

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère De L'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

LAYATI Tayeb Mehdi

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT 3^{ème} CYCLE

Filière Electrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Intitule de la thèse :

Réalisation d'une installation prototype industrielle
de génération d'ozone par décharge à barrière
diélectrique. Application pour le traitement des eaux.

Présenté devant le jury composé de :

Pr. HADJERI Samir	Pr (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Dr. NASSOUR Kamel	MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Directeur de thèse
Pr. TILMATINE Amar	Pr (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Co-Directeur de thèse
Pr. BENDAOU Abdelbar	Pr (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur
Dr. RAOUTI Driss	MCA (U.M.T. Saida)	Examineur
Dr. NEMMICH Said	MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Invité

Soutenu le : 10 /11/ 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DEDICACE

♥ *A mes chers parents*

♥ *A ma sœur*

♥ *A toute ma famille et mes ami(e)s,*

♥ *A tous ceux qui me sont chers.*

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage, la patience et la volonté pour accomplir ce travail.

Un seul nom figure sur la couverture de cette thèse, malgré ça, il est important de préciser que ce résultat est le fruit d'un effort collectif. C'est pourquoi je tiens à remercier de près ou de loin les personnes qui ont participé à l'avancement et aboutissement de ce travail.

*Tout d'abord je remercie sincèrement les professeurs **Amar TILMATINE, Kamel NASSOUR et Said NEMMICH** qui ont su encadré et dirigé ce travail avec beaucoup d'intentions et de compétences et surtout ils ont veillé à la disponibilité de beaucoup de moyens morales et matériels. Je tiens à les remercier pour la confiance qu'ils m'ont témoignée lors de l'attribution et du déroulement de cette thèse. J'espère sincèrement pouvoir continuer cette collaboration dans le futur.*

*J'adresse tous mes remerciements au Dr **Samir HADJERI** Professeur à l'université de Sidi-Bel-Abbès pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de cette thèse et d'évaluer ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent également au Dr **Abdelbar BENDAOU** Professeur à l'université De Sidi-Bel-Abbes pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être membres du jury. Je remercie également le Dr **Driss RAOUTI** maître de conférences à l'université de Saida, d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse ainsi que pour les nombreux conseils, les nombreux échanges scientifiques et techniques que nous avons eus.*

*Je remercie également les travailleurs de l'entreprise de construction du matériel agricole « **CMA** » de la wilaya de Sidi-Bel-Abbes pour leur disponibilité et leur aide, et spécialement mon collègue et ami **Mohammed NEHARI**.*

Finalement, je tiens également à remercier tous les professeurs et les doctorants de laboratoires APELEC, IRECOM et ICEPS pour leur soutien, leur disponibilité et leur sympathie.

Table des matières

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre 1

Généralités sur les décharges électriques et leurs applications : état de l'art

1.1. Introduction	03
1.2. Généralités sur les plasmas	03
1.2.1. Historique	03
1.2.2. Définition.....	03
1.2.3. Paramètres physiques et classification de plasmas.....	05
1.2.4. Application industrielles des plasmas froids	07
1.3. Décharge électrique dans le gaz	09
1.3.1. Caractéristiques des décharges électriques dans les gaz	09
1.3.2. Régimes de décharge dans le gaz.....	13
1.4. Les décharges couronnes	15
1.4.1. Définition.....	15
1.4.2. Caractéristique courant tension et régimes de décharge	17
1.4.3. Différents types de la décharge couronne.....	18
1.4.4. Application des décharges couronnes.....	19
1.5. Les décharges avec barrière diélectrique	20
1.5.1. Historique	20
1.5.2. Définition	21
1.5.3. Principe	21
1.5.4. Sources d'excitation pour les DBDs	22
1.5.5. Mécanismes de micro-décharges dans les DBDs	23
1.5.6. Différents régimes des DBDs	25
1.5.7. Géométries des DBDs	26
1.5.8. Applications des DBDs	27
1.6. L'ozone	30
1.6.1. Introduction à l'ozone.....	30
1.6.2. Aperçu historique sur l'ozone.....	30
1.6.3. Propriétés physiques et structure de l'ozon.....	31
1.6.4. Mode de production de l'ozone.....	32
1.6.5. Décomposition de l'ozone	36
1.6.6. Réaction d'ozone	37
1.6.7. Avantages et inconvénients de l'ozone	39

1.6.8. Applications de l’ozone.....	41
1.7. Conclusion	46

Chapitre 2

Analyse expérimentale d’un générateur d’ozone cylindrique avec une électrode haute-tension partitionne

2.1. Introduction	47
2.2. Description du dispositif expérimental utilisé	48
2.2.1. Structure et dimensions du générateur d’ozone développé	48
2.2.2. Système de refroidissement	51
2.2.3. Montage utilisé pour la mesure de puissance et la concentration d’ozone.....	52
2.3. Résultats et discussion	53
2.3.1. Caractéristiques électriques	53
2.3.2. Influence de la tension sur le rendement des générateurs d’ozone	55
2.3.3. Simulation numérique du champ électrique	57
2.3.4. Modélisation expérimentale et optimisation de l’efficacité énergétique	59
2.3.4.1. Rappels sur la méthode des plans d’expériences	59
2.3.4.2. Logiciel MODDE 5.0	63
2.3.4.3. Résultats et discussion	63
2.4. Conclusion	69

Chapitre 3

Effet de l’écoulement de gaz sur la production d’ozone

3.1 Introduction	70
3.2 Etude de l’écoulement de gaz dans un générateur d’ozone.....	70
3.2.1 Description du générateur d’ozone étudié.....	70
3.2.2 Structure des différents types de montages réalisés.	71
3.2.3 Dispositif expérimental	73
3.2.4 Résultats et discussion	73
3.2.4.1 Caractéristiques électriques	73
3.2.4.2 Détermination de la configuration optimale	75
3.3 Etude et réalisation du SKID mobile	78
3.3.1 Description du SKID	78
3.3.2 Etude expérimentale de la production d’ozone.	80
3.3.2.1 Influence du nombre de générateur sur la production d’ozone	81
3.3.2.2 Influence de l’écoulement d’aire sur la production d’ozone (cas d’un SKID).	82
1.1 Conclusion.....	86

Chapitre 4

Traitement des effluents non domestiques (piscicultures et hospitaliers) par ozonation

4.1	Introduction	87
4.2	Méthodes de traitement des eaux usées.....	87
4.2.1	Définition et types des eaux usées	87
4.2.2	Caractéristiques des eaux usées	89
4.2.3	Étapes et procédés de traitement des eaux usées.....	90
4.3	Dispositif expérimental d'ozonation utilisé pour le traitement	92
4.4	Traitement des rejets piscicultures par ozonation.....	93
4.4.1	Généralités sur l'aquaculture	93
4.4.2	Avantages et inconvénients de l'aquaculture	94
4.4.3	L'aquaculture en Algérie.....	95
4.4.4	Caractérisation des effluents piscicoles	97
4.4.5	Méthodes de traitement des rejets piscicultures	98
4.4.6	Utilisation de l'ozone dans le domaine d'aquaculture	101
4.4.7	Traitement des bassins d'élevage du barrage de TABAIA	102
4.5	Traitement des rejets liquides hospitaliers	106
4.5.1	Définition des effluents hospitaliers	106
4.5.2	Caractéristiques des effluents hospitaliers	107
4.5.3	Réactivité des biocides au cours des traitements par oxydation	109
4.5.4	Traitements des rejets hospitaliers du CHU de Sidi Bel Abbas	111
4.6	Conclusion	114
	Conclusion générale	115

Références bibliographiques

Résumé

Liste des figures

Chapitre 1

Généralités sur les décharges électriques et leurs applications : état de l'art

Figure 1.1	<i>Evolution de l'état de la matière avec la température.</i>	04
Figure 1.2	<i>Avalanche électronique.</i>	09
Figure 1.3	<i>Forme de la charge d'espace.</i>	10
Figure 1.4	<i>déroulement du mécanisme de Townsend.</i>	11
Figure 1.5	<i>Enceinte remplie par un gaz.</i>	12
Figure 1.6	<i>Courbe de Paschen.</i>	12
Figure 1.7	<i>Dispositif expérimental de Townsend.</i>	13
Figure 1.8	<i>Caractéristique courant-tension et différents types de décharges dans les gaz.</i>	13
Figure 1.9	<i>Décharge couronne lumineuse produite entre des pointes et une électrode plane reliée à la terre.</i>	16
Figure 1.10	<i>La zone active et la zone de dérive produite dans la décharge couronne ...</i>	16
Figure 1.11	<i>Les différentes configurations de la décharge couronne.</i>	16
Figure 1.12	<i>Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne à pression atmosphérique.</i>	17
Figure 1.13	<i>Descriptif de la décharge couronne positive.</i>	18
Figure 1.14	<i>Descriptif de la décharge couronne négative.</i>	19
Figure 1.15	<i>Principe de fonctionnement d'une DBD.</i>	22
Figure 1.16	<i>Forme d'onde Burst obtenue par la fusion d'une onde sinusoïdale et une onde pulsée.</i>	23
Figure 1.17	<i>Principales étapes de la formation d'une micro-décharge. De gauche à droite : développement de l'avalanche primaire, transition en streamer puis formation du canal de décharge.</i>	24
Figure 1.18	<i>Différents régimes de micro-décharges sont observés en augmentant la tension, allant de filaments dissociés à des ensembles de filaments montrant un comportement collectif.</i>	25
Figure 1.19	<i>Schémas de décharge à barrière diélectrique volumique.</i>	26
Figure 1.20	<i>Schémas de décharge à barrière diélectrique surfacique.</i>	26
Figure 1.21	<i>Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement d'eau.</i>	27
Figure 1.22	<i>Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique du plastique.</i>	28
Figure 1.23	<i>La DBD dans les écrans plats à plasma. DBD à électrodes parallèles (gauche).</i>	29
Figure 1.24	<i>Cycle de Chapman.</i>	31

Figure 1.25	<i>Structure de l'ozone.</i>	32
Figure 1.26	<i>Étapes de formation de l'ozone par décharge électrique</i>	33
Figure 1.27	<i>Étapes de formation de l'ozone par UV.</i>	34
Figure 1.28	<i>Spectre germicide des lampes UV.</i>	35
Figure 1.29	<i>Production d'ozone par décharge a barrière diélectrique</i>	35
Figure 1.30	<i>Décomposition de l'ozone dans différents types d'eau à 20 °C.</i>	37
Figure 1.31	<i>Réaction d'oxydation de l'ozone avec les substances oxydables</i>	38
Figure 1.32	<i>Effet de l'ozone sur une bactérie</i>	39
Figure 1.33	<i>Lavage des fruits et des légumes par l'eau ozonée.</i>	42
Figure 1.34	<i>Appareil Healozone.</i>	45

Chapitre 2

Analyse expérimentale d'un générateur d'ozone cylindrique avec une électrode haute-tension partitionne

Figure 2.1	<i>Photographie des bouchons en téflon</i>	49
Figure 2.2	<i>Photographie de l'électrode interne en cuivre insérée à l'intérieur de la barrière diélectrique en verre</i>	49
Figure 2.3	<i>Schéma descriptif des deux configurations d'électrodes haute tension</i>	50
Figure 2.4	<i>Schéma descriptif du générateur d'ozone</i>	50
Figure 2.5	<i>Photographie du générateur d'ozone</i>	51
Figure 2.6	<i>Schéma descriptif du système de refroidissement du réacteur d'ozone</i>	51
Figure 2.7	<i>Schéma descriptif du descriptif du dispositif expérimental</i>	52
Figure 2.8	<i>Formes d'onde de courant et de tension obtenues pour les modèles</i>	54
Figure 2.9	<i>Figures de Lissajous obtenues pour les deux générateurs d'ozone G_{1p} et G_{3p} ($V=7,5$ kV).</i>	55
Figure 2.10	<i>Variation de la concentration d'ozone en fonction de la tension appliquée pour les modèles de générateurs G_{1P} et G_{3P}.</i>	56
Figure 2.11	<i>Variation du rendement énergétique en fonction de la tension appliquée pour les modèles de générateurs G_{1P} et G_{3P}.</i>	57
Figure 2.12	<i>Distribution longitudinale du champ électrique dans la zone de plasma à 0,1 mm juste au-dessus de la barrière diélectrique pour les deux configurations ($V = 7$ kV).</i>	58
Figure 2.13	<i>Variation du champ électrique dans la zone de plasma à 0,1 mm au-dessus de la barrière électrique en fonction de la distance d'espacement 'd'</i>	58
Figure 2.14	<i>Environnement du système.</i>	59
Figure 2.15	<i>Disposition des expériences dans un plan composite centré.</i>	62
Figure 2.16	<i>Variation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique en fonction de la tension pour le modèle G_{3P} ($d=2$ mm ; $f=9$ Kh</i>	64
Figure 2.17	<i>Variation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique en fonction de la fréquence pour le modèle G_{3P} ($d=2$ mm ; $V=7$ kV)</i>	65

Figure 2.18	Variation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique en fonction de la distance entre les portions adjacentes pour le modèle G_{3P} ($f=7$ kHz ; $V=7$ kV).	66
Figure 2.19	Tracés des Coefficients modèles mathématiques obtenus avec MODDE.05.	68
Figure 2.20	Résultats du programme d'optimisation de MODDE 5.0, pour la maximisation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique	69

Chapitre 3

Effet de l'écoulement de gaz sur la production d'ozone

Figure 3.1	Coupe longitudinal du générateur d'ozone.	71
Figure 3.2	Schéma du bouchon avec deux ouvertures.	71
Figure 3.3	Schéma descriptif du G_1	72
Figure 3.4	Schéma descriptif du G_2	72
Figure 3.5	Schéma descriptif du G_3	72
Figure 3.6	Dispositif expérimentale utilisé pour la mesure de la concentration d'ozone.....	73
Figure 3.7	Courbe de Lissajous obtenues pour les 3 montages du générateur d'ozone G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz, $V=5$ kV).	74
Figure 3.8	Variation de la puissance consommée en fonction de la tension appliquée pour les 3 montages du générateur d'ozone G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz).	74
Figure 3.9	Variation de la concentration d'ozone en fonction de la tension appliquée pour les 3 montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz, $Q=1$ l/min.	75
Figure 3.10	Variation de l'efficacité énergétique en fonction de la tension appliquée pour les trois montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz, $Q=1$ l/min).	76
Figure 3.11	variation de la concentration d'ozone en fonction du débit d'oxygène pour les 3 montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz, $V=9$ kV).	77
Figure 3.12	Variation de l'efficacité énergétique en fonction du débit d'oxygène pour les trois montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz, $V=9$ kV).	77
Figure 3.13	Photographie du SKID.	78
Figure 3.14	Schéma descriptif du groupe soudé (bac+ électrodes externes).	78
Figure 3.15	Schéma descriptif des nourrices.	78
Figure 3.16	Schéma descriptif des bouchons.	80
Figure 3.17	Schéma descriptif de l'assemblage rassemblant un bouchon, une barrière diélectrique et une tige métallique.	80
Figure 3.18	Schéma descriptif du dispositif expérimental.....	81
Figure 3.19	Variation de concentration d'ozone en fonction du nombre de générateurs.	82
Figure 3.20	Photographie descriptive du montage 1 « une seul entrée avec une seul sortie en diagonale ».	83
Figure 3.21	Photographie descriptive du montage 2 «deux entrées avec une seul sortie».	83
Figure 3.22	Photographie descriptive du montage 3 « quatre entrées avec une seul sortie ».	

Figure 3.23	<i>Variation de la concentration d’ozone en fonction du débit d’oxygène pour les trois configurations.</i>	84
Figure 3.24	<i>Variation du taux d’ozone en fonction du débit d’oxygène pour les trois configurations.</i>	85

Chapitre 4

Traitement des effluents non domestiques (piscicultures et hospitaliers) par ozonation

Figure 4.1	<i>Photographie du dispositif expérimental de traitement...</i>	93
Figure 4.2	<i>Bassins d’élevage de la commune de Tabia (image satellite).</i>	102
Figure 4.3	<i>Réaction de l’ozone moléculaire sur les amines primaires, secondaires et tertiaires</i>	110

Liste des tableaux

Tableau 1.1	<i>Principales constantes physiques, thermodynamiques et toxicologiques de l'ozone de l'ozone.</i>	32
Tableau 1.2	<i>Demi-vie de l'ozone dans l'eau et dans l'air.....</i>	36
Tableau 1.3	<i>Potentiels Redox de quelques produits oxydants utilisés dans l'industrie.....</i>	38
Tableau 2.1	<i>Résultats des expériences de conception du CCF.</i>	67
Tableau 4.1	<i>Résultats moyens de l'analyse physico-chimique des eaux piscicoles. ...</i>	104
Tableau 4.2	<i>Résultats moyens des analyses bactériologiques des eaux piscicoles. ...</i>	104
Tableau 4.3	<i>Potentiel Red/Ox de quelques oxydants, à T = 25 °C sous 1 atm.</i>	109
Tableau 4.4	<i>Résultats moyens de l'analyse physico-chimique des effluents hospitaliers du mois d'Avril.</i>	112
Tableau 4.5	<i>Résultats moyens des concentrations des métaux lourds des effluents hospitaliers avant et après traitement à l'ozonation.</i>	112
Tableau 4.6	<i>Résultats d'analyses bactériologiques des effluents hospitaliers d'avant et après traitement à l'ozonation.</i>	114

Introduction
générale

Introduction générale

L'homme a le devoir de protéger ses semblables et son environnement. Lorsqu'il utilise l'eau il ne fait pas que la consommer, mais il en rejette une partie dans l'environnement. C'est ce que l'on appelle l'eau usée. Cette eau usée peut contenir différents polluants. On a donc tout d'abord commencé à la traiter pour des raisons sanitaires.

Pour une gestion durable de la ressource en eau, les réglementations nationales et internationales se renforcent, instaurant des normes de plus en plus exigeantes sur les prélèvements d'eau et les rejets en milieux aquatiques.

La prise de conscience écologiste des années 70-80 a permis de prendre en compte l'impact environnemental des eaux usées : il a alors fallu éliminer de nombreux polluants chimiques, dont certains étaient encore inconnus. Cependant de nombreux progrès restent encore à faire. Les méthodes de traitements sont en constante évolution afin de répondre de manière spécifique au contexte dans lequel les stations de traitement s'insèrent.

Les systèmes utilisés pour traiter l'eau usée aujourd'hui dans nos stations de traitement présentent plusieurs aspects négatifs. Par exemple, l'utilisation du chlore n'est pas optimale. Ce désinfectant puissant laisse des traces non négligeables car il reste présent dans l'eau une fois traitée et a des impacts négatifs sur la faune et la flore aquatique, sur l'eau que nous consommons...

Nous tenterons alors de répondre à la question suivante : Quels sont les défis du traitement des eaux usées ?

De nouvelles techniques, très performantes ont ainsi pu voir le jour, parmi lesquelles le procédé de désinfection à l'ozone dont il marque une nouvelle rupture technologique dans le domaine du traitement de l'eau. Vis-à-vis de l'étape de désinfection, le traitement à l'ozone apparaît comme un procédé alternatif et/ou complémentaire des techniques conventionnelles telles que la chloration. En effet, ce procédé permet l'élimination des microorganismes de l'eau brute par rétention sur une barrière, l'ozone.

Le traitement de l'eau par l'ozone généré par DBD est une technique encore peu répandue de par les coûts qu'elle engendre mais qui présente des avantages non négligeable sur notre environnement ainsi que sur la qualité de l'eau. En profitant du développement de la technologie de plasmas froids, les décharges à barrière diélectrique deviennent le moyen le plus efficace pour la production d'ozone. Cette technique reste encore peu répandue de par les coûts qu'elle engendre, mais qui présente des avantages non négligeables. En effet, cette technologie basée sur les plasmas réactifs hors équilibre générés par des DBDs dans l'air à la pression atmosphérique, est moins consommatrice d'énergie électrique en comparaison d'un réacteur à plasma thermique.

L'objectif général de cette thèse, est basé principalement à la conception et la réalisation de quelques générateurs d'ozone de forme cylindrique (décharge à barrière diélectrique volumique), et optimiser leur rendement énergétique en fonction de plusieurs paramètres géométriques, électriques et d'autres facteurs, qui feront par la suite l'élément principal pour la conception d'un prototype industriel mobile utilisé dans le traitement des eaux.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes proposé d'appliquer cette technique en premier temps pour le traitement d'une eau pisciculture de l'écloserie de Tabia, dans la wilaya de Sidi Bel Abbes. Ensuite, nous traiterons les rejets liquides de l'hôpital HSSANI Abdelkader de la de la wilaya de Sidi-Bel-Abbès.

La première partie de ce manuscrit consacré à l'état de l'art, a pour objet de décrire les différents phénomènes qui se produisent au sein d'une décharge électrique dans un gaz. Nous décrivons aussi le mécanisme de déroulement des micro-décharges. Ensuite nous donnons les concepts fondamentaux des décharges à barrière diélectriques, leurs différentes configurations physiques possibles et voir son importante application, à savoir la production d'ozone. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons le gaz d'ozone et ses diverses applications, en exposant toutes ses propriétés comme étant un produit industriel (avantages, production ainsi que la désinfection...).

Dans le deuxième chapitre, nous proposons en premier temps un générateur d'ozone d'une forme cylindrique avec un espace de décharge réduit, et une électrode haute tension partitionné composée de trois bandes de feuille de cuivre cliquant. Le modèle proposé a été comparé à un modèle similaire qui possède une électrode haute tension complète de même longueur effective. En deuxième temps, Le générateur d'ozone a été analysé en termes d'efficacité énergétique et de concentration d'ozone en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. Trois facteurs contrôlés ont été pris en compte, à savoir la tension, la fréquence et la distance entre les parties adjacentes de l'électrode HT.

Le troisième chapitre présente l'étude de l'écoulement de gaz dans un générateur d'ozone, une étude expérimentale comparative entre trois modèles du générateur d'ozone est réalisée afin de chercher le meilleur itinéraire de la quantité de gaz injecté. Le modèle le plus performant a été multiplié en six réacteurs pour former un SKID mobil avec une nouvelle conception à plusieurs entrées et sortie de gaz où plusieurs essais ont été faits afin de trouver la configuration optimale en termes de production d'ozone.

Ce manuscrit s'achèvera par l'implantation de notre du procédé d'ozonation dans un circuit de traitement des eaux usée non domestique, à savoir les rejets piscicultures et les effluents hospitaliers. Nous donnons dans cette section les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux traitées avant et après traitement, en faisant la comparaison avec les normes en vigueur.

Chapitre 01

*Généralités sur les décharges
électriques et leurs applications :
état de l'art*

1

GENERALITES SUR LES DECHARGES ELECTRIQUES ET LEURS APPLICATIONS : ETAT DE L'ART

1.1 Introduction

L'objet du présent chapitre est d'effectuer une brève synthèse bibliographique sur les différentes décharges électriques en introduisant les différentes notions concernant les phénomènes de décharges pour appréhender ce travail de thèse.

Nous entamons cette partie par quelques rappels et généralités sur les plasmas. Nous rappellerons les différents paramètres et processus physiques qui interviennent au sein des plasmas et qui permettent ainsi de les classifier. Ensuite nous expliquerons les différents régimes de décharge pouvant se développer dans un gaz.

Nous présentons par la suite les décharges couronnes, ainsi que leurs domaines d'applications.

Dans un deuxième lieu, nous expliquons les concepts fondamentaux des décharges à barrière diélectriques (*DBDs*) qui constitue le support de nos expérimentations, ainsi leurs différentes configurations physiques possibles et leurs domaines d'applications

La dernière partie de ce chapitre consiste tout naturellement à faire un bref rappel sur l'ozone, ses caractéristiques, ses avantages, ses inconvénients et ses diverses applications.

1.2 Généralités sur les plasmas

1.2.1 Historique

Lorsque le sang est débarrassé de ses globules et plaquettes, persiste un liquide clair que le physiologiste Tchèque *Johannes Purkinje* (1787-1869) a nommé "plasma". L'emploi du mot "plasma" pour décrire les phénomènes de gaz ionisés date de 1927 ; on le doit au chimiste américain travaillant chez General Electric et un des lauréats du prix Nobel de chimie en 1932, *Irving Langmuir* (1881-1957). Dès 1923, avec son collègue *Levy Tonks*, *Langmuir* observe le mouvement d'oscillation collective d'un nuage d'électrons pendant une décharge dans le mercure à basse pression. Ce nuage, brillant et ondulant comme une substance gélatineuse, lui fait alors penser à un plasma sanguin. En fait, pour Langmuir, le plasma désigne essentiellement la zone centrale globalement neutre de la décharge, la colonne positive, et non les régions où le champ électrique est élevé, qui forment des gaines autour des électrodes. [1]

1.2.2 Définition

Le plasma est défini comme étant le quatrième état de la matière, faisant suite, dans l'échelle des températures, aux trois états classiques « solide-liquide-gaz » (*figure 1.1*). En théorie, un plasma est un gaz totalement ionisé dans lequel on a macroscopiquement la

neutralité électrique. Il existe soit à l'état naturel dans l'univers (couronne solaire, Soleil, intérieur des étoiles, ionosphère, intérieur des naines blanches...), sur terre (la flamme, les aurores boréales et la foudre...), soit en laboratoire (artificielle) où il est généralement produit par le passage de l'état gazeux qui nécessite un apport énergétique qui peut provenir d'une source de chaleur, d'un champ électromagnétique très intense, d'un bombardement de particules ou encore d'un champ électrique de forte amplitude. [2-3]

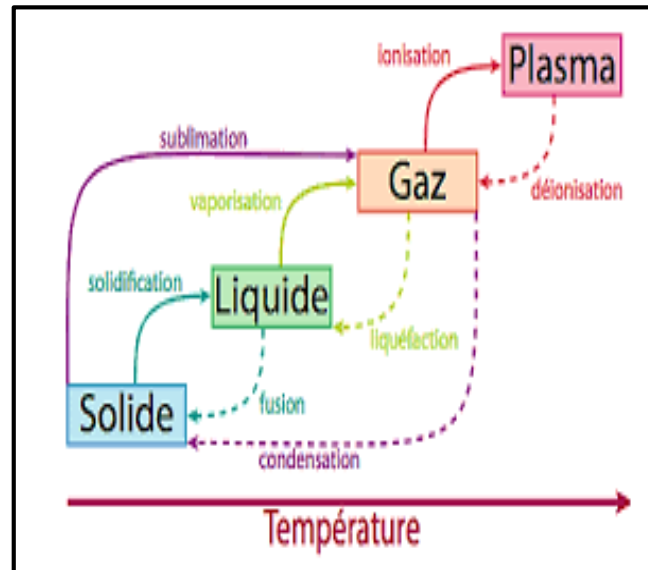


Figure 1.1 Evolution de l'état de la matière avec la température [4]

Un plasma étant un milieu énergétique, il peut contenir des électrons, des particules neutres (atomes, molécules, radicaux libres), d'ions positifs ou négatifs (particules ayant respectivement perdu ou capté des électrons).

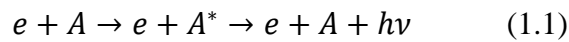
Il existe aussi dans un plasma des atomes ou molécules dits « excités » (les électrons ne sont pas arrachés, mais portés dans des états d'énergie potentielle élevée en restant liés au noyau) qui peuvent se désexciter en émettant de la lumière. Cela permet à ce gaz d'être émetteur de lumière visible ou invisible (rayons X, ultraviolet UV, infrarouge IR, etc). [3]

Dans notre cas de décharge, le plasma est obtenu en soumettant l'air ou l'oxygène ambiant à un champ électrique de forte amplitude (application de la haute tension) pour transférer l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz, et dans ce cadre il existe deux types de collisions entre ces éléments :

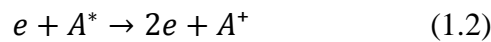
- Les collisions élastiques, qui ne participent pas directement à l'activation du gaz, elles ne modifient pas la structure interne des atomes rentrés en collision, seule la vitesse des particules est affectée, en norme et en direction. Ce type de collisions n'est responsable que de la conduction et de la diffusion de la chaleur.
- Les collisions inélastiques, qui sont responsables de changements au niveau de l'énergie interne des molécules, de la nature des particules conduisant à la formation d'espèces excitées ou ionisées. [5]

C'est ce type de collision qui va être à l'origine des processus physico-chimiques au sein du plasma, modifiant ainsi ses propriétés macroscopiques. Parmi ces processus, on distingue alors les phénomènes : [3-5]

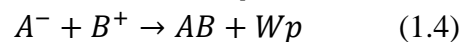
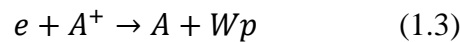
- a) **Excitation** : lorsqu'un atome a acquis suffisamment d'énergie, un de ses électrons quitte l'état fondamental et l'atome passe à un état excité.



- b) **Ionisation** : Dans ce cas, l'énergie absorbée par l'atome lors de la collision est suffisante pour qu'un de ses électrons soit arraché de l'attraction du noyau. L'électron est alors soit attaché à un autre atome (attachement), soit il s'éloigne à l'infini. Quant à l'atome perdant ou gagnant des charges n'est plus neutre électriquement. Il est alors appelé ion.



- c) **Recombinaison** : C'est le phénomène d'attachement de particules lorsqu'un ion positif rencontre un électron ou lorsque deux ions de signes contraires se rencontrent.



- d) **Détachement** : c'est le phénomène qui se produit lorsqu'un ion négatif cède l'électron supplémentaire.



1.2.3 Paramètres physiques et classification des plasmas

L'étude d'un plasma reste très complexe même de nos jours à cause des différentes interactions des particules qui le constitue et leurs réaction chimique, malgré les moyens numériques actuels qui simplifient les équations reliant toutes ces données. Cependant, des modèles ont été établis en classant les plasmas en fonction de certains paramètres :

- **Densité électronique** : la densité électronique ne représente le nombre d'électrons libres par unité de volume. [5]
- **Degré (taux) d'ionisation** : est défini comme le rapport entre la densité électronique et la somme de la densité électronique et de la densité du gaz (nombre d'atomes (particules neutres) dans le même volume).

$$\tau_i = \frac{ne}{ne+N} \quad (1.6)$$

ne : La densité électronique (nombre d'électrons libres dans un volume unitaire)

N : La densité du gaz (nombre d'atomes dans le même volume)

On parle de gaz faiblement ionisés lorsque $\tau_i \leq 10^{-4}$ (principales interactions de type collisions électron-neutre) et de gaz partiellement voire fortement ionisés lorsque $\tau_i > 10^{-4}$ lorsque les interactions coulombiennes ne sont plus négligeables (collision électron-électron ou électron-ion).

- **Température électronique** : La température T caractérisant la distribution de *Maxwell-Boltzmann* des particules s'exprime normalement en Kelvin (K). Cependant, en physique des plasmas, on indique volontairement la température en électron-volt, Te c'est-à-dire en unités d'énergie. On passe d'ailleurs, directement, de T à Te par la relation :

$$\frac{K \times T}{e} = Te(eV) \quad (1.7)$$

K : Constante de Boltzmann,

T : la température en K

e : la charge

La température Te ne représente que les 2/3 de l'énergie moyenne des particules du Plasma, si $Te = 1 eV$, la température en Kelvin est d'environ 11600 K pour une énergie moyenne de 1.5 eV . [5]

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

Il est défini par la relation suivante :

$$\sqrt{\left(\frac{2 \times \epsilon_0 \times K \times Te}{ne \times e^2}\right)} = \lambda \quad (1.8)$$

Avec :

ϵ_0 : Permittivité du vide ($8,84.10^{-12} F.m^{-1}$)

k : constante de Boltzmann ($1,3806. 10^{-23} J.K^{-1}.molécule^{-1}$)

ne : densité électronique (cm^{-3})

Te : température électronique (K).

A partir des paramètres ci-dessus, il est possible alors de répertorier les différents types de plasmas en deux grandes classes :

- **Plasma thermique** : est caractérisé par une seule température de gaz T_g , les autres températures des électrons Te , des ions T_i et des neutres T_N étant proches, voire égale à celle de gaz. Ces plasmas froids thermiques sont donc généralement à l'équilibre thermodynamique local (ETL). [6]
- **Plasma non-thermique** : est caractérisé par plusieurs températures. La température des électrons Te est très grande devant celle de gaz T_g qui reste assez proche de la température ambiante. Mais du fait de leur petit nombre et malgré leur température

élevée, les électrons ne chauffent pas significativement le gaz, la majeure partie de l'énergie n'est pas convertie en chauffage du gaz mais en réactivité chimique par production d'espèces métastables, dissociées et ionisées. [7-8]

Ce sont donc des plasmas en régime hors équilibre thermodynamique mais aussi chimique parce que la micro-réversibilité n'est naturellement pas vérifiée lors des collisions inélastiques. Dans ce type de plasma, Les puissances typiquement mises en jeu pour obtenir un plasma hors-équilibre vont de quelques watts à quelques kilowatts. [6]

Ainsi, la caractérisation des plasmas ci-dessus permet de situer les décharges électriques. Elles sont alors des plasmas froids et sont générées par l'application d'une différence de potentiel électrique.

1.2.4 Application industrielles des plasmas froids

Les plasmas froids connaissent à l'heure actuelle un grand progrès, ils sont impliqués dans des divers et multiples applications industrielles touchant notamment la micro optoélectronique, la métallurgie, la sidérurgie, l'automobile, l'emballage, l'industrie textile.

Les procédés plasmas sont également promis à jouer un rôle dans le domaine médical, en médecine dans les maladies parodontales (antibiothérapie dans le traitement d'alvéolites, dermatologie buccale...), dans la stérilisation du matériel médical (tels que les endoscopes).

Ils apparaissent également comme des candidats prometteurs pour la dépollution d'effluents gazeux (traitement des fumées d'usine, gaz d'échappement des automobiles) et le traitement de surface. [9]

▪ Stérilisation médicale

La stérilisation est l'opération qui consiste à éliminer ou tuer tous les micro-organismes portés par des milieux inertes contaminés. Le mode de stérilisation de référence actuel est la stérilisation par la chaleur (sèche ou humide).

L'autoclave est le plus couramment utilisé et est celui préconisé dans les normes pour les objets non thermosensibles, une stérilisation à des températures comprises entre 121 et 138 degrés Celsius avec une répartition homogène de la chaleur. Bien que cette technique soit très sûre elle pose cependant un problème majeur : elle ne permet pas de stériliser les objets thermosensibles.

Dans ce cas, une autre voie possible est la stérilisation chimique (utilisation de l'oxyde d'éthylène). Cette technique présente des inconvénients majeurs pour le personnel (grande toxicité de ce gaz), et le temps long pour le rinçage et la phase d'aération de 8 à 10 heures.

L'application des plasmas pour la stérilisation d'objets médicaux présente des modes de fonctionnement très variés, selon :

La pression à laquelle le traitement s'effectue (basse pression ou pression atmosphérique) : le choix de la pression entraîne une cinétique spécifique des espèces actives responsables de l'effet biocide ; leur durée de vie est à priori plus longue à basse pression qu'à pression atmosphérique.

- Le positionnement des surfaces traitées par rapport à la décharge produite.

Le positionnement des surfaces à traiter par rapport au plasma signifie que le milieu actif est constitué soit par la décharge (le plasma lui-même), soit par la post-décharge (le flux gazeux émanant du plasma) c'est la zone qui ne contient pas des particules chargées.

Lorsque les objets à décontaminer sont placés au sein même de la décharge, on obtient généralement de très bons résultats. L'inconvénient est qu'il est possible d'avoir une forte dégradation du matériau que l'on veut traiter compte tenu de la présence des ions et des électrons très énergétiques.

L'avantage du traitement en post-décharge est d'éviter ces effets (au niveau de cette zone, la température est inférieure à 50 degrés Celsius) et notamment d'être applicable à des matériaux thermosensibles. [9-11]

▪ **Traitement des polluants gazeux**

Les secteurs industriels en collaboration avec les milieux scientifiques, s'intéressent depuis une dizaine d'années à la possibilité d'utiliser les plasmas froids pour la dépollution des effluents gazeux.

L'idée de base est d'exploiter la réactivité chimique des radicaux et espèces engendrés au sein du plasma pour transformer les molécules polluantes en molécules inoffensives. Les polluants visés dans les développements actuels sont essentiellement les oxydes de soufre et d'azote (les COV ou composés organiques volatils) et les molécules malodorantes.

La production de radicaux réactifs pour dépolluer des effluents gazeux est également possible avec la technologie des faisceaux d'électrons, qui connaît déjà de nombreuses applications industrielles dans le monde.

Le développement du plasma froid laisse encore de la place à des optimisations technico- économiques. En revanche, il bénéficie d'une grande souplesse d'utilisation et peut s'adapter à des débits de gaz très variable, puisqu'on envisage de l'utiliser aussi bien sur des cheminées de centrales que sur des pots d'échappement d'automobiles. [9] [12-14]

▪ **Traitement de surfaces**

La préparation des surfaces est une phase essentielle dans l'assemblage par collage. Elle a pour premier objectif d'éliminer les contaminants et les couches superficielles de faible cohésion.

Des traitements plus poussés peuvent permettre de modifier la chimie de surface afin d'augmenter la tension superficielle ou de favoriser la création de liaisons chimiques avec l'adhésif. Diverses méthodes de traitement sont utilisées.

Les traitements de surface du fait qu'ils sont respectueux de l'environnement, constituent une application importante des plasmas froids. [9] [15]

Aujourd'hui, l'industrie de la micro- électronique utilise des procédés plasmas basse pression à toutes les étapes de fabrication des circuits intégrés. Néanmoins, même s'il existe des solutions plasmas pour la plupart des besoins concernant les modifications de surface ou la réalisation des couches minces, leur transfert vers l'industrie en dehors de la micro- électronique est très limité. Cette situation s'explique par un coût d'installation mais surtout de fonctionnement trop important pour que le processus soit rentable.

Néanmoins, l'étude des procédés plasmas se poursuit car ils sont une alternative possible aux traitements chimiques dont les effluents sont de plus en plus difficiles à recycler. Parmi les évolutions notables, figurent les procédés de traitement de surface par plasmas à pression atmosphérique. [9]

1.3 Décharge électrique dans le gaz

1.3.1. Caractéristiques des décharges électriques dans les gaz

Un gaz soumis à une décharge électrique, peut se trouver dans différents régimes de fonctionnement. Tous dépendent de mouvement des électrons, des particules, et des ions. Des phénomènes qui se produisent lors de la décharge :

a) Avalanche électronique :

On considère deux électrodes planes placées dans un gaz et soumises à une tension élevée.

Un électron primaire e_0 créé par ionisation grâce à des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques est accéléré par le champ E entre en collision avec un atome A_1 et l'ionise, A_1 libère un électron et devient lui-même un ion positif A_1^+ . Les électrons e_0 et e_1 ionisent par collision deux atomes A_2 et A_3 qui libèrent deux électrons e_2 et e_3 . Ces quatre électrons entrent en collision avec 4 autres atomes qu'ils ionisent, ceci conduit à une avalanche électronique (*figure 1.2*).

La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode (l'avalanche progresse dans le sens opposé au champ électrique « Cathode → Anode »). [16-17]

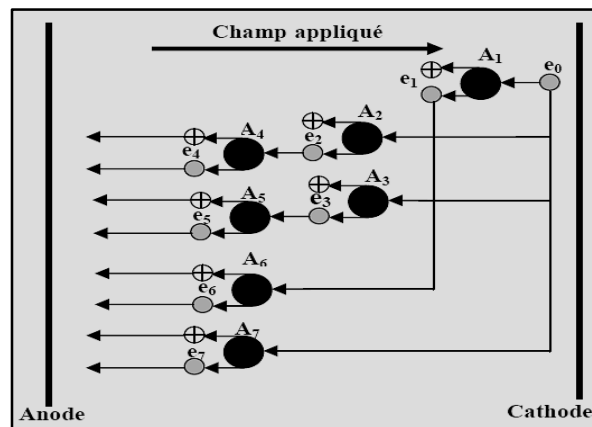


Figure 1.2 Avalanche électronique. [4]

b) Charge d'espace

Les électrons plus rapides sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs lourds et plus lents forment entre les électrodes un ensemble de charges qu'on appelle « charge d'espace ».

Comme l'avalanche électronique débute de la cathode et finit sur l'anode. La charge d'espace présente la forme d'un cône. Elle progresse dans le sens opposé du champ électrique E (*figure 1.3*). [16] [18]

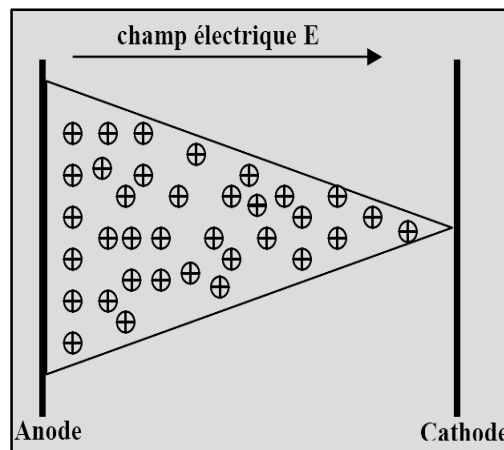


Figure 1.3 Forme de la charge d'espace. [19]

c) Mécanisme de la décharge des isolants gazeux

Le mécanisme de claquage a été le mieux élucidé dans le gaz et des bases théoriques ont été élaborées tandis que le mécanisme de claquage dans les solides et les liquides n'est pas encore aussi bien établi.

- **Influence de la pression :**

La charge d'espace se forme durant l'avalanche électronique, sa taille dépend de la pression de gaz.

En basse pression Comme la densité atomique est faible, la charge d'espace est telle qu'elle génère un champ électrique E_c faible et négligeable \Rightarrow Mécanisme de *TOWNSEND*.

En haute pression la densité atomique est grande, la charge d'espace est volumineuse elle crée un champ électrique E_c considérable qui joue un rôle important dans le claquage \Rightarrow Mécanisme de *STREAMER*.

Les plasmas étudiés dans notre thèse sont les plasmas hors équilibre thermodynamique, nous allons présenter quelques notions permettant d'expliquer les phénomènes générés dans ce type de plasma. [19]

- **Mécanisme de Townsend :**

Pour les distances faibles (max. 1 m), la théorie de *Townsend* est valable pour des pressions inférieures à 0,1 à 1 atmosphère tandis que la théorie de *Streamer* est valable pour les hautes pressions ($\geq 1 \text{ atm}$).

Déroulement :

Phase 1 : Un électron primaire situé près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire.

Phase 2 : Les électrons sont absorbés par l'anode tandis que les ions positifs bombardent la cathode avec leur énergie cinétique pour extraire des électrons secondaires.

Phase 3 : Les électrons (secondaires) émis de la cathode par bombardement créent de nouvelles avalanches secondaires et provoquent le claquage du gaz.

Remarque :

- Dans le mécanisme de *Townsend*, l'étincelle de la décharge se produit dès que la cathode émet des électrons secondaires.
- La décharge de *Townsend* se situe entre 10^{-8} et 10^{-6} A, elle est donc peu lumineuse. La luminosité est à peu près uniforme dans tout l'espace compris entre les électrodes. [19]

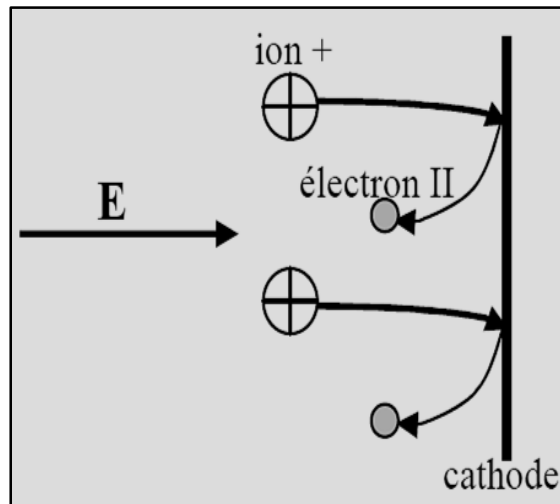


Figure 1.4 déroulement du mécanisme de *Townsend* [19]

Coefficients α et γ :

- Coefficient d'ionisation α : nombre d'électrons créés par ionisation par un électron sur 1 cm de parcours.
- Coefficient γ : nombre d'électrons secondaires émis par bombardement de la cathode par un ion positif.

Le premier coefficient de Townsend, appelé aussi coefficient d'ionisation, est plus élevé dans les gaz rares à cause de leur facilité d'ionisation (néon, argon, vapeur métallique...).

Ce coefficient est par contre plus petit dans le cas des gaz électronégatifs.

- **Loi de Paschen :**

Considérons une enceinte pleine de gaz lequel on peut varier la pression (*figure 1.5*).

