ème} année ETH) à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

-[15] Cours dirigé par A.Tilmatine, chapitre 6 ISOLATEURS DES LIGNES AERIENNES HAUTE TENSION, pp 2.

-[16] Yoann-Nicolas JAFFRÉ, « Optimisation de réacteurs à plasmas non-thermiques pour le traitement des oxydes d'azote », thèse présentée à l'école centrale de lyon pour obtenir le grade de docteur Préparée au sein de L'Ecole Doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, pp 98, 2010.