La loi de *Paschen* donne l'expression de la tension de claquage pour un gaz donné et elle est seulement une fonction du produit pression gaz et de la distance inter-électrodes.

$$Vb = \frac{B \times P \times d}{\ln\left(\frac{A \times P \times d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (1.9)$$

Vb : tension claquage ;

p : pression gaz ;

d : distance inter-électrodes ;

A et B : constantes phénoménologiques du coefficient de première ionisation de *Townsend* ;

γ : Coefficient d'émission secondaire, fonction du matériau et de son état de surface. il est défini comme le rapport entre le nombre d'électrons secondaires émis par la cathode et la somme des ions et photons qui la bombardent. [4] [19]

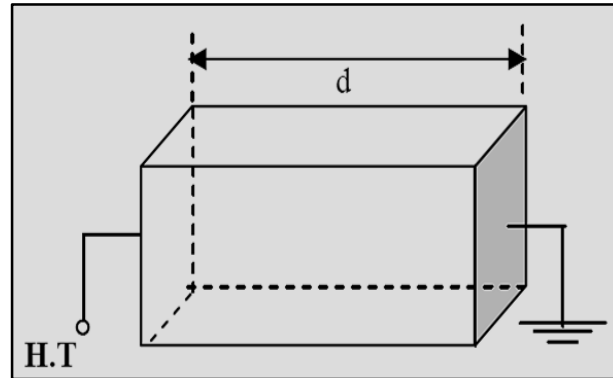


Figure 1.5 Enceinte remplie par un gaz [19]

- Courbe de Paschen

On peut voir d'après la courbe de Paschen (figure 1.6) qu'il y a une valeur de tension U_{cmin} , quand la tension est inférieure à cette valeur, l'intervalle gazeux de n'importe quelle longueur et sous n'importe quelle pression ne peut être claqué, pour l'air : $U_{cmin} = 326 \text{ V}$.

- Interprétation de la courbe : (d constante)

Région 1 : U_c diminue en fonction de la pression P

Quand la pression augmente, la densité atomique augmente ; Il y a plus de particules et donc plus d'ionisation par collision. Le gaz devient plus conducteur et le claquage plus facile $\Rightarrow U_c$ diminue.

Région 2 : U_c augmente avec la pression P.

Quand la pression augmente encore plus, malgré que la probabilité d'ionisation par collision augmente, le libre parcours moyen λ est tellement petit que l'énergie de l'électron nécessaire à l'ionisation des atomes devient insuffisante. Il y a peu d'ionisation et le claquage devient difficile $\Rightarrow U_c$ augmente. [19]

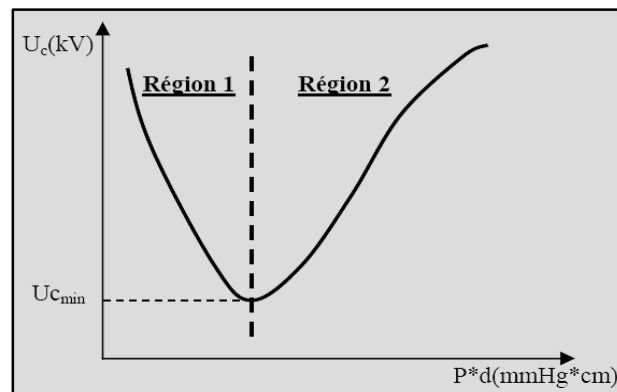


Figure 1.6 courbe de Paschen. [19]

U_c : tension critique de claquage ;

P : pression du gaz ;

d : distance inter-électrodes.

U_{cmin} : tension critique minimale ;

1.3.2 Régimes de décharge dans le gaz [3-4] [20-21]

Pour présenter le comportement du gaz et identifier les différents régimes de décharges, on s'appuie sur le dispositif étudié par Townsend, schématisé sur la *figure 1.7*, qui a donné naissance à une des décharges les plus étudiées sur le plan académique : la décharge continue basse pression.

L'application d'une tension continue entre deux électrodes et l'utilisation d'un tube à gaz reste une méthode classique pour réaliser une décharge. On utilise, par exemple, un tube de verre de quelques centimètres de diamètre, muni d'électrodes à ses deux extrémités et rempli d'un gaz sous une pression moyenne, de l'ordre de 1 torr. Une différence de potentiel continue V est appliquée aux bornes d'un tube à travers une résistance variable R . En agissant sur les valeurs de R et V , le courant i traversant le gaz varie en allant des valeurs très faibles, de l'ordre de 10^{-18} A, arrivant à quelques centaines de milliampères.

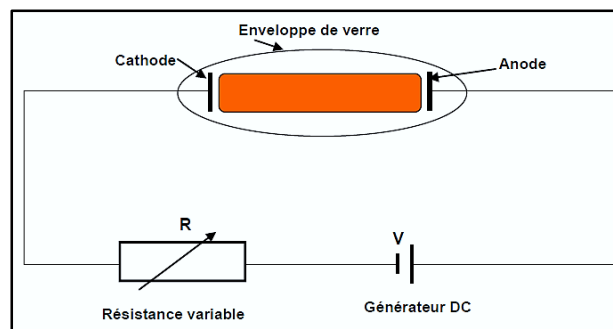


Figure 1.7 dispositif expérimental de Townsend

La caractéristique courant-tension de la décharge est obtenue en variant la tension dont l'allure est présentée sur la *figure 1.8*. La courbe fait apparaître plusieurs domaines correspondant aux quatre régimes de décharges.

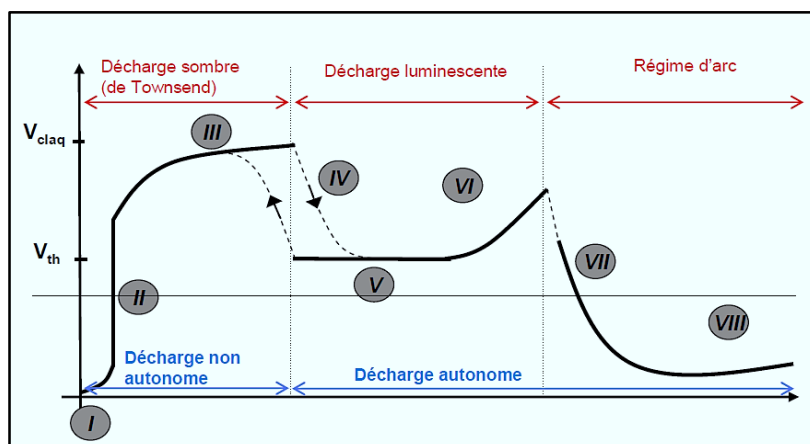


Figure 1.8 Caractéristique courant-tension et différents types de décharges dans les gaz

a) Régime d'ionisation de fond (Zone I)

Appelé aussi décharge non autonome sans multiplication électronique. Ce régime est caractérisé par une très faible valeur de tension gaz, dont l'anode collecte les électrons libres. Ces électrons libres et ions sont créés par des rayons cosmiques et autres formes de rayonnement d'ionisation de fond.

b) Régime de saturation (Zone II)

Appelé également décharge non autonome avec multiplication électronique, c'est un régime dans lequel tous les ions et électrons produits dans le régime précédent disparaissent dans le volume de décharge, car ils sont collectés par la cathode et l'anode respectivement.

Dans ce régime, les électrons ne possèdent pas assez d'énergie pour créer de nouvelles ionisations.

c) Régime de Townsend (Zone III)

Dans cette étape, les électrons se trouvant dans le volume de décharge acquièrent suffisamment d'énergie, grâce au champ électrique, pour créer de nouvelles ionisations.

La multiplication des électrons est principalement gouvernée :

- par l'ionisation et l'impact d'électrons sur les molécules neutres du gaz ;
- par l'augmentation du flux d'électrons extraits par bombardement ionique de la cathode.

Ces nouvelles ionisations conduisent à un accroissement exponentiel du courant en fonction de la tension.

Les trois régimes de décharge qui viennent d'être présentés (zones I, II, III), sont dénommés « décharge sombre » car, exceptées les décharges corona, toutes ces décharges restent invisibles à l'œil nu.

d) Régime de transition entre le régime de Townsend et le régime luminescent décharge subnormale (Zone IV)

L'augmentation du champ électrique accélère la vitesse de bombardement des ions sur la cathode. Ce mouvement génère des électrons supplémentaires qui à leur tour font augmenter le courant.

La tension de décharge chute, suite à l'augmentation de la quantité d'électrons, provoquant une transition discontinue vers le régime luminescent. Ce champ électrique peut être désigné comme le champ électrique de claquage.

La tension correspondant au champ électrique de claquage est appelée « tension de claquage » ou « potentiel disruptif ».

e) Régime de décharge normal (Zone V)

Dans ce régime normal la tension aux bornes de la décharge est quasiment indépendante du courant. Ce sont des décharges auto-entretenues, caractérisées par des densités de courant encore relativement faibles (typiquement inférieures à 1 A/cm^2), pour des pressions de l'ordre de quelque millibars.

La grande différence qu'elles présentent avec les décharges dites de Townsend réside dans le fait que c'est le champ de charge d'espace et non pas le champ Laplacien qui gouverne la dynamique des espèces chargées dans la décharge.

Ce champ de charge d'espace provient de la différence de mobilité entre électrons et ions : ceci induit une localisation du champ électrique lorsque la densité des porteurs devient suffisante. C'est notamment pour cette raison que ces décharges peuvent être maintenues à des tensions beaucoup plus faibles que les décharges de Townsend.

La densité de courant reste à peu près constante dans ce régime, ce qui signifie que la décharge n'occupe pas entièrement la surface des électrodes. Ce régime de décharge présente un intérêt tout particulier, car on pourra moduler la valeur du courant sans pour autant qu'il y ait de variation de la tension. C'est dans ce régime de décharge que fonctionnent les DBDs.

f) Régime de décharge anormale (Zone VI)

Le courant continuant à augmenter, la partie de la cathode occupée par le plasma augmente, jusqu'à la couvrir entièrement (tant que la cathode n'est pas entièrement couverte, on est dans le régime normal (zone III).

Quand la cathode est entièrement couverte, le régime de décharge anormale caractérisé par un accroissement de la tension suivant le courant atteint.

g) Régime d'arc non thermique (Zone VII)

Avec l'augmentation de la densité de courant, la cathode chauffe jusqu'à l'incandescence, générant des électrons supplémentaires par effet thermoionique.

L'augmentation du nombre des électrons crée un phénomène d'avalanche qui fait chuter la tension de décharge, alors que le courant augmente jusqu'à des valeurs très élevées.

On est dans un régime d'arc non thermique dans lequel les électrons, les ions et le gaz n'ont pas la même température.

h) Régime d'arc thermique (Zone VIII)

Ce dernier régime est caractérisé par une pente positive de la caractéristique et est appelé régime d'arc thermique. C'est un régime dans lequel le plasma est proche de l'équilibre thermodynamique et la température de toutes les espèces est quasi égale.

1.4 Décharges couronnes

1.4.1 Définition

La décharge de type couronne est une décharge non homogène, générée à pression atmosphérique dans un système d'électrodes fortement dissymétriques, La décharge est établie entre une électrode active et une électrode passive (reliée à la terre).

L'électrode active est une pointe laquelle on va appliquer un haut potentiel électrique tandis que l'électrode passive est une plaque ou une grille. [5]

Lors de l'application d'une haute tension au niveau de l'électrode ayant le plus petit rayon de courbure, le champ électrique réduit produit dans l'espace inter-électrodes est fortement inhomogène. Il a une valeur élevée au voisinage de cette électrode puis décroît

rapidement au fur et à mesure qu'on s'approche de la cathode plane, il s'agit donc d'un champ non uniforme (*figure 1.9*). [6]

Les décharges couronnes apparaissent généralement à pression atmosphérique et sont faiblement lumineuses. Elles sont caractérisées par la présence d'une zone de forte densité électronique dont le champ est intense se développe ainsi autour de l'anode, c'est la zone d'ionisation ou zone active, et d'une zone où les ions positifs sont collectés vers la cathode sous l'effet de la force de Coulomb, c'est la zone de dérive (*figure 1.10*). [4] [22]

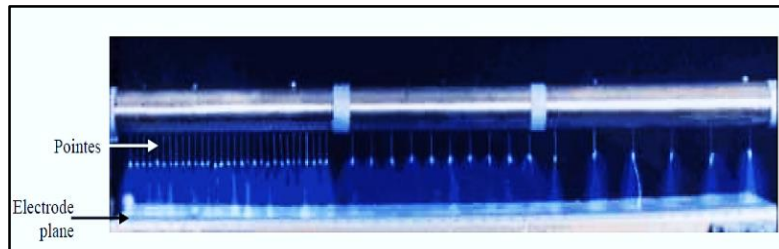


Figure 1.9 Décharge couronne lumineuse produite entre des pointes et une électrode plane reliée à la terre. [22]

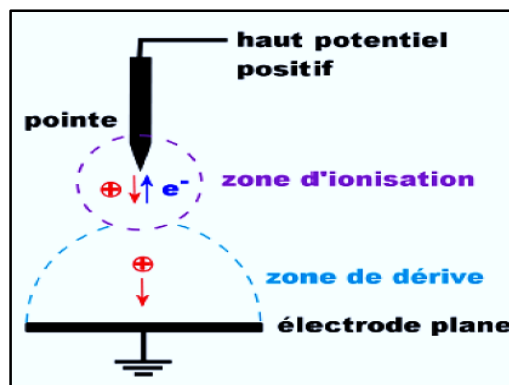


Figure 1.10 Zone active et la zone de dérive produites dans la décharge couronne [4]

L'appellation de décharge couronne (corona discharge) vient du halo lumineux en forme de couronne qui apparaît autour de l'électrode à forte courbure lors de l'initiation de la décharge.

Les configurations qui sont très utilisées sont de type pointe-plan, multipoints-plan, fil-cylindre, couteau-cylindre ou encore cylindre-cylindre comme le montre la *figure 1.11*.

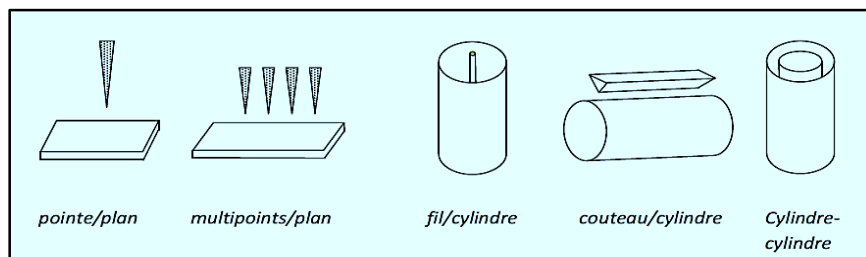


Figure 1.11 Différentes configurations de la décharge couronne. [5]

▪ Difficultés de décharge couronne

La difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc électrique qui est accompagnée par une forte augmentation de courant circulant dans la décharge et une température de gaz élevé et par conséquent le plasma généré est proche de l'équilibre thermodynamique et la puissance injectée dans le gaz est majoritairement dissipée par effet de Joule.

Dans la plupart des applications utilisant des décharges couronnes on cherche à éviter cette transition afin de ne pas détériorer les électrodes et pour optimiser les processus de formation d'espèces actives en fonction de l'énergie injectée. [6]

1.4.2. Caractéristique courant-tension et régimes de décharge couronne

La caractérisation courant-tension de la décharge couronne est obtenue en faisant augmenter la tension appliquée à l'intervalle gazeux, quatre régimes de décharge sont alors parcourus *figure 1.12*.

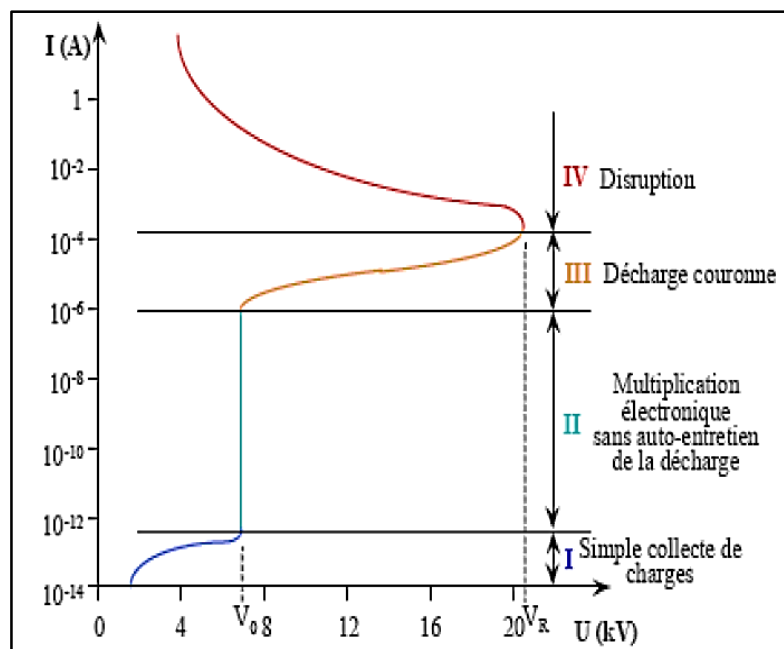


Figure 1.12 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne à pression atmosphérique. [5]

Régime I : Collecte de charges

Dans ce régime, le courant recueilli est dû à une simple collecte de charges naturellement présentes dans le milieu. Elles ont été créées par des sources extérieures telles que les rayons cosmiques ou la désintégration spontanée d'espèces présentes. Cette décharge n'est pas auto-entretenu et elle est impossible si le milieu est isolé de l'environnement extérieur. [22]

Régime II : Régime impulsionnel

Qui se produit à partir d'une tension seuil V_0 , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge. La décharge est qualifiée de non-autonome car elle dépend de processus

d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée. [5]

Régime III : Régime luminescent

L'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs : la décharge est auto-entretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards (aussi appelés "streamers") responsables de la composante impulsionnel du courant. Au-delà d'une tension appliquée V_R , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz.

Régime IV : Régime disruptif

Le régime d'arc est atteint, le milieu passe de l'état de plasma hors équilibre à l'état de plasma thermique.

1.4.3. Différents types des décharges couronnes

Selon la polarité du potentiel appliqué à la pointe on distingue deux types de décharge la décharge couronne positive et de la décharge couronne négative.

a) Décharge électrique couronne à polarité positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et le plan à la terre. Les électrons libres formés naturellement dans l'espace inter-électrode sont accélérés vers l'anode. Dans la région d'ionisation les collisions non-élastiques produisent des paires électron-ion positif (*figure 1.13*).

La décharge électrique couronne positive est entretenue par des électrons secondaires qui sont produit par la photo-ionisation du gaz dans la région du plasma ou cette dernière coïncide avec la région d'ionisation ce que n'est pas le cas d'une décharge couronne négative. [6]

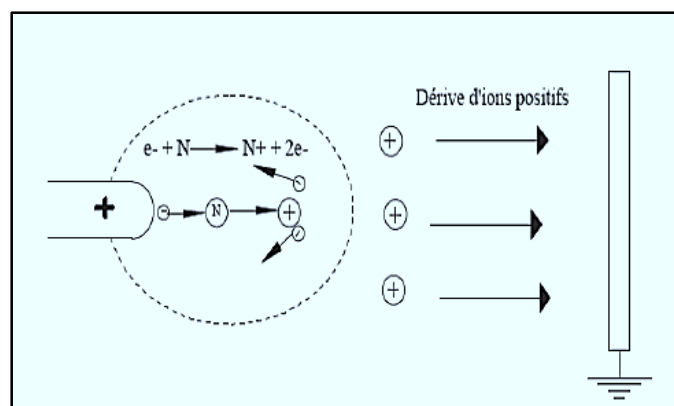


Figure 1.13 Descriptif de la décharge couronne positive. [5]

b) Décharge électrique couronne à polarité négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe, ce qui explique que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode *figure 1.14*. Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers le plan.

Lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc. Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de *Trichel* à une fréquence qui dépend de la tension appliquée.

Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode.

Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de *Trichel*, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode. [5]

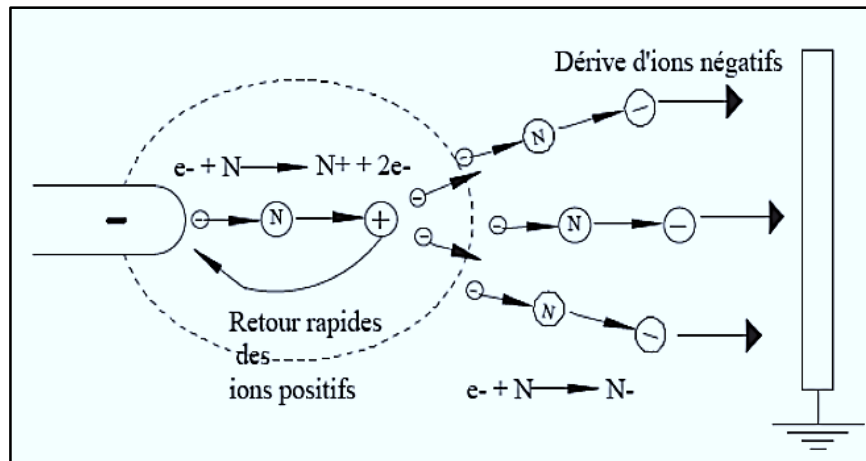


Figure 1.14 Descriptif de la décharge couronne négative. [5]

c) Décharge couronne pulsée

La haute tension est généralement appliquée à l'électrode active, peut être pulsée, alternative ou continue de polarité positive ou négative. L'utilisation d'une alimentation pulsée permet de générer de forts courants pendant des temps très courts (typiquement 500 A pendant 100 ns) et donc d'obtenir, sans passage à l'arc, des électrons de haute énergie.

La puissance pulsée peut fournir une énergie limitée à la décharge avec des tensions de travail habituellement utilisées variant de quelques Kilovolts à une trentaine de Kilovolts environ tandis que les puissances dépassent rarement quelques kilowatts.

La haute tension pulsée est habituellement employée pour obtenir un rendement élevé de production de l' O_3 (ozone) dans un espace large. [5-6]

1.4.4. Application des décharges couronne

Les décharges couronne sont utilisées dans de nombreux domaines pour des applications commerciales et industrielles où elles remplacent des techniques souvent plus polluantes.

▪ Traitement des surfaces

Le traitement de surfaces est un domaine d'utilisation des plasmas froids produits par décharge couronne. Ils ont été adoptés dans le secteur de la micro-électronique pour la fabrication des circuits intégrés et des circuits imprimés.

En raison de leurs caractéristiques et de leurs qualités intrinsèques, les plasmas froids générés par décharge couronne se diffusent dans d'autres secteurs tels que : [6]

- La métallurgie et la mécanique : durcissement superficiel et protection anticorrosion des pièces et outillages.
- La plasturgie : préparation de la surface à une enduction ultérieure, nettoyage et dégraissage, élaboration de fonctions sélectives sur membranes, modification du coefficient de frottement, création d'un effet barrière, notamment pour les emballages alimentaires.
- Élimination de l'électricité statique : L'électricité statique est, dans l'industrie, la source de dysfonctionnements gênants. Elle provoque des décharges néfastes aux dispositifs électroniques.

▪ Destruction des polluants

De nombreuses applications des décharges couronne ont vu le jour pour le traitement des effluents gazeux par des réacteurs, notamment dans le cas des COV (méthanes), acétaldéhyde, CFC, du CO₂, des NO_x ou du SO₂. [5]

Le traitement s'effectue soit en détruisant les espèces toxiques, soit en les transformant en espèces moins nocives et/ou plus facilement traitables par d'autres techniques de dépollution.

▪ Génération d'ozone

Les décharges couronnes, dans l'air, à pression atmosphérique, permettent de générer les espèces radicalaires, principalement l'oxygène atomique, nécessaires à la constitution de l'ozone et cela pour des températures ambiantes. L'ozone possédant un fort pouvoir oxydant est également utilisé dans de nombreux domaines comme l'industrie agroalimentaire en tant que désinfectant ou conservateur. [5-6]

Les décharges de corona ont de nombreuses autres applications comme les parafoudres (augmenter la conductivité de l'air autour de la pointe pour capter la foudre par le paratonnerre), la neutralisation (Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques), les Filtres et les séparateurs électrostatique. [6]

1.5 Décharges à barrière diélectrique

1.5.1 Historique

Les décharges à barrière diélectrique (*DBD*) ou décharges silencieuses sont connues depuis plus d'un siècle et les premières expériences sur ces décharges ont été reportées par *Von Siemens* en 1857. 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*. Les premières simulations et recherches sur les *DBDs* c'était dans les années soixante-dix qui ont permis d'élargir le champ d'application de ces décharges.

A la fin des années quatre-vingt les japonais ont découvert l'existence d'un régime de *DBD* homogène à la pression atmosphérique. Depuis, de nombreuses recherches ont été menées afin de comprendre les phénomènes physiques régissant les *DBDs*. [4] [16] [20]

1.5.2 Définition

Une DBD est une source de plasma froid hors d'équilibre caractérisée par la présence d'au moins un diélectrique entre les deux électrodes métalliques. La présence du diélectrique permet de limiter l'énergie qui passe dans chaque canal de décharge et ainsi d'éviter le passage à l'arc.

Le rôle du diélectrique est de constituer d'une certaine façon une capacité en série avec l'espace de gaz. Et donc sa charge limitera la tension appliquée au gaz, ce qui permet d'éviter la transition vers un arc. L'accumulation de charges issues du plasma sur le diélectrique solide entraîne une chute du potentiel et du champ appliqués sur le gaz, conduisant à l'extinction de la décharge.

Il agit donc comme un ballast qui, dans le cas idéal, ne consomme aucune énergie. Le diélectrique étant un isolant, sa constante diélectrique et son épaisseur, en combinaison avec la dérivée dans le temps de la tension appliquée dv / dt , détermine le courant de déplacement qui peut passer à travers le diélectrique. Il ne laisse pas passer le courant continu (DC) et les décharges DBD sont nécessairement pulsées et requièrent donc l'utilisation de tension alternative pour fonctionner. [4]

1.5.3 Principe

Suite à l'application d'une tension suffisamment élevée, sur les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d'un canal conducteur appelé micro-décharge (la localisation de ce canal peut résulter de la présence d'une impureté ou d'une irrégularité à la surface d'une électrode) (*figure 1.15-a*).

Le schéma de la *figure 1.15-d* représente une seule micro- décharge ou une décharge homogène sur toute la surface des électrodes.

Le diélectrique en vis-à-vis de la micro-décharge se comporte comme l'isolant d'un condensateur, C_l , dont les armatures sont d'un côté la décharge et de l'autre l'électrode.

Le passage du courant induit une accumulation de charges sur la surface du diélectrique solide en vis-à-vis du canal de décharge qui se traduit par une augmentation de la tension V_{ds} (tension sur le diélectrique).

Si l'augmentation de cette tension au fur et à mesure du développement de la décharge est plus rapide que l'augmentation de la tension V_a (la tension appliquée sur la cellule de décharge), elle cause une chute de la tension appliquée sur le gaz V_g (la tension appliquée sur le gaz), ce qui conduit à l'extinction de la décharge. Ainsi, la micro-décharge est bloquée bien avant d'avoir atteint un degré d'ionisation suffisant pour transiter en régime d'arc.

Tant que la tension appliquée augmente, des micro-décharges s'initient à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles sur le diélectrique diminue le champ électrique appliqué sur le gaz aux positions où des micro-décharges se sont déjà développées (*figure 1.15-b*).

Au changement de polarité (*figure 1.15-c*), les charges précédemment déposées sur le diélectrique permettent un claquage du gaz sous un champ plus faible que lors de la première alternance.

La fonction première du diélectrique est de limiter la charge déposée sur les électrodes et par voie de fait le courant transitant dans le canal afin que la décharge ne devienne par un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à pression atmosphérique. De

plus, l'utilisation du diélectrique a également pour conséquence de tendre vers une répartition plus uniforme des micro-décharges sur toute la surface des diélectriques. [4]

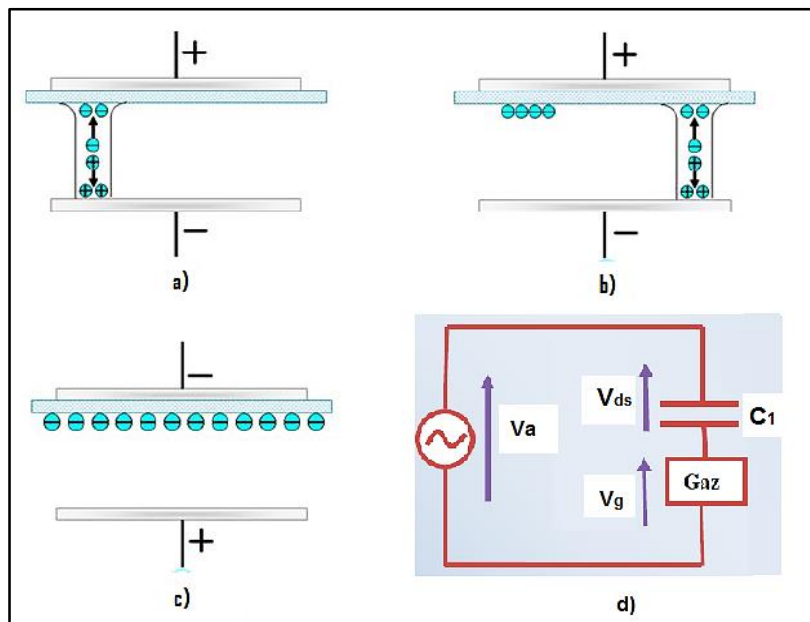


Figure 1.15 Principe de fonctionnement d'une DBD (a) Etablissement d'une première micro-décharge, (b) extinction de la première micro-décharge et amorçage d'une nouvelle, (c) changement de la polarité appliquée sur les électrodes, (d) schéma électrique équivalent d'une micro-décharge. [4]

1.5.4 Sources d'excitation pour les DBDs

a. Source d'excitation sinusoïdale

L'alimentation d'une DBD en utilisant un générateur de tension sinusoïdale est la façon la plus ancienne et la plus facile à réaliser. Dans ce type de configuration, il est nécessaire de placer un transformateur élévateur en sortie du générateur, quand la tension du générateur n'est pas suffisante pour faire claquer le gaz. Les alimentations sinusoïdales permettent un réglage de la fréquence et de l'amplitude de la tension. Typiquement, avec ce type d'alimentation, le courant (de conduction) ne circule dans le gaz que de façon instantanée, aux moments du claquage du gaz. [3]

b. Source d'excitation impulsionnelle [1] [3]

Les alimentations impulsionnelles pour les DBDs présentent généralement une tension carrée, avec une amplitude de l'ordre de 10kV , des temps de montée de l'ordre de la centaine de ns et une fréquence de fonctionnement de l'ordre de plusieurs dizaines de kHz.

Pour faire claquer le gaz il faut arriver à des niveaux de tension élevés pour cela un convertisseur de type impulsionnel composé d'une source de tension continue et d'un transformateur élévateur sont utilisés.

Ces sources de tension, sont actuellement utilisées dans les excilampes en raison de leur efficacité supérieure en termes de puissance rayonnée, par rapport aux alimentations sinusoïdales.

Dans ce type d'alimentation le passage du courant se fait pendant les changements de niveau de la tension imposée, dans des intervalles de temps très courts. Ce courant est effectivement un courant de conduction (qui produit une dissipation de puissance dans la décharge) et a une amplitude plus importante que celui fourni par l'alimentation sinusoïdale.

c. Source d'excitation Burst

Une onde Burst est une onde sinusoïdale haute fréquence (quelque MHz) à amplitude modulée, elle est considérée comme une forme d'onde intermédiaire entre une onde sinusoïdale et une onde pulsée.

Ainsi l'onde Burst est constituée de susception de mode on et off de la décharge à une fréquence f_B qui est de l'ordre de quelque centaine de Hz. Tel que la modulation de l'amplitude est performée par la multiplication d'un signal sinusoïdal carré à une fréquence f_A de l'ordre de quelque Méga Hz . Donc l'onde Burst est la fusion entre une onde sinusoïdale et une onde impulsionnelle (*figure 1.16*). [3]

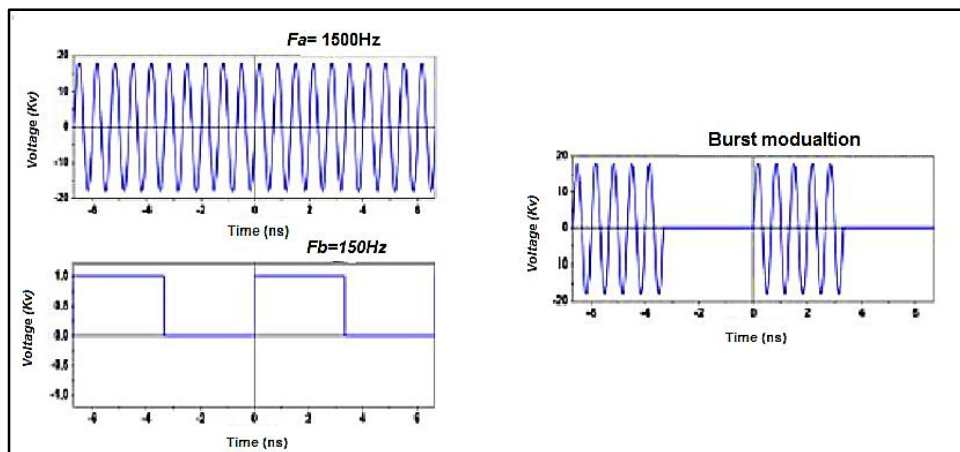


Figure 1.16 Forme d'onde Burst obtenue par la fusion d'une onde sinusoïdale et une onde pulsée. [3]

1.5.5. Mécanismes de micro-décharges dans les DBDs

La micro-décharge est définie comme l'ensemble des processus initiés par l'avalanche électronique et leur développement jusqu'à la jonction du streamer à la cathode. Le déroulement de ces étapes sera détaillé dans cette partie.

a. Avalanche électronique et transition en streamer

L'avalanche des *DBDs* se propage de la cathode vers l'anode selon un mécanisme spécifique. Elle se distingue par une forte charge d'espace, la répartition de ces charges au sein de l'avalanche donne à celle-ci une structure dipolaire.

Lorsque l'avalanche arrive sur l'anode, elle provoque un dépôt de charges négatives qui s'étend sur la surface du diélectrique. Dans le même temps une charge positive créée par les ions issus de la queue d'avalanche se forme en regard de l'anode.

L'accumulation de ces charges positives provoque une dégradation locale du champ électrique adjacent à la barrière anodique et constitue la tête du streamer lorsque le champ électrique est suffisamment intense pour provoquer la transition. [3]

b. Propagation du streamer

Le streamer utilise Pour se propager un point de départ qui est la distorsion du champ électrique causée par les charges d'espace dans la région du plasma.

Ce plasma, constitué des électrons issus de l'avalanche et d'ions positifs issus du nuage de charges d'espace en cours d'accumulation agit comme un milieu conducteur et amène une partie du potentiel anodique à l'intérieur de l'espace gazeux.

Le déplacement des électrons secondaires créés par photo-ionisation par des particules excitées générées par le champ électrique qui devient suffisamment élevé par l'augmentation de la densité du nuage de charges d'espace, déclenche des avalanches secondaires offrant de nouvelles zones de charge d'espace positive en regard de la tête du streamer, ce qui conduit à la progression du streamer vers la cathode en laissant un sillage de plasma étendu faiblement ionisé. [1] [3]

c. Obstruction du canal de micro-décharge

Lorsque le streamer parvient à la cathode, la charge d'espace positive est transférée sur la barrière cathodique et se transforme en charge de surface en s'étendant radialement.

À ce stade, les champs locaux sont renforcés au niveau des barrières, et sont répartis de manière relativement homogène à travers l'espace gazeux. A mesure que les densités surfaciques de charges se forment sur les barrières, le champ électrique dans l'espace de gaz décroît et devient inférieur au seuil d'ionisation.

Les électrons quittent le canal laissé par le streamer rapidement jusqu'à ce que la micro-décharge disparaisse sous l'effet conjugué des charges accumulées à la surface des diélectriques et de la charge d'espace positive provoquée par les ions, qui mettent plus de temps à quitter l'espace de décharge. Cela marque la fin de la phase de claquage de la micro-décharge. [1] [3]

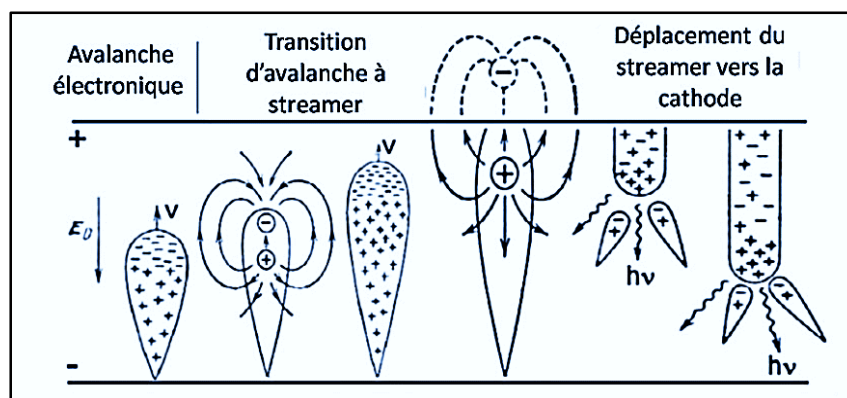


Figure 1.17 Principales étapes de la formation d'une micro-décharge. De gauche à droite : développement de l'avalanche primaire, transition en streamer puis formation du canal de décharge [3]

1.5.6. Différents régimes des DBDs

a. Régime filamentaire

Le régime filamentaire se compose de multitudes de micro-décharges désynchronisées spatialement et temporellement, c'est donc un régime non uniforme.

Macroscopiquement, on peut alors observer un phénomène de répulsion des filaments entre eux. La densité de micro-décharges est proportionnelle à l'amplitude de la tension appliquée (*figure 1.18*).

Pour des tensions proches de la valeur de claquage (et à fréquence élevée), les micro-décharges en tendance à apparaître au même endroit les charges résiduelles sur le diélectrique facilitent l'apparition d'un nouveau filament en ces points de la surface après le changement de la polarité.

À l'inverse, à tension élevée (et fréquence faible) les micro-décharges changent de position sur la surface de manière aléatoire, la répartition des charges résiduelles étant dans ce cas quasi homogène. [3]

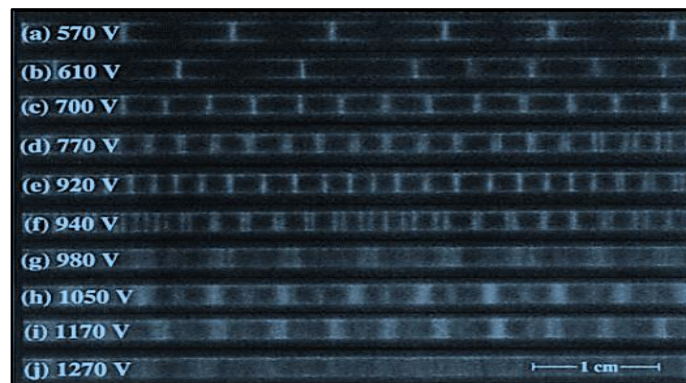


Figure 1.18 Différents régimes de micro-décharges sont observés en augmentant la tension, allant de filaments dissociés à des ensembles de filaments montrant un comportement collectif. [3]

b. Régime homogène

Un moyen d'accéder à une DBD homogène est de parvenir à une répartition homogène des charges sur la surface. La décharge homogène est possible si la densité d'électrons de pré-ionisation est suffisante pour causer la synchronisation des têtes d'avalanches primaires aux étapes où des micro-décharges isolées devraient autrement se produire.

La nature des diélectriques (par la valeur des coefficients d'émission secondaire selon le gaz), les conditions de surface et les propriétés de polarisation peuvent favoriser l'apparition d'une décharge homogène préférentiellement au mode filamentaire. La présence d'impuretés ou d'espèces réactives et/ou électronégatives (comme l'oxygène), même en faible quantité peut amener la décharge dans un régime filamentaire.

Les signaux électriques, et notamment la tension appliquée et la fréquence influencent l'allure de la décharge par contre Les propriétés des micro-décharges sont globalement indépendantes de la forme des signaux appliqués, à l'exception des courts temps de montée de tension (un temps de montée de tension suffisamment court initie un grand nombre de micro-décharges simultanément, voire de synchroniser les micro-décharges). [3]

1.5.7. Géométries des DBDs

L'utilisation d'un isolant permet également d'obtenir de nombreuses géométries de décharges, elles peuvent être regroupées en deux catégories :

a. Décharge à barrière diélectrique volumique

La DBD volumique s'établit entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant. La décharge se développe principalement dans le volume gazeux par des filaments se propagent et s'étalent sur la surface (*figure 1.19*). [4] [20]

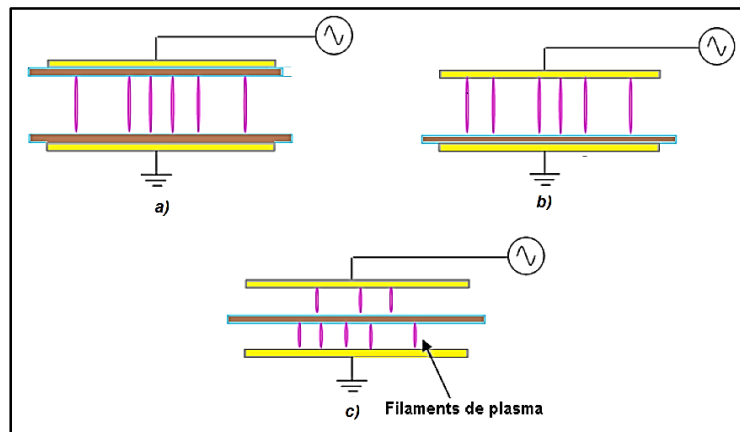


Figure 1.19 Schémas de décharge à barrière diélectrique volumique [16]

b. Décharge à barrière diélectrique surfacique

Cette décharge est établie entre au moins deux électrodes placées de part et d'autre du diélectrique et est dite surfacique car il n'y a plus, comme précédemment, d'espace gazeux entre les électrodes (le diélectrique occupant tout l'espace inter-électrodes).

L'électrode active est directement en contact avec le diélectrique, et la décharge va se propager à la surface de l'isolant. Dans une telle décharge, il est clair que la surface du diélectrique joue un rôle dans la propagation du plasma en particulier quand la cathode est au-dessous du diélectrique. [4]

La forme de la décharge dépend des polarités respectives de l'électrode de surface et de la contre-électrode. Si l'électrode de surface est la cathode, la surface se charge de manière homogène ; pour des polarités opposées une structure de filaments apparaît. [3]

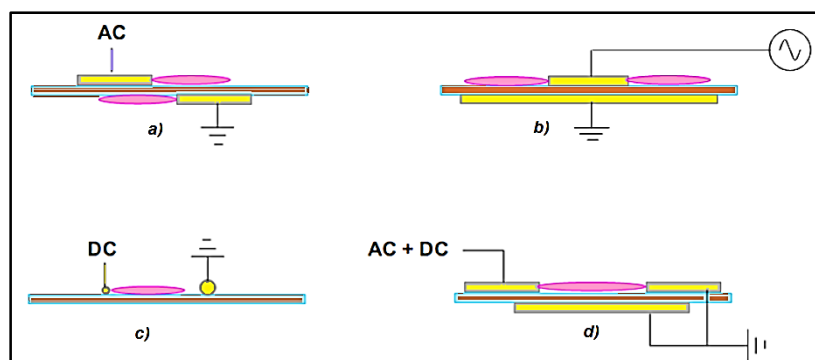


Figure 1.20 Schémas de décharge à barrière diélectrique surfacique. [4]

1.5.8. Applications des DBDs

Au cours de ces dernières décennies, les applications des décharges à barrières diélectriques ont été diversifiées. Selon l'objectif recherché soit la décharge filamentaire, soit la décharge luminescente est privilégiée. [9]

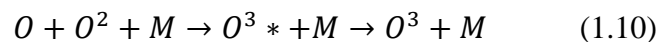
Dans cette partie, nous allons citer un grand nombre d'applications des DBDs, en commençant par la génération d'ozone ensuite traitement des surfaces, les éclairages et écrans à plasma, et finalement les lampes à excimères.

a. Production d'ozone

La première synthèse de l'ozone dans l'air à partir d'une DBD à pression atmosphérique était réalisée par Siemens, en 1857. La production d'ozone fut l'objet de nombreuses recherches finalisées qui aboutirent à la réalisation de réacteurs industriels largement utilisés de nos jours. [8]

La plus grande installation de génération d'ozone pour la désinfection de l'eau était construite à Nice (France) et à St. Petersburg (Russie) à la fin du siècle dernier. Bien que la purification de l'eau potable soit toujours le marché de l'ozone le plus important, d'autres applications ont émergé. [4]

La *figure 1.21* illustre un réacteur d'ozone à décharge à barrière diélectrique alimenté en oxygène « O_2 ». Le générateur est constitué d'une DBD à deux barrières diélectriques coaxiales, la décharge est effectuée dans le volume par lequel le gaz circule. Initialement, l'oxygène à son état fondamental est dissocié, par une collision électronique (conséquence du courant électrique de l'alimentation) produisant deux atomes d'oxygène suivant la synthèse ci-dessous : [21-22]



Avec :

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

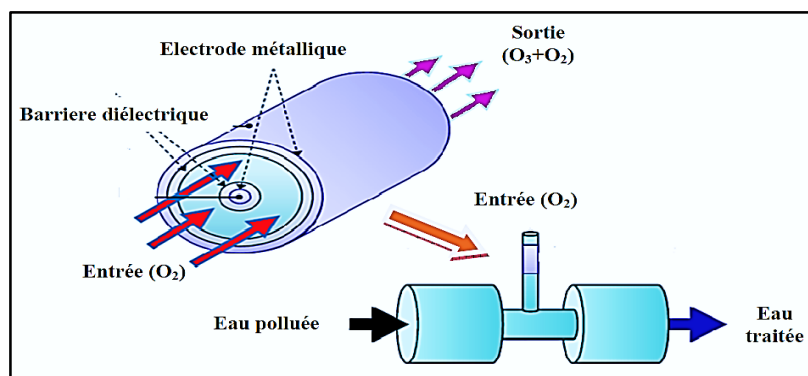


Figure 1.21 Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement d'eau [23]

La configuration des DBDs mise au point pour la production d'ozone, est également appliquée à la décomposition et la destruction des gaz toxiques, comme le monoxyde de

carbone CO, les oxydes d'azote NO_x et dans la réduction des émissions à effet de serre, comme le dioxyde de carbone CO₂, responsables du réchauffement de la planète.

En outre, les *DBDs* serrent aussi (dans le domaine académique pour le moment) à produire de l'Hydrogène à partir d'hydrocarbures ou, afin de faciliter leur transport ; à faire la synthèse de combustibles liquides, comme le méthanol, à partir de gaz produits dans l'extraction pétrolière. [22]

b. Traitement de surfaces

Les *DBDs* peuvent fonctionner en régime filamentaire ou homogène, la caractéristique « homogène » leur confère la propriété de pouvoir agir pour une modification uniforme des surfaces traitées ; un exemple est le traitement des plastiques, pour leur permettre de coller facilement ou d'être réceptifs à l'encre d'impression.

Les *DBDs* peuvent être facilement introduite dans le processus industriel de production de papier, en effectuant la décharge entre un rouleau qui fait tourner le papier et une électrode (parfois plusieurs) recouverte par un diélectrique, comme le montre la *figure 1.22*.

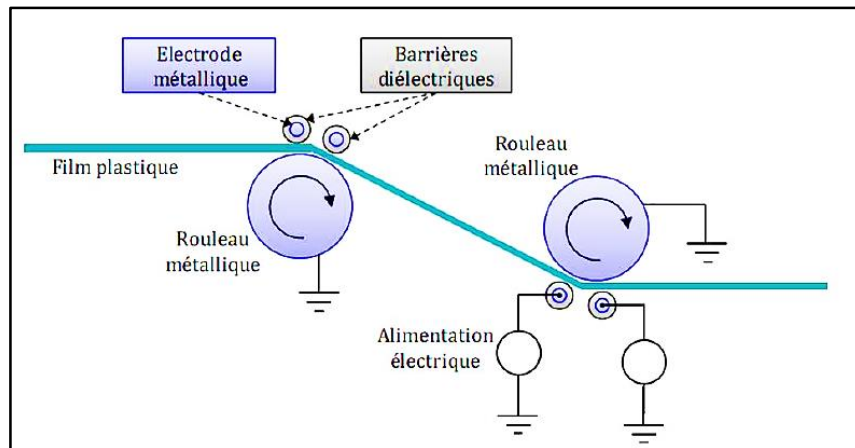


Figure 1.22 Utilisation d'une *DBD* dans le traitement surfacique du plastique. [3]

Les *DBDs* sont amplement étudiées pour l'industrie des composants microélectroniques ; elles peuvent être impliquées dans plusieurs étapes de la fabrication d'un circuit intégré. Avec les *DBDs*, il est possible de réaliser des dépôts de surfaces et des gravures, qui sont d'ailleurs très précises. [22]

c. Eclairage et écrans à plasma

Les *DBDs* présentent une bonne solution aux problèmes de contamination du gaz et d'érosion des électrodes dans les lampes, ce qui a permis d'augmenter leur durée de vie et d'éliminer des éléments dangereux tels que le mercure. [3]

Les lampes à *DBD*, ont également l'avantage de pouvoir produire un rayonnement homogène à travers la surface des électrodes ; cette propriété est exploitée pour les lampes d'éclairage de fond dans les écrans *LCD* (*liquid crystal display*, en anglais). Les lampes *DBD* sont utilisées pour produire les pixels dans les écrans à plasma. Elles sont de plus dotées d'un revêtement de poudre phosphorescente à l'intérieur de la paroi externe. La décharge dans le gaz conduit à la production de photons dans la région UV ; ces photons entrent en collision avec la substance phosphorescente, générant ainsi de la lumière visible. Le diélectrique

externe (et parfois l'électrode externe qui est transparente) filtre l'UV, ne permettant que le passage de la couleur correspondante à une longueur d'onde visible.

Cette longueur d'onde peut être choisie avec la substance fluorescente, ce qui est exploité dans la construction des écrans plats pour la télévision.

Un écran plat est constituée par un grand nombre de cellules ou « pixels » (par exemple 1280 en largeur par 1024 en hauteur), chacune constituée par trois mini-lampes phosphorescentes, l'une rayonnant dans le rouge, l'autre dans le vert et la troisième dans le bleu. La configuration de la cellule peut être avec des électrodes parallèles ou coplanaires, comme le montre la *figure 1.23*. La tonalité finale de la couleur pour chaque *DBD* est obtenue, par le nombre de décharges effectuées pendant un cycle de rafraîchissement de l'écran. [22]

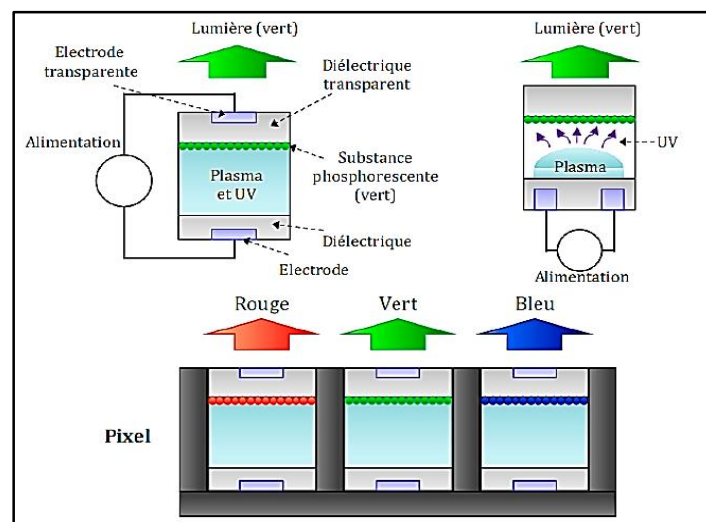


Figure 1.23 la DBD dans les écrans plats à plasma. DBD à électrodes parallèles (gauche). DBD à électrodes coplanaires (droite). Cellule élémentaire ou pixel (bas). [3]

d. Les lampes à Excilampes [22]

Les lampes à *DBD* basées sur l'utilisation du rayonnement UV produit, sont appliquées dans des différents domaines ; les traitements dermatologiques, la stérilisation de l'eau et les procédés pour la microélectronique.

Les lampes à espèces excitées, excimères ou exciplexes, présentent des avantages par rapport aux techniques classiques de production d'UV :

- Elles n'utilisent pas le mercure dans le mélange gazeux, évitant des conséquences graves pour la santé et l'environnement ;
- Elles n'ont pas besoin d'un système de chauffage du gaz (mercure) et peuvent être employées dans des applications à basse température (régime luminescent au lieu du régime d'arc) ;
- Leur spectre d'émission peut être réglé avec le mélange gazeux, avec multiples choix, et avec une largeur de raie de l'ordre de la dizaine de nanomètres.

a) Excimères

L'Excimères, qui doit son nom à la contraction en anglais de « excited dimmer », est une molécule excitée et instable, formée par deux atomes d'un gaz rare. Cette molécule libère une énergie en forme de photon, lors de son retour à l'état fondamental (deux atomes).

b) Exciplexes

L'exciplexe est une molécule excitée instable, constituée par un atome d'un gaz rare et un autre d'un halogène. Son nom provient de l'anglais « excited complex » et le processus de génération de la lumière est similaire à celui d'un excimères, expliqué auparavant.

1.6 L'ozone

1.6.1 Introduction à l'ozone

L'ozone est un gaz odorant de couleur bleu pâle. C'est une forme très instable et réactive de l'oxygène. Il est présent au niveau de la haute atmosphère (stratosphère) sous la forme d'une couche d'une quarantaine de kilomètres d'épaisseur surmontant la troposphère " la couche d'ozone". Dans ce cas, il joue le rôle d'un écran aux rayonnements ultraviolets émis par le soleil, rayonnements dont les effets nocifs affectent non seulement l'être humain (cancers, cataractes, ulcères, maladies du sang, etc.) mais également d'autres êtres vivants.

L'ozone troposphérique (au niveau du sol) est également présent par l'action des rayons ultraviolets du soleil sur les polluants primaires que sont les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et le monoxyde de carbone. Il se produit également lors des chutes de pluie essentiellement dans les régions tropicales et est transporté vers les hautes latitudes au cours de l'hiver par les grands courants aériens.

Lorsqu'il est inhalé, il provoque des irritations du nez et de la gorge. C'est donc un gaz toxique. L'accroissement de sa concentration dans l'air que nous respirons notamment lors de situations météorologiques empêchant sa dispersion, durant les orages et après les éclairs, représente un danger pour notre santé.

Conjointement, l'exposition quotidienne à l'ozone, se fait pendant de brèves périodes, quand le trafic au sein de ville est trop important, ou quand les gaz industriels sont contraints par le temps à rester au niveau du sol. [4-6]

1.6.2 Aperçu historique sur l'Ozone

a. Découverte de l'ozone

A la fin des années du dix-septième siècle, le chercheur scientifique Martinus Van Marum a décrit l'odeur caractéristique se formant près d'une machine électrostatique. En 1801, la même odeur fut remarquée à l'anode a été constatée par Cruikshank, quand il effectua l'électrolyse de l'eau. Seulement en 1839 et toujours en travaillant dans le même domaine « électrolyse », Schönbein, Professeur à l'Université de Basle a établi que cette odeur très prononcée était due à un nouveau composé chimique qu'il a appelé *Ozone* d'après le mot grec « ozein » et qui veut dire mauvaise odeur. Cela a pris encore 25 ans de conflit pour que le scientifique J.L. Soret puisse établir en 1865 que ce nouveau composé est constitué de trois atomes d'oxygène. La découverte des propriétés bactéricides de l'ozone par Ohlmüller en 1890 a été à l'origine de sa production industrielle. [5-6]

b. Cycle de Chapman

En 1930, les hypothèses du britannique Sydney Chapman sur la formation et la destruction chimique de l'ozone se révélèrent correctes. L'atome d'oxygène et l'ozone se transforment alternativement l'un en l'autre. Les liaisons qui unissent les atomes au sein des molécules sont cassées à cause des rayons solaires.

Pour briser la molécule d'O₂ il faut plus d'énergie solaire que pour briser la molécule d'ozone (dans le premier cas, il faut une longueur d'onde de 240 nm contre 320 nm dans le second cas). La *figure 1.24* « a » et « b » montre la formation et la destruction de l'ozone. [9] [20] [24]

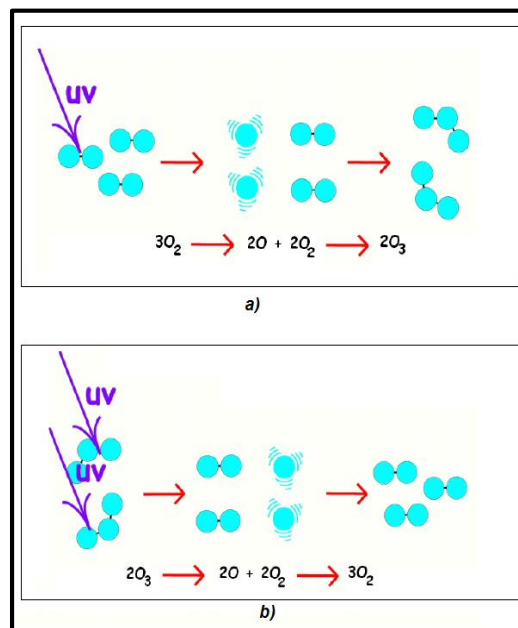


Figure 1.24 Cycle de Chapman : a) formation de l'Ozone, b) destruction de l'Ozone. [9]

1.6.3 Propriétés physiques et structure de l'ozone

L'ozone est un agent d'oxydation puissant qui peut être la source de réactions violentes avec de nombreux composés minéraux ou organiques. Le potentiel d'oxydation de 2,07 Volts prouve que l'ozone est un fort oxydant. En fait, l'ozone est l'un des oxydants disponibles les plus forts pour le traitement de l'eau.

L'ozone est peu soluble dans l'eau. Sa solubilité augmente avec la température de l'eau (à partir de 0°C) et avec sa concentration dans la phase gazeuse.

A température ordinaire l'ozone est un gaz instable bleuté inflammable et explosif, il est aussi plus lourd que l'air (densité par rapport à l'air : 1,657) ; il peut donc s'accumuler près du sol. Il se liquéfie à -111,9°C en prenant l'aspect d'un liquide bleu foncé et il se solidifie à -192,5°C en un solide de couleur pourpre.

L'odeur piquante de l'ozone est détectée à un seuil de perception d'environ 0,01 ppm à 0,05 ppm et l'on considère qu'un taux de 0,25 ppm est préjudiciable à la santé.

Les principales constantes physiques, thermodynamiques et toxicologiques de l'ozone sont reprises dans le **tableau 1.1** [5-6], ainsi que la *figure 1.25* montre sa structure qui est présenté

sous la forme d'un triangle isocèle d'un angle au sommet égal à $116^{\circ}45'$ et de deux liaisons interatomiques de $1,278 \cdot 10^{-10}$ m. [9] [20]

Tableau 1.1 : Principales constantes physiques, thermodynamiques et toxicologiques de l'ozone de l'ozone [6] [9] [20] [25]

Masse molaire	47,9982 g/mol
Point de fusion	-192,5 °C
Point d'ébullition	-119,5 °C
Température critique	-12,1 °C
Pression critique	5460 kPa
Densité à 101 KPa et 25°C	1,66
Point de fusion	-192,5 °C
Point d'ébullition	-119,5 °C
Masse volumique à 0°C et 1 atm	2,15 g/l
Solubilité	570 mg/l à 20 °C
Enthalpie de formation	142,3 KJ/mol (34,15 kcal/mol)
Énergie de dissociation	-144,8 KJ/mol
Angle de liaison	116°
Potentiel électrochimique (oxydation à 25°C)	2,07 volt
Occurrence	Gaz bleuté, fluide bleu foncé

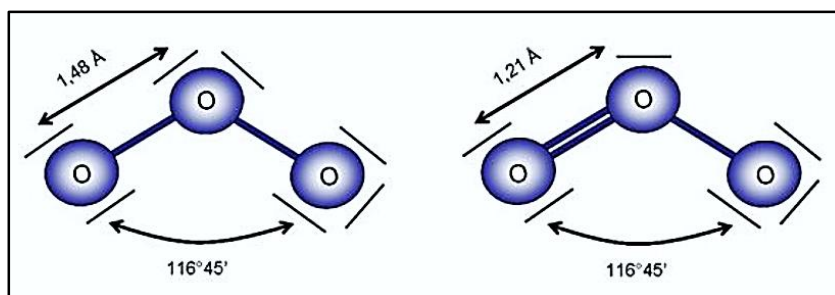


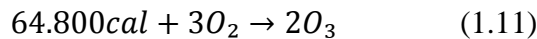
Figure 1.25 Structure de l'ozone [9] [20]

1.6.4 Modes de production de l'ozone

▪ Production naturelle

L'ozone joue un rôle important dans l'atmosphère sous forme d'une couche appelée « OZONOSPHERE » agit comme un véritable filtre afin que les radiations ultra-violettes irradiées par le soleil atteignent la terre avec seulement le millionième de leur action, car dans le cas contraire ça serait fatal pour les êtres vivants sur la terre. Cet ozone stratosphérique est bénéfique et se concentre à 90% à une altitude de 20 à 50 km (avec une concentration maximale de 5 à 6 ppm à 25 km d'altitude). L'épaisseur réduite de l'ozone stratosphérique est de 1 à 4 mm. [5] [26]

L'ozone se forme à la suite de la dissociation d'une molécule d'oxygène par l'action des radiations solaires. Ces phénomènes atmosphériques sont chargés d'apporter de l'énergie nécessaire à la formation de l'ozone, d'après la réaction endothermique :



Dans la troposphère, en revanche, la pollution photochimique engendre des niveaux d'ozone qui, bien que contribuant que pour quelques centièmes à l'épaisseur réduite de l'ozone atmosphérique, posent divers problèmes sanitaires (irritation des muqueuses à œdèmes pulmonaires suivant la concentration) et environnementaux (effet de serre, effet sur les végétaux...). Cet ozone se forme par oxydation photochimique de CO, CH₄ et d'autres hydrocarbures en présence d'oxydes d'azote. [20] [27-28]

a. Formation de l'ozone par décharge électrique

L'ozone peut être créé par décharge électrique dans la nature ou une très grande quantité d'ozone peut être créé avec l'éclairage de chaque foudre. Sa formation passe par deux étapes (*figure 1.26*) : [9] [29]

- **1^{ère} étape** : Les molécules d'oxygène (O₂) sont scindées par une forte tension électrique résultant en deux individuels atomes d'oxygène (O).
- **2^{ème} étape** : Les deux atomes d'oxygène (O) s'unissent avec d'autres molécules d'oxygène (O₂) pour produire l'ozone (O₃).

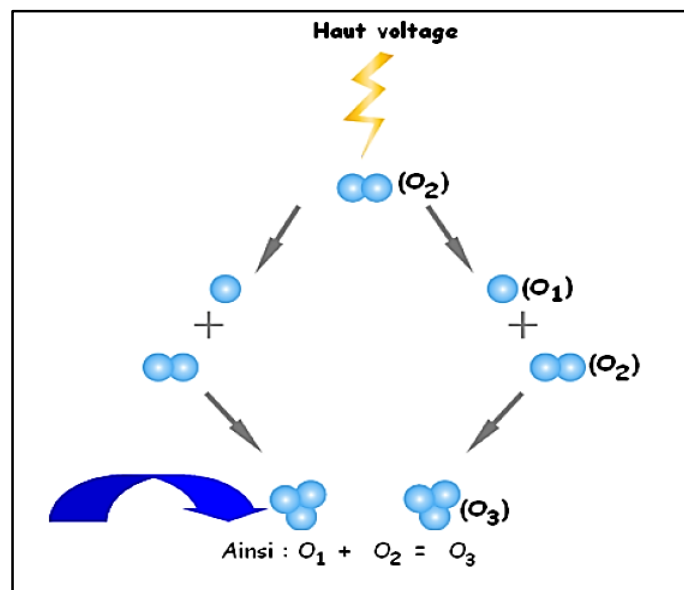


Figure 1.26 Étapes de formation de l'ozone par décharge électrique. [20]

b. Formation de l'ozone par rayons UV

L'ozone se forme à partir des rayons ultraviolets par quatre étapes (*figure 1.27*) :

- a. Une radiation UV de haute énergie atteint une molécule O₂.
- b. Deux atomes d'oxygène sont alors libérés.
- c. Ces radicaux oxygènes entrent en collision avec des molécules de dioxygène.
- d. formant ainsi une molécule d'ozone. [20] [30]

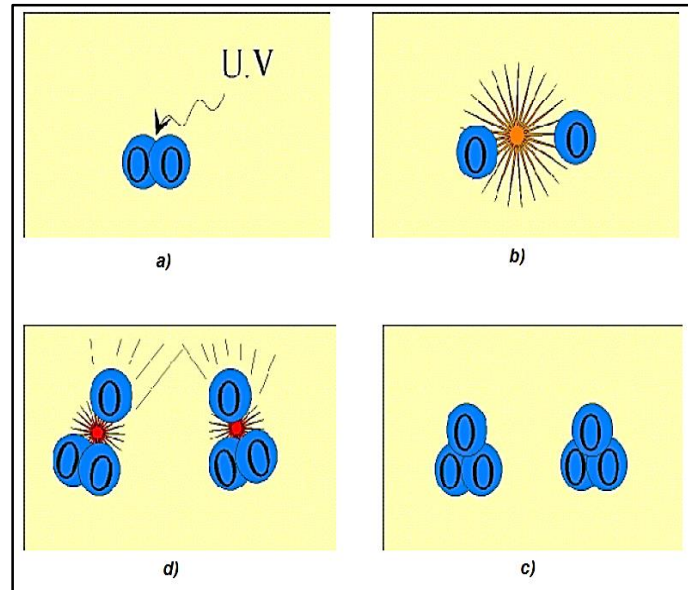


Figure 1.27 Étapes de formation de l'ozone par UV. [20]

■ Production artificielle

La production de l'ozone artificiellement est obtenue par des procédés physico-chimiques, à savoir :

- Par des lampes ultra-violettes, pour des applications qui demandent une basse concentration d'ozone.
- Par décharges électriques silencieuses (décharge *DBD*), pour des applications demandant une forte concentration d'ozone. [20] [27]

a. Lampes Ultra-violettes

La lumière UV-C est créée par une lampe contenant un gaz inerte et du mercure. L'énergie électrique est appliquée aux électrodes au sein de cette lampe qui crée un arc électrique à travers la vapeur métallique pour générer le rayonnement UV.

Deux principales technologies de lampes UV sont disponibles pour la désinfection

- Lampes à basse pression ont la capacité de créer un rayonnement monochromatique à **254 nm**, à proximité du pic germicide (**264 nm**).
- Lampes à moyenne pression créent un large spectre de longueurs d'ondes UV de **200 à 300 nm**.

Ces systèmes désinfectent par l'inactivation des micro-organismes pathogènes comme les virus, bactéries et parasites causant de nombreuses maladies. Les plus efficaces longueurs d'onde des UV pour inactiver ces micro-organismes sont les UV-C avec des longueurs d'onde comprises entre 200 et 280 nm (*figure 1.28*) qui endommagent les acides nucléiques (ADN ou ARN).

L'efficacité germicide d'un système UV dépend de diverses propriétés telles que : la transmission UV, en taux et en dose, qui est une fonction de l'intensité UV délivrée par les lampes et la durée d'exposition dans le réacteur. [20] [31]

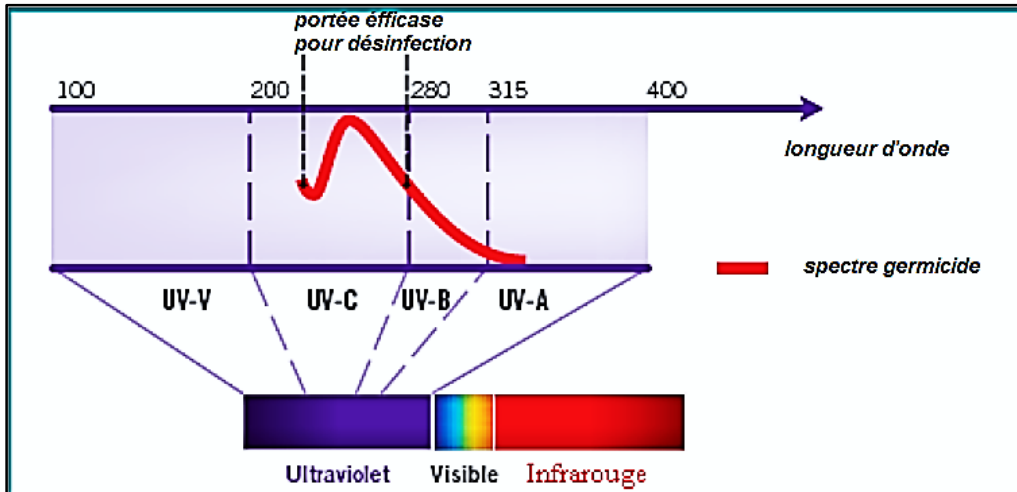


Figure 1.28 Spectre germicide des lampes UV. [20] [32]

b. Décharge à barrière diélectrique

En 1857, Werner Siemens, a proposé une méthode efficace pour la production d'ozone en faisant passer l'air ou l'oxygène à travers une décharge à CA délimitée par au moins une barrière diélectrique.

L'ozone est produit aujourd'hui sur une échelle commerciale par le biais de décharge électrique silencieuse dans des générateurs tubulaires. Cette production est due à un générateur, qui est essentiellement composée de deux électrodes conductrices séparées par une couche d'air et un isolant électrique de constante diélectrique élevée. L'air ou l'oxygène est comprimé, puis séché, et passe entre ces deux électrodes où il est soumis à un effluve électrique dans un champ de courant alternatif à une haute tension ce qui entraîne la dissociation des molécules d'oxygène et leur recombinaison en ozone. Une couronne peut être présente mais le champ électrique est maintenu à une valeur inférieure à celle qui entraînerait l'apparition d'un arc électrique et d'un plasma (*figure.1.29*). [9] [20]

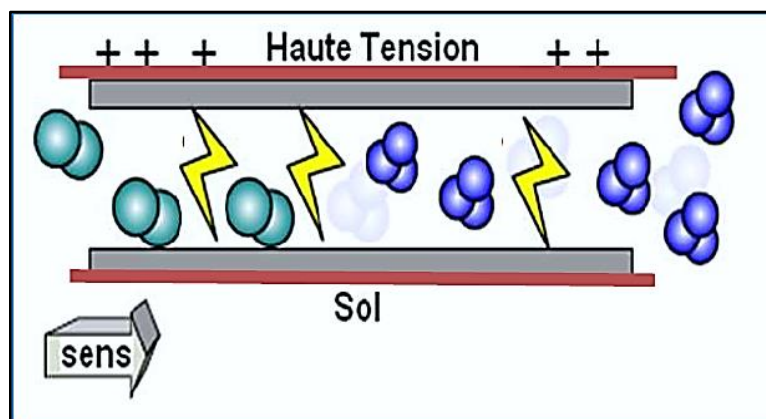


Figure 1.29 Production d'ozone par décharge à barrière diélectrique [33]

1.6.5 Décomposition de l'ozone

Comme mentionné précédemment, l'ozone une fois produit, se décompose rapidement vu qu'il est instable avec une durée de vie relativement courte. La demi-vie de l'ozone dans l'eau est beaucoup plus courte que dans l'air.

Les facteurs influençant la décomposition de l'ozone dans l'eau sont :

- La température.
- le pH.
- l'environnement.
- les concentrations en matières dissoutes et la lumière UV. [3]

a. Température

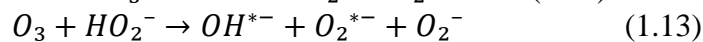
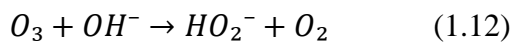
La demi-vie de l'ozone est fortement influencée par la température. Le **tableau 1.2** montre la demi-vie de l'ozone dans l'air et dans l'eau. Principalement, des températures plus élevées que 40°C cause des demi-vies très courtes de l'ozone. [3]

Tableau 1.2 Demi-vie de l'ozone dans l'eau et dans l'air [6] [25]

Air		Dissous dans l'eau (pH 7)	
Température (°C)	Demi-vie	Température (°C)	Demi-vie
-50	3 mois	15	30 min
-35	18 jours	20	20 min
-25	8 jours	25	15 min
20	3 jours	30	12 min
120	1,5 heure	35	8 min

b. Le PH

La décomposition partielle de l'ozone en radicaux OH^- augmente avec l'augmentation du PH. Dans une solution les ions hydroxydes jouent le rôle d'initiateur de la décomposition de l'ozone : [6]



c. Concentration en solides dissous

L'ozone dissous peut réagir avec une grande variété de matière, tels que les composés organiques, les virus, les bactéries, etc. De ce fait, l'ozone se décompose en d'autres matières ; Dans l'eau en radicaux OH^- . Cette décomposition est affectée par la nature des matières dissoutes .Elle peut être accélérée (réaction en chaîne) par des substances appelées agents promoteurs ou ralentie par des inhibiteurs.

La *figure 1.30* montre la décomposition de l'ozone dans différents types d'eau dont elle illustre que la demi-vie de l'ozone dans l'eau du robinet est plus courte, comparée à l'eau distillée. [6]

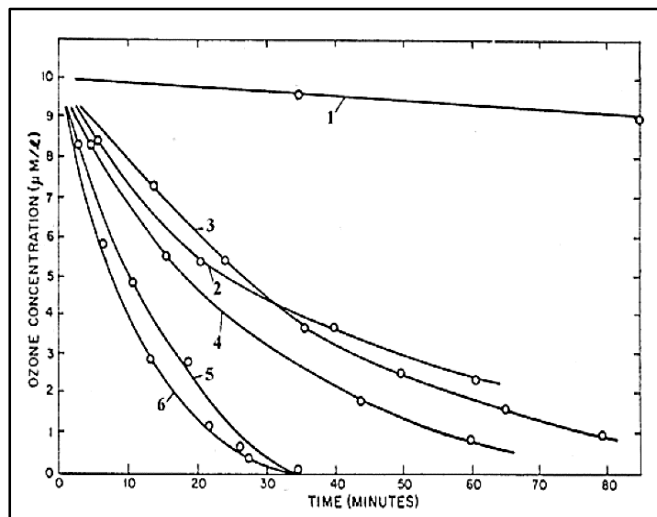


Figure 1.30 Décomposition de l'ozone dans différents types d'eau à 20 °C. 1 = eau double-distillée ; 2 = eau distillée ; 3 = eau du robinet ; 4 = eaux souterraines à faible dureté ; 5 = eau filtrée du lac de Zurich (Suisse) ; 6 = eau filtrée du Bodensee (Suisse) [6] [25]

d. Matière organique naturelle

Le carbone organique dissous (COD) est la mesure de la matière organique naturelle (NOM) dont sa présence est un facteur qui réduit la qualité des eaux du point de vue de la couleur et de l'odeur. Sa concentration dans les eaux naturelles peut varier de 0,2 à 10 mg l⁻¹.

L'influence du NOM dans l'ozone est double. En fonction du type de NOM, il peut être oxydé directement par le NOM. C'est le cas pour les composés qui réagissent facilement avec l'ozone, tels que les doubles liaisons, les composés aromatiques activés, certaines amines et sulfide. D'autre part, les radicaux-OH ont la propriété de réagir avec la NOM (réaction indirecte) et agir en tant que promoteur ou désactivateurs.

A cause de l'effet indéterminé de la NOM, il n'est pas toujours facile de déterminer la stabilité de l'ozone. Ceci indique qu'il n'est pas possible d'évaluer la fraction qui accélère ou ralentit la réaction. [6]

1.6.6 Réactions d'ozone

a. Principe

L'ozone est un composé naturel qui a des propriétés d'oxydation très puissantes. Il oxyde et inactive toutes les substances organiques, les pesticides et les organismes pathogènes (virus, bactéries, protozoaires, etc.). Le **tableau I.3** montre les potentiels Redox de produits oxydants employés dans l'industrie, il montre que l'ozone est l'oxydant le plus fort.

Tableau 1.3 Potentiels Redox de quelques produits oxydants utilisés dans l'industrie [22] [34]

Réactif	Potentiel Redox
Ozone	2.07
Peroxyde d'hydrogène	1.17
Chlore (gaz)	1.36
Oxygène	1.23

De même, l'ozone va oxyder des éléments physico-chimiques désagréables qui laissent des traces tels que le fer, le manganèse, le soufre (odeur d'œuf pourri), les arrière goûts qui peuvent être causés par des algues, champignons et moisissures, certains types de tannins qui donnent une couleur ressemblant à celle du thé.

L'ozone réalise son action destructrice de trois manières :

- Action oxydante dans laquelle intervient un seul atome d'oxygène (potentiel d'oxydation $E_0 = 1,5$ V).
- Par ozonolyse, avec formation d'ozoneurs (HO_3). Dans ce cas, c'est la molécule entière d'ozone qui intervient sur les substances organiques. Ces ozoneurs sont très instables et sont détruits en des composés différents à celui de la molécule organique qui est intervenue dans sa formation.
- En catalysant l'effet oxydant de l'oxygène qui n'est pas intervenu dans la formation d'ozone. Dans ce cas, l'oxygène joue le rôle le plus important. [9] [27]

b. Réaction de l'ozone avec les substances oxydables

L'ozone réagit rapidement avec les micro-organismes, parvient en règle générale à diminuer la toxicité des composés dans l'eau et à augmenter leur biodégradabilité.

La molécule d'ozone est instable au contact des substances oxydables et cette combinaison libère le troisième atome d'oxygène qui est extrêmement réactif. Cet atome se fixe facilement à d'autres molécules.

La réaction d'oxydation se produit sur une collision entre la molécule d'ozone et la molécule d'une substance oxydable. Le résultat de cette réaction permet aux molécules organiques d'être transformées *figure 1.31*. [9] [20] [35]

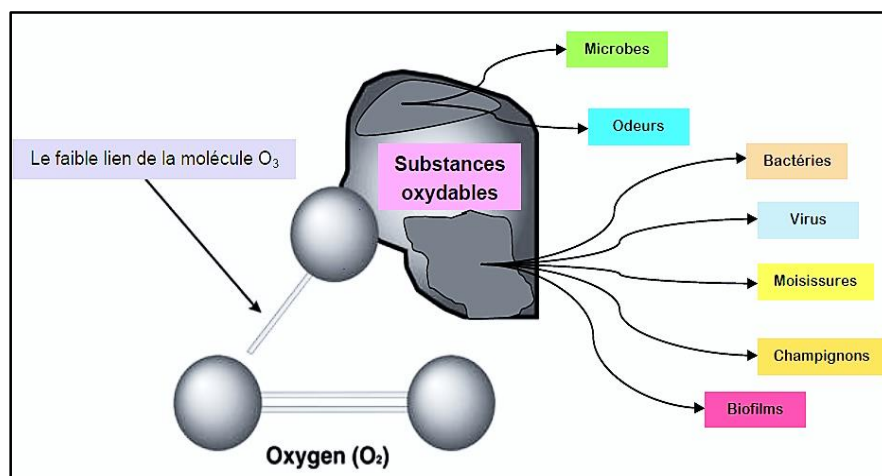


Figure 1.31 Réaction d'oxydation de l'ozone avec les substances oxydables [29] [20]

c. Effet de l'ozone sur les bactéries

L'ozone agit sur les bactéries par des milliers de collision sur la paroi cellulaire, cette dernière est vitale, elle garantit le maintien de la forme de l'organisme de la bactérie.

La molécule d'ozone étant en contact avec la paroi cellulaire, une réaction appelée "burst oxydative" se produit et crée littéralement un petit trou dans la paroi cellulaire.

Au bout de quelques secondes, des nouveaux trous sont créés jusqu'au la paroi bactérienne n'arrive plus à garder sa forme et la cellule meurt (*figure 1.32*). [9] [20]

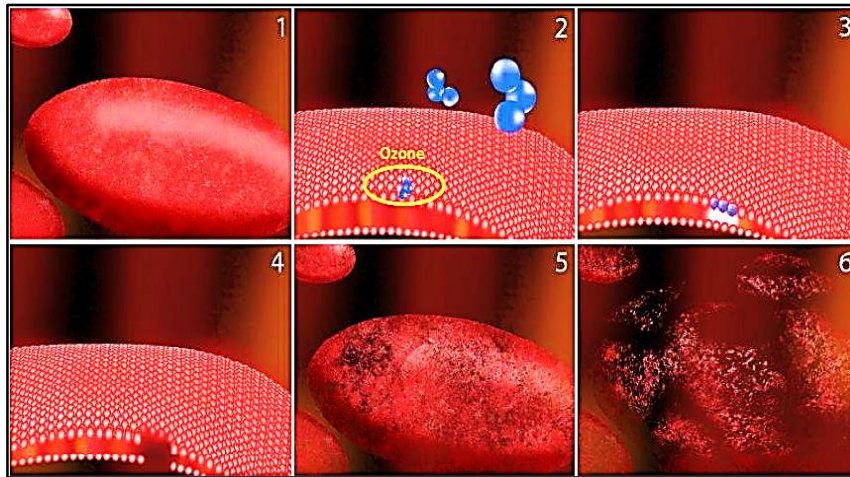


Figure 1.32 Effet de l'ozone sur une bactérie [9] [20]

1.6.7 Avantages et inconvénients de l'ozone

L'ozone est un produit chimique utile en raison de sa capacité d'oxyder et de stériliser. Il a, cependant, des caractéristiques qui le rendent inapproprié pour certaines applications mais qui sont compensés par une série d'avantages qui le rendent très intéressant dans nombre d'applications industrielles.

a. Avantages

Contrairement aux autres désinfectants, tel le chlore, qui pourrait être responsable de problèmes de santé causé par la formation de dérivés potentiellement toxiques, l'ozone disparaît sans laisser de trace après son utilisation. Dans le domaine de l'eau potable, la purification de l'eau par l'ozone est un procédé qui représente un avantage en particulier il permet d'abaisser et même d'éliminer complètement les « trihalométhanes » ; sous-produits qui se produit après une réaction du chlore avec les micro-organismes lorsque il est ajouté pour éliminer les bactéries dans l'eau.

L'ozone peut être considéré comme un des agents microbicides des plus rapides et efficaces qu'il existe par ses propriétés oxydantes. Son action possède un large spectre qui englobe l'élimination de : [9]

- **Bactéries (effet bactéricide)**

Un des plus grands avantages de l'ozone, par rapport à d'autres bactéricides, est que cet effet se manifeste à de petites concentrations (de l'ordre de 0,01 p.p.m ou moins) et pendant

des périodes d'exposition très courtes, voire des infimes concentrations d'ozone (de l'ordre de 0,01 p.p.m) où l'on peut déjà remarquer un effet bactériostatique. [9] [36]

- **Virus (effet virulicide)**

Contrairement aux bactéries, les virus sont toujours nocifs et provoquent des maladies à tout l'organisme qu'ils attaquent. L'ozone agit sur elles en oxydant les protéines de leur enveloppe et en modifiant leur structure tridimensionnelle.

Lorsque ceci a lieu, le virus ne peut se rattacher à aucune cellule qui puisse l'accepter car il ne reconnaît pas son point de rattachement, et lorsque le virus non protégé est incapable de se reproduire, il finit par mourir.

L'action virucide peut être observée à des concentrations d'ozone inférieures à celle de l'action bactéricide. C'est dû à ce que la complexité de l'enveloppe virale est inférieure à celle de la paroi bactérienne. [9] [36]

- **Spores (effet sporicide)**

Les spores présentent un mécanisme de résistance qui les rend difficile à combattre à cause de leur métabolisme qui récupère son activité dès que les conditions de survie sont de nouveau favorables après qu'elles étaient en état d'éveil lorsque les conditions étaient adverses à leur développement.

L'ozone a le pouvoir d'éliminer la résistance des spores à des concentrations légèrement supérieures à celles que l'on utilise pour les autres bactéries et des traitements aussi utiles en d'autres cas comme les hautes températures et la multitude d'antimicrobiens deviennent inefficaces. [9] [36]

L'ozone agit aussi comme un désodorisant pour de faibles concentrations (0,1 – 0,5 mg/m³) et son action est particulièrement appréciable dans la neutralisation vis-à-vis des odeurs de provenance organique. Son action désodorisante n'est pas due à un simple effet de camouflage de l'odeur, mais il s'agit bien d'une véritable destruction chimique.

En 1939, WITHERIDGE & YAGLOU, manifestaient que « l'odeur se dégageant de 95 personnes, dans sa majorité des adultes, réunies dans une petite pièce, était neutralisée par 0,15 ppm d'ozone, ce qui permettait une diminution de 50% de l'introduction d'air Extérieur ». [9] [37]

Autres avantages de l'ozone :

- En comparaison, l'efficacité de la désinfection de l'ozone est 2500 fois plus efficace que l'hypochlorite (CHL) et 5000 fois plus que les Chloramines (NH₂CL), il détruit les bactéries, les virus, et les moisissures.
- L'ozone ne laisse pas de résidus chimiques ni d'odeurs dans l'eau.
- L'ozone n'irrite pas la peau et ne la dessèche pas.
- L'ozone ne brûle pas les yeux, ne les rougit pas comme les autres produits chimiques ont tendance à le faire.
- Propriétés pour éliminer les graisses.
- Ozone créé au point d'usage – aucun emmagasinage ou transport de produits chimiques hasardeux exigés.
- L'ozone est sécurisant car il ne peut exploser et n'est pas combustible.
- L'utilisation de l'ozone limite au maximum l'achat des produits chimiques oxydants.

- Parce que l'ozone réagit très vite, il est possible que certaines substances persistent. L'utilisation de chlore ou de brome avec l'ozonateur réduit cette possibilité. [9] [20] [33]
- b. Inconvénients**
- Investissement plus élevé : La production et l'utilisation de l'ozone nécessitent des coûts plus élevés comparés aux autres techniques d'oxydation/désinfection car l'ozone doit être produit sur site et ne peut pas être stocké ou transporté.
 - Système plus complexe : l'ozone doit être produit, puis dissous dans l'eau, le gaz résiduel doit être extrait de l'eau, etc. le système résultant est inévitablement plus complexe à installer et à utiliser qu'une pompe à injection de chlore, par exemple.
 - Il n'y a pas de membranes résistantes à l'ozone : cela pose un problème à certaines industries particulières, comme l'agro-alimentaire, qui veulent en général désinfecter l'ensemble de la chaîne de traitement : si un osmoseur est prévu, cela est possible avec le chlore en choisissant une membrane en acétate de cellulose par exemple, alors que c'est effectivement impossible avec l'ozone.
 - Consommation en énergie plus élevée, puisque l'ozone est produit par décharge électrique. [5] [20] [33]

1.6.8 Applications de l'ozone

Les domaines d'utilisation d'ozone étant très variés, grâce à ses excellentes qualités de désinfection et d'oxydation. L'ozone peut être utilisé pour différents objectifs dans les systèmes de traitement, tels que pour une pré-oxydation (avant un filtre à sable ou un filtre à charbon actif), une oxydation intermédiaire ou une désinfection finale.

La plus célèbre application sert essentiellement au traitement de l'eau en éliminant les bactéries, les virus, les odeurs désagréables, la destruction ou l'élimination des molécules organiques complexes, des cyanures et des phénols provenant des effluents industriels. [33] [4]

- **Traitement de l'eau de piscine**

Les nageurs sont la principale source de pollution des eaux de piscine. Le nombre et le type de baigneurs sont des facteurs dont cette pollution dynamique dépend. Les polluants de piscine peuvent être classés en trois groupes :

- Les microorganismes (tels que des bactéries, des champignons et des virus).
- Les polluants non-dissous (ex : particules flottantes visibles).
- Les polluants dissous (l'urine, la sueur, des fluides des yeux et de la salive...) [5]

- **Eau potable [33]**

L'ozone n'assure pas seulement une bonne désinfection d'une eau destinée à la consommation humaine, il agit sur d'autres paramètres :

- Améliore la clarification, et élimine certaines matières organiques et micro-organismes, comme les algues.

- Attaque les matières organiques résiduelles et favorise la biodégradabilité de certaines substances organiques qui seront, par la suite, éliminées lors de l'étape de filtration biologique.

Les couplages ozone-charbon actif ou ozone-peroxyde représentent aujourd'hui les procédés les plus puissants dont dispose le traiteur d'eau pour l'élimination de certains polluants et constituent une garantie vitale vis-à-vis des pollutions accidentelles.

- **Eaux usées (industriels et urbaines)**

L'ozone est aujourd'hui l'agent chimique le plus économique pour les applications qui améliorent la qualité d'eau rejetée dans les systèmes d'eaux usées en réduisant les résidus d'organismes pathogènes, en rééquilibrant le pH, et en réduisant les produits chimiques résiduels. L'industrie chimique cherche de nouvelles façons d'accroître la productivité tout en utilisant des procédés écologiques par la contribution à la préservation de l'environnement. Elle a trouvé en l'ozone une excellente solution à son problème.

L'ozone aussi permet une meilleure pénétration et un meilleur effet nettoyant des détergents, sont utilisation combinés aux détergents donnent une efficacité supérieure que les doses doublées de détergent normal d'où l'utilisation de l'ozone pour les blanchisseries dans les hôpitaux et les laboratoires. Un autre bénéfice est relève de l'utilisation d'ozone en économisant la quantité d'eau de rinçage du détergent, et la quantité des eaux usées. De plus, moins d'endommagement est subi par les machines en réduisant les besoins en produits chimiques agressifs. [4] [6] [33]

- **Domaine agro-alimentaire**

- a. Lavage des produits alimentaires.**

La Stérilisation de l'extérieur des fruits et des légumes avec de l'eau ozonisée (*figure 1.33*) peut éliminer les engrais et les bactéries extérieurs et d'autres pathogènes et prolonger la durée de conservation de 3 à 10 fois. Rincer et cuire du riz avec de l'eau ozonisée peut lui enlever l'odeur de moisi et rendre le riz beaucoup plus savoureux

La surface de la viande, du poisson et crevettes peut être nettoyée avec de l'eau ozonisée, pour décomposer les restes d'antibiotiques et d'hormones, afin de se débarrasser des bactéries et des vers. Ce processus rend la viande sûre et fraîche.

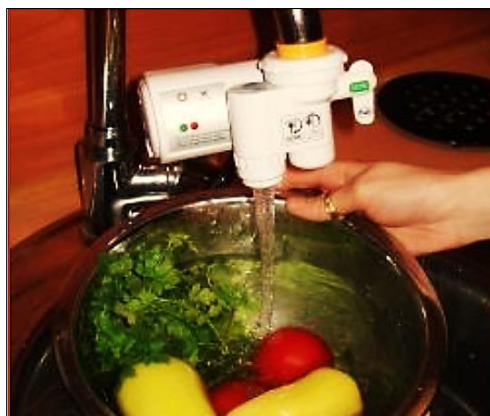


Figure 1.33 lavage des fruits et des légumes par l'eau ozonée. [4]

b. Désinfection des chambres froides

L'injection du gaz ozone dans les chambres froides est une technique utilisée mondialement pour maintenir une hygiène optimale de l'ambiance. L'ozone permet un contrôle biologique continu 24h/24h.

L'ozonation des chambres froides offre de nombreux avantages :

- **Il détruit rapidement les microbes** : élimine les virus, les bactéries, moisissures qui sont à la surface des aliments
- **Il élimine les mauvaises odeurs** : évite l'accroissement des arômes entre les différents produits
- **Sans contaminer ni nuire les aliments** : l'ozone est une forme allotropique de l'oxygène

Avec une correcte ozonation de la chambre froide on réussira à :

- Augmenter le temps de conservation réduire les pertes des produits
- Eviter la contamination croisée [38]

c. Affinage des fromages

Durant l'affinage des fromages il est nécessaire d'avoir une humidité relative élevée. Dans ces conditions les moisissures se développent à la surface ce qui abîme l'aspect du produit final pour certains types de fromages. Pour se faire elles doivent être éliminées en lavant ou en grattant le fromage ce qui provoque une augmentation des coûts de fabrication ainsi que des délais. Comme l'ozone est un puissant désinfectant, c'est donc un allié indispensable dans l'industrie du fromage :

- Il évite la croissance des champignons et des moisissures tout en travaillant dans un taux d'humidité élevée ce qui permet de diminuer la perte des poids et une économie de la main d'œuvre.
- Il permet d'avoir une densité de stockage plus grande.
- Il désodorise les locaux ; ambiance plus saine pour les travailleurs ainsi que pour les clients. [38]

d. Industrie de la boulangerie et industrie de la pâtisserie

Un des marchés les plus importants en termes de volume et de résultats dans lequel nous travaillons, c'est l'industrie du pain et de la pâtisserie. Les expériences réalisées dans le traitement de l'eau et dans le traitement des ambiances des locaux de fabrication et de vente ont démontré les grandes possibilités et l'aide efficace qu'apporte un traitement d'ozone dans ce secteur.

Résultats d'ozonation :

Au moment d'appliquer l'eau, nous utilisons de l'eau ozonisée qui, en se mélangeant avec la farine, agit en détruisant les moisissures et les spores existant dans la farine. Plus le temps de mélange est long plus la pâte à pain acquiert de la force et sa couleur blanchit légèrement du fait de l'oxydation produite par l'ozone. Nous pouvons donc affirmer qu'une masse traitée avec de l'ozone :

- Est plus blanche
- A plus de force

- Voit le gluten se développer plus rapidement (les protéines s'hydratent plus rapidement)

Une fois achevée l'élaboration du pain, nous pouvons donc vérifier les résultats surprenants qui suivent

- La mie est plus blanche et homogène
- La croûte est plus croustillante et plus dure
- Un volume plus important

L'ozone est utilisé dans ce secteur aussi pour :

- Le traitement des ambiances local de vente, salle d'élaboration, le magasinage
- Les chambres froides : la conservation de la pâtisserie, du pain de mie, des matières premières
- L'utilisation de l'eau ozonisée pour la désinfection des installations et des citernes. [38]

e. **Traitement des feuilles avec de l'eau ozonée**

L'ozone est une substance avec un désinfectant de puissance élevée, dûment dissous dans l'eau est capable d'atteindre des concentrations qui, une fois projetés sur une douille, des fruits, de la tige ou même le sol est capable d'effectuer un traitement de désinfection rapide et efficace. [38]

f. **L'agriculture hydroponique**

Dans les systèmes d'agriculture hydroponiques (aquaculture et pisciculture), la dissolution nutritive en contact avec les racines peut transporter des champignons, bactéries et virus adaptés à la vie aquatique et ceux-ci se dispersent avec beaucoup de facilité dans le milieu.

Pour prévenir ou réduire certain risque de dispersion de maladies, une correcte désinfection de la propre dissolution est nécessaire pour la réalisation d'une bonne culture. La solution est adoption un système de désinfection avec de l'ozone, avec des volumes d'eau et concentration d'ozone grâce à ozonateur biens déterminés, On peut parvenir à la désinfection complète. [33] [39]

• **Applications médicales de l'ozone**

L'utilisation de l'ozone à visée médicale date de plus de cent ans. Durant toute cette période, de nombreux rapports sur son succès dans le traitement de différentes pathologies ont augmenté l'intérêt de la communauté scientifique à son égard.

A partir de 1856, l'ozone fut utilisé pour décontaminer des salles d'opération et sa première application médicale eut lieu en 1870, lorsque le Dr C. Lender s'en servit pour purifier du sang dans des tubes à essai.

Lors de la Première Guerre Mondiale, les soldats allemands furent soignés à l'aide d'ozone pour des gangrènes, des blessures infectées, des fistules ou encore des dommages liés au gaz moutarde. En 1929, cent quatorze maladies sont ainsi répertoriées comme étant traitables par ozonothérapie.

La première utilisation de l'ozone en dentisterie a été décrite en 1930, par le dentiste allemand Dr E. A Fish, qui l'utilisa dans sa pratique de façon régulière à Zurich, en Suisse, sous forme d'eau ozonée. Il soigna par la suite le chirurgien Autrichien le Dr Ernst Payr, pour

des infections dentaires, qui, stupéfait par les résultats, devint un fervent défenseur de l'ozone et dédia ses recherches à son utilisation médicale. [40]

En odontologie, l'ozonothérapie se fait en application topique ou loco régionale, sous trois formes différentes :

1. L'eau ozonée

Pour obtenir de l'eau ozonée, il faut réaliser le « barbotage » (passage d'un gaz à travers un liquide).

Oleg V et al. ont proposé un protocole de production d'eau ozonée à partir de leurs recherches : le gaz est produit à une concentration de 5mg/L et le temps d'application dépend du volume d'eau à ozoner (trente minutes pour trois litres et soixante minutes pour dix litres).

2. L'huile ozonée

L'huile ozonée est principalement recommandée pour une utilisation ambulatoire par le patient, pour compléter un traitement classique. A cet effet, il peut l'appliquer à l'aide d'une seringue émoussée ou n'importe quel embout approprié pour une utilisation à domicile.

3. Le gaz ozoné

Il existait différents générateurs d'ozone utilisables en cabinet dentaire, On retrouvait par exemple le Healozone (*figure 1.34*), distribué par la société Kavo, et le Prozone, par W&H. [40]



Figure 1.34 Appareil Healozone. [40]

❖ Les différentes disciplines de l'odontologie pouvant utiliser l'ozonothérapie

▪ L'ozonothérapie en chirurgie orale

Les résultats d'une étude réalisée par A. Filippi en 1997, ont montré que l'eau ozonée utilisée de manière quotidienne, pouvait permettre d'accélérer le processus de guérison des lésions épithéliales au niveau de la muqueuse buccale, principalement durant les deux premiers jours postopératoires.

Une étude comparant les effets d'une huile ozonée (Oleozon) à ceux d'un traitement par Alveogyl associé à une antibiothérapie dans le traitement d'alvéolites suppurées post

extractionnelles a montré que chez les patients traités par de l'Oleozon, les alvéolites suppurées guérissaient plus rapidement et sans nécessité d'un traitement systémique.

- **L'ozonothérapie en dermatologie buccale**

Le traitement de lésions herpétiques par application topique d'huile ozonée a été étudié et montré un temps de guérison plus rapide que lors de la mise en œuvre de protocoles conventionnels. Il en est de même dans le cas de lésions aphtoïdes, de candidoses, d'abcès ou de fistules.

- **L'ozonothérapie pour l'éclaircissement dentaire**

En association au protocole classique sur dent dépulpée, une application de gaz ozoné pendant trois à quatre minutes permettrait d'obtenir un éclaircissement de meilleure qualité. [40]

1.7 Conclusion

Nous avons introduit succinctement dans ce chapitre les éléments essentiels à la compréhension de la suite de nos travaux. Les concepts de base ont été introduits, notamment la classification des plasmas, les différents régimes de décharges dans les gaz.

Une part prépondérante de cette étude bibliographique est consacrée aux décharges à barrières diélectriques. Nous avons commencé par les principes généraux des *DBDs*, leurs différentes géométries possibles et leurs applications les plus courantes.

Compte tenu de l'axe d'orientation choisi pour cette thèse, nous avons insisté sur l'ozone, ces mode de production, ces propriétés physiques et avons discuté en détail sur son domaines d'application.

Dans le prochain chapitre nous allons présenter un prototype d'un générateur d'ozone à *DBD* volumique avec une nouvelle configuration et un nouveau système de refroidissement. Une étude détaillée sera effectuée dans le but d'augmenter le rendement énergétique d'ozone en agissant sur les paramètres électriques (tension, fréquence) ainsi que les paramètres géométriques (subdivision de l'électrode alimenté en haute tension, la distance inter-électrode).

Chapitre 02

*Analyse expérimentale d'un
nouveau générateur d'ozone avec
une électrode HT partitionnée*

2

ANALYSE EXPERIMENTALE D'UN NOUVEAU GENERATEUR D'OZONE AVEC UNE ELECTRODE HT PARTITIONNE

2.1 Introduction

L'ozone est un oxydant très puissant qui est principalement utilisé dans les domaines du développement durable, notamment le traitement de l'eau, le stockage des aliments et certains domaines médicaux... Une large application de l'ozone est entravée principalement en raison de sa faible efficacité de génération. [41]

Récemment, de nombreuses tentatives et efforts ont été faits pour analyser les performances des systèmes de génération d'ozone afin d'améliorer le rendement énergétique de la génération d'ozone ; avoir une concentration maximale d'ozone avec une consommation d'énergie plus faible.

Nomoto et al. (1995) ont proposé un nouveau type de générateur d'ozone dont l'objectif principal était de montrer la possibilité d'améliorer l'efficacité en utilisant un générateur à décharge hybride ; la décharge de surface et la décharge de volume se produisent en même temps. Les résultats obtenus ont montré que l'efficacité de l'ozone est 3 fois supérieure à celle de la décharge de surface et 2 fois supérieure à celle de la décharge de volume. Le rendement maximal de production d'ozone obtenu était de 274 g/kWh pour un débit d'oxygène gazeux de 2 l/min et une fréquence de décharge de 60 Hz. [41-42]

Takaki, K et al. (2008) se sont concentrés dans leur recherche sur la configuration géométrique de l'électrode relié à la terre pour améliorer le rendement énergétique ; trois configurations ont été testées : électrodes planes, tranchées et multipoints. Parmi les trois configurations expérimentées, l'électrode multipoint a donné le taux de rendement maximal, passant de 80 g/kWh à 135 g/kWh. [41] [43]

En 2017, A.Chebbah et al. ont développé un nouveau modèle à *DBD* surfacique sous une forme de "serpentin" pour la génération d'ozone dans lequel le gaz circule dans 10 canaux parallèles ayant la forme d'un serpentin gravé dans une plaque de Bakélite de 4 mm d'épaisseur. Ce modèle a été comparé à un générateur d'ozone à *DBD* volumique, qui est le modèle le plus utilisé dans l'industrie pour la production d'ozone. Les résultats obtenus ont montré que le taux d'ozone est beaucoup plus élevé dans le cas du générateur en forme de "serpentin" en termes d'efficacité énergétique. [9] [41] [44]

Dans la même année, K.Nassour et al. ont développé une autre nouvelle configuration d'un réacteur d'ozone hybride, La principale caractéristique de ce générateur est que le gaz circule en série d'abord à travers la décharge volumique et passe ensuite à travers la décharge de surface. Ce réacteur hybride a donné des valeurs plus élevées de la concentration d'ozone qui atteint jusqu'à 50% par rapport à la *DBD* de volume et 30% par rapport à la *DBD* de surface. [4] [41] [45]

En 2019, S.Nemmich et al. ont réalisé une étude expérimentale comparative, en termes de concentration d'ozone et d'efficacité énergétique, entre trois formes d'onde de tension différentes : triangulaire, rectangulaire et sinusoïdale. Les résultats obtenus ont affirmé que, bien que le signal sinusoïdal soit largement utilisé pour alimenter les générateurs d'ozone, le signal triangulaire est bien meilleur que les signaux rectangulaire et sinusoïdal en termes d'efficacité énergétique. Le rendement énergétique obtenu avec le signal triangulaire était de $\eta = 70$ g/kWh, ce qui était supérieur au signal sinusoïdal ($\eta = 51$ g/kWh) et plus de deux fois supérieur au signal rectangulaire ($\eta = 28$ g/kWh). [33] [41] [46]

L'objectif de ce chapitre est d'abord de réaliser une analyse expérimentale d'un générateur d'ozone d'une forme cylindrique avec un espace de décharge réduit à 0,5 mm et une électrode haute tension composée de trois bandes de feuille de cuivre cliquant. Le modèle proposé a été comparé à un modèle similaire qui possède une électrode haute tension complète de même longueur effective. Deuxièmement, Le générateur d'ozone a été analysé en termes d'efficacité énergétique et de concentration d'ozone en utilisant la méthodologie des plans d'expériences. Trois facteurs contrôlés ont été pris en compte, à savoir la tension 'V', la fréquence 'f' et la distance 'd' entre les parties adjacentes de l'électrode HT. Les résultats obtenus ont montré que la nouvelle configuration avec une électrode partitionnée donne de meilleurs résultats à la fois en termes de concentration d'ozone et d'efficacité énergétique. [41]

2.2 Description du dispositif expérimental utilisé

2.2.1 Structure et dimensions du générateur d'ozone développé

Parmi les différentes conceptions de générateur d'ozone nous avons opté pour celle qui est la plus souvent utilisée dans les laboratoires et dans l'industrie, et similaire à celui réalisé par Nemmich et Nassour et Draou durant leurs travaux. Nous avons choisis la configuration cylindrique qui possède l'avantage d'offrir une surface de décharge plus grande comparativement aux formes planes, par conséquent elle permet de générer plus d'ozone ainsi qu'une très bonne flexibilité pour l'écoulement du gaz (oxygène et ozone). [4] [22] [33] [47]

- **Electrode externe**

Pour le choix du matériau, nous avons opté pour l'acier inoxydable car il est relativement léger (une masse assez faible) par rapport aux autres matériaux mais surtout résiste à l'effet corrosif de l'ozone. L'électrode est reliée à la masse est de 252 mm de longueur avec un diamètre intérieur qui vaut 45.1 mm. [22]

- **Barrière diélectrique**

Le diélectrique à un double rôle, premièrement il aide à créer un champ électrique inverse au champ électrique appliqué aux bornes des électrodes ce qui cause un arrêt de la décharge (limitation de courant) avant le passage à l'arc à la tension prévue par la loi de Paschen. Deuxièmement, il permet de répartir les charges accumulées uniformément sur leur Surface par conséquent on aura une décharge stable et répartie sur la surface totale des électrodes. [4]

Parmi les matériaux diélectriques utilisés nous avons choisi le verre vu sa résistivité à la température élevée et à l'effet corrosif de l'ozone. Le tube cylindrique en verre est de 2.5 mm d'épaisseur et 300 mm de longueur et de diamètre interne de 44 mm, conduit à un intervalle de décharge de 0.5 mm.

- **Bouchons de centrage (téflon)**

Nous avons réalisé deux bouchons en téflon placés au bout des deux côté du générateur afin de maintenir le même intervalle de décharge et stabiliser la décharge sur toute la longueur du générateur. Les deux bouchons sont munis d'ouvertures d'entrée et de sortie de gaz afin de séparer les électrodes de l'écoulement du gaz d'ozone (*figure 2.1*).

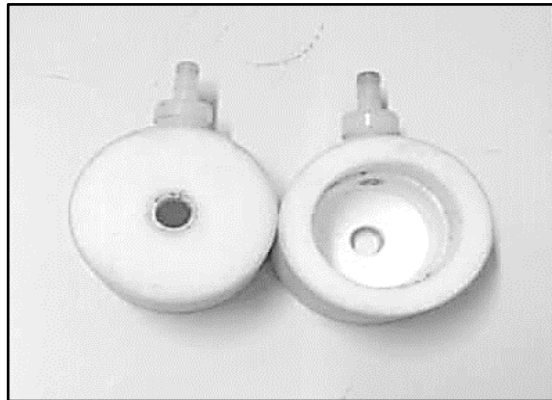


Figure 2.1 Photographie des bouchons en téflon.

- **Electrode interne**

L'électrode cylindrique interne reliée à la haute tension est une feuille de cuivre clinquant insérée dans le tube de verre avec un contact fermé de leurs surfaces (*figure 2.2*).



Figure 2.2 Photographie de l'électrode interne en cuivre insérée à l'intérieur de la barrière diélectrique en verre.

L'efficacité de la génération d'ozone a été analysée pour deux configurations différentes de l'électrode HV *figures 2.3* :

- G_{1P} : une électrode HT en feuille de cuivre d'une longueur totale de 120 mm (*figure. 2.3 a*).
- G_{3P} : trois parties de feuille de cuivre de 40 mm de long chacune, séparées par une distance d'intervalle variable $d= 2...18$ mm (*figure.2.3b*). [41]

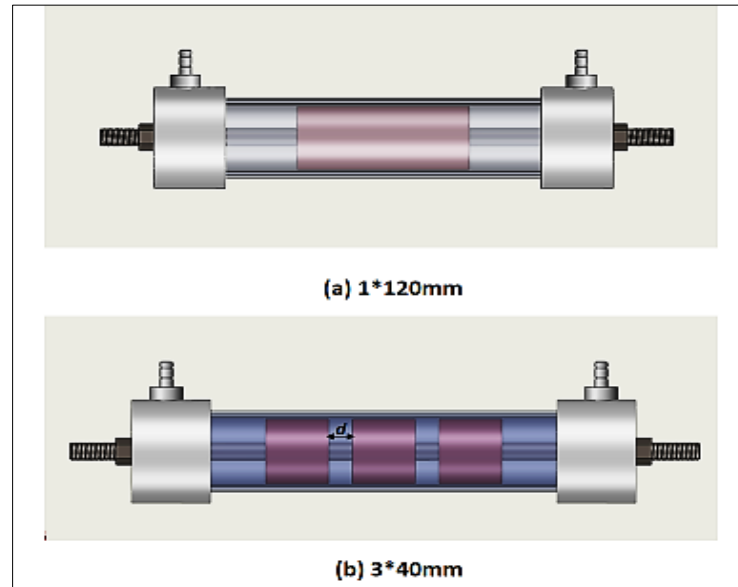


Figure 2.3 Schéma descriptif des deux configurations d'électrodes haute tension. [41]

Les **figures 2.4** et **2.5** illustrent le schéma descriptif du générateur d'ozone ainsi qu'une photographie du générateur conçu dans notre laboratoire.

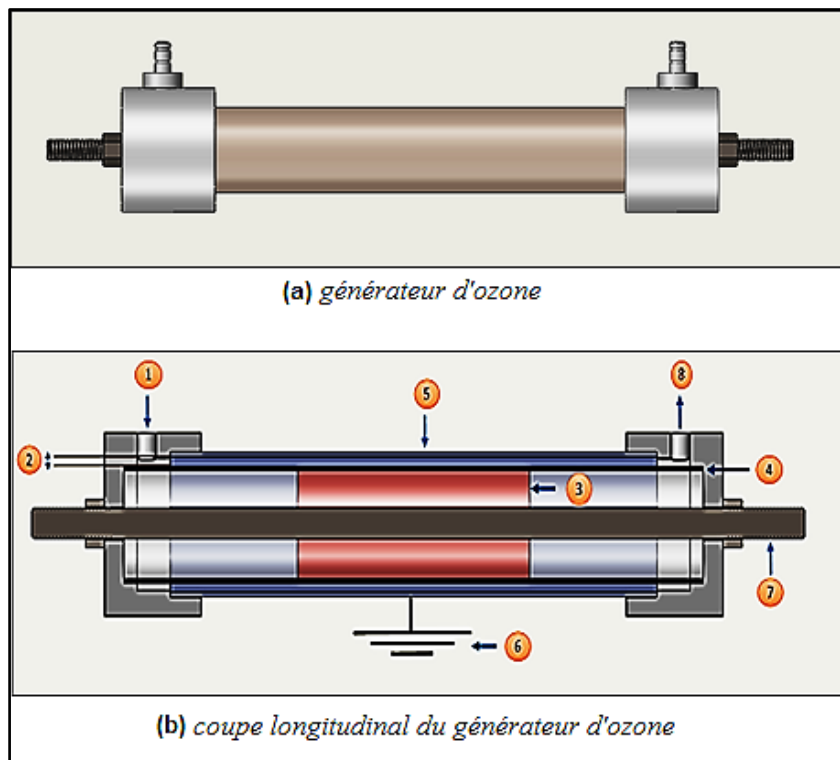


Figure 2.4 Schéma descriptif du générateur d'ozone [41]

(1) Entrée d'oxygène. (2) Espace de décharge du gaz. (3) Electrode cylindrique interne (adhésif en cuivre). (4) Barrière diélectrique (verre). (5) Electrode cylindrique externe. (6) Borne de terre. (7) Borne haute tension. (8) Sortie d'ozone



Figure 2.5 Photographie du générateur d'ozone

2.2.2 Système de refroidissement

Au cours des expériences avec ces générateurs d'ozone, nous avons constaté un échauffement du dispositif du a l'élévation de la température, suite à la décharge électrique et la dissociation de l'ozone, chose qui conduit à la destruction des molécules d'ozone, cela montre que l'installation d'un système de refroidissement est indispensable.

Pour cela, Le générateur d'ozone est placé horizontalement dans une chambre parallélépipédique en plexiglas remplie d'eau, de dimensions 21 x 30 x 30 cm³. La partie métallique du générateur est immergée dans l'eau, tandis que les bouchons en téflon comprenant les ouvertures d'entrée d'oxygène et de sortie d'ozone restent à l'extérieur de la chambre (figure 2.6). Le système de refroidissement est un groupe frigorifique à gaz dont l'évaporateur est immergé dans l'eau. [41]

Pour obtenir les meilleurs résultats avec une efficacité maximale, la température du gaz doit être maintenue ; la température finale du gaz est la même que la température initiale, tandis que toute l'énergie électrique est convertie en énergie de synthèse et que le rendement en ozone le plus élevé est atteint. [48]

Pendant presque toutes les expériences, la température du générateur était en général stable, presque égale à 5 °C.

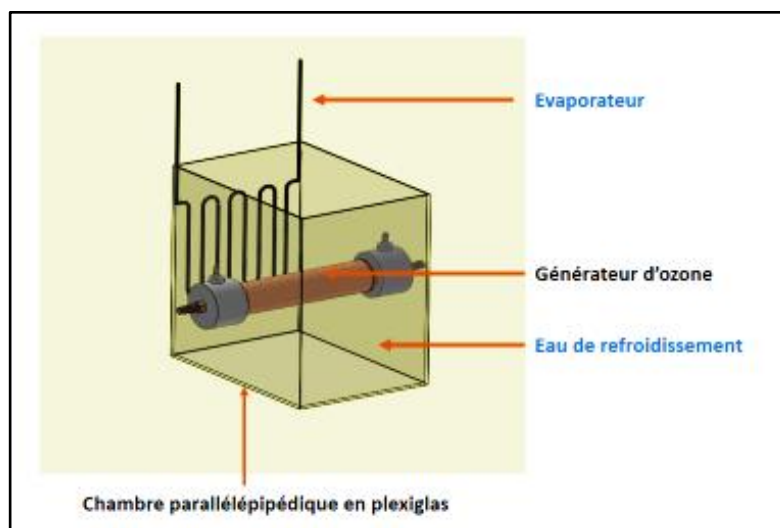


Figure 2.6 Schéma descriptif du système de refroidissement du réacteur d'ozone.

2.2.3 Montage utilisé pour la mesure de puissance et la concentration d'ozone

Un transformateur haute tension haute fréquence contrôlé par une alimentation variable de 0-250 V AC qui délivre une haute tension réglable de 1-15 kV a été utilisée pour la caractérisation électrique des générateurs d'ozone. La tension appliquée V a été mesurée à l'aide d'une sonde haute tension (Tektronix P6015A) et d'un oscilloscope numérique (GWINSTEK GDS-3154) qui ont été connectés à un ordinateur, tandis que le courant a été estimé par un capteur de courant haute fréquence (Pearson current monitor 410, 20 MHz).

Les formes d'onde de courant et de tension sont enregistrées dans deux canaux différents de l'oscilloscope sur plusieurs périodes. Un condensateur $C = 22 \text{ nF}$ a été placé entre l'électrode externe et la terre pour mesurer les charges transportées. Par la suite, la puissance est évaluée à l'aide de la *figure* de Lissajous en traçant la charge électrique et la tension appliquée sur les axes X et Y, respectivement. [49-50]

De plus, la concentration en O_3 a été mesurée en (mg/l) à la sortie du réacteur à l'aide d'un moniteur d'ozone (moniteur d'ozone 106-H) afin de comparer les efficacités des deux générateurs qui sont alimentés par de l'oxygène pur à 95% à travers un concentrateur à débit variable (1-10 l/min).

La *figure 2.7* représente Schéma descriptif du dispositif expérimental utilisé.

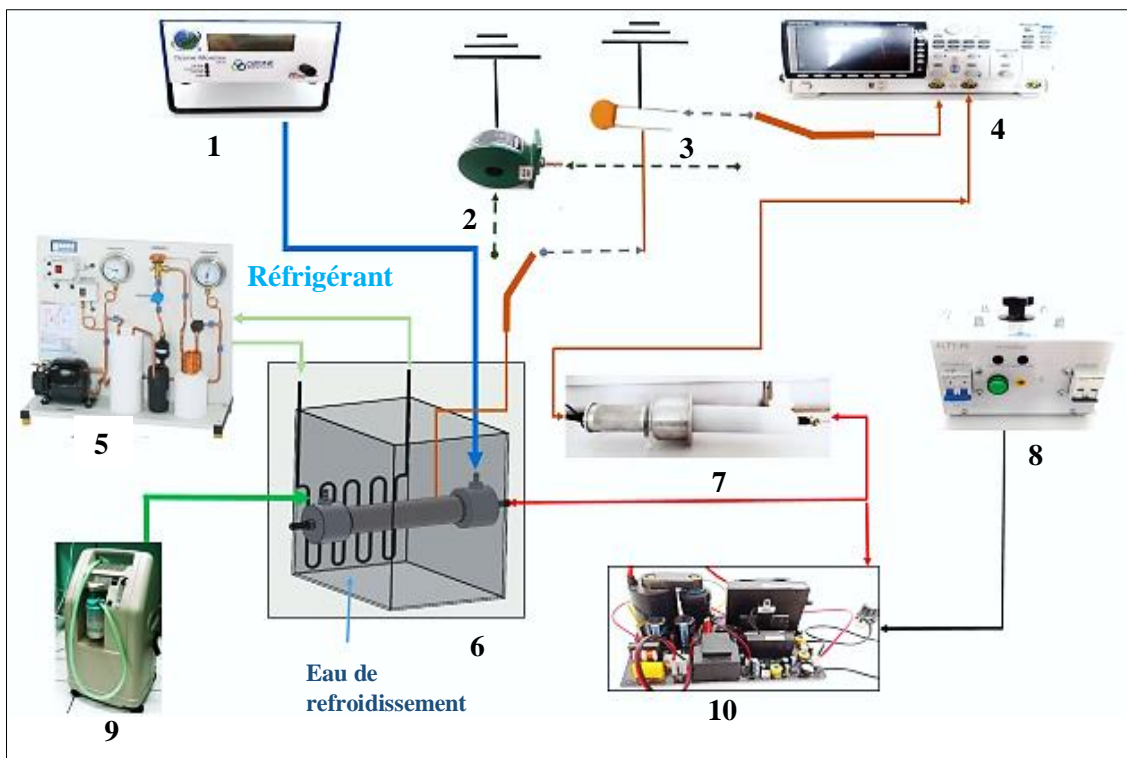


Figure 2.7 Schéma descriptif du descriptif du dispositif expérimental

1. Moniteur d'ozone, 2. Capteur de courant, 3. Condensateur, 4. Oscilloscope numérique, 5. Unité de réfrigération, 6. Générateur d'ozone placé à l'intérieur d'un boîtier en plexiglas de forme parallélépipédique rempli d'eau refroidie, 7. Sonde haute tension, 8. Autotransformateur, 9. Concentrateur d'oxygène, 10. Alimentation haute fréquence haute tension. [41]

Toutes les expériences ont été conduites dans les mêmes conditions de température standard (19-23°C) et d'humidité (50%-65%). Chaque point tracé représente la moyenne de deux mesures avec leurs barres d'erreur associées afin de montrer la bonne convergence des expériences.

L'efficacité énergétique a été estimée en utilisant la relation suivante :

$$\frac{Y}{P} = \eta \quad (2.1)$$

Où :

Y est le taux de production d'ozone en (g/h),

P est la puissance consommée par le plasma en (kW).

Le taux de production d'ozone est exprimé en grammes par heure comme suit :

$$Y \left(\frac{g}{h} \right) = C_{O_3} \left(\frac{g}{l} \right) \cdot Q \left(\frac{l}{h} \right) \quad (2.2)$$

Où :

- C_{O_3} est la concentration d'ozone en (g/l),
- Q est le débit d'oxygène en (l/h).

L'énergie consommée pendant un cycle, qui est égale à la surface enveloppée dans la figure de Lissajous, est calculée comme suit :

$$W = \oint V \cdot C \cdot dV_C = \oint V \cdot dq \quad (2.3)$$

Où, q est la charge transmise par le réacteur (C) et V est la tension appliquée (V).

La puissance P consommée par la DBD est ensuite déduite en multipliant l'aire de Lissajous correspondant à l'énergie W avec la fréquence f : [51-53]

$$P = W \times f \quad (2.4)$$

2.3 Résultats et discussion

2.3.1 Caractéristiques électriques

a. Mesure des courants et des tensions

La *figure 2.8* illustre l'évolution temporelle de la tension appliquée et du courant de décharge obtenu pour les deux générateurs G_{1P} et G_{3P} respectivement.

Une densité de micro-décharge plus élevée est produite dans la configuration 3*40mm où l'amplitude du courant est supérieure à celle du réacteur 1*120mm même si la fréquence de G_{3P} (30,48 kHz) était inférieure à celle de la configuration G_{1P} (34,45 kHz).

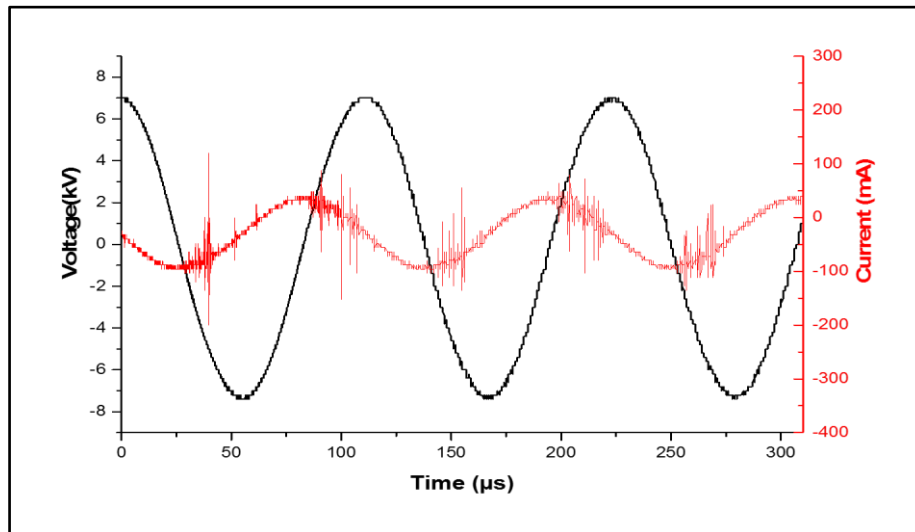
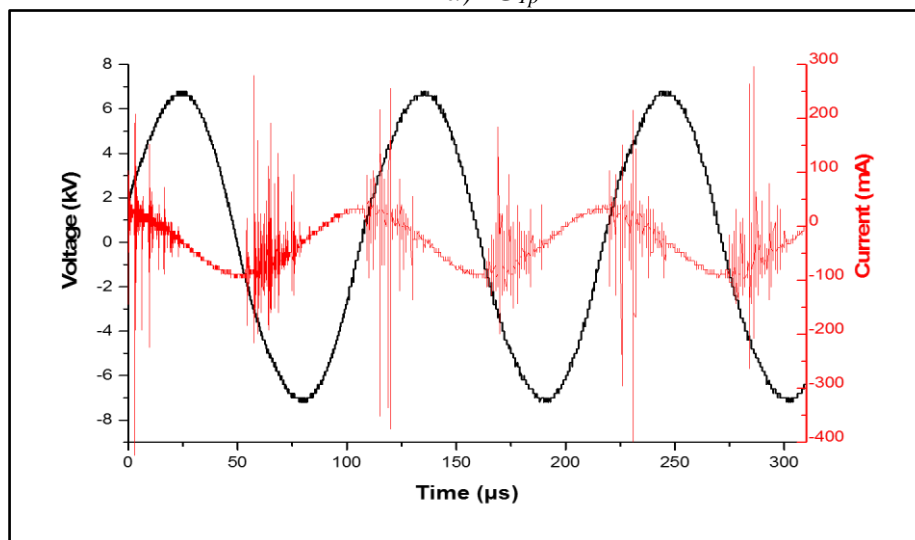
a) G_{1p} b) G_{3p}

Figure 2.8 Formes d'onde de courant et de tension obtenues pour les modèles
a) $1*120\text{mm}$ et b) $3*40\text{mm}$ ($V=7.5\text{ kV}$)

b. Mesure de la puissance

La **figure 2.9** représente les tracés des courbes de Lissajous des deux réacteurs à ozone G_{1p} et G_{3p} à une tension de 7,5 kV. L'énergie consommée sur une période, calculée selon l'équation (2.3), est égale à 2,19 mJ et 2,47 mJ, pour les configurations G_{1p} et G_{3p} , respectivement. En multipliant ces valeurs d'énergie par la fréquence $f=9\text{ kHz}$, la puissance consommée est donc égale à 19,74 W pour G_{1p} et 22,28 W pour G_{3p} .

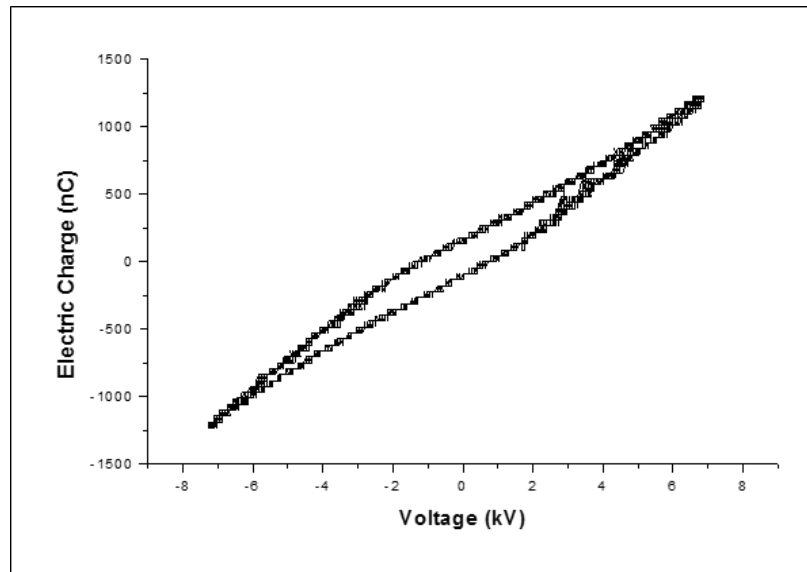
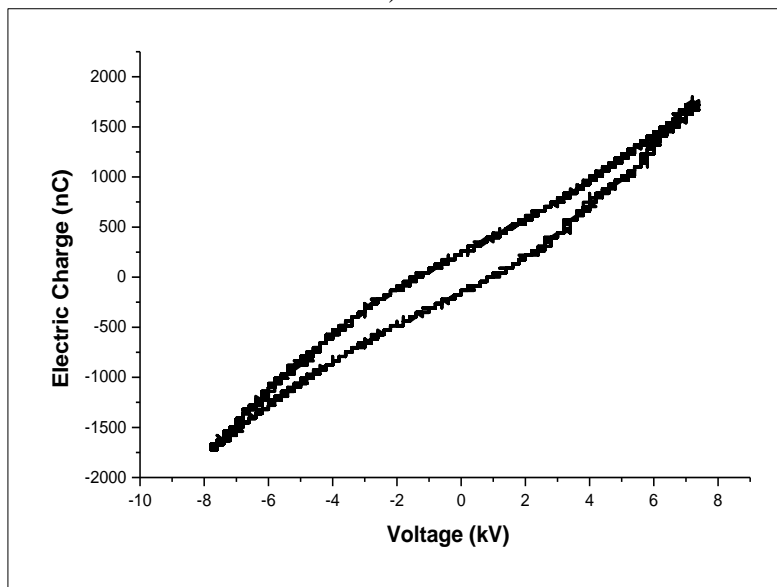
a) G_{1P} b) G_{3P}

Figure 2.9 Figures de Lissajous obtenues pour les deux générateurs d'ozone G_{1P} et G_{3P} ($V=7,5$ kV). [41]

2.3.2 Influence de la tension sur le rendement des générateurs d'ozone

a. Influence de la tension sur la concentration d'ozone

Dans la *figure 2.10* est représentée la variation de la concentration d'ozone CO_3 en fonction de la tension appliquée pour les deux configurations G_{1P} et G_{3P} . Comme prévu, l'augmentation de la tension V améliore le processus de génération d'ozone en raison de l'augmentation du nombre de micro-décharges par unité de surface et de leur intensité, et par conséquent une augmentation de la densité des électrons libres et du taux de dissociation des molécules d'oxygène. [54]

De plus, la concentration d'ozone est significativement plus élevée pour le modèle de générateur G_{3P} pour lequel l'électrode HV est constituée de 3 portions égales en comparaison

avec le G_{1P} comprenant une électrode cylindrique complète. On constate que la concentration est augmentée jusqu'à 20 % correspondant à une augmentation des valeurs maximales de CO_3 de près de 100 à 120 mg/l.

De plus, au-delà de $V=8$ kV, le taux de concentration d'ozone atteint un état de saturation en raison du surplus d'énergie qui se transforme en chauffage, provoquant la dissociation rapide des molécules d'ozone. [54]

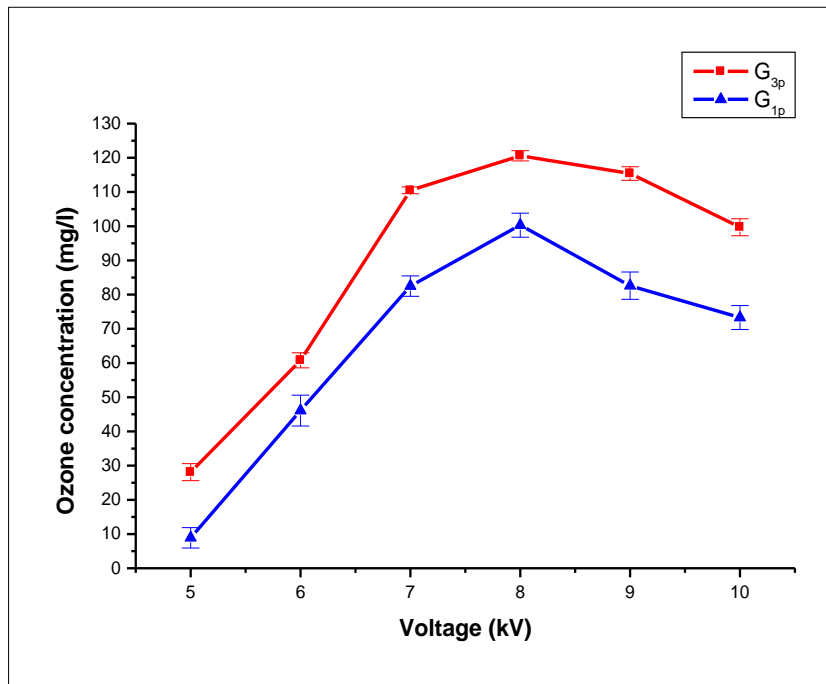


Figure 2.10 Variation de la concentration d'ozone en fonction de la tension appliquée pour les modèles de générateurs G_{1P} et G_{3P} . [41]

b. Efficacité énergétique des deux générateurs

La *figure 2.11* illustre l'efficacité énergétique des deux configurations de générateur en fonction de la tension V . Dans le cas du modèle G_{3P} , l'efficacité énergétique est significativement plus élevée principalement pour les valeurs de niveau de tension inférieures à 7 kV. Pour $V=5$ kV, bien que la concentration d'ozone soit faible (*figure 2.10*), l'efficacité de la configuration G_{3p} atteint presque 200 g/kWh alors que la valeur correspondante du modèle G_{1p} ne dépassait pas 70 g/kWh. Ainsi, avec la nouvelle configuration, une plus grande concentration d'ozone est obtenue avec une meilleure efficacité énergétique.

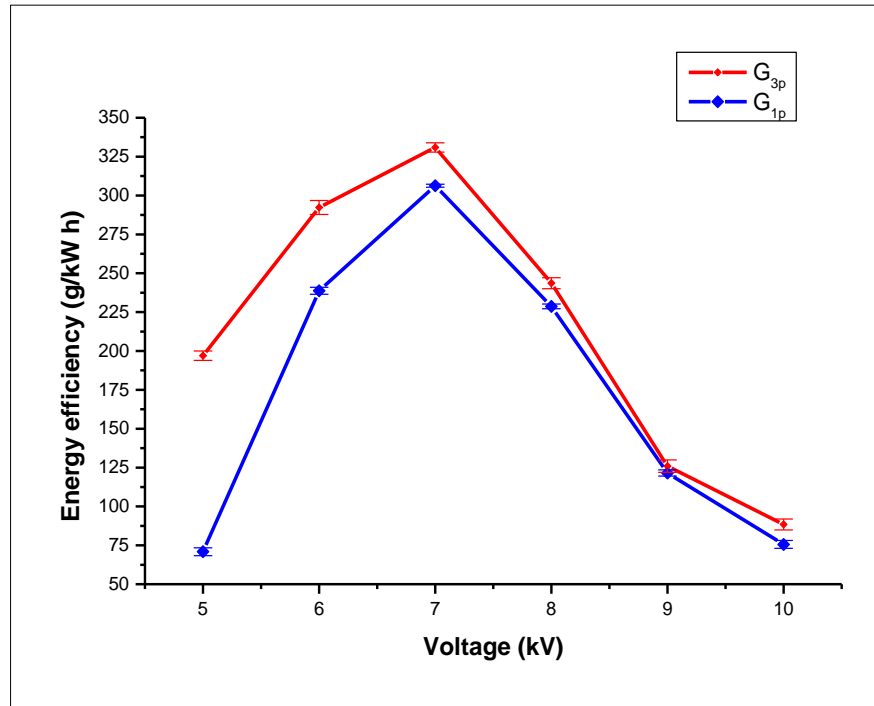


Figure 2.11 Variation du rendement énergétique en fonction de la tension appliquée pour les modèles de générateurs G_{1P} et G_{3P} . [41]

2.3.3 Simulation numérique du champ électrique

Une analyse numérique du champ électrique à l'aide du logiciel "**COMSOL Multiphysics**" a été réalisée pour estimer le champ électrique dans la zone de plasma pour chaque géométrie [55]. La *figure 2.12* représente la distribution longitudinale du champ électrique à une distance de 0,1 mm juste au-dessus de la barrière diélectrique en verre.

Les résultats obtenus montrent qu'il y a des pics intenses du champ électrique situés aux extrémités de l'électrode HT, pour les deux configurations ; ce phénomène est causé par le fait que les lignes de champ se resserrent au point est appelé "effet de pointe".

La première région près de l'extrémité de l'électrode où le champ électrique est intense est la zone active, le reste de l'espace le champ diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des extrémités et devient homogène ; c'est la zone de dérive.

Le nombre de ces pics est donc plus élevé pour l'électrode partitionnée par rapport au modèle G_{1P} . De plus, on constate que si le champ électrique est égal à près de 6.10^6 V/m à la surface de l'électrode, il augmente jusqu'à 16.10^6 V/m aux extrémités.

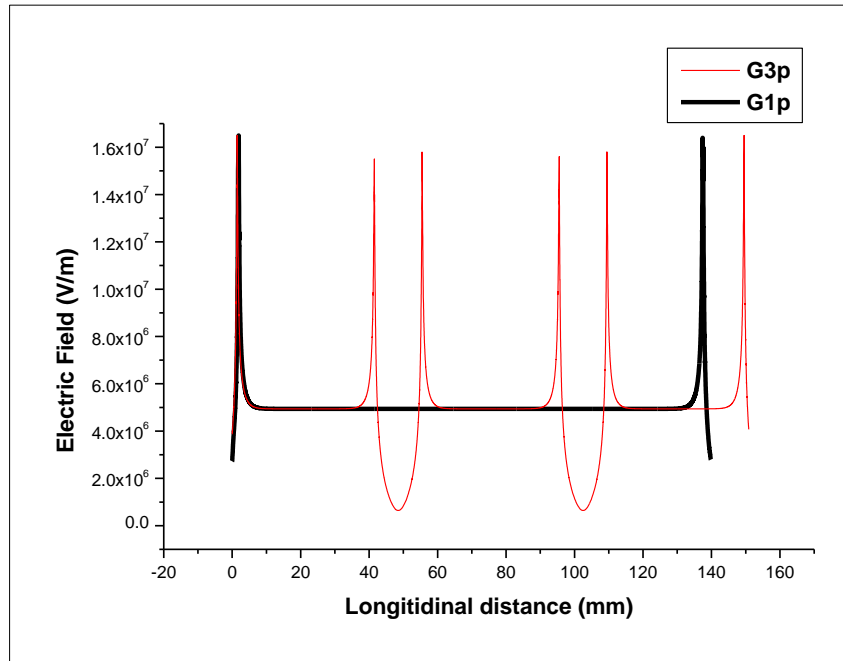


Figure 2.12 Distribution longitudinale du champ électrique dans la zone de plasma à 0,1 mm juste au-dessus de la barrière diélectrique pour les deux configurations ($V = 7$ kV). [41]

En outre, la **figure 2.13** montre la distribution longitudinale du champ électrique, calculée à 0,1 mm au-dessus de la barrière diélectrique en verre, en fonction de la distance entre les portions adjacentes de l'électrode HV. D'après les résultats de simulation obtenus, on constate que le champ électrique maximal correspond à $d = 6$ cm.

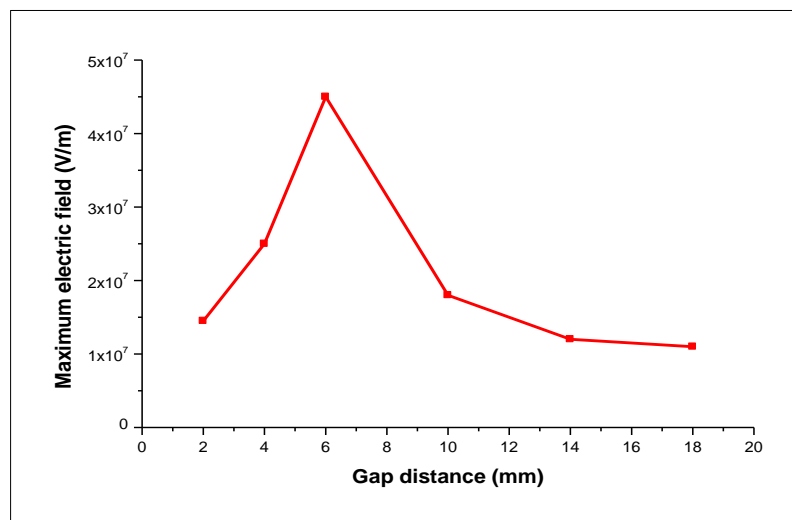


Figure 2.13 Variation du champ électrique dans la zone de plasma à 0,1 mm au-dessus de la barrière électrique en fonction de la distance d'espacement 'd'. [41]

Par conséquent, une étude d'optimisation a été réalisée en utilisant la méthodologie du plan d'expérience afin d'identifier les valeurs optimales des facteurs de contrôle que sont la distance d'écartement, la tension et la fréquence du signal.

2.3.4 Modélisation expérimentale et optimisation de l'efficacité énergétique

Les résultats trouvés précédemment montrent l'avantage de l'utilisation du générateur G_{3P} qui présente une meilleure efficacité énergétique, autrement dit plus d'ozone produit avec une consommation d'énergie réduite. Cela nous conduit à une optimisation des paramètres géométriques et électriques de ce générateur, à savoir la tension appliquée et la fréquence du signal ainsi que la distance entre les portions de l'électrode HT afin d'augmenter son rendement énergétique, en utilisant la méthode des plans d'expériences.

Nous présenterons les principes de base de la modélisation expérimentale avec le logiciel **MODDE 5. 0** que nous avons utilisés pour optimiser l'efficacité du procédé de génération d'ozone. [56-57]

2.3.4.1 Rappels sur la méthode des plans d'expériences

a. Concepts fondamentaux : réponses, facteurs effets, interactions :

Les scientifiques sont souvent amenés à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et essaye ensuite d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs *figure 2.14*. [4]

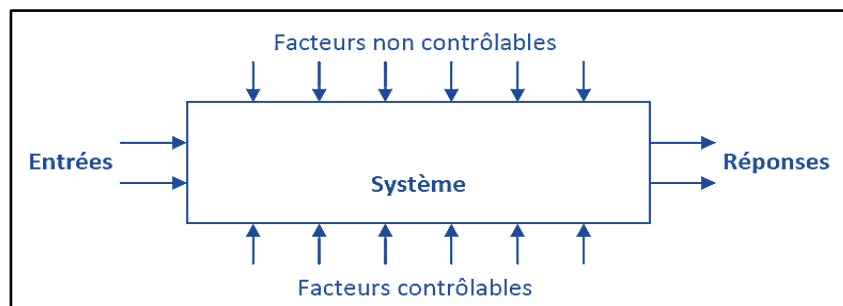


Figure 2.14 Environnement du système. [4]

Un facteur est une grandeur le plus souvent mesurable, Parmi les facteurs on distinguera :

- Les facteurs contrôlables : ce sont les facteurs qui dépendent directement du choix du technicien (pression, température, matériau ...)
- Les facteurs non contrôlables : ce sont qui varient indépendamment du choix du technicien (conditions climatiques, environnement d'utilisation...).

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai ; le plan vise à déterminer quels facteurs l'influencent ou quelle est son évolution en fonction de ceux-ci.

Une notion importante est celle d'interaction entre deux facteurs d'entrée. On parle d'interaction entre deux facteurs A et B quand l'effet du facteur A sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur B. [4]

Les phénomènes étudiés sont mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(U_{ij}) \quad (2.5)$$

Où :

- **Y** est la réponse à laquelle s'intéresse l'expérimentateur,
- **U_{ij}** sont les facteurs qui influencent un phénomène,
- **f** est une fonction mathématique qui prédit les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux **U_{ij}** ; en principe il s'agit d'un polynôme du premier ou deuxième degré dans le cas des plans d'expériences.

Lorsque l'on étudie un facteur **U_{ij}**, on définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes qui sont appelées niveau bas et niveau haut. On désigne le niveau bas (codé -1) par le signe (-) et le niveau haut (codé +1) par le signe (+). [33]

b. Variables Codées

Pour pouvoir comparer entre eux les "poids" des paramètres, on préfère ne pas utiliser les valeurs des variables naturelles **U_{ij}** qui dépendent des unités utilisées. Pour surmonter cette difficulté, on utilise les valeurs des variables codées **X_{ij}** dont l'origine correspond au centre du domaine expérimental. Les valeurs des variables codées sont définies de la manière suivante :

$$X_{ij} = \frac{U_{ij} - U_{0j}}{\Delta U_j} \quad (2.6)$$

Avec **X_{ij}** : valeur de la variable codée **j** pour l'expérience **i** ;

U_{ij} : valeur de la variable naturelle **j** à l'expérience **i** ;

U_{0j} : valeur de la variable naturelle au centre du domaine ;

ΔU_j : pas de variation de la variable naturelle **j** (moitié de l'écart entre la valeur maximum et la valeur minimum de la variable).

Trouver des modèles mathématiques de bonne qualité avec un minimum d'efforts dépend de la façon dont les intervalles des facteurs sont sélectionnés. Cette méthode peut être utilisée comme suit :

- Sélection des facteurs les plus intéressants et influents.
- Détermination des valeurs maximales, minimales et centrales de chaque facteur.
- Réalisation d'une matrice d'expériences avec tous les états possibles et les réponses correspondantes. [33]

c. Notion De Modélisation Mathématique

On choisit à priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou

Moins élevé :

$$Y = a_0 + \sum a_i . x_i + \sum a_{ij} . x_i . x_j + \dots + \sum a_{ii} . x_i^2 + a_{ij} \dots z . x_i . x_j \dots x_z \quad (2.7)$$

Où :

- **y** est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.

- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_2 sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.
- L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori". [33]

d. Principaux Avantages Des Plans d'expériences :

Les principaux avantages de cette méthode sont :

- Diminution du nombre d'essais ;
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs ;
- Détection des interactions entre facteurs ;
- Modélisation des réponses étudiées ;
- Précision optimum des résultats.

La méthode des plans d'expériences permet une interprétation rapide en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié. [4] [33]

e. Les Plans Composites

Le plan composite centré (*Central Composite Design*) fait partie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses. Leur usage est particulièrement destiné aux problèmes d'optimisation, quand la stratégie expérimentale conduit à construire et interpréter un modèle empirique, pour la recherche d'une solution dans le domaine expérimental.

La première partie de l'étude est un plan factoriel complet ou fractionnaire complétée par des points au centre pour vérifier la validité du modèle du premier degré. Si les tests de validation sont positifs l'étude s'achève le plus souvent, mais s'ils sont négatifs on entreprend des essais supplémentaires pour établir un modèle du second degré.

La seconde partie consiste à l'étude des essais supplémentaires, ces nouveaux essais sont représentés par des points d'expériences situés sur les axes de coordonnées et par de nouveaux points centraux. Les points situés sur les axes de coordonnées sont appelés les points en étoile (*figure 2.15*).

Les plans composites présentent donc trois parties :

- Le plan factoriel : c'est un plan factoriel complet ou fractionnaire à deux niveaux par facteurs. Les points expérimentaux sont aux sommets du domaine cubique d'étude.
- Le plan en étoile : les points du plan en étoile sont sur les axes et ils sont en général tous situés à la même distance du centre du domaine d'étude.
- Les points au centre du domaine d'étude. On ajoute toujours des points expérimentaux situés au centre du domaine d'étude et cela aussi bien pour les plans factoriels que pour les plans en étoile (composite). [4] [33]

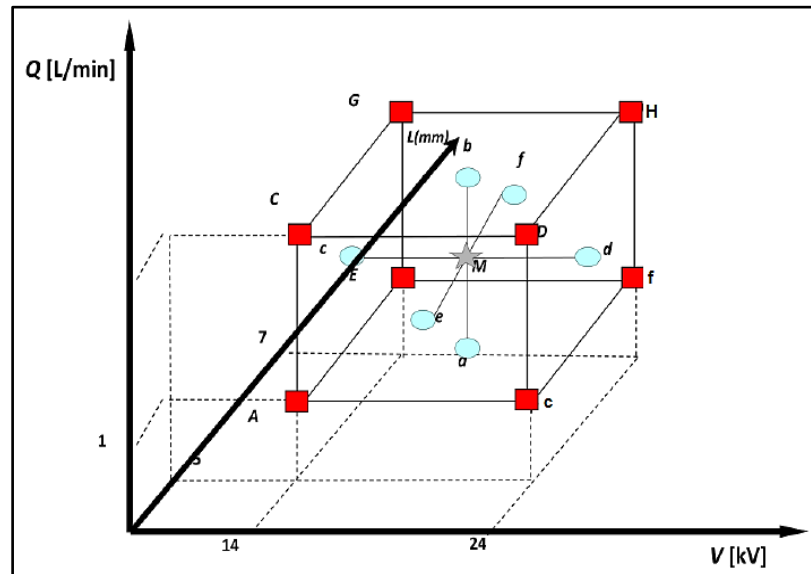


Figure 2.15 Disposition des expériences dans un plan composite centré. [4]

Le nombre total d'essais n à réaliser est la somme :

- Essais du plan factoriel, soit n_f ;
- Essais du plan en étoile, soit n_a ;
- Essais au centre, soit n_0^*

Le nombre n des essais d'un plan composites est donné par la relation suivante :

$$n = n_f + n_a + n_0 \quad (2.8)$$

Lorsque le domaine expérimental est défini à partir des variations de k facteurs, le nombre de traitement expérimentaux proposées par un plan composite centré est donc égal à :

$$n = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \quad (2.9)$$

Avec :

- 2^k : nombre d'essais correspondant au plan factoriel.
- $2k$: nombre d'essais du plan en étoile.
- n_0 : nombre d'essais au centre.

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences correspondantes aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble de toutes les expériences. Les plans composites sont parfaitement adaptés à l'acquisition progressive des résultats. [4] [33]

f. Qualité Du Modèle

1. Qualité descriptive du modèle

Appelé la qualité de l'ajustement, traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant :

$$-\infty \leq R^2 \leq 1 \quad (2.10)$$

Où 1 indique un modèle parfait et 0 indique aucun modèle. [4]

2. Qualité prédictive du modèle :

Le modèle obtenu peut servir à prédire la valeur de la réponse non encore réalisés. Cette approche est très courante dans un problème d'optimisation. Au même titre que l'on a défini précédemment la qualité descriptive d'un modèle à partir du coefficient de détermination, il est possible de définir maintenant la qualité prédictive Q^2 . Par définition, le coefficient Q^2 appartient à l'intervalle suivant :

$$-\infty \leq Q^2 \leq 1 \quad (2.11)$$

Plus la valeur du coefficient Q^2 est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est importante. Les deux paramètres doivent être élevés, et de préférence non séparés par plus de 0,2 à 0,3.

2.3.4.2 Logiciel MODDE 5.0

Parmi les logiciels utilisés on cite *MODDE* de la société *Umetrics*, qui est spécialisé dans la construction et l'analyse de plans d'expériences. Il permet de bâtir et d'analyser des plans de criblage, en surface de réponse, Taguchi, de mélanges, D-optimaux, des plans multi variés « *Onion Designs* » ainsi que des plans comportant à la fois des composants et des facteurs de procédés. Pour estimer les modèles, il utilise soit la méthode des moindres carrés usuelle (*MLR*) soit la méthode des moindres carrés partiels (*PLS*). Cela permet notamment d'ajuster un modèle reliant les variations de toutes les réponses aux facteurs en prenant en compte la structure de covariances.

Nous avons utilisé ce logiciel sous Windows pour la création et l'évaluation de modèles expérimentaux. Le programme aide l'utilisateur à l'interprétation des résultats et la prévision des réponses. Il calcule les coefficients du modèle mathématique et identifie les meilleures adaptations des facteurs permettant d'optimiser le processus. [4] [56]

2.3.4.3 Résultats et discussion

a. Expériences de criblage

La méthodologie de conception des expériences pourrait être appliquée à un processus de criblage, d'optimisation et de test de robustesse. L'étape d'optimisation doit permettre de déterminer des valeurs de facteurs pour lesquelles la concentration d'ozone est un maximum et la puissance consommée est un minimum. [57]

Les expériences ont été réalisées en faisant varier trois variables de contrôle suivantes pour optimiser l'efficacité énergétique de la configuration G_{3P} :

- La tension V (en kV) ;
- La Fréquence f (en kHz) ;
- La distance d'écartement d (en mm)

Les limites de variation de ces trois facteurs ont été définies par des expériences préliminaires de type « un facteur à la fois ».

- **Expérience 1.** Tension variable V (5-10) kV, pour des valeurs constantes de la fréquence ($f = 9$ kHz) et de la distance entre les portions adjacentes ($d = 2$ mm).
- **Expérience 2.** Fréquence variable f (5-9) kHz, pour des valeurs constantes de la distance entre les portions adjacentes ($d = 2$ mm) et la tension ($V = 7$ kV).
- **Expérience 3.** Distance d'écartement variable d (2-18) mm, pour des valeurs constantes de la fréquence ($f = 7$ kHz) et de la tension ($V = 7$ kV).

Les expériences 1 à 3 sont données respectivement sur les *figures 2.16* à *2.18*.

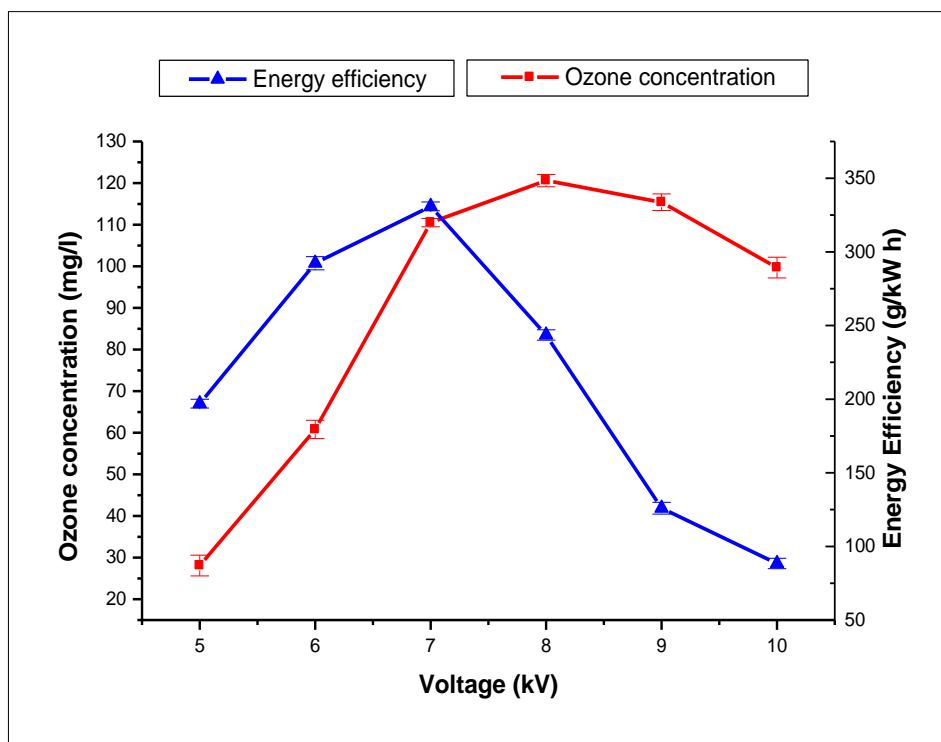


Figure 2.16 Variation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique en fonction de la tension pour le modèle G_{3P} ($d=2$ mm ; $f=9$ kHz). [41]

Comme le montre la *figure 2.16*, représentant la variation de la concentration d'ozone CO_3 et de l'efficacité énergétique η , le rendement du générateur d'ozone diminue drastiquement au-delà de $V=7$ kV. Ceci est dû au fait que le surplus d'énergie est converti en perte de puissance thermique pour des valeurs plus élevées de V .

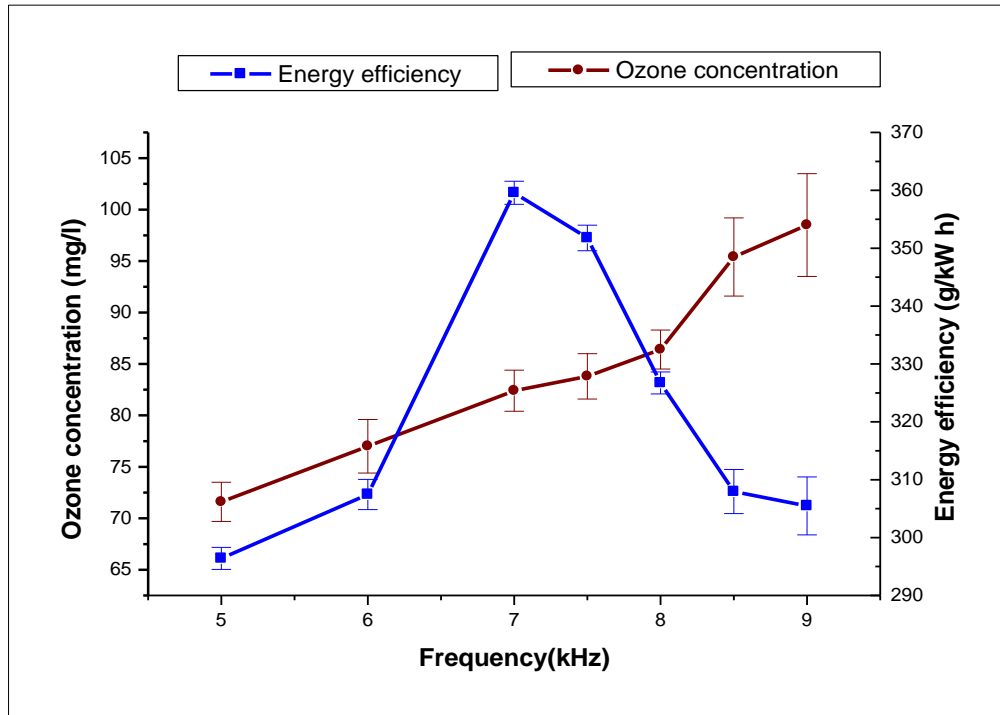


Figure 2.17 Variation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique en fonction de la fréquence pour le modèle G_{3P} ($d=2$ mm ; $V=7$ kV). [41]

Les résultats de la variation de CO_3 et de η par rapport à la fréquence f montre que la concentration d'ozone augmente en fonction de la fréquence, cela pourrait s'expliquer d'un côté par le fait que l'augmentation de la fréquence fait augmenter le nombre des micro-décharges par unité de temps.

En outre, l'efficacité énergétique augmente jusqu'à 350 g/kWh pour $f=7$ kHz et diminue ensuite jusqu'à 305 g/kWh pour $f=9$ kHz (*figure 2.17*). Ceci est dû à l'augmentation de la puissance consommée par le générateur, qui est proportionnelle à la fréquence du signal (équation 2.4). [58]

Les résultats obtenus représentés sur la *figure 2.18* représentent la variation du rendement énergétique CO_3 et de la concentration d'ozone η en fonction de la distance d'écartement. Les valeurs de CO_3 et η augmentent jusqu'à respectivement 330 g/kWh et 86 mg/l, pour une distance entre les parties adjacentes de l'électrode HV $d=6$ mm. Pour des valeurs plus grandes de d , l'évolution de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique est opposée. Alors que l'efficacité η continue d'augmenter avec d jusqu'à 380 g/kWh pour $d=14$ mm, la concentration en CO_3 diminue à l'inverse jusqu'à 75 mg/l.

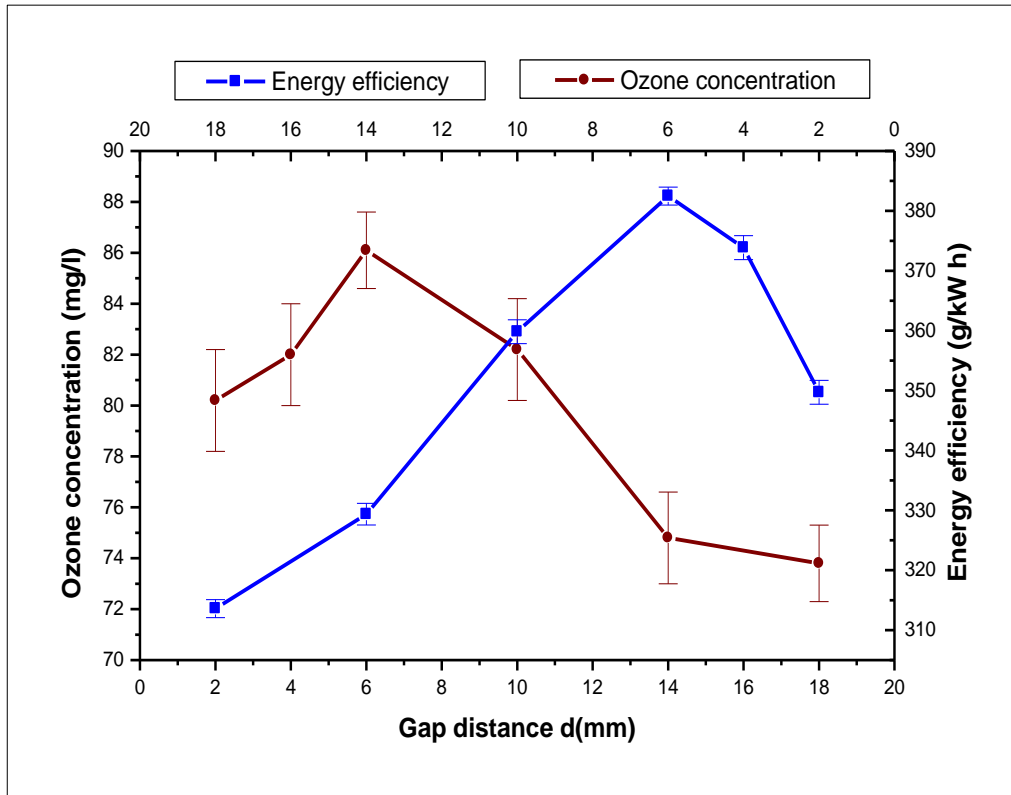


Figure 2.18 Variation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique en fonction de la distance entre les portions adjacentes pour le modèle G_{3P} ($f=7$ kHz ; $V=7$ kV). [41]

b. Identification du point optimal

Selon les expériences précédentes "un facteur à la fois", les domaines de variation suivants ont été déterminés pour l'optimisation de l'efficacité énergétique :

- Tension Appliquée : $V_{\min}= 6$ kV ; $V_{\max}= 9$ kV
- Fréquence : $f_{\min}= 6$ kHz ; $f_{\max}= 8$ kHz
- Distance d'écartement : $d_{\min}= 2$ mm ; $d_{\max}= 10$ mm

On a identifié le point de consigne V_0 , f_0 et d_0 en utilisant un plan CCF central ; les deux niveaux "max" et "min" sont les limites établies selon les résultats de la section précédente pour chacune des trois variables de contrôle (V_{\min} , V_{\max}), (f_{\min} , f_{\max}) et (d_{\min} , d_{\max}). Les coordonnées du point central V_c , f_c et d_c ont été calculés et leurs valeurs sont respectivement 7,5 kV, 7 kHz et 6 mm.

Les résultats des expériences de conception du CCF sont donnés dans le **tableau 2.1**. [41]

Exp N°	Tension V (kV)	Fréquence f (kHz)	distance d'écartement d (mm)	Concentration d'Ozone C_{O_3} (mg/l)	Efficacité énergétique η (g/kWh)
1	6	6	2	42.2	274.42
2	9	6	2	111.7	301.89
3	6	8	2	51.2	255.34
4	9	8	2	118.5	169.89
5	6	6	10	52.3	293.82
6	9	6	10	120.6	325.75
7	6	8	10	56.4	300.35
8	9	8	10	121.5	219.05
9	6	7	6	59.9	330.65
10	9	7	6	122.4	287.17
11	7.5	6	6	94.4	362.14
12	7.5	8	6	110.2	295.53
13	7.5	7	2	96.2	330.20
14	7.5	7	10	100.7	352.1
15	7.5	7	6	104	363.63
16	7.5	7	6	105.7	352.32
17	7.5	7	6	104.3	350.26

Comme les critères statistiques R^2 et Q^2 étaient proches de l'unité, $R^2 = 0,995$ et $Q^2 = 0,975$ pour la réponse de la concentration d'ozone CO_3 et $R^2 = 0,993$ et $Q^2 = 0,974$ pour la réponse de l'efficacité énergétique η (*figure 2.19*), les deux modèles ont été validés et ont été utilisés pour l'analyse de prédiction et d'optimisation.

Les modèles mathématiques des réponses considérées pour l'optimisation, qui sont la concentration d'ozone CO_3 et l'efficacité énergétique η , ont été obtenus avec MODDE 5.0. Les coefficients des modèles sont tracés dans la *figure 2.19*.

Nous constatons que les effets de ces trois facteurs sont significatifs à la fois sur la concentration d'ozone et sur l'efficacité énergétique. Selon les résultats obtenus, nous remarquons un effet opposé de la tension V et de la fréquence f sur les réponses η et CO_3 . Bien que la CO_3 augmente avec la tension V et la fréquence f , le rendement énergétique diminue en fonction de ces deux facteurs. De plus, les résultats obtenus à partir des modèles mathématiques n'ont pas indiqué d'interaction importante entre les facteurs pour la

concentration d'ozone, puisque leurs effets ne sont pas significatifs dans les limites de l'investigation. Cependant, l'interaction entre la tension V et la fréquence f est significative pour l'efficacité énergétique. Par conséquent, une optimisation doit être effectuée pour identifier les valeurs optimales des trois facteurs qui donnent les valeurs maximales à la fois de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique.

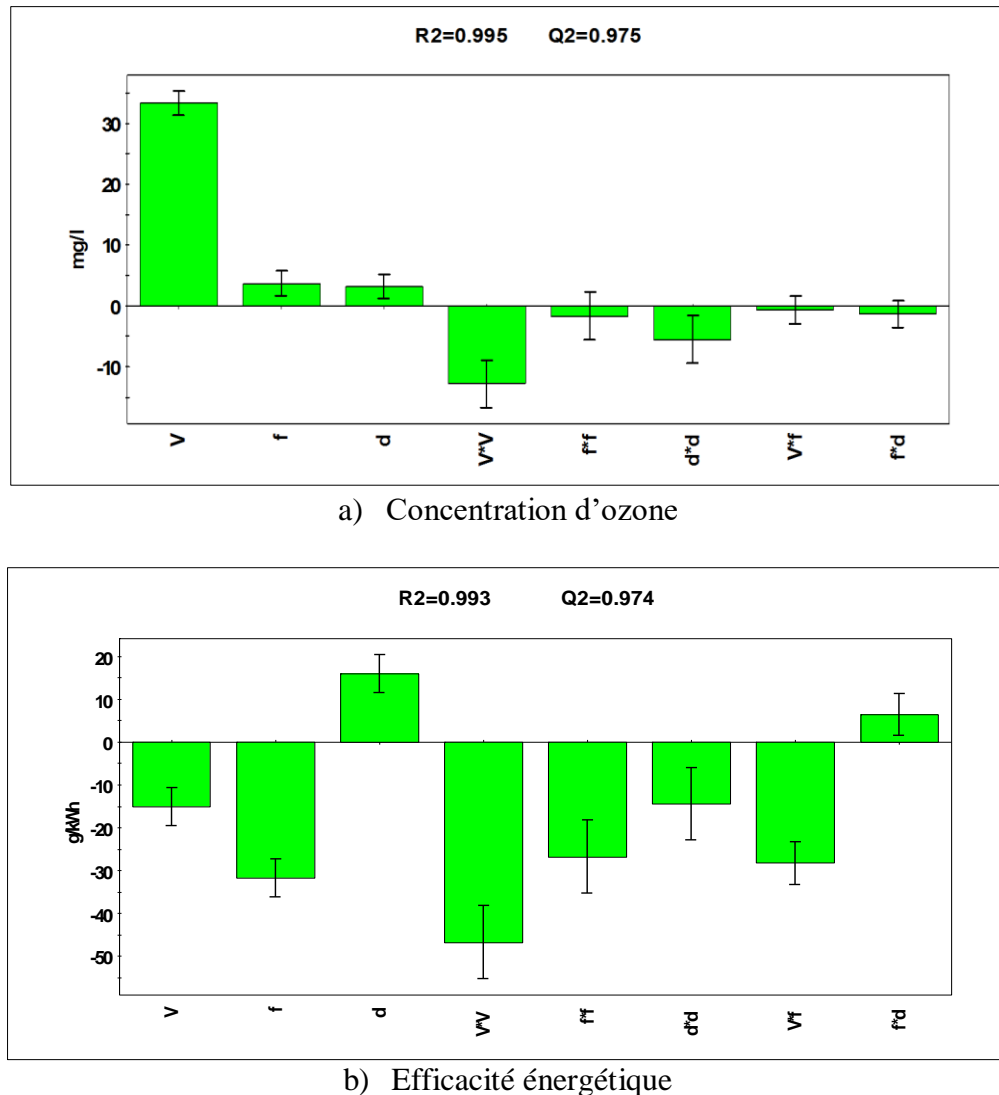


Figure 2.19 tracés des Coefficients modèles mathématiques obtenus avec MODDE.05 [41]

Le logiciel offre la possibilité d'identifier les valeurs optimales des facteurs qui devraient donner la plus grande concentration d'ozone pour la plus petite consommation d'énergie (c'est-à-dire la plus grande valeur d'efficacité énergétique). Il contient une routine d'optimisation capable de traiter simultanément plusieurs réponses, affectées par différents coefficients de pondération.

MODDE.05 dispose d'un outil d'optimisation, qui propose les valeurs optimales des facteurs en maximisant à la fois la concentration d'ozone et l'efficacité énergétique. Selon ce modèle, l'optimum du procédé (c'est-à-dire la maximisation de la concentration d'ozone et de

l'efficacité énergétique) devrait être obtenu pour $V = 8,6$ kV, $f = 6,45$ kHz, et $d = 7,5$ mm correspondant à $CO_3 = 120,31$ mg/l et $\eta = 342,29$ g/kW h (*figure 2.20*). "iter" est le nombre d'itérations et "log(D)" est le Log de la distance globale à la cible ; la valeur de Log (D) est égale à zéro lorsque toutes les réponses sont entre la cible et la limite. Plus Log (D) est petit, meilleur est le résultat. Log (D) devient négatif lorsque les valeurs de toutes les réponses sont encore plus proches de la cible. [23] [56-57] [59-60]

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max		
1	Ozone concentration	Maximize	1	120.582	128.843			
2	energy efficiency	Maximize	1	351.016	370.054			
	1	2	3	4	5	6	7	
	voltage	frequency	spacing	Ozone concentration	energy efficiency	iter	log(D)	
1	8.6109	6.4527	7.5177	120.329	342.216	158	0.2042	
2	8.6094	6.4522	7.5214	120.313	342.293	147	0.2031	
3	8.6252	6.4622	7.5201	120.51	341.35	74	0.2163	
4	8.6307	6.4658	7.5212	120.579	341.013	62	0.2211	
5	8.6147	6.4567	7.5243	120.385	341.954	148	0.2077	
6	8.6119	6.4561	7.5234	120.354	342.098	63	0.2058	
7	8.6307	6.4658	7.5212	120.579	341.013	62	0.2211	
8	8.6089	6.4547	7.5245	120.318	342.267	55	0.2035	

Figure 2.20 Résultats du programme d'optimisation de MODDE 5.0, pour la maximisation de la concentration d'ozone et de l'efficacité énergétique.

2.4 Conclusion

Une étude expérimentale d'un générateur d'ozone DBD cylindrique, avec un espace de décharge réduit à 0,5 mm et une électrode haute tension divisée en trois parties, a été décrite dans ce chapitre.

Tout d'abord, le modèle étudié a été comparé à un modèle similaire qui possède une électrode HV complète. Ensuite, le générateur d'ozone a été analysé en termes d'efficacité énergétique et de concentration d'ozone en utilisant la méthodologie des plans d'expériences.

Trois facteurs de contrôle ont été considérés, à savoir la tension, la fréquence et la distance entre les parties adjacentes de l'électrode HT. Les résultats obtenus ont montré que la nouvelle configuration avec une électrode partitionnée donne de meilleurs résultats en termes de concentration d'ozone et d'efficacité énergétique.

Dans le chapitre suivant, nous proposons des nouvelles configurations de générateurs d'ozone qui nous permettent d'étudier l'influence de l'écoulement d'aire sur la concentration d'ozone ainsi que sur le rendement énergétique.

Nous intéresserons ensuite à la réalisation d'un SKID mobile comprenant six réacteurs d'ozone avec une nouvelle conception qui offre plusieurs choix d'entrée et de sortie d'aire, ce qui nous offre la possibilité d'étudier expérimentalement le SKID, en examinant les différentes configurations pour trouver la conception optimale, en termes de production d'ozone.

Chapitre 03

*Effet de l'écoulement de gaz sur la
production d'ozone*

3

EFFET DE L'ÉCOULEMENT DE GAZ SUR LA PRODUCTION D'OZONE

3.1 Introduction

Les réacteurs DBD ont été largement étudiés pour optimiser le taux de la génération d'ozone et le rendement énergétique en fonction de plusieurs paramètres électriques et géométrique tels que le niveau et la forme du signal de la tension appliquée, l'espace de décharge et la longueur des électrodes, ou selon leur type de décharge DBDs surfacique, volumique et même hybrides. [44-46]

Cependant, peu d'études expérimentales sont consacrées à l'étude de l'influence de l'écoulement de gaz sur la génération d'ozone.

Dans ce chapitre, nous avons pris en considération les résultats des travaux du chapitre précédent pour le choix du type de générateur d'ozone développé « électrode interne partitionné », nous réaliserons dans un premier temps une étude expérimentale comparative en termes de concentration d'ozone et d'efficacité énergétique sur trois modèles du générateur d'ozone afin de chercher le meilleure itinéraire de la quantité d'oxygène injecté. Le principe et de faire varier les entrée et sorties de gaz pour de trouver la configuration optimale.

Les résultats satisfaisants trouvé, nous ont motivé à regrouper les générateurs d'ozone dans une cuve métallique parallélépipédique afin d'avoir un taux d'ozone plus élevé.

Dans la deuxième partie, nous présenterons le SKID mobile contenant six réacteurs d'ozone avec une nouvelle conception à plusieurs entrées et sortie de gaz.

Afin de trouver la configuration optimale en termes de production d'ozone plusieurs essais ont été effectués. Les résultats obtenus ont montré que la configuration à quatre entrées de gaz est la plus performante.

3.2 Etude de l'écoulement de gaz dans un générateur d'ozone

3.2.1 Description du générateur d'ozone étudié

Nous avons pris en considération les résultats trouvées précédemment dans les travaux du chapitre précédent concernant le choix de la configuration optimale du générateur d'ozone « G_{3P} avec une électrode HT partitionnée » (*figure 3.1*), qui présente les bonnes performances en termes de concentration et efficacité énergétique.

Une petite modification a été faite sur le réacteur au niveau des bouchons de centrages, deux autres ouvertures ont été rajoutées (*figure 3.2*), une dans chaque bouchon afin d'avoir une bonne circulation de gaz chose qui nous permettra d'avoir plus de possibilité d'étudier l'influence de l'écoulement de gaz sur la production d'ozone.

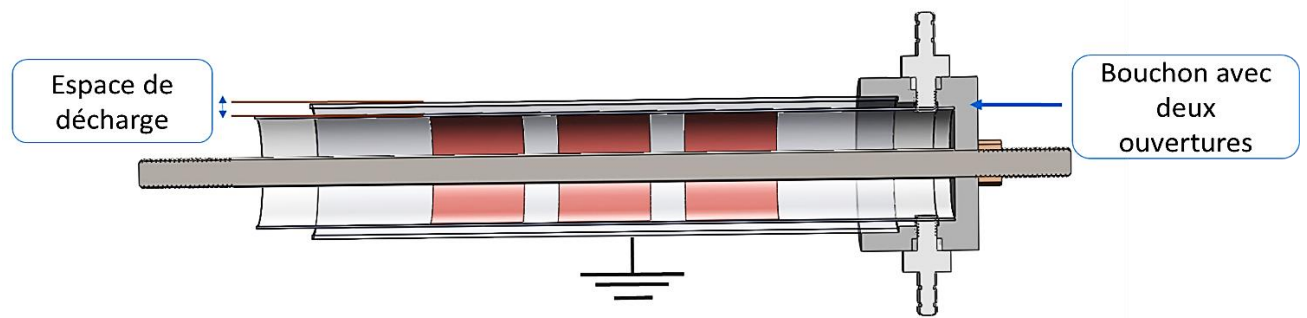


Figure 3.1 Coupe longitudinale du générateur d'ozone.

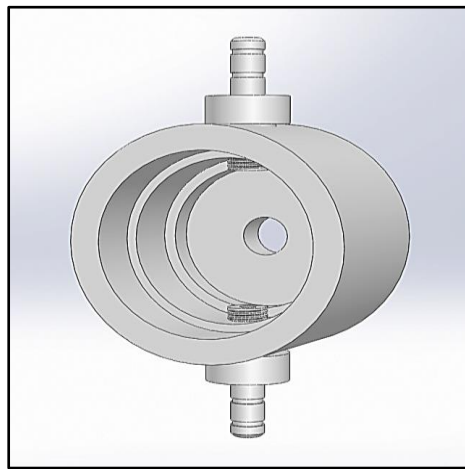


Figure 3.2 Schéma du bouchon avec deux ouvertures.

3.2.2 Structure des différents types de montages réalisés

La conception développée mené de quatre ouvertures, deux pour chaque cotés ; entrée et sorties de gaz, nous a permis d'avoir la possibilité d'étudier trois montages :

a. G_1 : entrée avec sortie en diagonale (figure 3.3)

Dans ce montage l'oxygène " O_2 " est injecté par l'une des ouvertures du premier bouchon et l'ozone " O_3 " obtenu est récupéré par l'ouverture diagonale du deuxième bouchon ; les deux autres sont bloquées.

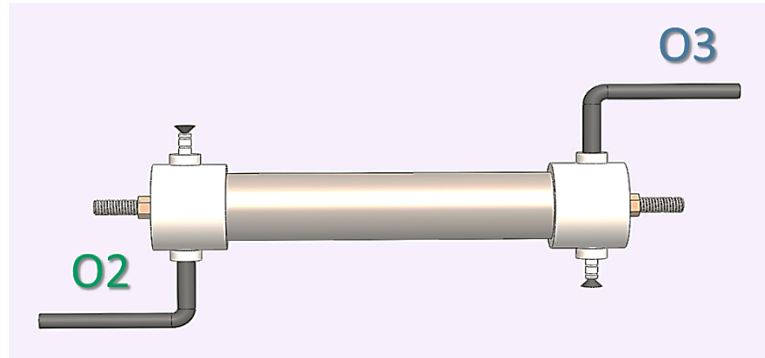


Figure 3.3 Schéma descriptif du G_1 .

b. G_2 : entrée avec sortie sur le même côté (figure 3.4)

Dans ce deuxième montage, une seule entrée de gaz « O_2 » est utilisée avec une seule sortie d'ozone « O_3 » sur le même côté, les deux autres ouvertures sont fermées.

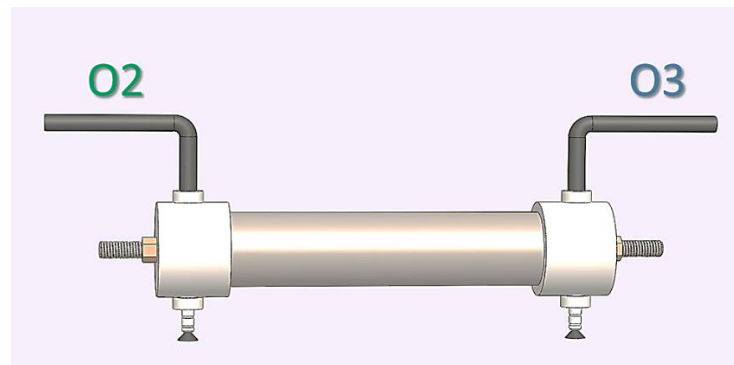


Figure 3.4 Schéma descriptif du G_2 .

c. G_3 : deux entrées d'oxygène avec deux sorties d'ozone en parallèle (figure 3.5)

Dans cette configuration, les quatre ouvertures sont utilisées ; l'oxygène est injecté par les deux ouvertures du premier bouchon, l'ozone est récupéré par les deux autres ouvertures du second bouchon.

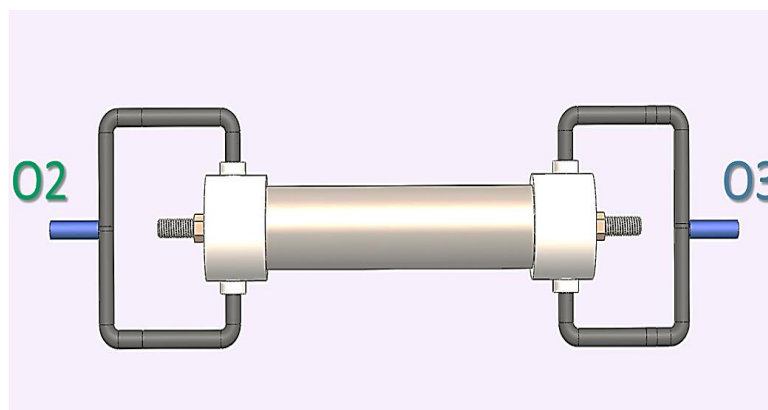


Figure 3.5 Schéma descriptif du G_3 .

3.2.3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la concentration d'ozone est le même qui est utilisé lors des expériences faites au chapitre 2. La photographie de la *figure 3.6* illustre le montage ainsi que les appareils utilisés lors des essais.

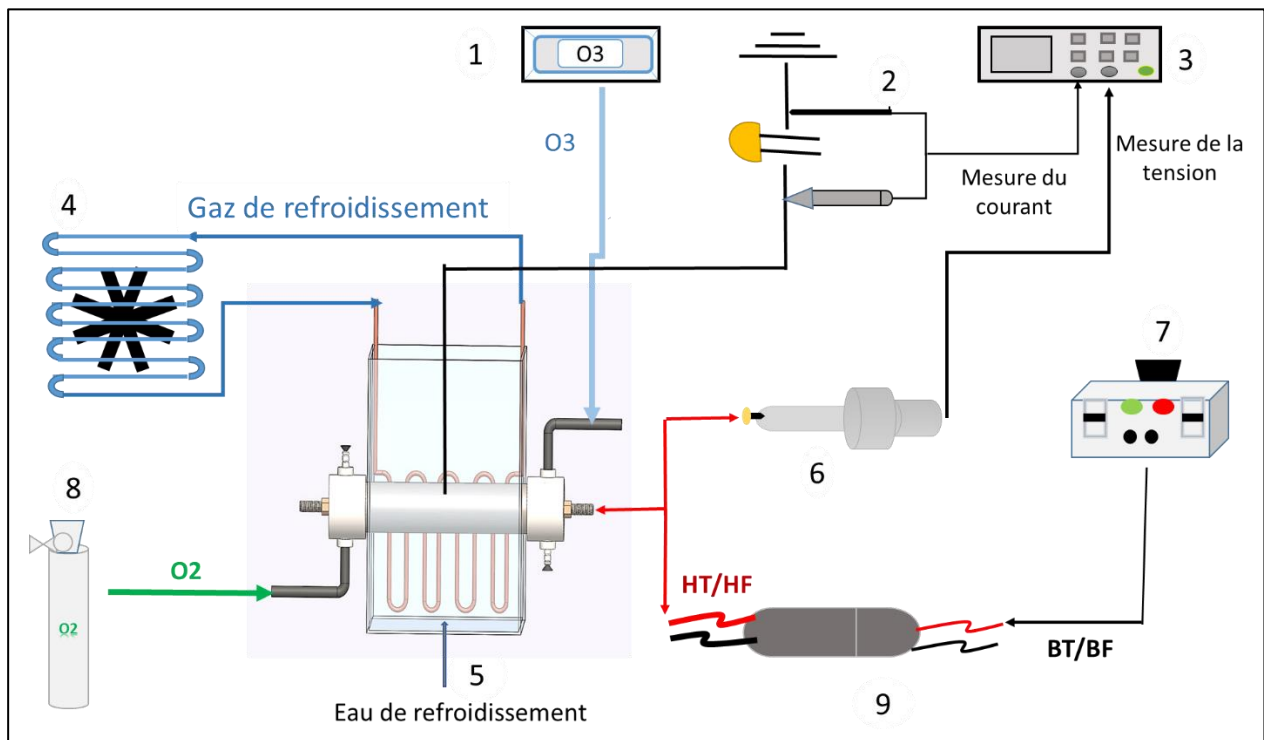


Figure 3.6 Dispositif expérimentale utilisé pour la mesure de la concentration d'ozone
 1. Moniteur d'ozone 2. Sonde pour mesurer le courant, 3. Oscilloscope numérique, 4. Refroidissement, 5. Générateur d'ozone, 6. Sonde haute tension, 7. Autotransformateur, 8. Concentrateur d'oxygène, 9. Alimentation haute tension haute fréquence. [61]

3.2.4 Résultats et discussion

3.2.4.1 Caractéristiques électriques

a. Mesure de l'énergie consommée par cycle

La *figure 3.7* illustre la courbe de Lissajous pour les trois géométries (G_1 , G_2 et G_3) du générateur d'ozone avec une tension appliquée de 5 kV. Selon les résultats obtenus, l'énergie consommée, W pendant un cycle, calculée selon l'équation (2.3) est de 3,4 mJ. En multipliant cette valeur énergétique par la fréquence, f , 6 kHz, la puissance consommée, P , a été calculée comme étant 20,4 W.

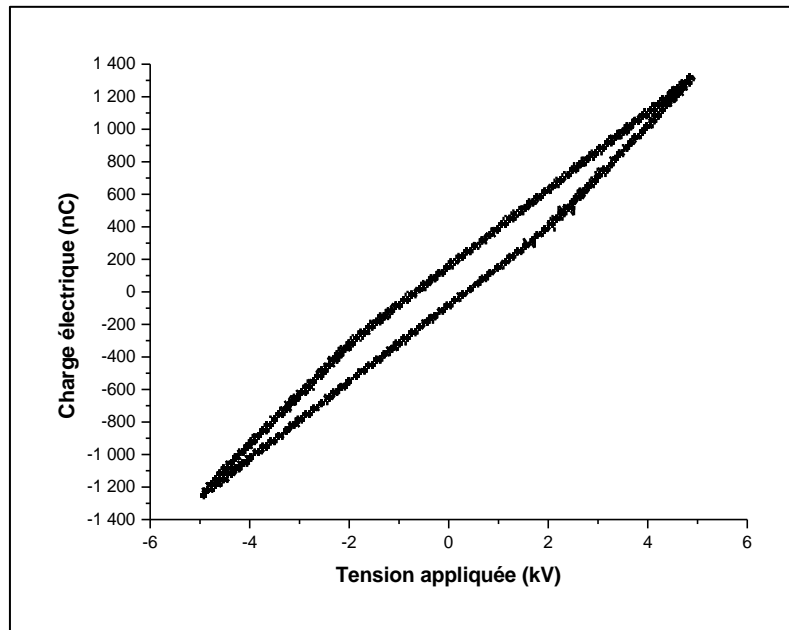


Figure 3.7 Courbe de Lissajous obtenues pour les 3 montages du générateur d'ozone G_1 , G_2 et G_3 ($f = 6$ kHz, $V = 5$ kV). [61]

b. Mesure de la puissance consommée

La **figure 3.8** illustre la variation de la puissance consommée en fonction de la tension appliquée pour les trois géométries du générateur d'ozone avec une fréquence de 6 kHz.

L'énergie consommée, pour une fréquence du signal donnée, est proportionnelle à la tension de la décharge. La valeur maximale de la puissance consommée est de 39 W pour une tension et une fréquence de 9kV.

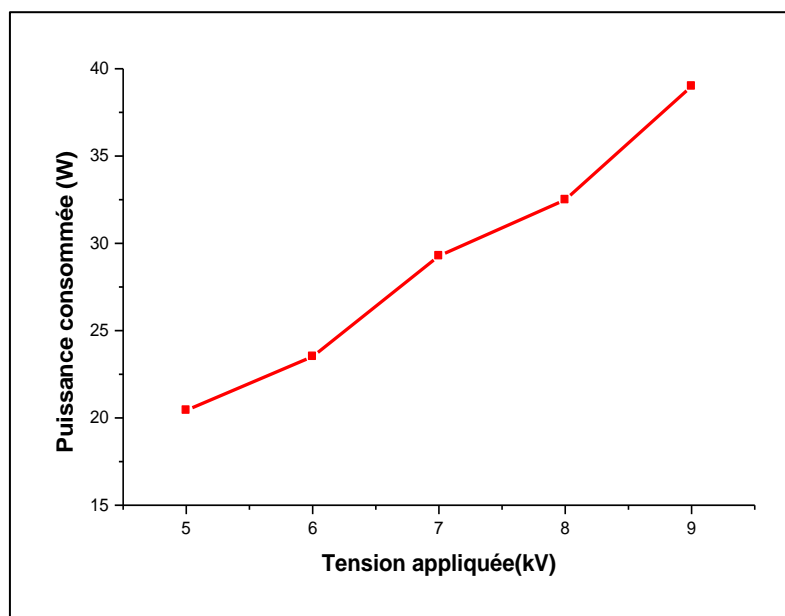


Figure 3.8 Variation de la puissance consommée en fonction de la tension appliquée pour les 3 montages du générateur d'ozone G_1 , G_2 et G_3 ($f = 6$ kHz).

3.2.4.2 Détermination de la configuration optimale

Afin de réaliser une analyse comparative entre les trois configurations G_1 , G_2 et G_3 du générateur d'ozone, en termes d'efficacité énergétique de la production d'ozone, deux paramètres sont étudiés, la tension appliquée V et le débit de gaz injecté Q .

a. Influence de la tension sur la concentration d'ozone et l'efficacité énergétique

Les expériences ont été faites dans une température ambiante, la température du générateur était en général stable, presque égale à 5 °C. Le débit d'oxygène est de 1 l/min et la fréquence utilisée égale à 6 kHz. Les manipulations sont répétées deux à trois fois afin de prendre la valeur moyenne pour chaque expérience.

Comme l'illustre la *figure 3.9*, la quantité d'ozone produite augmente presque linéairement avec la tension appliquée, quelle que soit la configuration du réacteur. L'augmentation de la tension V a permis de multiplier le nombre de micro-décharges et leur intensité ; par conséquent, la densité d'électrons libres et le taux de dissociation des molécules d'oxygène ont augmenté. [61]

De plus, la concentration d'ozone est significativement plus élevée pour le modèle G_1 où elle augmente et atteint une concentration de près de 120 mg/l pour une tension de 9 kV, un débit de 1 l/min et une fréquence de 6 kHz.

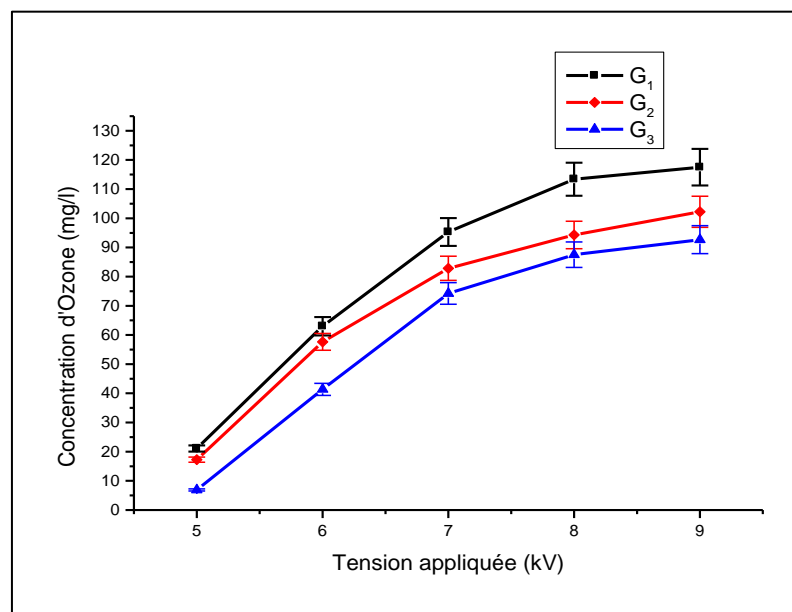


Figure 3.9 Variation de la concentration d'ozone en fonction de la tension appliquée pour les 3 montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz, $Q=1$ l/min). [61]

La *figure 3.10* illustre la variation du rendement énergétique de la production d'ozone pour les trois configurations de générateur en fonction de la tension appliquée V pour un débit de 1 l/min et une fréquence de 6 kHz.

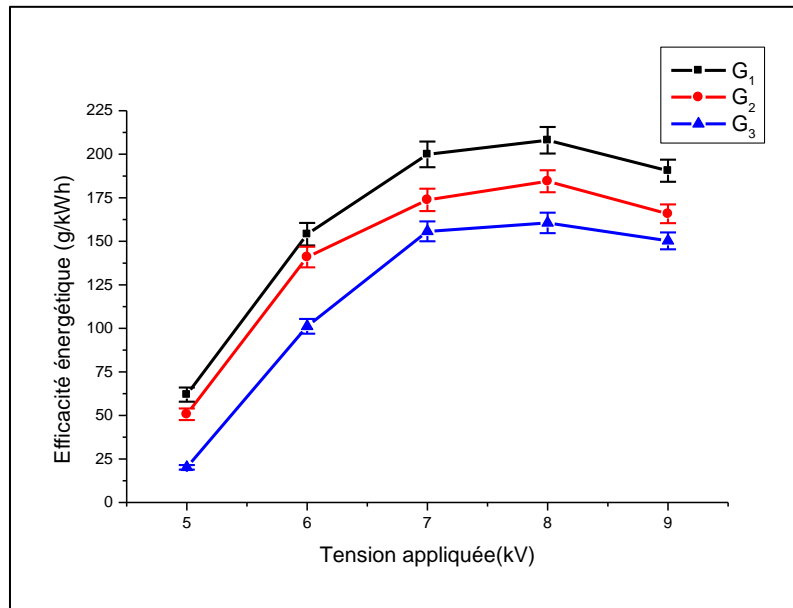


Figure 3.10 Variation de l'efficacité énergétique en fonction de la tension appliquée pour les trois montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f=6$ kHz, $Q=1$ l/min). [61]

Au-dessus de 5 kV, la supériorité du modèle G_1 est claire par rapport aux modèles G_2 et G_3 , le rendement énergétique atteint son maximum de 208 g/kWh lorsque la tension atteint 8 kV avant de diminuer à nouveau pour les trois configurations. Cette diminution considérable est le résultat de la conversion de l'énergie excédentaire en chaleur. [41]

b. Influence du débit sur la concentration d'ozone et l'efficacité énergétique

Afin d'étudier l'influence du débit de gaz « O_2 » sur la production d'ozone nous avons utilisé le même concentrateur d'oxygène utilisé dans les essais précédentes (ONYX ULTRA+) qui permet de fournir un débit variant de 1 à 10 l/min, et permet d'éliminer l'azote, le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et les hydrocarbures à partir de l'air ce qui donne une pureté de 95%.

Dans les conditions de température et d'humidité ambiantes, le moniteur d'ozone ne supporte pas plus que 2 l/min, pour cela un débitmètre et une vanne sont installés en amont du moniteur pour mesurer le débit d'ozone et garder la valeur au-dessous de 2 l/min.

En variant le débit de 1 à 10 l/min et en gardant les valeurs de la tension appliquée 9 kV et la fréquence maintenu à 6 kHz nous avons eu les résultats présentés dans les *figures 3.11* et *3.12* ci-dessous.

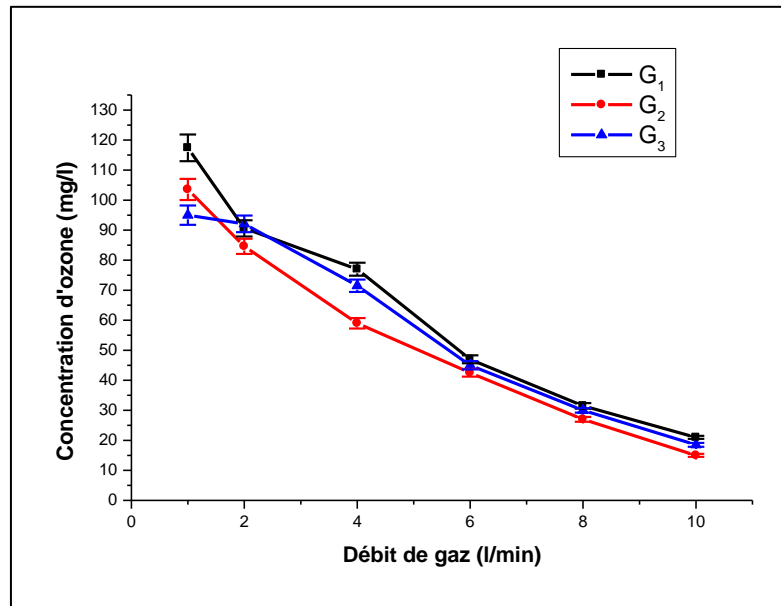


Figure 3.11 variation de la concentration d'ozone en fonction du débit de d'oxygène pour les 3 montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f = 6 \text{ kHz}$, $V = 9 \text{ kV}$). [61]

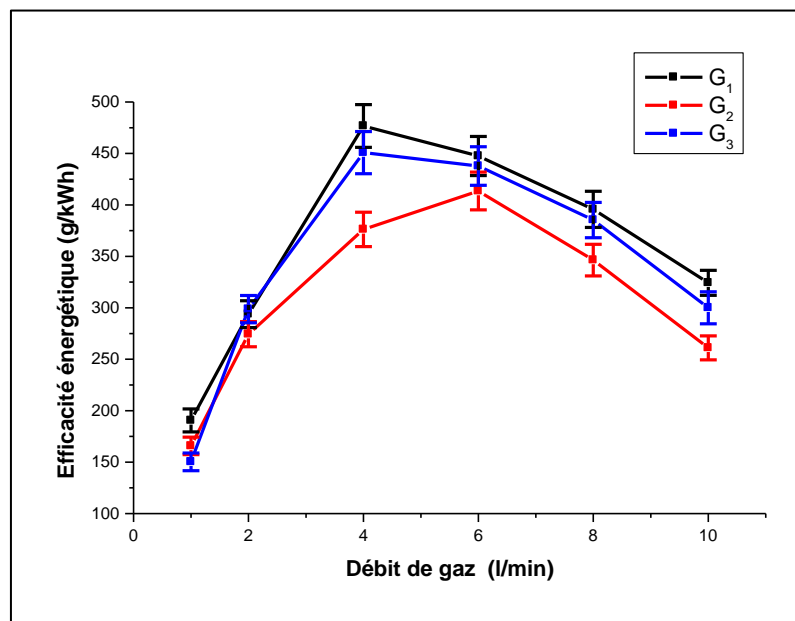


Figure 3.12 Variation de l'efficacité énergétique en fonction du débit d'oxygène pour les trois montages du générateur G_1 , G_2 et G_3 ($f = 6 \text{ kHz}$, $V = 9 \text{ kV}$) [61]

Les résultats obtenus prouvent encore la supériorité de la géométrie diagonale G_1 par rapport aux autres configurations pour les différentes valeurs du débit de gaz. L'augmentation du débit de gaz (au-dessus de 6 l/min) conduit à une accélération des molécules d'oxygène, ce qui entraîne un temps de résidence court dans la zone de décharge (une grande quantité de molécules d'oxygène par rapport aux molécules d'ozone), ce qui fait que certaines molécules d'oxygène ne sont pas soumises à la micro-décharge, et par conséquent une baisse de la concentration d'ozone où les valeurs sont presque les mêmes pour les trois modèles. [4]

La valeur maximale de rendement énergétique atteinte est de 477 g/kWh pour une concentration d'ozone de 77 mg/l par G_1 pour un débit de 4 l/min. En fait, cette supériorité s'explique par la grande quantité d'oxygène forcée de traverser tout l'espace de décharge du générateur où elle a le temps nécessaire pour se dissocier en atomes et se convertir en ozone, contrairement à G_3 où les molécules d'oxygène ne traversent que les parties inférieure et supérieure de la zone de décharge et G_2 dans lequel l'oxygène traverse l'espace de décharge le moins résistant et ne rencontre que la partie supérieure de la zone active. [61]

Ces résultats obtenus confirment définitivement l'avantage de faire circuler le gaz injecté avec une géométrie d'entrée et de sortie diagonale pour des faibles et hautes valeurs de débit de gaz.

3.3 Etude et réalisation du SKID mobile

3.3.1 Description du SKID

Après avoir effectué une étude comparative dans la partie précédente entre les générateurs d'ozone avec les trois différentes configurations qui ont permis d'étudier l'influence de l'écoulement d'air sur le rendement énergétique du générateur, et les résultats satisfaisants obtenus en terme de concentration d'ozone générée par les deux réacteurs « G_1 et G_3 ».

Cette partie a pour objet de réaliser présenter et décrire un SKID mobile qui regroupe six générateurs d'ozone (*figure 3.13*) afin de les exploiter dans une installation de traitement des eaux produisant un taux d'ozone élevé.

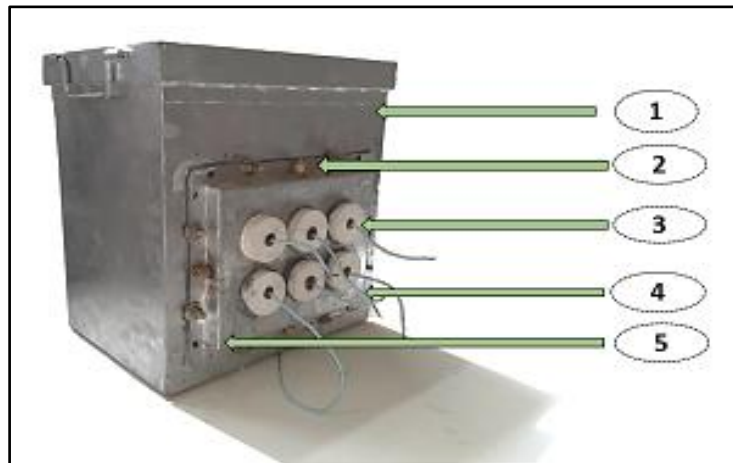


Figure 3.13 Photographie du SKID

1. bac, 2. Ouverture d'entrée et de sortie de gaz, 3. Bouchon, 4. Câble d'alimentation en HT, 5. Nourrice.

Nous avons tiré profit des résultats précédents en gardant la même conception des générateurs en ce qui concerne l'électrode HT partitionnée pour un meilleur rendement énergétique.

Le dispositif comprend six générateurs dont les électrodes externes forment un groupe soudé relié au bac de refroidissement (*figure 3.14*).

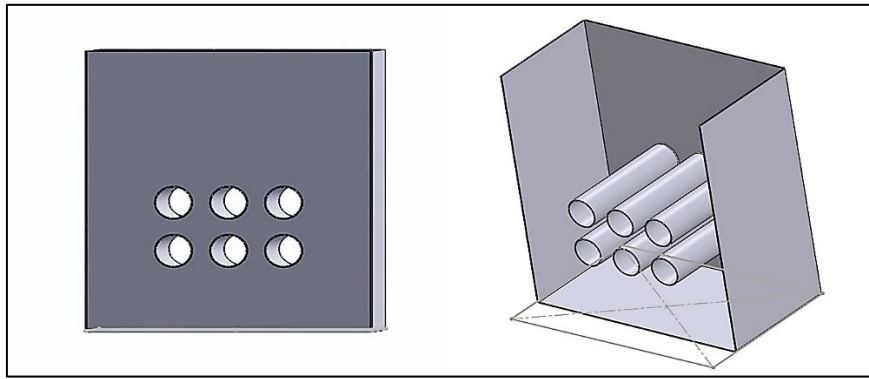


Figure 3.14 Schéma descriptif du groupe soudé (bac + électrodes externes)

L'alimentation et la récupération de gaz « O_2 et O_3 » se fait par deux nourrices fixées au bac contenant quatre ouvertures pour l'entrée d'oxygène O_2 et quatre autres ouvertures pour la sortie d'ozone O_3 (figure 3.15).

Un joint est rajouté entre les nourrices et le bac pour avoir une bonne étanchéité et pour minimiser les pertes de charges en éliminant le maximum les fuites de gaz.

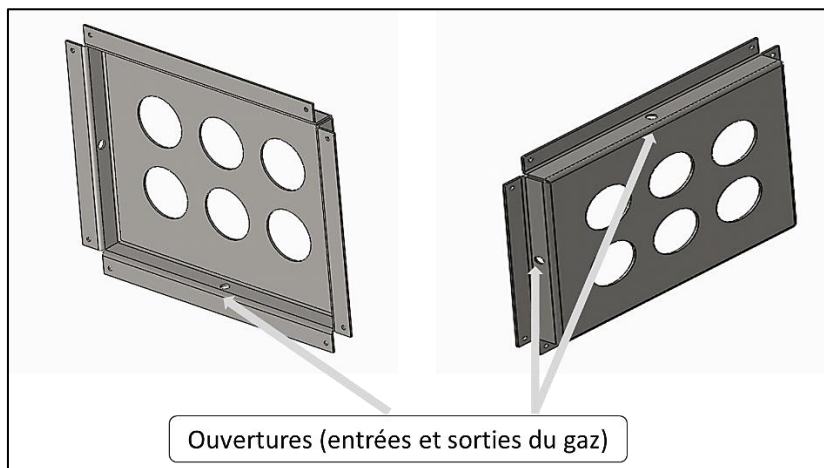


Figure 3.15 Schéma descriptif des nourrices

Les bouchons de centrage en téflon sont percés et taraudés pour permettre à une tige métallique (électrode interne relié à la haute tension) de se fixer à l'intérieur de générateur et pour maintenir le même intervalle de décharge. Les bouchons ont été montés au bout des deux côtés du chaque générateur. Un joint torique est placé dans chaque bouchon afin d'éviter les fissures dans la barrière diélectrique (verre) au moment de serrage et pour garantir l'étanchéité (figure 3.16).

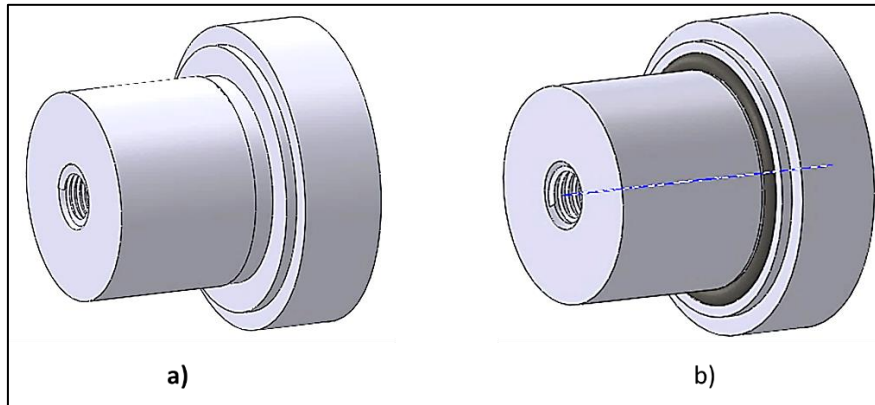


Figure 3.16 Schéma descriptif des bouchons

- a) Sans joint torique
- b) Avec joint torique

Un schéma descriptif de l'assemblage des bouchons avec joint torique, barrière diélectrique (cylindre en verre) et tige métallique fileté est illustré dans la *figure 3.17* ci-dessous :

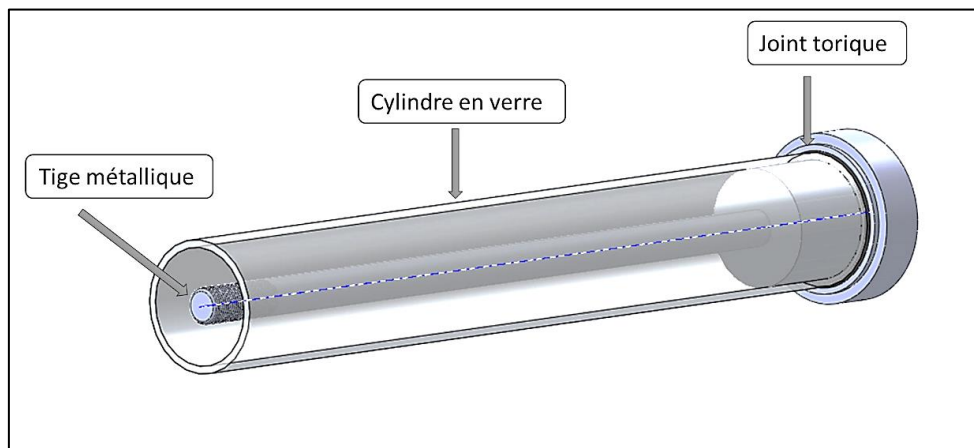


Figure 3.17 Schéma descriptif de l'assemblage rassemblant un bouchon, une barrière diélectrique et une tige métallique.

3.3.2 Etude expérimentale de la production d'ozone

Afin d'étudier expérimentalement le procédé pour l'appliquer dans le traitement des eaux, plusieurs configurations et expériences ont été réalisées de sorte que le taux d'ozone soit maximale.

Le débit d'oxygène et le nombre de générateurs utilisés sont les facteurs influant la production d'ozone et sa concentration dans l'eau. Un autre paramètre étudié pour avoir un meilleur rendement est le nombre d'ouvertures utilisées pour l'entrée de gaz.

La conception du SKID avec des ouvertures aux nourrices nous à donner la possibilité d'avoir quatre entrées en passant le gaz par les ouvertures de la nourrice jusqu'aux générateurs. Ces trois paramètres sont étudiés dans cette partie.

Nous avons pris en considération les résultats trouvés lors des essais précédents sur un seul générateurs qui ont montré la supériorité des deux configurations celle du montage 1 « G₁ » et du montage 3 « G₃ ».

3.3.2.1 Influence du nombre de générateur sur la production d'ozone

Pour la première expérience sur le SKID on a choisi une entrée parmi les quatre entrée en diagonal avec une sortie afin d'étudier l'influence du nombre de générateurs sur la production d'ozone, en gardant les paramètres électriques et le débit d'oxygène constants et en variant le nombre de générateurs de 1,3,6.

Le matériel utilisé dans dispositif expérimentale pour la mesure de la concentration d'ozone est le même qui est utilisé lors des expériences précédentes, une alimentation et un autotransformateur ont été rajouté pour soulager et éviter la surcharge sur la première alimentation, ce qui donne une alimentation pour chaque 3 générateurs.

Un interrupteur à était placé en amont des générateurs afin de commander et contrôler l'alimentation des réacteurs utilisé.

La *figure 3.18* représente Schéma descriptif du dispositif expérimental utilisé.

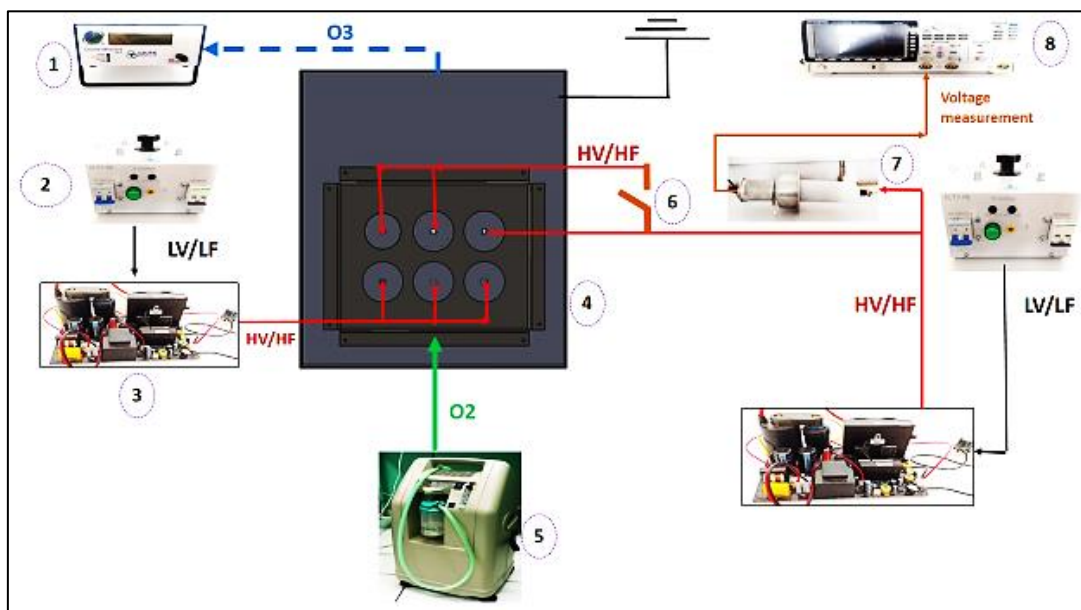


Figure 3.18 Schéma descriptif du dispositif expérimental

1. Moniteur d'ozone, 2. Autotransformateur, 3. Alimentation haute fréquence haute tension, 4. SKID,
5. Concentrateur d'oxygène. 6. Interrupteur. 7. Sonde haute tension, 8. Oscilloscope numérique

La *figure 3.19* illustre la variation de la concentration d'ozone en fonction du nombre de générateurs avec une tension appliquée constante égale à 7 kV, une fréquence de 5 kHz et un débit d'oxygène de 2 l/min.

Les résultats trouvés montrent que la concentration d'ozone augmente en multipliant le nombre de générateurs d'ozone.

Nous constatons que cette augmentation n'est pas proportionnelle en passant d'une faible concentration de 11 l/min pour un seul réacteur arrivant à 80 l/min pour la totalité des générateurs.

La faible concentration générée par un seul réacteur est dû au passage d'une grande quantité de molécules d'oxygène non soumis à la décharge électrique par les réacteurs non alimentés, ce qui va provoquer une baisse de concentration causé par la tyrannie des molécules d'oxygène aux dépens des molécules d'ozone générées par le seul générateur alimenté.

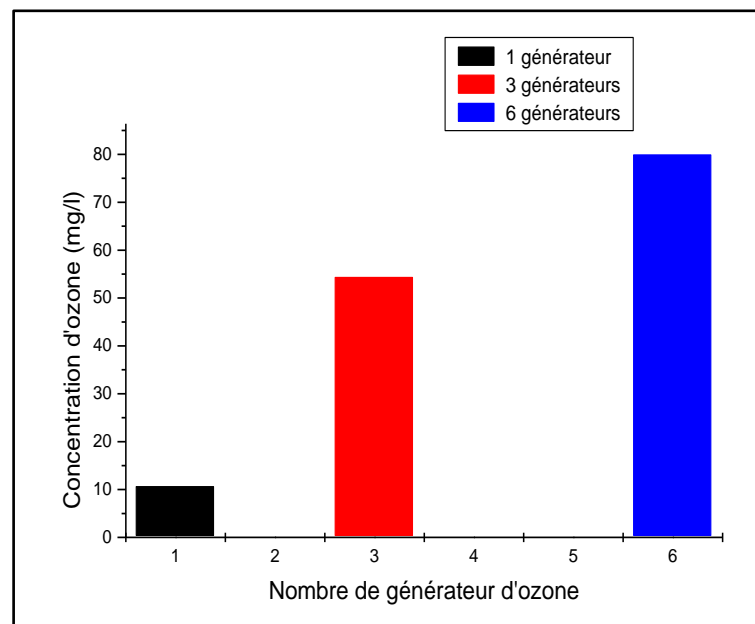


Figure 3.19 Variation de concentration d'ozone en fonction du nombre de générateurs.

3.3.2.2 Influence de l'écoulement d'aire sur la production d'ozone (cas d'un SKID)

Le SKID mobile est un modèle à échelle semi-industrielle qui comprend six générateurs d'ozone pour satisfaire la demande dans les applications avec une quantité et un volume d'eau très élevées. Pour cela la concentration d'ozone ainsi que le taux d'ozone doivent être maximal. La conception des nourrices (quatre ouvertures pour chaque une) nous a donné la possibilité d'étudier plusieurs conceptions pour optimiser la trajectoire du gaz afin de bien diviser la quantité d'aire injecté sur tous les générateurs.

Dans ces expériences, trois configurations ont été choisie afin d'étudier l'influence de l'écoulement de gaz sur la concentration et le taux d'ozone :

a. Montage 1 : une entrée en diagonal avec une sortie

Dans ce montage, l'oxygène a été injecté par une ouverture de la première nourrice parmi les quatre ouvertures, et l'ozone a été récupéré par l'ouverture diagonale de la deuxième

nourrice (*figure 3.20*). Le changement des ouvertures n'as pas d'influence sur les résultats en gardant toujours l'entrée et la sortie en diagonale.

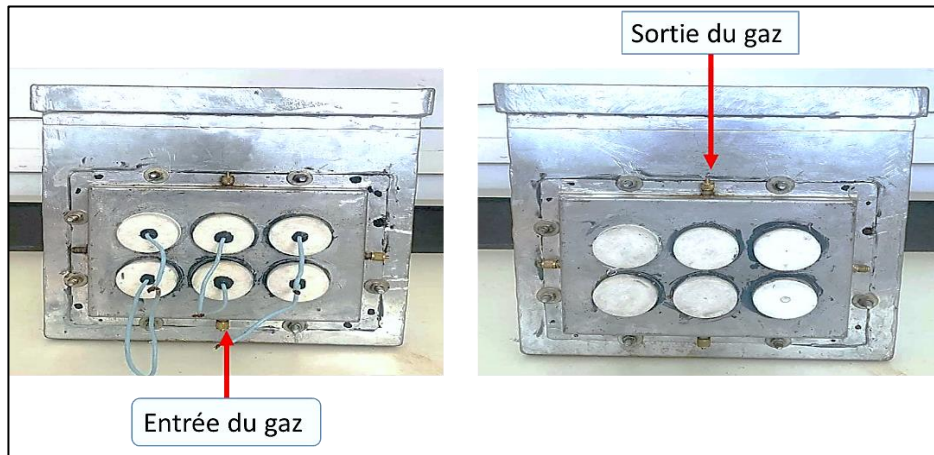


Figure 3.20 Photographie descriptive du montage 1 « une seule entrée avec une seule sortie en diagonale ».

b. Montage 2 : deux entrées avec une sortie

Une ouverture est rajouté en plus de la première entrée ce qui nous donne deux entrées pour l'injection de l'oxygène et une ouverture pour la récupération d'ozone.

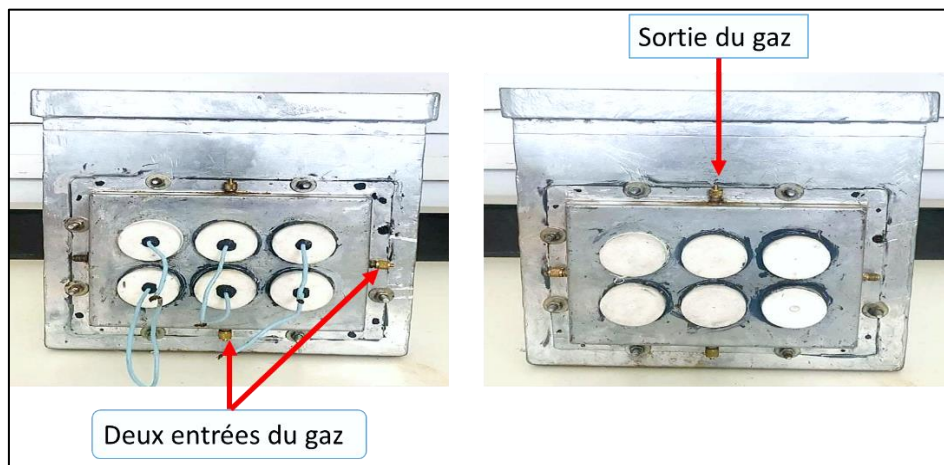


Figure 3.21 Photographie descriptive du montage 2 « deux entrées avec une seule sortie ».

c. Montage 3 : quatre entrées avec une sortie

Dans cette configuration les quatre entrées de gaz sont utilisées en gardant toujours une seule ouverture pour la sortie d'ozone.

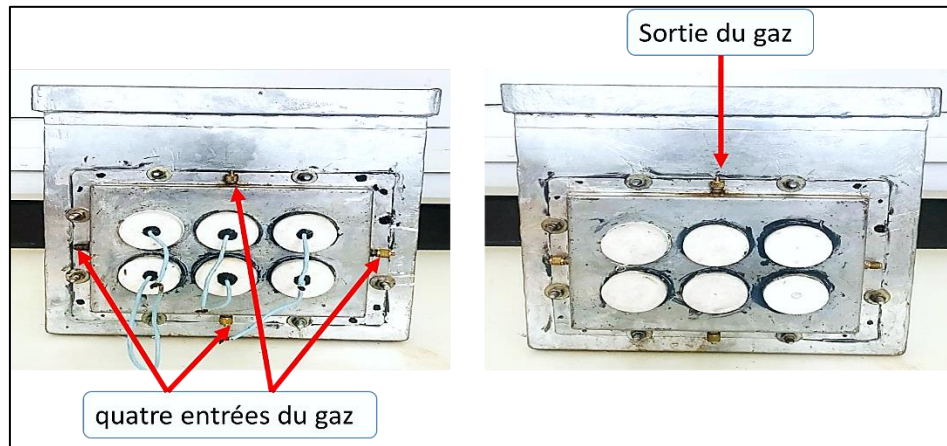


Figure 3.22 Photographie descriptive du montage 3 « quatre entrées avec une seule sortie ».

Dans les trois montages on a gardé une seule ouverture pour la sortie d'ozone, la multiplication des ouvertures pour la récupération d'ozone n'as pas d'influence sur la concentration d'ozone, les trois autres ouvertures sont utilisées pour les essais dans le cas où on veut changer une des ouvertures d'entrées de gaz pour que la sortie soit toujours en diagonal.

Le dispositif expérimental utilisé sur ces montages pour la mesure de la production d'ozone est le même à celui qui est utilisé dans l'expérience précédente, le débit d'oxygène a été varié de 1 à 6 l/min, les paramètres électriques sont constants, tension appliquée de 8 kV et une fréquence de 5 kHz.

La **figure 3.23** illustre la variation de la concentration d'ozone en fonction du débit d'oxygène pour les trois conceptions.

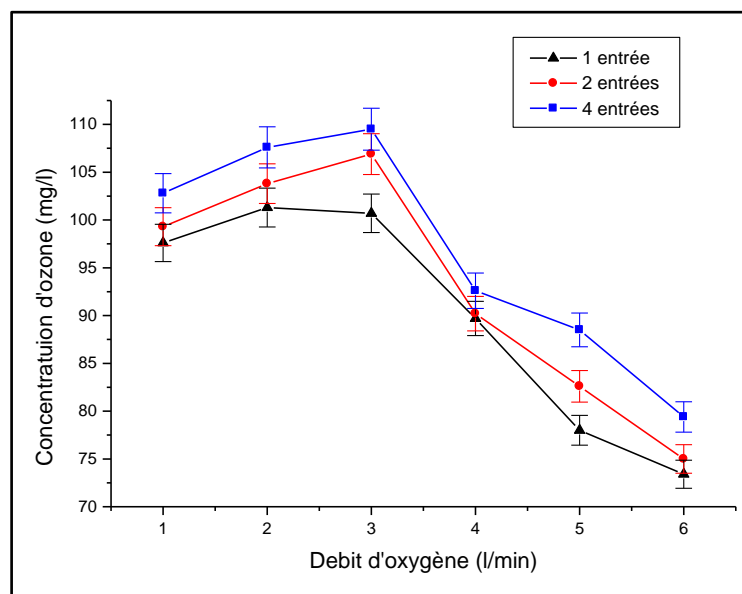


Figure 3.23 Variation de la concentration d'ozone en fonction du débit d'oxygène pour les trois configurations.

Les résultats du tracé de la *figure 3.23* montre que l'augmentation du débit d'oxygène fait augmenter la concentration d'ozone jusqu'à la valeur de 3 l/min pour le montage 2 et 3 et jusqu'à la valeur de 2 l/min pour le montage 1, cela est dû à l'augmentation du nombre de molécule d'oxygène soumis aux décharges électrique pour se transformer en ozone.

La comparaison entre les trois configurations montre la supériorité du montage 3 où les quatre ouvertures sont utilisées par rapport aux autres montages, avec une concentration maximale obtenu qui atteint 110 mg/l avec un débit d'oxygène de 3 l/min.

En outre, au-delà du débit d'oxygène de 3 l/min, la concentration d'ozone commence à abaisser pour les trois montages. Cette diminution est due à l'augmentation de la vitesse des molécules d'oxygène dans les zones de décharges des générateurs.

On peut constater que la conception du montage 3 avec quatre entrées d'oxygène a permis d'avoir un bon partage de la quantité d'aire injecté, ce qui a donner une bonne circulation de gaz réparti sur tous l'ensemble des générateurs contrairement aux autres configuration où le trajet d'oxygène n'est pas distribuer avec égalité sur les six réacteurs ce qui à donner par conséquence un mauvais rendement.

D'un autre côté, la *figure 3.24* illustre la variation du taux d'ozone en fonction du débit d'oxygène pour les trois conceptions.

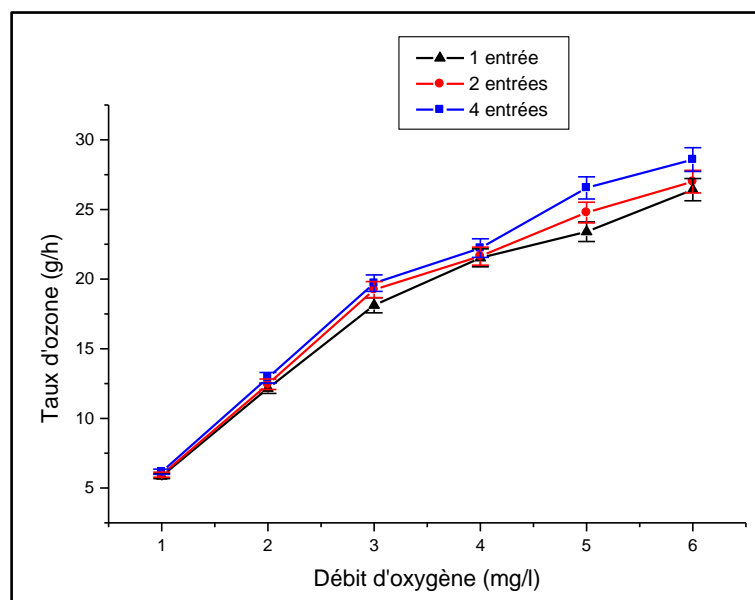


Figure 3.24 Variation du taux d'ozone en fonction du débit d'oxygène pour les trois configurations.

On peut dire que le taux d'ozone produit par les trois montages souligne une évolution linéaire en fonction du débit d'oxygène. Par ailleurs, au-delà d'une certaine valeur environ

égale à 3 l/min, le taux d'ozone produit n'augmente pas aussi rapidement. En effet, plus le débit est élevé plus la vitesse d'écoulement augmente ce qui cause une durée de séjour du gaz plus courte.

En outre, la conception de quatre entrées est la plus performante dont la valeur du taux maximal atteint presque les 30 g/h pour un débit de 6 l/min.

On peut conclure d'après les résultats obtenus par les expériences faites sur le SKID afin d'optimiser la production d'ozone que la configuration optimale est celle du montage 3 qui permet d'injecter la quantité de gaz par les quatre entrées contrairement aux autres conceptions où la quantité injecter n'est pas partager en égalité sur tous l'ensemble des générateurs chose qui va réduire le rendement de quelques réacteurs et par conséquent affaiblir la performance de l'ensemble du SKID.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude d'optimisation de la production d'ozone en fonction de l'écoulement d'air, tous d'abord une comparaison a été effectué entre trois configurations d'un générateur d'ozone où les entrées et les sorties de gaz ont été variées.

Les résultats ont montré la supériorité en termes de concentration d'ozone et d'efficacité énergétique de la géométrie diagonale « une entrée avec une sortie en diagonal ».

La deuxième partie, a été consacrée à l'analyse expérimentale d'un SKID comprenant six générateurs d'ozone. Ce dispositif est réalisé avec une conception avec des nourrices contenant plusieurs ouvertures d'entrées et de sorties de gaz afin d'étudier l'influence de l'écoulement de gaz sur la concentration et le taux d'ozone.

Les résultats trouvés ont montré que l'augmentation du nombre de générateurs d'ozone conduit à l'élévation de la production.

Une comparaison a été établie entre trois configurations, les meilleurs résultats ont été obtenus par la conception de quatre entrées de gaz, ce montage permet de bien organiser le partage de la quantité d'oxygène injecté sur tous les réacteurs, chose qui a conduit à avoir des résultats satisfaisants avec un taux d'ozone de 30 g/h pour un débit de 6 l/min.

Le SKID mobile a montré de bonnes performances en termes de concentration et de taux d'ozone, chose qui nous a motivées à l'appliquer pour le traitement des eaux dans la suite de notre travail.

Chapitre 04

Traitement des effluents non domestiques (piscicultures et hospitaliers) par ozonation

4

TRAITEMENT DES EFFLUENTS NON DOMESTIQUE (PISCICULTURES ET HOSPITALIERS) PAR OZONATION

4.1 Introduction

L'ozone (O₃) est un oxydant germicide puissant et efficace, son potentiel de désinfection est beaucoup plus élevé que celui du chlore et des autres désinfectants.

De nos jours, l'ozone devient l'oxydant de choix pour de nombreuses applications industrielles, domestique et non domestiques dans la désinfection de l'air et de l'eau, les produits chimiques et certaines applications pharmaceutiques. [45]

Dans ce chapitre, nous avons opté d'appliquer cette technique d'ozonation en utilisant le SKID mobile, en premier lieu sur les eaux piscicoles en traitant les eaux de bassins chargés de déchets d'écloserie de la station TABIA dans la wilaya de Sidi Bel Abbes, afin de les réutiliser en partie ou totalement. Ceci permet de réduire la consommation et de minimiser la fuite et le transfert des agents pathogènes vers le milieu extérieur.

En deuxième temps, la technique d'ozonation est appliquée sur les rejets liquides hospitaliers, ces derniers peuvent contenir des produits chimiques et biologiques contaminants dont la source principale est les différentes substances utilisées pour traitement des patients.

Ce type de rejet peut présenter un risque sanitaire important pour la santé humaine et peut provoquer une forte dégradation de l'environnement. La présente étude se concentre sur l'amélioration de la qualité des effluents liquides de l'hôpital Hassani Abdelkader de Sidi Bel-Abbes.

4.2 Méthodes de traitement des eaux usées

4.2.1 Définitions et types des eaux usées [63- 64]

Les eaux usées sont des eaux contaminées qui ont perdu leurs puretés par les activités humaines et rejetées après leur utilisation domestique, industrielle ou agricoles.

On distingue quatre grandes catégories d'eaux usées : les eaux domestiques, les eaux industrielles, les eaux pluviales et les eaux d'origine agricole.

a. Eaux domestiques

Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines : urines, fèces (eaux vannes) et eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères).

Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales, ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension.

Elles proviennent essentiellement :

- Des eaux de cuisine provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides) et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses ;
- Des eaux de salle de bain chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées ;
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires, très chargées en matières organiques hydrocarbonées, en composés azotés, phosphatés et microorganisme.

b. Eaux industrielles

Elles sont très différentes des eaux usées domestiques. Elles ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés.

On peut néanmoins, faire un classement des principaux rejets industriels suivant la nature des inconvénients qu'ils déversent :

- Pollution due aux matières en suspension minérales (carrière, tamisage du sable et gravier, industries productrices d'engrais phosphatés...);
- Pollution due aux matières en solution minérales (usine de décapage, galvanisation...);
- Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, pâte à papier...);
- Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers (raffineries de pétrole, porcherie, produits pharmaceutiques.....)
- Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industries nucléaires....)

c. Eaux pluviales

Les eaux de pluie se chargent d'impuretés au contact de l'air (fumées industrielles), puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes.

En outre, en cas de fortes précipitations, dans les zones urbaines, les surfaces construites rendent les sols imperméables et ajoutent le risque d'inondation à celui de la pollution.

Les eaux pluviales peuvent poser un problème pour les stations d'épuration, les contraintes de préservation des installations d'épuration peuvent imposer un déversement ("délestage") de ce "mélange" très pollué dans le milieu naturel.

d. Eaux d'origine agricole

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux.

Il s'agit principalement :

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation) ;

- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...).

4.2.2 Caractéristiques des eaux usées [65]

En général, les eaux usées non traitées peuvent contenir de nombreux contaminants biologiques et chimiques pouvant nuire à la santé humaine, à l'environnement et aux cours d'eau :

a. Macropolluants

Les macropolluants sont des molécules de grande taille (par rapport aux micropolluants), qui sont soit naturellement présents dans l'eau, soit apportés par l'activité humaine mais qui ne présentent pas d'inconvénient pour la vie aquatique, l'écosystème aquatique ou l'aptitude d'une eau à la fabrication d'eau potable, tant qu'elles restent à des niveaux ou des concentrations limitées. Ils doivent être contenus dans certaines limites de concentration, évaluées en milligrammes par litre (mg/l), par opposition aux micropolluants, chiffrés en microgrammes par litre (g/l).

Les matières en suspension (MES) : sont des matières insolubles, fines, minérales ou organiques, biodégradables ou non. Leur principal effet est de troubler l'eau : c'est la turbidité.

Dans le milieu naturel, elles proviennent des effets de l'érosion et des débris d'origine organique. Les eaux résiduaires urbaines et industrielles contribuent également à l'élévation des matières en suspension, notamment les rejets en provenance des industries agroalimentaires et de la chimie.

Les matières organiques : Un composé organique est caractéristique de toute matière vivante ou issue d'une matière qui a été vivante, et/ou contient du carbone.

La plupart des matières organiques ne deviennent polluantes que lorsqu'elles sont en excès dans le milieu notamment dans le milieu aquatique. On distingue, d'une part, les matières organiques biodégradables (d'origine humaine) qui se décomposent dans le milieu naturel et qui peuvent générer divers problèmes (odeurs, consommation d'oxygène) et surtout être associées à des micropolluants bactériens. D'autre part les matières organiques non biodégradables (hydrocarbures...).

Les nutriments : sont des matières nutritives. Il s'agit principalement de l'azote et du phosphore. L'azote et le phosphore sont ce qu'on appelle en agronomie deux facteurs limitants : la capacité de développement des plantes (terrestres et aquatiques) dépend de la quantité d'azote et de phosphore qu'elles vont absorber. Ils ne doivent cependant pas être excessifs dans l'eau. Dans l'eau de surface, ils peuvent provoquer une prolifération végétale (eutrophisation), qui va à son tour entraîner une demande d'oxygène, et donc un appauvrissement en oxygène dans l'eau et, à terme, une diminution, voire la disparition, de la faune piscicole.

L'azote a la faculté de changer très facilement de forme chimique, en s'associant à des molécules d'oxygène ou d'hydrogène, l'azote et l'hydrogène forment l'ammoniac (NH_4^+), l'azote, en consommant de l'oxygène, forme des nitrites (NO^{2-}) ou des nitrates (NO^{3-}).

Ces éléments contribuent à des situations d'anoxie des milieux aquatiques et peuvent favoriser une eutrophisation des écosystèmes. L'agriculture et la chimie industrielle apportent les plus grosses contributions à ce type de pollution.

Comme l'azote, l'excès de phosphore, entraîne une prolifération d'algues grandes consommatrices d'oxygène, ce qui peut conduire à asphyxier les milieux aquatiques (eutrophisation).

b. Micropolluants

Le terme micropolluants désigne un composé minéral ou organique dont les effets sont toxiques à très faible concentration (les teneurs sont évaluées en g/litre).

On distingue quatre types de micropolluants :

Les métaux : sont naturellement présents dans les roches et les sols. La présence de gisements métallifères (Massif central, Alsace) contribue à la contamination métallique des eaux.

Les éléments métalliques surveillés sont le fer, le chrome, le zinc, le nickel, qui sont utiles au monde vivant en très faible quantité, et les métaux lourds, dont on ne connaît aucune utilité pour l'homme, et qui ont la propriété de s'accumuler dans la chaîne alimentaire : mercure, cadmium, plomb, arsenic, etc.

Les métaux lourds ont un fort caractère bioaccumulatif et ont la particularité de ne pouvoir être éliminés. Ils changent simplement de forme. Au-delà d'un certain seuil, ils deviennent des toxiques importants pour l'homme.

Les pesticides destinés à lutter contre les parasites des plantes. L'agriculture est le principal utilisateur de pesticide.

Les autres micropolluants organiques : Ce sont surtout des substances chimiques. On distingue principalement les hydrocarbures et les solvants.

Les micros polluants issus de la micro biologie : bactéries, virus et parasites.

4.2.3 Étapes et procédés de traitement des eaux usées [65]

Afin de réduire les risques de contamination et de perturbation des écosystèmes aquatiques, les eaux usées doivent être traitées avant de les retourner dans l'environnement.

Le traitement des eaux usées est un processus visant à améliorer la qualité de l'eau, en éliminant une partie ou la totalité des contaminants, ce qui permet de les réutiliser ou de les rejeter dans l'environnement.

Le traitement des eaux usées comprend une suite d'opérations impliquant à la fois des procédés physiques, chimiques et biologiques.

a. Méthodes physiques (près-traitement)

Les eaux usées peuvent parfois contenir des déchets solides et des matières insolubles qui doivent être retirés avant même d'entreprendre le traitement primaire. C'est pourquoi il est préférable de les soumettre à un prétraitement physique en trois étapes.

D'abord, lors du dégrillage, les eaux usées passent à travers une grille dont les barreaux retiennent les matières les plus volumineuses. Le tamisage peut compléter cette phase de prétraitement.

Ensuite, le dessablage permet de retirer le sable et le gravier de l'eau par sédimentation dans un bassin.

Finalement, le dégraissage vise à éliminer la présence de graisses dans les eaux usées, graisses qui peuvent gêner l'efficacité des traitements biologiques qui interviennent ensuite. Le dégraissage s'effectue par flottation. L'injection d'air au fond de l'ouvrage permet la remontée en surface des corps gras. Les graisses sont raclées à la surface, puis éliminées (mise en décharge ou incinération).

b. Traitement primaire (physico-chimique)

Une fois les eaux usées débarrassées des gros déchets, les eaux subissent ensuite un traitement primaire.

Le traitement « primaire » fait appel à des procédés physiques, avec décantation plus ou moins aboutie, éventuellement assortie de procédés physico-chimiques, tels que la coagulation-floculation.

La décantation : consiste en une séparation des éléments liquides et des éléments solides sous l'effet de la pesanteur. Les matières solides se déposent au fond d'un ouvrage appelé « décanteur » pour former les « boues primaires ». Ce traitement élimine 50 à 55 % des matières en suspension et réduit d'environ 30 % la DBO et la DCO.

Décanteur lamellaire : L'utilisation d'un décanteur lamellaire permet d'accroître le rendement de la décantation. Ce type d'ouvrage comporte des lamelles parallèles inclinées, ce qui multiplie la surface de décantation et accélère le processus de dépôt des particules. Une décantation lamellaire permet d'éliminer plus de 70 % des matières en suspension et diminue de plus de 40 % la DCO et la DBO.

La floculation : La décantation est encore plus performante lorsqu'elle s'accompagne d'une floculation préalable. La coagulation-floculation permet d'éliminer jusqu'à 90 % des matières en suspension et 75 % de la DBO. Cette technique comporte une première phase d'adjonction d'un réactif, qui provoque l'agglomération des particules en suspension. Les amas de solides ainsi obtenus sont appelés « floccs ».

c. Traitement secondaire (biologique)

Après le traitement primaire, les eaux usées peuvent encore contenir des matières organiques dissoutes indésirables. L'objectif du traitement secondaire est de les éliminer en misant sur un traitement biologique. Ces traitements sont basés sur la capacité des micro-organismes à oxyder la matière minérale (NH_3 ...) et les matières constitutives de la DCO et de la DBO d'une part (aérobie), et à réduire d'autre part les molécules comportant de l'oxygène : NO_3 (anoxie), SO_4 et CO_2 (anaérobie). Ils vont permettre ainsi d'éliminer la pollution soluble biodégradable et une partie des MES. [66]

Parmi les traitements biologiques, on distingue les procédés biologiques extensifs et intensifs :

• Les procédés biologiques extensifs

Le lagunage utilise la capacité épuratrice de plans d'eau peu profonds. Les eaux usées sont envoyées dans une série de bassins. L'oxygène est apporté par les échanges avec l'atmosphère. La pollution organique se dégrade sous l'action des bactéries présentes dans le plan d'eau. Ce mode d'épuration permet d'éliminer 80 à 90 % de la DBO, 20 à 30 % de l'azote et contribue à une réduction très importante des germes. Il a cependant l'inconvénient d'utiliser des surfaces importantes.

- **Les procédés biologiques intensifs**

Ils regroupent toute une série de techniques ayant en commun le recours à des cultures bactériennes qui « consomment » les matières polluantes. Il existe deux grandes catégories de procédés biologiques artificiels.

Les installations à « boues activées » : il s'agit d'un système d'épuration aérobie, c'est-à-dire nécessitant un apport d'oxygène. La culture bactérienne est maintenue dans un bassin aéré et brassé. Les matières organiques contenues dans l'eau se transforment en carbone sous l'action des bactéries. Les résidus ainsi formés, contenant ce stock de bactéries, sont appelés « boues ». Après un temps de séjour dans un bassin d'aération, l'effluent est renvoyé dans un clarificateur, appelé aussi décanteur secondaire. Ensuite, les boues sont soit envoyées dans une unité de traitement spécifique, en vue de leur épandage agricole ou de leur élimination, soit réinjectées pour partie dans le bassin d'aération. On qualifie cette opération de « recirculation des boues ». Les traitements par boues activées éliminent de 85 à 95 % de la DBO₅, selon les installations. C'est le traitement biologique le plus simple et le plus fréquemment utilisé.

Les installations à « cultures fixes » : La technique des lits bactériens consiste à faire ruisseler les eaux à traiter sur un support solide où se développe une culture de micro-organismes épurateurs, le « film biologique » ou « biofilm ». Le rendement maximum de cette technique est de 80 % d'élimination de la DBO.

On trouve aussi le traitement combinant les procédés biologiques et physiques, c'est les procédés membranaires. Ces membranes très fines constituent une barrière physique qui retient les micro-organismes et les particules. [65]

d. Le traitement tertiaire

On ajoute des traitements complémentaires aux traitements de base lorsque les eaux usées doivent être rejetées dans des écosystèmes fragiles. Parmi ces traitements supplémentaires :

La désinfection qui permet d'éliminer les micro-organismes pathogènes par l'ajout de chlore ou d'ozone ou par l'action de rayons ultraviolets.

La **déphosphatation**, quant à elle, permet de précipiter les phosphates en excès dans l'eau en y ajoutant de la chaux ou du chlorure de fer.

Finalement, une **filtration** sur un lit de sable et de charbon de bois activé permet d'éliminer divers contaminants chimiques. [67]

4.3 Dispositif expérimental d'ozonation utilisé pour le traitement

Une installation d'ozonation utilisée pour la désinfection de l'eau comprend les parties suivantes :

- Alimentation électrique (haute tension /haute fréquence)
- Admission du gaz par un compresseur d'aire ou un concentrateur d'oxygène
- Un ou plusieurs réacteurs d'ozone (cas d'un SKID).
- Un ou plusieurs réservoirs d'eaux
- Pompe pour faire circuler l'effluent à traiter

- Système de transfert d'ozone dans l'eau : colonne de contact, injecteur venturi ou par contact direct.
- Système de récupération et traitement des gaz ozonés dégagés.

Le dispositif expérimental utilisé pour les expériences de traitement de l'eau est décrit à la *figure 4.1*. Le procédé de traitement de l'eau est un circuit fermé ou ouvert, l'eau « polluée » sort du réservoir et l'eau traitée revient dans le même réservoir ou dans un autre réservoir. La pompe aspire l'eau avec un débit d'environ 10 L/min, le système d'injection Venturi permet d'injecter l'ozone produit par le générateur dans le circuit d'eau. En effet, une aspiration se produit au niveau de l'injecteur Venturi, qui va permettre d'assurer le mélange de l'eau avec l'ozone.

La concentration en ozone mesurée dans l'eau par le moniteur d'ozone OZS30 (OZOTEK) est d'environ 10 mg/ L. L'eau ozonée est considérée comme une eau traitée qui sera réintroduite dans le bassin en circuit fermé. [68]

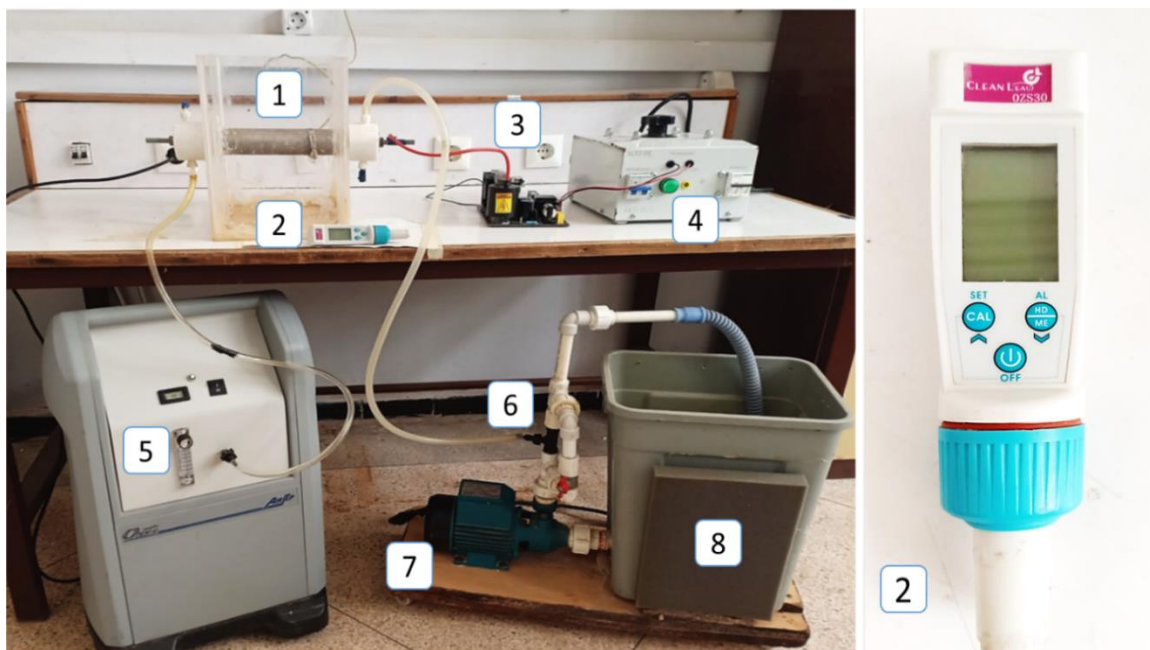


Figure 4.1 Photographie du dispositif expérimental de traitement.

1. Générateur d'ozone, 2. Moniteur d'ozone,
3. Alimentation électrique haute fréquence haute tension
- , 4. . Autotransformateur, 5. Concentrateur d'oxygène,
6. Injecteur Venturi, 7. Pompe à eau, 8. Effluent traité [61]

4.4 Traitement des rejets piscicultures par ozonation

4.4.1 Généralités sur l'aquaculture

- **Aquaculture** [69-70]]

L'aquaculture est définie comme l'art de multiplier et d'élever les organismes aquatiques, elle recouvre toutes les activités qui ont pour objet la production, la transformation, le conditionnement et la commercialisation d'espèces aquatiques.

L'aquaculture s'intéresse à plusieurs catégories de productions dont les principales :

La conchyliculture concerne l'élevage des mollusques (coquillages)

- La pisciculture qui est l'élevage des poissons.
- L'astaciaculture définissant l'élevage de l'écrevisse genre *astacia*.
- L'algoculture définissant la culture des algues.
- L'échinoculture concerne l'élevage des oursins.
- La carcinoculture concerne l'élevage des crustacés.
- La raniculture (élevage des grenouilles)

- **Pisciculture [71]**

La pisciculture fait partie intégrante de l'aquaculture, elle est définie comme « une exploitation ayant pour objet l'élevage de poissons destinés à la consommation, au repeuplement, à l'ornement, à des fins expérimentales ou scientifiques ainsi qu'à la valorisation touristique »

La pisciculture est constituée de la pisciculture continentale (en eau douce), la pisciculture marine (en eau de mer) et de la salmoniculture (élevage des salmonidés : truites, saumons, ombles, en eau douce et/ou en eau de mer).

- **Objectifs [71-72]**

L'aquaculture et la pêche sont des activités complémentaires, confrontées au défi de satisfaire la hausse de la demande en produits de la mer. Il est sans nul doute que l'augmentation de la production de produits aquatiques à l'avenir ne pourra provenir que de l'aquaculture. En effet, l'aquaculture actuelle est devenue une activité économique importante, source d'emploi dans le monde entier.

L'aquaculture se trouve au carrefour des recherches biologiques et écologiques ; elle concerne autant les processus de production de matière vivante que les processus nutritifs, l'adéquation entre sites et espèces élevées et les manipulations génétiques.

D'après BARNABE, elle aurait pour objectifs :

- La production de poisson pour la pêche pour la reconstitution des stocks naturels ;
- L'identification des sites naturels et aménageables pour l'exploitation aquacole ;
- L'introduction de nouvelles techniques d'élevage ;
- Le contrôle de la reproduction pour l'amélioration du rendement ;
- La mise au point d'aliments composés pour les poissons d'élevage à partir de sous-produits de l'agro-industrie, de farines végétales et de farines de poissons.

4.4.2 Avantages et inconvénients de l'aquaculture [73]

La faim et la malnutrition restent parmi les problèmes les plus dévastateurs auxquels les pauvres du monde entier sont confrontés. La demande alimentaire, et plus particulièrement la demande de poisson, continue d'augmenter et on prévoit qu'en raison de l'expansion démographique et de l'évolution des habitudes alimentaires, les impératifs de production alimentaire vont doubler dans les trente ans à venir. L'aquaculture devient une importante alternative socio-économique, contribue à réduire la pauvreté en donnant du travail à des millions de personnes, aussi bien dans le secteur de l'aquaculture lui-même que dans les services de soutien.

L'aquaculture devient une composante intéressante et importante des moyens de subsistance en milieu rural, les avantages de l'aquaculture pour le développement rural concernent la santé et la nutrition, l'emploi, le revenu, la réduction de la vulnérabilité et la durabilité de l'exploitation agricole. Elle crée des « emplois indépendants », y compris pour les femmes et les enfants, et assure un revenu par la vente d'un produit dont la valeur peut être relativement élevée.

Au titre des avantages indirects, il convient de citer la disponibilité accrue du poisson sur les marchés locaux, ruraux et urbains, ainsi que la réduction concomitante des dépenses des ménages grâce à une consommation moindre d'autres produits de la ferme constituant des sources de revenu.

Un avantage important, quoique souvent négligé, plus particulièrement en ce qui concerne les systèmes intégrés d'agriculture et d'aquaculture, tient au fait qu'ils contribuent à améliorer l'efficacité et la durabilité de l'exploitation.

Les pratiques en matière d'aquaculture se développent rapidement mais en même temps surgissent plusieurs inquiétudes. L'impact de l'équipement et infrastructure peut affecter négativement la faune et la flore locale, y compris les espèces en danger. Les effluents des granges d'aquaculture contenant des produits chimiques et thérapeutiques néfastes (par ex. produits anti-encrassement) pourraient endommager l'écosystème local ainsi que les organismes émanant des granges peuvent avoir un impact. L'utilisation d'espèces exotiques en aquaculture apporte des risques tels que l'introduction de forme de vie associée (par ex. algues et microorganismes) ou bien de nouveaux agents pathogènes qui peuvent s'étendre dans un nouvel environnement. En général la source d'alimentation pour les poissons cultivés consiste de les nourrir avec de la farine de poisson ainsi que de l'huile de poisson. Il est probable que cette forme d'alimentation ne soit pas viable étant donné que ces produits primaires sont faits avec de petits poissons pélagiques et par conséquent pourrait augmenter la pêche abusive.

Plusieurs problèmes peuvent être éliminés en améliorant la gestion des poissons de granges ainsi que les pratiques de l'aquaculture en suivant les codes de conduite existants comme par exemple l'Organisation des nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

4.4.3 Aquaculture en Algérie

a. Historique de la production Aquacole en Algérie

En raison de son étendue, l'Algérie a fait l'objet de plusieurs actions de planification aquacole, les premiers documents remontant dès avant le XIX^{ème} siècle, mais c'est devenu une réalité dans les pays du Maghreb depuis une vingtaine d'années. [70] [76]

Le développement de l'aquaculture en Algérie a évolué suivant trois périodes :

- **Première période (XIX^{ème} siècle – 1962)**

- 1921 : création de la station d'aquaculture et de pêche de Castiglione (Bou-Ismaïl), où d'illustres scientifiques se sont distingués (Boutan, Dieuzeide, Roland et autres).

- 1936 : création de la station d'alevinage de Ghrib en vue d'empoissonner massivement les barrages de Ghrib et de l'Oued Fodda.

- 1938 : premiers résultats de croissance de truite arc-en-ciel introduite au barrage du Ghrib (wilaya de Médéa)

→ 1947 : création de la station du Mazafran, dépendant de Castiglione dans une optique de repeuplement en poisson d'eau douce et de recherche hydro biologique.

- **Deuxième période (1962 - 1993)**

→ 1970- 1973 : construction de bassins en ciment au niveau de la station du Mazafran, toujours dans une optique de repeuplement.

→ 1976- 1978 : programme de coopération avec la Chine concernant trois actions :

- Initiation aux techniques de reproduction et d'alevinage de la carpe pour repeuplement
- Construction de bassins en terre, repeuplement des barrages Ghrib et Hamiz
- Tentatives d'élevage larvaire de Caramote *Penaeus kerathurus* au CROP.

- 1981 : Le Secrétariat d'Etat à la Pêche a entrepris une étude «Etude des Potentialités Aquacoles», menée par France Aquaculture avec la collaboration du bureau d'études SEPIA Internationale.

- Mars 1987 : une étude pour l'installation de cages flottantes ayant pour but l'élevage super intensif de carpe royale et de la truite Arc en Ciel a été réalisée par le CERP au niveau du barrage Ghrib dans la wilaya de Ain Defla.

-1982-1990 : exploitation des lacs Tanga, Oubeira et El Melah pour la reproduction des carpes.

- **Troisième période (1993 - 2014)**

→ 2007 à 2009 : reproduction et empoissonnement de 500 000 alevins de tilapia et mullet ont été effectués par le CNRDPA.

→ 2012-2014 : Avaient un impact direct sur le développement du secteur et sur l'amélioration des conditions socioéconomique des professionnels. Partant de cette politique de développement qui est menée jusqu'à présent, il s'avère que ce diagnostic a révélé la nécessité de définir de nouvelles priorités, et de les adapter selon une démarche prospective réaliste à horizon 2030.

Dans cette vision le secteur de la pêche compte poursuivre l'action déjà menée en faveur de la réorganisation et du développement durable des activités de la pêche et de l'aquaculture, et ce afin de contribuer au renforcement de la sécurité alimentaire, à la préservation et à la création d'emplois, ainsi qu'au développement de l'économie productive nationale. [70]

b. L'aquaculture dans le Sahara [77-78]

Le Sud algérien offre la possibilité de l'intégration de la pisciculture à l'agriculture, où les eaux souterraines pourraient contribuer à la diversification et le développement de certaines espèces des eaux chaudes.

- **Projet sur l'aquaculture désertique (2008-2009)**

Le projet de «Support à l'aquaculture saharienne et valorisation des étangs salés» qui s'est déroulé de novembre 2008 à août 2009 avait pour objectif de :

- Développer la pisciculture intégrée (tilapias) à l'agriculture dans des bassins d'irrigation de 2 palmeraies de la Wilaya de Ouargla.
- D'effectuer des essais de production d'aliments à partir des matières premières locales.

- D'effectuer une étude sur les souches locales d'artémia éventuellement utilisables pour les phases larvaires des espèces d'intérêt commercial pour l'aquaculture marine telles que le bar européen et la dorade royale.

Selon la Direction de la Pêche et des Ressources Halieutiques (DPRH) de la Wilaya, Ouargla est devenue «un pôle important et une zone pilote dans la production aquacole».

En effet, la wilaya d'Ouargla, dispose d'importantes quantités d'eau douce et saumâtre provenant des forages utilisés pour l'irrigation des palmeraies et des cultures sous-jacentes. La disponibilité en eau, les nombreux bassins et canaux d'irrigation ont permis de planifier le développement d'un pôle d'aquaculture saharienne intégrée à l'agriculture, basée sur l'élevage extensif des poissons d'eau douce (principalement de tilapia du Nil et ses hybrides tels que le tilapia rouge) en synergie avec les activités agricoles.

4.4.4 Caractérisation des effluents piscicoles [79]

L'impact environnemental de la pisciculture dépend de : l'espèce, la méthode d'élevage, de l'hydrologie du site (disponibilité d'eau et son besoin pour l'élevage), le type d'alimentation (sa composition et sa gestion) et les pratiques d'élevage.

Les effluents piscicoles constituent un flux de matières minérales et organiques qui représente une Charge polluante susceptible parfois de perturber le milieu récepteur. En effet, ces matières précitées favorisent l'eutrophisation des milieux aquatiques par la hausse de la charge en éléments azote et phosphore.

Les rejets des poissons sont caractérisés par leur dilution variable mais élevée en comparaison avec les autres productions animales ou les eaux de rejets industriels. On doit distinguer les rejets directs émis par les poissons (déchets métaboliques) et les rejets liés à l'ensemble du système d'élevage.

a) Rejets directs des poissons

Les rejets des poissons sont issus de plusieurs origines possibles, de la partie non ingérée de l'aliment (refus alimentaire), de la partie absorbée mais non digérée (fèces) et de déchets métaboliques dissous.

Les pertes alimentaires sont très dépendantes de la conduite de l'élevage, Le mode, la fréquence et l'heure de distribution de l'aliment, la durée de chaque repas et la quantité d'aliment délivrée (ration alimentaire) sont autant des paramètres à contrôler pour éviter le gaspillage.

Les poissons puisent leur énergie à partir de la consommation de molécules complexes, métabolisées par l'animal. Ces réactions biologiques n'ayant pas un rendement de 100 %, des sous-produits du métabolisme sont rejetés par le poisson sous forme dissoute et particulaire. Ces éléments sont l'azote, le phosphore, le carbone et les oligo-éléments. Or ceux-ci peuvent engendrer des pollutions. Ce sont principalement dans les excréments, fraction non digérée de l'aliment, que l'on retrouve ces éléments. Leur présence dans les fèces est en fonction de l'aliment ingéré et du stade de vie.

b) Rejets liés aux systèmes d'élevage

Concernant les rejets liés au système de production, ils sont caractérisés par une forte dilution des polluants dissous et particulaires. Les caractéristiques de ces rejets sont dépendantes du type de système d'élevage considéré : les concentrations en matières solides et dissoutes de l'effluent rejeté, de même que les débits à traiter sont très variables selon le type de système utilisé. On distingue en général deux types de systèmes d'élevage. Il s'agit en effet des systèmes en circuit ouvert et ceux en circuit fermé.

▪ Déchets des systèmes d'élevage en circuit ouvert

Dans les systèmes d'élevage en circuit ouvert traditionnels, ces concentrations sont faibles et les débits de rejet considérables de l'ordre de 100 m³/kg d'aliment. La concentration en azote d'une eau d'élevage en système d'élevage en circuit ouvert est de quelques milligrammes par litre essentiellement sous forme d'azote ammoniacal total. [80]

▪ Déchets des systèmes d'élevage en circuit fermé

Dans les systèmes d'élevage en circuit recirculé, la concentration en azote est de plusieurs dizaines, voire centaines de mg/l.

Un dégazage du dioxyde de carbone est systématiquement effectué pour limiter sa concentration dans l'eau d'élevage. La sensibilité au dioxyde de carbone dépend des espèces, du stade de développement et de la qualité d'eau.

4.4.5 Méthodes de traitement des rejets piscicultures

La réduction des rejets peut-être envisagé à la fois au niveau du poisson en améliorant l'aliment et la digestibilité et au niveau du système d'élevage par une bonne gestion de la distribution de l'aliment. Outre une réduction des rejets, le traitement des effluents piscicoles peut être envisagé en vue d'une valorisation de la matière particulaire. [79]

a. Diminution des intrants

Les rejets des fermes piscicoles ont des origines multiples : alimentaire, métabolique, physiologique, médicamenteuse. La réduction de ces rejets passe tout d'abord par une bonne gestion des intrants et donc par une bonne conduite d'élevage.

Une stratégie pour limiter ces rejets consiste à garder les poissons en bonne santé, dans un bon état de fonctionnement physiologique, en maintenant des conditions favorables à une bonne prise alimentaire (contrôle de l'oxygène, de la température, du pH, de la qualité de l'eau...), et en améliorant les techniques d'alimentation pour optimiser la prise alimentaire et réduire l'aliment non consommé. [81]

▪ Diminution des intrants alimentaires

On estime que près 20 % de l'aliment distribué n'est pas consommé par les poissons et s'accumule au fond des filets. Outre l'utilisation d'un aliment avec une bonne digestibilité, une densité énergétique élevée et un taux de conversion optimal, il convient donc de ne pas distribuer une quantité trop importante d'aliments mais bien de raisonner sa distribution.

▪ Diminution des intrants médicamenteux [79]

Des efforts drastiques ont été effectués pour réduire la quantité d'antibiotiques utilisée. Ainsi, en 2003, la quantité d'antibiotiques utilisée représente 2 % de la quantité d'antibiotiques employée en 1987.

Cette diminution passe par l'application de règles de prophylaxie efficaces : l'utilisation de vaccins, l'optimisation des choix des sites de production, l'amélioration des conditions d'élevage et de l'hygiène et le respect des règles de biosécurité.

Des lignes directrices pour une utilisation prudente des antimicrobiens en médecine vétérinaires ont récemment été publiées. Ces lignes préconisent la mise en place de mesures pour prévenir et réduire la nécessité d'avoir recours à des antibiotiques en aquaculture. Ces mesures sont :

- ✚ Encourager l'adoption de systèmes de production qui garantissent des conditions environnementales adéquates pour les animaux d'aquaculture détenus dans des exploitations aquacoles, notamment en ce qui concerne la qualité et le débit de l'eau, les niveaux d'oxygène et l'alimentation.
- ✚ Encourager la réalisation de tests de la sensibilité aux antimicrobiens avant tout traitement.
- ✚ Encourager l'élaboration de programmes de surveillance de maladies spécifiques, en vue de déceler les épizooties éventuelles et de contribuer à les prévenir.
- ✚ Mettre en œuvre des mesures d'hygiène et de biosécurité spécifiques, y compris des mesures visant à empêcher l'introduction et la propagation d'infections.

b. Traitements des effluents piscicoles

Outre une réduction des intrants pour diminuer les rejets, le traitement des eaux de rejet des systèmes d'élevage effluents piscicoles peut être envisagé.

1) Le traitement des rejets d'eau douce en circuit ouvert

Les eaux issues des fermes piscicoles en eau douce sont caractérisées par de forts débits et de faibles concentrations en matières solides et dissoutes à traiter. Les matières solides (débris végétaux, aliments non consommés) sont plus faciles à traiter que les matières dissoutes.

Il existe deux types de traitement des rejets solides en eau douce : la filtration mécanique et la décantation. Pour des raisons pratiques et économiques la filtration mécanique est la plus souvent utilisée.

❖ Traitement des rejets solides par filtration [71] [79]

Ce procédé utilise le passage d'un mélange diphasique solide-liquide à travers un élément poreux : le filtre.

Deux catégories de filtration sont employés en pisciculture : la filtration sur lit granulaire, le filtre à sable étant le plus couramment utilisé et la filtration sur support ou tamisage (tamis droit ou rotatif), avec, selon la taille des ouvertures, le microtamisage (< 150 µm), le macrotamisage (200-4000 µm) et le dégrillage (> 4 mm).

L'efficacité des filtres est liée aux caractéristiques de l'effluent à traiter et de la taille des mailles utilisées. Ainsi, une mauvaise filtration peut être attribuée à une taille des mailles trop grande ou à des concentrations d'effluents à traiter trop faibles.

❖ **Traitement des rejets par décantation [71] [79-81]**

Les matières en suspension issues du système d'élevage ou de lavage des filtres mécaniques sont encore trop diluées. Il est donc nécessaire qu'elles soient plus concentrées en vue d'une valorisation de la matière particulaire. La décantation permet cette concentration.

Il existe plusieurs types de procédés de décantation. Le plus classique comprend un système de récupération des particules au sein même du bassin d'élevage, puis l'eau issue de cette première décantation et après les bassins, en général en association avec un filtre préalable : on distingue les bassins de décantation plats, les décanteurs circulaires, coniques et lamellaires.

Les bassins de décantation plats sont les systèmes de traitement les plus répandus en aval des bassins.

Le principe repose sur le ralentissement des particules dans un bassin dont la vitesse d'avancement de l'eau ne doit pas être supérieure à $6,6 \text{ cm.s}^{-1}$, voire 4 cm.s^{-1} . La difficulté est que ces bassins doivent être suffisamment grands pour accueillir le débit total d'effluent à traiter ; avec un dimensionnement d'environ 1 m^3 par $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ à traiter.

L'élimination des MES peut être améliorée par des processus de coagulation-floculation avec l'insertion des produits permettent d'augmenter l'agrégation des particules et ainsi d'augmenter leur décantation. La coagulation consiste à déstabiliser les particules par addition d'un réactif chimique appelé coagulant, la floculation consiste à agglomérer des particules déstabilisées en micro floc et ensuite en flocons plus volumineux, appelés flocons.

❖ **Traitement des rejets dissous**

Les marais construits ou filtres plantés, inspirés du principe de traitement par marais naturels. Ce sont des outils de traitement combinant des processus physico-chimiques et biologiques, au travers des plantes et des bactéries qui les colonisent. Les marais construits peuvent être utilisés en traitement primaire, mais requièrent alors de grandes superficies, ou en traitement secondaire après traitement des rejets solides par filtration et/ou décantation. Le principe des marais construits est basé sur une symbiose entre des macrophytes et des microorganismes (bactéries, champignons, algues) et leurs interactions avec la chimie du sol.

2) Traitement des rejets en circuit recirculé [71] [82]

La pisciculture en douce en circuit recirculé fonctionne sur le principe que l'eau chargée des déchets d'élevage en sortie de bassin subit une série de traitements d'épuration avant d'être réutilisée en partie ou totalement. Le but de ce système est ainsi de limiter la production de déchets dans le milieu naturel et également de contrôler l'intrusion de pathogènes.

L'utilisation de systèmes de culture en recirculation est un moyen d'utiliser plus efficacement l'eau disponible et offre des avantages potentiels par rapport aux formes d'aquaculture en étang ou en cage. Il s'agit notamment de la flexibilité dans le choix du site, de la réduction de la consommation d'eau, de la diminution des volumes d'effluents, d'un meilleur contrôle environnemental et d'une plus grande intensité de production.

Globalement, les traitements d'épuration concernent les déchets particuliers et dissous (gaz carbonique et azote ammoniacal).

Dans les systèmes d'aquaculture en recirculation, les particules (y compris les matières fécales, les aliments non consommés, les bactéries et les algues) peuvent causer plusieurs

problèmes, dans la mesure où elles peuvent abriter des agents pathogènes, irriter physiquement les poissons et, lors de leur décomposition, libérer de l'ammoniac et consommer de l'oxygène.

Des filtres mécaniques, des séparateurs de mousse et d'autres dispositifs sont utilisés pour éliminer rapidement les particules des systèmes d'aquaculture, afin d'améliorer la santé des poissons et de réduire la charge sur les biofiltres et les oxygénateurs.

Le gaz carbonique est éliminé par diffusion dans des dispositifs de désaturation dans lesquels l'interface d'échange entre l'air et l'eau est maximisée.

L'azote ammoniacal est transformé en nitrate par des bactéries aérobies autotrophes nitrifiantes. Ces bactéries ont pour supports des filtres biologiques : argiles, pouzzolane (roche volcanique), mousses, etc. Ces filtres biologiques peuvent épurer 100 g.m^{-3} d'azote ammoniacal de support et par jour. Ces capacités sont dépendantes de la température et de la salinité.

Les nitrates sont partiellement éliminés à travers dans des réacteurs contenant des bactéries anaérobies qui les transforment en azote gazeux. Des algues utilisant ces nitrates peuvent également être utilisées.

Des enceintes contenant des lampes UV étanches sont utilisées pour inactiver ou tuer les pathogènes, principalement bactéries et virus dont l'abattement est proche de 90 %.

Concernant l'oxygène, ce dernier est rétabli à des valeurs compatibles avec l'élevage grâce à des oxygénateurs, tandis que le pH est maintenu par élimination du CO_2 , et si nécessaire par apport de soude.

La température est rétablie par transfert de calories d'un fluide porteur passant dans un échangeur. Elle peut être réchauffée ou refroidie.

Actuellement une grande partie des alevins de poissons, qu'elle soit d'eau douce ou d'eau de mer est élevée dans des systèmes en circuit recirculé.

Malgré les avantages environnementaux ; diminution des rejets de déchets de poisson et d'aliments, minimisation des évasions et de transferts des pathogènes vers le milieu extérieur, la pisciculture en circuit fermé présente des contraintes. En effet, elle demande des coûts élevés d'investissements et d'exploitation de par son utilisation de combustibles fossiles pour alimenter les pompes actionnées par l'électricité. Cette utilisation de ressources non renouvelables a un impact négatif sur l'environnement.

4.4.6 Utilisation de l'ozone dans le domaine d'aquaculture [82]

L'ozone est utilisé dans les RAS comme désinfectant, pour éliminer le carbone organique, et aussi pour éliminer la turbidité, les algues, la couleur, les odeurs et le goût.

Il a été démontré que l'ozone est efficace pour éliminer la plupart des pathogènes affectant les fruits de mer dans les systèmes d'aquaculture d'eau douce et d'eau de mer (saumon, flétan, tilapia, crevettes, etc.). En outre, l'ozone peut améliorer la qualité de l'eau en réduisant la demande biochimique en oxygène (DBO), l'ammoniac et les nitrites, pour désinfecter l'eau entrante des écloseries, pour désinfecter les eaux usées des écloseries et pour désinfecter les œufs de poisson. Bien que l'exposition directe des organismes aquatiques à l'ozone et aux oxydants formés dans l'eau de mer ozonée puisse être mortelle, les œufs de poisson fécondés peuvent tolérer des niveaux variables d'ozone dissous. Les niveaux d'exposition spécifiques doivent être déterminés pour chaque espèce, et des méthodes fiables de mesure de l'ozone dans l'eau de mer sont donc nécessaires pour garantir que les limites létales ne sont pas dépassées.

L'efficacité du traitement à l'ozone dépend de la concentration d'ozone, de la durée d'exposition à l'ozone (temps de contact), des charges pathogènes et des niveaux de matière organique. Bien que l'ozone soit un agent oxydant très efficace, des concentrations d'ozone plus élevées constituent un risque pour les stocks de poissons d'élevage, entraînant des lésions tissulaires importantes et la mort des stocks, ainsi qu'un risque pour les films bactériens sur le biofiltre.

- **Technique d'application [82]**

L'ozone peut être appliqué en continu, en une série de traitements par jour ou en un seul traitement par lot par jour.

L'application dans la plupart des situations peut être liée à la stratégie d'alimentation employée dans le système d'élevage. Trois à quatre heures après l'alimentation des poissons, les concentrations d'ammoniac, de matières organiques dissoutes et d'autres déchets atteignent un maximum. Si les poissons sont nourris plusieurs fois dans la journée, une série de traitements à l'ozone peut être introduite après chaque alimentation pour cibler l'augmentation associée des niveaux de déchets. Si la nourriture est introduite 24 heures par jour, la qualité de l'eau se dégrade continuellement et l'application d'ozone doit donc être continue.

L'utilisation réussie de l'ozone dans l'industrie de l'aquaculture nécessite également une méthode fiable, simple et rapide pour sa mesure qui peut être effectuée sur place dans une écloserie, dans des conditions hors laboratoire. Le test doit permettre des lectures multiples au cours d'un traitement afin de s'assurer que des concentrations constantes sont maintenues pour éviter une inutile surexposition et des mortalités élevées.

4.4.7 Traitement des bassins d'élevage du barrage de TABAIA

a. Protocole et méthode d'analyses

- **Présentation du site**

L'écloserie est située dans l'Ouest de l'Algérie, à la station de Tabia du Centre national de recherche et de développement de la pêche et de l'aquaculture, dans la wilaya de Sidi-Bel-Abbès (*figure 4.2*). L'objectif de l'écloserie est la production contrôlée d'alevins de poissons d'eau douce (carpe chinoise, carpe commune, tilapia, black bass et sandre) pour l'empoissonnement des barrages réservoirs et des bassins d'irrigation.



Figure 4.2 Bassins d'élevage de la commune de Tabia (image satellite).

▪ **Echantillonnage**

Les analyses ont été effectuées pour les eaux (avant et après traitement) au Laboratoire de Contrôle de la Qualité et de la Conformité AQOLAB à Oran, Algérie. Les échantillons d'eau à analyser ont été placés dans des bouteilles stériles et transportés dans des boîtes isothermes jusqu'au laboratoire choisi afin de réaliser les analyses rapidement et d'éviter le vieillissement des échantillons. Afin de garantir l'intégrité des échantillons, toutes les procédures d'analyse ont été effectuées le jour même du prélèvement de l'échantillon.

▪ **Analyses physico-chimiques et bactériologiques :**

Afin d'évaluer l'effet du traitement par l'ozone et d'optimiser l'efficacité du procédé, plusieurs paramètres physico-chimiques ont été analysés : le potentiel hydrogène (pH), la conductivité, la turbidité, le total des matières en suspension (MES), l'oxygène dissous (OD), la demande biologique en oxygène à 5 jours (DBO_5), la demande chimique en oxygène (DCO), les orthophosphates (PO_4^{3-}), et les nitrites (NO_2^-). Les eaux usées des écloséries de poissons sont également considérées comme un environnement optimal pour la croissance microbienne.

Les bactéries sont généralement recherchées dans l'eau comme indicateurs de contamination fécale [5]. Les coliformes fécaux (CF), les coliformes totaux (CT) et E. coli (EC) ont été choisis comme indicateurs fécaux standard dans cette étude, car ils sont généralement réglementés pour le rejet ou la réutilisation des eaux usées. [61]

b. Résultats du traitement

L'objectif des analyses était d'obtenir une eau de qualité conforme aux normes et sans risque sanitaire pouvant entraîner une forte dégradation des différents compartiments de l'environnement, principalement l'eau et le sol. Les résultats des analyses physico-chimiques et bactériologiques avant et après une heure de traitement de l'eau à l'ozone sont résumés respectivement dans les **tableaux 4.1** et **4.2**.

Tableau 4.1 Résultats moyens de l'analyse physico-chimique des eaux piscicoles. [61]

Paramètres	Eau de poisson brut	Après traitement	Normes aquaculture	Normes OMS
PH	8.5	6.85	5 - 9	6.5 – 9
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4440	1500	<3000	1200
Turbidité (NTU)	71	19.1	/	/
MES (mg/L)	272	18.6	<50	20
DO (mg O ₂ /L)	2.58	5.70	>3	
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	106	27.5	<6	30
DCO (mg O ₂ /L)	148	16	<30	90
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	20.84	6.88	/	<20
NO ₂ ⁻ (mg/L)	1.03	0.029	<0.5	3

Tableau 4.2. Résultats moyens des analyses bactériologiques des eaux piscicoles. [61]

Paramètres	Unités	Eau de poisson brut	Après traitement
Coliformes totaux	Log UFC/100ml	4	0.26
Coliformes fécaux	Log UFC/100ml	3.45	0.3
E. coli	Log UFC/100ml	0.8	0

Potentiel d'hydrogène (PH)

La plage de pH qui n'est pas directement mortelle pour les poissons est de 5 à 9 ; cependant, la toxicité de nombreux polluants communs est significativement affectée par les changements de pH dans cette plage, et une augmentation de l'acidité ou de l'alcalinité peut rendre ces poissons plus toxiques [83]. Le traitement à l'ozone a réduit le PH de 19,41% (c'est-à-dire de 8,5 à 6,85).

Conductivité

La conductivité optimale pour une production piscicole élevée diffère selon les espèces. Makori et al. (2017) ont trouvé une relation négative entre la longueur moyenne des poissons et la conductivité. Le taux de croissance spécifique (TCS) le plus élevé obtenu à la fin de leur étude (après 112 jours), soit 4,4 % par jour, a été obtenu dans le bac témoin avec une conductivité de 23,5 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Stone et al. (2013) situent toutefois la plage de conductivité souhaitable pour les bassins à poissons entre 100 et 2000 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$.

Notre système de traitement par ozonation a réduit la valeur de la conductivité de 4440 à 1500 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, ce qui est nettement inférieur à la valeur limite de 3000 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ pour l'aquaculture. [84-85]

Turbidité

La turbidité quantifie la présence de micro-organismes. La turbidité est un élément important de la qualité de l'eau, tant pour la vie aquatique (car elle réduit la transparence, empêche la pénétration de la lumière). [65] [86]

Les résultats du traitement ont révélé une efficacité élevée et une réduction considérable de la turbidité de près de 75% avec une diminution de 71 à 19.1 NTU. Ceci est dû à la réaction rapide de la turbidité avec l'ozone moléculaire.

Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension sont d'origine minérale ou organique via les fèces, les débris végétaux et les aliments non consommés ; elles peuvent obstruer les structures d'incubation et transporter des polluants. Elles conduisent aussi à des fermentations contribuant aux carences en oxygène, et ont des effets mécaniques sur les poissons par colmatage des branchies. [65] [87]

Le traitement de l'eau à l'ozone a permis l'élimination presque complète de plus de 90% des matières en suspension totales, ce qui démontre l'efficacité du traitement à l'ozone.

Oxygène dissous (OD)

L'importance de l'oxygène dans l'eau est une variable déterminante pour la vie aquatique. Les différentes espèces de poissons ont des exigences différentes en matière de concentration d'oxygène dissous dans l'eau. Certaines espèces sont très exigeantes ; leur concentration optimale est de 8 à 10 mg L⁻¹, en dessous de 3 mg L⁻¹ ils commencent à montrer des signes de suffocation. D'autres espèces peuvent prospérer dans une eau contenant 6 à 8 mg L⁻¹ et ne montrent des signes de suffocation que lorsque la concentration d'oxygène tombe à 1,5-2,0 mg L⁻¹. Le facteur le plus communément responsable d'une réduction significative de la concentration en oxygène de l'eau est la pollution par des substances organiques biodégradables. [88]

Une diminution de la teneur en oxygène peut entraîner un retard du développement embryonnaire, un retard de croissance, une diminution de la vitesse et de la durée de la nage, et même une augmentation de la mortalité. [72]

La valeur indiquée de la concentration d'oxygène dans l'eau après traitement (5,7 mg L⁻¹) était conforme aux normes d'aquaculture avec une augmentation de 55 %.

DCO et DBO₅ [65] [89-92]

La demande chimique en oxygène (DCO) indique la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toutes les substances organiques dissoutes ou en suspension présentes dans les eaux usées. Lorsque des matières organiques sont présentes dans l'eau, leur oxydation entraîne une chute de la quantité d'oxygène dissous, ce qui peut nuire, en cas d'excès, à la survie de la faune et la flore.

Dans cette étude, la concentration de la DCO a été analysée pour évaluer l'élimination des polluants ozono-réactifs. Des études ont montré une forte réduction de la DCO pendant l'ozonation. Une réduction significative de la DCO est notée avec un taux de 89,2% où elle passe d'une valeur de 148 mg L⁻¹ à 16 mg L⁻¹.

La demande biochimique en oxygène (DBO_5) est utilisée pour quantifier la partie biodégradable des polluants carbonisés et organiques dans les eaux usées.

Elle représente la quantité d'oxygène consommée par les microorganismes après 5 jours pour oxyder les matières organiques biodégradables.

L'amélioration de la biodégradabilité des eaux usées induite par l'ozonation a été rapportée dans de nombreuses revues.

Les valeurs de la concentration de DBO_5 ont varié de 74,48% de 106 à 27,05 $mg L^{-1}$ (**tableau 4.1**). Ces résultats ont révélé l'augmentation de la biodégradabilité de la matière organique, avec une concentration résiduelle de DBO_5 (27,5 $mg L^{-1}$) en accord avec les normes de l'OMS (30 $mg L^{-1}$). Ces valeurs peuvent être encore améliorées en prolongeant le temps de traitement ou en augmentant la capacité du réacteur pour atteindre les normes extrêmes pour les eaux d'aquaculture (< 6).

Orthophosphates (PO_4^{3-})

Les orthophosphates (PO_4^{3-}) correspondent à une forme minérale oxydée du phosphore, ils sont présents sous forme dissoute, colloïdale ou solide. Les PO_4^{3-} favorisent l'eutrophisation lorsqu'ils sont présents en quantité excessive [93]. Ainsi, la teneur en orthophosphates de l'eau traitée à l'ozone était conforme aux normes de l'OMS (< 20 $mg L^{-1}$).

Nitrite (NO_2^-)

Le nitrite (NO_2^-) est le produit intermédiaire de plusieurs réactions d'oxydation et de réduction impliquées dans les différents processus de transformation de l'azote. [94]

Plusieurs études ont montré qu'en l'absence de nitrite, diverses espèces de poissons peuvent avoir des niveaux de méthémoglobine allant de zéro à 10% [31-33]. Certaines espèces de saumons et de truites exposées à de fortes concentrations de nitrites, entre 0,15 et 0,55 $mg-N L^{-1}$, présentent une coloration chocolat du sang. [95]

La teneur en nitrites de l'eau traitée à l'ozone (0,029 $mg L^{-1}$) était conforme aux normes d'aquaculture (0,5 $mg L^{-1}$) et aux directives de l'OMS (3 $mg L^{-1}$).

Paramètres bactériologiques

Les résultats de l'analyse bactériologique ont révélé l'élimination de l'indicateur E. coli. De plus, les coliformes totaux et les coliformes fécaux ont révélé une régression de 93,50 et 91,31% respectivement.

Les proportions d'inactivation observées dans cette étude illustrent que le processus de traitement utilisé crée une certaine efficacité dans la désinfection bactérienne et améliore donc la qualité des effluents. La qualité de l'eau peut être encore améliorée en prolongeant le temps de traitement et en augmentant le nombre de générateurs d'ozone pour augmenter le taux de production d'ozone et ainsi améliorer l'efficacité du traitement.

4.5 Traitement des rejets liquides hospitaliers

4.5.1 Définition des effluents hospitaliers

Les effluents hospitaliers sont les eaux usées d'un établissement de santé. Ils peuvent être classés en trois grandes catégories :

- 1) Les rejets domestiques regroupant les eaux provenant des cuisines et les rejets résultant de l'hygiène des patients non contagieux et du personnel.
- 2) Les rejets assimilables à des effluents industriels générés par certains équipements spécifiques (blanchisseries, chaufferies, ateliers...)
- 3) Les effluents spécifiques aux établissements de santé générés par les activités de soins, d'analyse et de recherche. [96]

Ces dernières spécifiques aux activités médicales comprennent principalement :

- **Les effluents des services de soins** qui contiennent des désinfectants, des détergents, des résidus médicamenteux (antibiotiques, anticancéreux, etc.), des rejets contenant des métaux (révélateurs et fixateurs de radiographies) ou encore des rejets contenant des germes pathogènes qui sont souvent polyrésistants aux antibiotiques.
- **Les effluents des services médico-techniques** qui proviennent des salles d'opération et dans lesquels on retrouve entre autres des liquides biologiques très chargés en matières organiques : sang, urines, selles, liquide gastrique.
- **Les rejets des laboratoires de recherches et d'analyses** qui regroupent une très grande variété de molécules : du sang, des crachats, des urines, des acides (acétique, lactique, citrique), des bases (soude, etc.), des solvants, des hydrocarbures benzéniques (toluène et xylène), des désinfectants (formol, alcool éthylique, eau de Javel), des effluents des services de radiologie (eaux de rinçage des clichés chargées en résidus argentiques). [98]

4.5.2 Caractéristiques des effluents hospitaliers

Les eaux usées hospitalières peuvent contenir des substances chimiques dangereuses, des agents pathogènes et radio-isotopes pouvant constituer un risque chimique, biologique et physique pour la santé publique et l'environnement.

Par rapport aux eaux usées urbaines, les eaux usées des hôpitaux contiennent de diverses substances toxiques ou persistantes telles que les produits pharmaceutiques, les radionucléides, les solvants et les désinfectants à usage médical dans une large gamme de concentrations.

Verlicchi et al. (2010) ont souligné que les concentrations de micropolluants (par exemple, antibiotiques, analgésiques, métaux lourds) dans les eaux usées des hôpitaux sont entre 4 et 150 fois plus élevées que celles des eaux usées urbaines.

Malgré les risques liés aux effluents hospitaliers, très souvent, il n'y a pas d'exigences légales en matière de traitement des effluents hospitaliers avant leur rejet dans le collecteur municipal ou directement dans les eaux de surface après le prétraitement. [98-99]

a. Caractéristiques physico-chimiques [99-100]

La caractérisation physico-chimique des effluents hospitaliers comprend l'évaluation de différents paramètres. Parmi ces paramètres, les plus couramment utilisés pour évaluer la présence et les charges de matières inorganiques/organiques dans l'effluent sont la conductivité électrique (CE), la demande biochimique en oxygène (DBO), la demande chimique en oxygène (DCO), le total des solides en suspension (TSS) et l'azote total. Verlicchi et al (2010) indiquent

que les effluents hospitaliers présentent des valeurs de DBO₅, DCO et TSS généralement 2 à 3 fois plus élevées que celles des effluents municipaux.

Les métaux lourds et éléments à l'état de trace contenus dans les effluents hospitaliers pourraient donner lieu à des dommages pour la santé de l'homme, ainsi que dans les milieux naturels variés (les sols, les eaux et l'air). Les principaux métaux lourds présents dans les effluents hospitaliers sont le gadolinium (Gd), le mercure (Hg) et le platine (Pt). D'autres métaux habituellement cherché pour caractériser les effluents hospitaliers, à savoir le cadmium (Cd), l'arsenic (As), le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le zinc (Zn) et de chrome (Cr) présentent généralement des concentrations similaires à celles signalées dans les effluents des municipalités.

b. Caractéristiques microbiologiques

Les effluents hospitaliers recèlent potentiellement de fortes concentrations et une grande diversité d'espèces microbiennes, virales ou parasitaires provenant de la flore digestive des patients ou de leur environnement. Compte tenu des substances chimiques retrouvées dans les effluents hospitaliers (désinfectants, antibiotiques), la flore bactérienne est plus réduite dans un effluent hospitalier que dans un effluent d'entrée de STEP.

La caractérisation bactériologique des effluents hospitaliers inclue la détection des indicateurs classiques de contaminations fécales et des pathogènes. Les coliformes fécaux thermotolérants sont typiquement analysés par la recherche des *E. coli* puisqu'ils représentent 80-90% des coliformes thermo-tolérants.

Diverses études rapportent que les effluents hospitaliers présentent des concentrations bactériennes plus faibles que les effluents urbains. Cette faible proportion de bactéries dans certains effluents hospitaliers serait due à la présence de désinfectants et/ou antibiotiques à forte concentration. D'après les données reportées par Carraro et al. (2016), les coliformes totaux mesurés dans les effluents hospitaliers sont de l'ordre de 10³ à 10⁴ MPN/ml contre 10⁸ à 10¹² MPN/ml dans les eaux usées en entrée de STEP. Parmi ces coliformes, les coliformes fécaux sont également de ce même ordre de grandeur. En revanche, ces auteurs présentent des valeurs pour *Escherichia coli* équivalentes entre la STEP et l'effluent hospitalier. [101-102]

A l'inverse, la concentration en microorganismes pathogènes comme *Pseudomonas* spp, *Staphylococcus aureus* ou en microorganismes antibiorésistants peut être de 2 à 10 fois plus importantes que dans les effluents urbains. [103]

Des marqueurs viraux de pollution fécale comme rotavirus, adenovirus, hépatite A et entérovirus sont aussi communément identifiés dans les effluents hospitaliers. Prado et al a montré que les effluents hospitaliers peuvent contenir des concentrations de virus entériques supérieures de deux log en moyenne à celles des effluents urbains. En revanche, les concentrations relevées par Carraro et al. (2016) indiquent que les quantités retrouvées dans les effluents hospitaliers sont généralement inférieures aux quantités retrouvées dans les effluents d'entrée de station d'épuration. Cependant, le fait que ces organismes soient au contact permanent avec de faibles doses d'antibiotiques et de désinfectants peut induire un développement de résistance à ces produits. Ce phénomène peut avoir d'importantes répercussions sur l'homme et l'environnement (traitements médicamenteux moins efficaces, sélection de la flore bactérienne environnementale). Même si des composés du même type sont

retrouvés régulièrement dans les effluents d'origine domestique de station d'épuration, le développement de la biorésistance pourrait être plus conséquent dans les effluents hospitaliers. [103-105]

c. Rejets médicamenteux

Les résidus médicamenteux sont également retrouvés dans les effluents hospitaliers. Les principales classes de ces produits sont les antibiotiques, les analgésiques et anti-inflammatoires, les agents cytostatiques et les anesthésiques. On pourrait a priori penser que l'hôpital est le premier lieu de consommation de ces substances. Une étude réalisée au Portugal, a montré qu'un hôpital universitaire (1 456 lits) pouvait participer à hauteur de 25-50 % de la charge d'analgésiques, antihistaminiques, antibiotiques et antiagrégant plaquettaires dans un effluent de station d'épuration (213 000 EH). [105]

Les effluents hospitaliers auraient donc des caractéristiques différentes des effluents urbains en ce qui concerne les résidus médicamenteux (concentrations, types de molécules). Jusqu'à présent, ces caractéristiques ont été peu étudiées. Les études portent ainsi sur un nombre limité de molécules : les analgésiques, les antibiotiques, les anti-épileptiques, les bêtabloquants, les anti-cholestérols et les anticancéreux. [100]

4.5.3 Réactivité des biocides au cours des traitements par oxydation

L'oxydation des substances chimiques peut être également utilisée pour dépolluer les effluents, soit avec une élimination totale des composés ; l'oxydation des molécules se fera jusqu'à leur minéralisation (plus rare), soit un prétraitement est visé et l'oxydation des composés sera partielle pour les rendre biodégradables et poursuivre le traitement en station d'épuration.

L'installation d'un prétraitement, en plus d'un traitement des effluents en stations d'épuration, permet d'offrir un maximum de sécurité quant à l'élimination des polluants mais aussi permettre d'éliminer certaines molécules réfractaires aux traitements biologiques rencontrés dans les stations d'épuration.

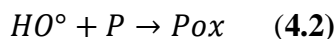
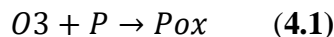
Plusieurs oxydants peuvent être utilisés en traitement des eaux pour élimination des composés organiques : le permanganate, le chlore, le peroxyde d'hydrogène, l'ozone. L'ozone est l'un des oxydants au potentiel le plus élevé (**tableau 4.3**).

Tableau 4.3 : Potentiel Red/Ox de quelques oxydants, à $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ sous 1 atm [106]

Couples Oxydo-Réducteur	Potentiel Red/Ox E° en V
F ₂ /F ⁻	2.87
HO/H ₂ O	2.81
O ₃ /O ₂	2.07
MnO ₄ ⁻ /MnO ₂	1.68
HOCl/Cl ⁻	1.49
Cl ₂ /Cl ⁻	1.36
Br ₂ /Br ⁻	1.087

❖ Elimination des micropolluants à l'ozone

L'élimination par oxydation à l'ozone des micropolluants peut avoir lieu selon deux types de réactions : directe pendant laquelle l'ozone moléculaire va être impliqué (**équation 4.1**) et indirecte pour laquelle les radicaux hydroxyles vont entrer en jeu (**équation 4.2**). Des réactions induites par la formation de sous-produits peuvent également avoir lieu.



Ces réactions sont dépendantes des conditions expérimentales comme le pH, la charge organique de la matrice ou encore la présence de carbonates agissant comme inhibiteur de la réaction de transformation de l'ozone. La réaction avec l'ozone moléculaire prédomine lorsque le pH est faible, la réaction est alors sélective et l'ozone réagit principalement par attaque électrophile sur des groupes à charge élevée. La réaction radicalaire est favorisée à pH basique, elle est non-sélective et provoque des réactions en chaînes avec les composés menant dans certains cas à la minéralisation partielle des composés organiques. Elle permet d'éliminer certaines substances réfractaires à l'ozone.

▪ Réactivité de l'ozone moléculaire

La molécule d'ozone peut se comporter comme un dipôle, un agent électrophile ou un agent nucléophile. Les sites de forte densité électronique favorisent l'attaque électrophile.

1) Sur les amines

Les fonctions amines possèdent une forte densité électronique ce qui permet à l'ozone de réagir par attaque électrophile. Le seul site réactionnel de l'ozone sur les composés aminés est l'atome d'azote lorsque le groupe amine est non protoné. [108]

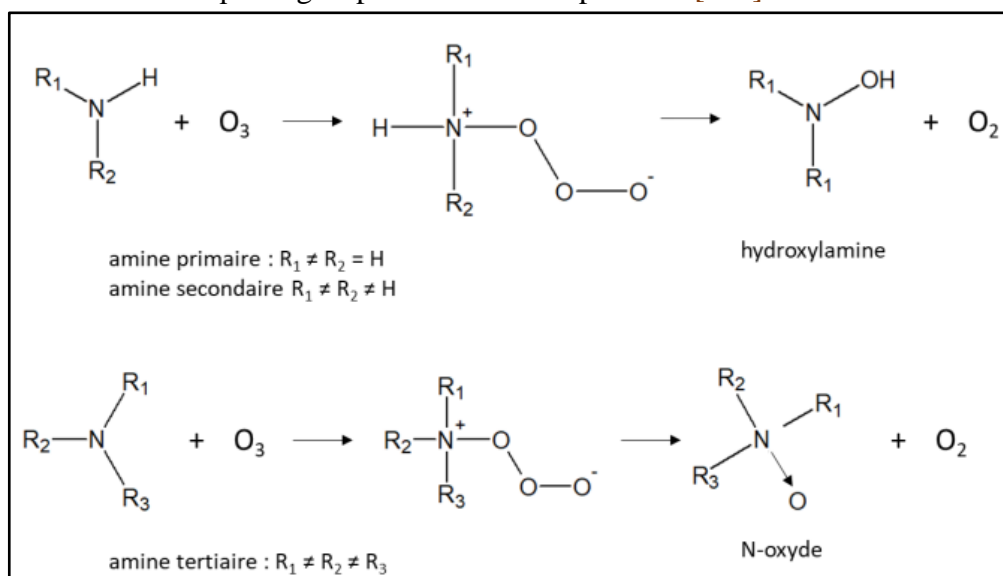


Figure 4.3 Réaction de l'ozone moléculaire sur les amines primaires, secondaires et tertiaires. [119]

D'un point de vue mécanistique (**figure 4.3**), l'attaque électrophile de l'ozone sur le doublet libre de l'azote conduit à la formation d'hydroxylamine pour les amines primaires et

secondaires et de N-oxyde pour les amines tertiaires. L'oxydation se poursuit par la rupture de la liaison C-N avec formation d'aldéhydes et de nitrates. [108]

2) Sur les chaînes carbonées

L'attaque de l'ozone sur l'atome d'azote peut être suivie d'une oxydation du carbone, et peut aboutir à la formation d'amides.

La réaction de l'ozone sur les composés aliphatiques saturés (alcools, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques) est lente. Le mécanisme conduit à l'augmentation du degré d'oxydation des composés. La réactivité est plus importante sur les formes dissociées des acides carboxyliques que sur les formes moléculaires.

3) Sur les composés aromatiques

L'attaque électrophile de l'ozone se produisant sur les composés à forte densité électronique, l'ozone est réactif vis-à-vis des composés aromatiques.

En présence de cycle aromatique, l'attaque de l'ozone sur ce groupement s'effectue par addition électrophile sur une liaison π du cycle et conduit à la formation de dérivés polyhydroxylés et quinoniques puis d'aldéhydes et de diacides par rupture du cycle. Les composés aromatiques substitués par des groupements donneurs orientent l'attaque en position ortho et para et se poursuit par l'ouverture du cycle aromatique avec formation d'aldéhydes et d'acides carboxyliques. [105]

4.5.4 Traitements des rejets hospitaliers du CHU de Sidi Bel Abbas

▪ Localisation

L'hôpital HASSANI Abdelkader est un centre hospitalier universitaire de la wilaya de Sidi Bel-Abbes situé à l'ouest de l'Algérie. L'hôpital est un hôpital civil construit en 1936 ; depuis, sa superficie n'a pas été modifiée et il a été fondé comme centre sanitaire juste après l'indépendance. Le centre hospitalier universitaire dispose de 639 lits répartis entre 23 services ainsi que des services d'exploration tels que : un laboratoire central, la médecine nucléaire, la radiologie et la physiologie. [110]

▪ Protocole et méthode d'analyses

Le moment de prélèvement des échantillons correspond à la période d'activité maximale et se situe entre 08H00 et 21H00. Les échantillons composites et périodiques ont été fractionnés, mis dans des boîtes isothermes et transportés vers les laboratoires sélectionnés pour les analyses afin de réaliser rapidement les analyses et d'éviter le vieillissement des échantillons.

Le transport a été effectué à l'aide d'une enceinte maintenue à une température égale à 5°C. Afin de garantir l'intégrité des échantillons, toutes les procédures d'analyse ont été effectuées le jour même du prélèvement de l'échantillon.

a) Analyse physico-chimique

Plusieurs paramètres physico-chimiques doivent être suivis à intervalles réguliers afin de vérifier la performance du système de traitement des déchets. La température, le pH, la conductivité, la matière en suspension, la demande biologique en oxygène à 5 jours DBO₅, la

demande chimique en oxygène DCO, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , et les métaux lourds sont des exemples de paramètres chimiques à suivre pour vérification. [110]

b) Analyses bactériologiques

Les paramètres microbiologiques sont mesurés par comptage bactériologique des effluents de l'hôpital. Un certain nombre de techniques analytiques ont été utilisées pour la caractérisation microbiologique des effluents. La culture cellulaire est la technique la plus utilisée pour l'examen bactériologique. L'ensemencement peut être fait sur différents milieux de culture existants pour sélectionner les bactéries pathogènes. Le dénombrement se fait directement en comptant les colonies formées sur le milieu solide (il est alors exprimé en Colony Formation Unit CFU). L'instrument utilisé pour la filtration est un réservoir en acier inoxydable tel que celui utilisé en référence. La membrane de filtration est en cellulose avec un diamètre de pore de 0,45 μm . [111]

▪ Résultats de traitement

Les résultats des analyses physico-chimiques ainsi que celles des métaux lourds de l'effluent avant et après une heure de traitement à l'ozone sont représentés dans les **tableaux 4.4 et 4.5** respectivement.

Tableau 4.4 Résultats moyens de l'analyse physico-chimique des effluents hospitaliers du mois d'Avril.

Paramètres	Effluent avant traitement	Effluents traités	Normes OMS
Température (c°)	20.8	19.8	30
Ph	7.55	6.25	5.5-8.5
Conductivité ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	245	178.5	1200
MES (mg/L)	550	60	20
COD (mgO_2/L)	560	181.17	90
BOD5 ($\text{mg O}_2/\text{L}$)	285	151.05	30
NH_4^+ (mg/L)	57.9	16.9	<0.5
NO_2^- (mg/L)	3.9	4.71	<01
NO_3^- (mg/L)	35.9	7.18	<01

Tableau 4.5 Résultats moyens des concentrations des métaux lourds des effluents hospitaliers avant et après traitement à l'ozonation

Paramètres	Effluent avant traitement	Effluents traités	Normes OMS
Fe (mg/L)	0.2	0.08	0.2
Pb (mg/L)	0.8	0.2	0.01
Zn (mg/L)	0.9	0.15	3
Hg (mg/L)	1.7	0.6	0.006

▪ Paramètres physico-chimiques

La température joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz et dans la détermination du pH. La température enregistrée est d'environ 19.8 °C. Ceci est en accord avec la norme internationale établie par l'OMS qui fixe la température maximale à 30°C (OMS, 2012).

Le processus de traitement a permis de diminuer le pH de 7.55 à 6.25. Selon l'OMS, pour des valeurs supérieures à 8,5, elles affectent la croissance et la survie des micro-organismes aqueux. [112]

Les résultats ont montré que la mesure de la conductivité électrique après le traitement présente une concentration de 178.5 µs/cm. Cette valeur était inférieure à la norme de l'OMS.

Pour l'échantillon étudié, une valeur élevée de MES a été observée ; avec une concentration de 550 mg/L. Bien que le traitement à l'ozone a permis de réduire la concentration à environ 90 % mais sa valeur était toujours supérieure à la norme de l'OMS qui est inférieure à 20 mg/L.

Les concentrations obtenues de la DCO et de la DBO₅ suite au traitement à l'ozonation étaient toujours supérieures aux normes de l'OMS, ces valeurs élevées montrent une forte prolifération de la pollution organique de ces effluents.

Les eaux usées des hôpitaux contiennent de l'azote organique et de l'azote ammoniacal. Le premier est un élément des cellules vivantes. Le second (ammonium, NH₄⁺) provient de la décomposition de l'azote organique par les bactéries et des rejets directs des déchets humains. L'ammoniac et le dioxyde d'azote sont un problème pour la santé publique. Ils induisent une prolifération bactérienne dans l'eau. D'autre part, les nitrates NO₃⁻ sont la principale source d'agitation. Ces ions sont transformés en milieu acide plus faible en ions nitrites qui sont toxiques pour l'organisme humain. D'après les résultats illustrés dans le **tableau 4.4**, le processus de traitement a permis de diminuer la concentration d'ammonium d'environ 70% d'une valeur de 57.9 mg/L à 16.9 mg/L.

▪ Métaux lourds

Dans cette étude, les micro-minéraux "facteurs de pollution de l'eau" étudiés sont le fer, le plomb, le zinc et le mercure, (Fe, Pb, Zn et Hg).

Les résultats obtenus montrent qu'à l'exception du mercure qui est en forte concentration 1,10 mg/L (**tableau 4.5**) due à sa grande utilisation dans le domaine de la santé, il s'agit notamment de sphygmomanomètres, de sondes gastriques, de thermomètres et de baromètres. Les concentrations en métaux Fe, Pb et Zn sont légèrement élevées pour répondre aux normes acceptées.

Le traitement à l'ozonation a permis de réduire les concentrations de métaux lourds mais certaines valeurs restent toujours au-dessus des valeurs indiquées par l'OMS.

▪ Paramètres bactériologiques

La faible consommation d'eau de l'hôpital HASSANI Abdelkader - Sidi Bel Abbes donne naissance à de faibles volumes de déchets liquides et donc moins dilués et donc à des effluents très chargés en micro-organismes pathogènes. Le nombre de micro-organismes exprimé en unités de formation de colonies (UFC) est de l'ordre de 10² à 10⁷ UFC/mL, les résultats des tests microbiologiques sont résumés dans le (**tableau 4.6**).

Les espèces bactériennes identifiées à partir des effluents de l'hôpital HASSANI Abdelkader étaient les Coliformes totaux, les Pseudomonas, et les Staphylocoque.

Les résultats concernant les pseudomonas retrouvés dans les effluents de l'hôpital HASSANI sont de l'ordre de 6,43 log UFC/100 mL. Pour les staphylocoques, leur valeur moyenne de concentration est de $5,6 \cdot 10^7$ UFC/100 mL, cette valeur peut s'expliquer par la faible consommation d'eau, de produits de nettoyage, de désinfectants et de détergents par l'hôpital.

Les résultats de l'analyse bactériologique après le traitement ont révélé une régression de plus de 70% de ces espèces bactériennes.

Tableau 4.6 Résultats d'analyses bactériologiques des effluents hospitaliers d'avant et après traitement à l'ozonation

Paramètres	Effluent avant traitement	Effluents traités
Coliformes totaux	9.51 log UFC/100mL	1.14 log UFC/100mL
Staphylocoque	$6.6 \cdot 10^7$ UFC/100 mL	$0.25 \cdot 10^7$ UFC/100 mL
Pseudomonas	8.63 log UFC/100 mL.	2.5 log UFC/100 mL

4.6 Conclusion

Grâce à sa forte capacité d'oxydation et au mécanisme de désinfection, l'ozone est très adapté au traitement de l'eau. Cette partie de la thèse avait en premier temps pour objectif d'aborder le problème de l'augmentation des besoins en eau et la confrontation à une dégradation des ressources en eau liée aux phénomènes météorologiques extrêmes.

Les résultats de l'analyse illustrent l'efficacité du système de traitement par ozonation dans la réduction des polluants physico-chimiques et bactériologiques dans l'eau des étangs piscicoles. Certains paramètres ont été améliorés jusqu'à un taux de 93%. Cette technologie semble efficace et peut être utilisée sur site en circuit fermé avec la mise en série d'un filtre à charbon actif agissant comme destructeur d'ozone avant de renvoyer l'eau améliorée vers l'écloserie.

Dans le même cadre du traitement un autre type d'eau non domestique a été traité, où les résultats d'analyses ont affirmé l'efficacité du traitement par ozonation. La qualité physico-chimique des rejets liquides hospitaliers a été nettement améliorée. Le processus a permis de réduire la concentration des métaux lourds, certain valeur restent toujours au-dessus des valeurs recommandé par l'OMS, d'où la durée de traitement peut être prolongé pour améliorer l'efficacité du traitement.

Conclusion
générale

Conclusion générale

Le travail réalisé au cours de cette thèse se place en exclusivité au niveau de notre laboratoire dans le cadre de la recherche appliquée. L'objectif principal consiste à l'étude et la réalisation de plusieurs générateurs d'ozone à décharge à barrière diélectrique sur plusieurs étapes pour aboutir à un modèle capable de traiter de l'eau à échelle industrielle.

Une analyse expérimentale comparative entre un nouveau générateur d'ozone à DBD cylindrique, avec une électrode haute tension divisée en trois parties et un modèle similaire qui possède une électrode HV complète, a été décrite. Les résultats obtenus ont montré que la nouvelle configuration avec une électrode partitionnée donne de meilleurs résultats en termes de concentration d'ozone et d'efficacité énergétique. Ceci est expliqué par le nombre de pics du champ électrique qui est donc plus élevé pour l'électrode partitionnée par rapport à l'autre modèle.

Par ailleurs, la méthodologie des plans d'expériences qui est un outil puissant pour l'identification du point optimal du procédé d'ozonation a été utilisée dans ce travail. Grâce aux résultats préliminaires, trois facteurs de contrôle ont été considérés, pour l'analyse de l'efficacité énergétique et la concentration d'ozone, à savoir la tension, la fréquence et la distance entre les parties adjacentes de l'électrode HT.

La partie suivante de la thèse, a fait l'objet d'une étude d'optimisation de la production d'ozone en fonction de l'écoulement d'aire, tous d'abord une comparaison a été effectuée entre trois configurations d'un générateur d'ozone où les entrées et les sorties de gaz ont été variées.

Les résultats ont montré la supériorité de la géométrie diagonale « une entrée avec une sortie en diagonal ».

Les résultats obtenus nous ont motivé à multiplier le nombre de générateur pour augmenter plus le taux d'ozone. Le SKID a été réalisé avec une conception contenant des nourrices à plusieurs ouvertures permettant de faire circuler le gaz injecté dans plusieurs trajectoires afin d'étudier l'influence de l'écoulement de gaz sur la concentration et le taux d'ozone.

Les résultats trouvés ont montré que l'augmentation du nombre de générateurs d'ozone conduit à l'élévation de la production. Le meilleur rendement a été obtenu par la conception de quatre entrées de gaz, ce montage permet de bien organiser le partage de la quantité d'oxygène injecté sur tous les réacteurs, chose qui a conduit à avoir des résultats satisfaisants avec un taux d'ozone de 30 g/h pour un débit de 6 l/min.

Après avoir optimisé le procédé de génération d’ozone, notre procédé a été utilisé pour le traitement des eaux des bassins d’élevage de la station de Tabia en premier lieu, et les rejets hospitalier liquides du CHU de la wilaya de Sidi Bel Abbès. Les analyses physico-chimiques et bactériologiques de l’eau avant et après le traitement, ont montré que l’eau a été quasiment désinfectée, en constatant une dégradation considérable de tous les paramètres.

Enfin, d’un point de vue fondamental, pour l’intérêt de la connaissance et pour les possibilités d’amélioration que celle-ci peut apporter sur le plan applicatif, il reste à exploiter ce pilote d’ozonation sur le terrain.

Perspectives

Dans le cadre de ces travaux, nous avons mis au point des générateurs d’ozone dont les propriétés des matériaux et les constituants peuvent influencer ses performances. Il serait alors intéressant d’étudier l’influence de ces matériaux ainsi que leurs géométries sur le rendement énergétique.

Un autre point semble intéressant qui consiste à faire une étude comparative entre la géométrie plane et cylindrique avec un volume de charge similaire.

L’étude électrique effectuée sur les réacteurs d’ozone peut être améliorée en introduisant des alimentations beaucoup plus stables où il serait bénéfique et économique d’utiliser des alimentations pulsées.

Concernant le traitement des eaux par le procédé d’ozonation, et pour les réutilisées dans d’autres domaines tels que l’irrigation, nous envisageons l’amélioration d’un autre SKID à électrodes planes à plusieurs étages afin de multiplier la quantité d’ozone produite.

Références
bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Boulos, Maher I.** "Thermal plasma processing." IEEE transactions on Plasma Science 19.6 (1991) : 1078-1089.
- [2] **M. C. BOUZIDI**, « Étude d'une Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) homogène dans l'azote à pression atmosphérique : Effet mémoire et Optimisation du transfert de Puissance», thèse de doctorat, université de Toulouse, 2013.
- [3] **H. LOUKIL**, « Description Electrique d'une Décharge à Barrières Diélectriques pour Lampe à Xénon Pur », thèse de doctorat, université d'Oran, 2014.
- [4] **K. NASSOUR**, « Optimisation du procédé de génération d'ozone par décharge à barrière diélectrique mixte « surfacique-volumique » pour le traitement d'eau », thèse de doctorat, université De Sidi Bel Abbes, 2016.
- [5] **A.H. BOUHADBA**, « « Etude de la production de l'ozone et du traitement des molécules Nox dans le mélange N2/O2 par décharge électrique pulsée », mémoire de magister, université D'Oran, 2015.
- [6] **M. BENYAMINA**, « Etude de la production de l'ozone dans les décharges couronne», thèse de doctorat, université d'Oran, 2014.
- [7] **B. MENNAD**, « L'influence de la nature du matériau des parois sur la décomposition de l'ozone dans une décharge couronne», mémoire de magister, université d'Oran, 2009.
- [8] **A. LATROUS**, « Modélisation électrique d'une décharge à barrières diélectriques DBD», mémoire de magister, université d'Oran, 2014.
- [9] **A. CHEBBAH**, « Contribution à l'étude de la production de l'ozone par décharge à barrière diélectrique surfacique et à électrodes planes. Application au traitement des eaux polluées », thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbes, 2018.
- [10] **P. DESTREZ**, « la stérilisation par plasmas froids", revue intermedica, absys sa, 21-24, page 6-7, mai 2002.
- [11] **S. C. TRAVERS**, "nouvelles techniques de stérilisation", revue périodique, la lettre traitement de surface par plasmas ions n°9, page 8-26, septembre 2002.
- [12] **S. MASUDA**, «destruction of gaseous pollutants and air toxics by surface discharge induced plasma chemical process (spcp) and pulse corona induced plasma chemical process (ppcp) ", nato asi series, vol. g34-b, page 199-209,1993.
- [13] **J. M. CORMIER**, "Traitement d'effluents gazeux par plasmas non thermiques", revue périodique, à la pointe de l'instrumentation et de la technologie, page 1-6, 2002.
- [14] **O. DUCASSE**, « modélisation électrodynamique d'un réacteur plasma hors équilibre de dépollution des gaz", thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, 2006.

- [15] **F. MASSINES**, «gas discharges and their applications (gd 92) », Swansea, W. T. Williams ed., vol ii, page 730-733, Septembre 92.
- [16] **K. ALLEGRAUD**, « Décharge à DBD de surface ; physique et procédé », thèse de doctorat, Ecole polytechnique, CNRS, 2008.
- [17] **P. AUDIER**, « Etude d'une DBD surfacique, application au contrôle d'écoulement autour d'un profil d'aile », thèse de doctorat, université d'Orléans, 2012.
- [18] **V. BOUCHINHA**, « Etude de l'écoulement induit par une DBD surfacique », thèse de doctorat, université d'Orléans, 2009.
- [19] **A. TILMATINE**, « Cours haute tension », promotion master, université De Sidi Bel Abbes, 2010.
- [20] **N. HAMMADI**, « Contribution à l'étude de la dépollution de l'eau et la désinfection de l'air par décharge à barrière diélectrique », thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbes 2013.
- [21] **M. A. DJIBRILLAH**, « Eléments de conception d'un générateur électrique pour alimentation d'un dispositif de décharge à barrière diélectrique », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2011.
- [22] **S. NEMMICH**, « Réalisation d'un Système de Désinfection de L'eau Par L'ozone Généré Par Une DBD », mémoire de magister, université de Sidi Bel Abbes 2011.
- [23] **Nemmich, S., A. Tilmatine, Z. Dey, N. Hammadi, K. Nassour, and S. Messal**. "Optimal Sizing of a DBD Ozone Generator Using Response Surface Modeling." *Ozone: Science & Engineering* 37:3–8. 2015.
- [24] **A. YOUSEF**, "ozone inactivation of microorganisms: kinetics and mechanisms", ozone-v conference, California, 2007.
- [25] Purification et traitement de l'eau, Lenntech (European Head Office), www.Lenntech.fr, (consulté le 05/05/2020).
- [26] **Breuer, H.**, Atlas de la chimie Broché, livre de poche, 10 mai 2000.
- [27] **Wong, David C.**, et al. "O₃ Source Contribution During a Heavy O₃ Pollution Episode in Shanghai China." International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application. Springer, Cham, 2016.
- [28] **Smith, Wayne**. "Principles of ozone generation", Watertec Engineering Pty Ltd., Australia (2011): 1-17.
- [29] **B.Langlais, D.A. Reckhow, and D.R. Brink** (editors), "Ozone in Drinking Water Treatment: Application and Engineering", AWWARF and Lewis Publishers, Boca Raton, FL, (1991).
- [30] **Christian Seigneur**, Cours VET « Environnement atmosphérique et qualité de l'air », Chimie stratosphérique, université PARIS- EST, 2011.
- [31] **T. RICH**, "A basic comparison of ozone technologies", *Water Technology Magazine*, 1994.

- [32] **Song, Kai, Madjid Mohseni, and Fariborz Taghipour.** "Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review." *Water research* 94 (2016): 341-349.
- [33] **S. NEMMICH,** « Modélisation expérimentale et optimisation du procédé de génération d’ozone par décharge à barrière diélectrique pour traitement de l’eau », thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbes 2015.
- [34] **Bruno Cédât,** « Evaluation du procédé UV/H₂O₂ pour la désinfection et l’élimination des micropolluants en vue d’une réutilisation des eaux usées traitées en petites stations d’épuration », thèse de doctorat, Ecole Doctorale de Chimie de Lyon, 2006.
- [35] **B. Langlais , D.A .Reckhow, D.R. Brink ,**”Ozone in Water Treatment: Application and Engineering”, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, USA (1991).
- [36] **Smail, Latifa,** et al. "Experimental investigation of an ozone disinfection cabin for people." *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol* 16.2022 (2001): 10pp.
- [37] **Yaglou, C. P., and W. N. Witheridge.** "Ventilation requirements, part 2." *ASHRAE transactions* 42 (1937) : 423-436.
- [38] **Bellebna, Yassine, and Yassine Khalfi.** "Ozone Generation using a Dielectric Barrier Discharge Reactor for Increasing Food Shelf Life." *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry• Wood Industry• Agricultural Food Engineering* (2020): 95-104.internet.
- [39] **Asbury, Clyde, and Robert Coler.** "Toxicity of dissolved ozone to fish eggs and larvae." *Journal (Water Pollution Control Federation)* (1980): 1990-1996.
- [40] **J. DURAN,** « apport de l’ozone dans la prise en charge des maladies parodontales ». Thèse de doctorat, université Toulouse iii, faculté de chirurgie dentaire 2014.
- [41] **Layati, T.M, K. Nassour, S. Nemmich, M. Brahami, and A. Tilmatine.** “Experimental analysis of a cylindrical-shape ozone generator with a partitioned high-voltage electrode” *Ozone: Science & Engineering* 1-12. 2020.
- [42] **Nomoto, Y., T. Ohkubo, S. Kanazawa, and T. Adachi.** 1995. “Improvement of Ozone Yield by a Silent-Surface Hybrid Discharge Ozonizer.” *IEEE.Trans. IA* 31(6): 1458–1462.
- [43] **Koichi Takaki, Yuki Hatanaka, Kaname Arima, Seiji Mukaigawa, Tamiya Fujiwara,** “Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier ischarge reactor” *Vacuum* 83 (2009) 128–132.
- [44] **Chebbah, S. Hadjeri, S. Nemmich, K. Nassour, N. Zouzou, A. Tilmatine.** (2017) Development and Experimental Analysis of a New “Serpentine-Shape” Surface-DBD Ozone Generator—Comparison with a Cylindrical Volume-DBD Ozone Generator. *Ozone: Science & Engineering* 39:3, pages 209-216.
- [45] **Nassour, K., Brahami, M., Nemmich, S., Hammadi, N., Zouzou, N., and Tilmatine, A.,** 2017, New hybrid surface–Volume dielectric barrier discharge reactor for ozone generation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industry Applications* 533, 2477–2484.

- [46] **Nemmich, S., Elmouloud Zemat, M., Nassour, K., Hammadi, N., Draou, A., & Tilmatine, A.** (2019). Experimental analysis of the influence of the voltage waveform on ozone generation efficiency. *International Journal of Environmental Studies*, 76(4), 571-581.
- [47] **A. Draou**, « Réalisation d'un procédé mobile pour traitement d'eau par ozone généré par DBD », thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbes 2019.
- [48] **Wei, L., Deng, H., Neretti, G., & Zhang, Y.**, 2019 "Ozone yield limit in low temperature plasmas based on thermodynamics". *The European Physical Journal D* 73 (7), 136.
- [49] **Wang, Changquan, Guixin Zhang, and Xinxin Wang.** "Comparisons of discharge characteristics of a dielectric barrier discharge with different electrode structures." *Vacuum* 86.7 (2012): 960-964.2012.
- [50] **Wei, L.S., Yuan, D.K., Zhang, Y.F., Hu, Z.J., and Dong, G.P.**, 2014, Experimental and theoretical study of ozone generation in pulsed positive dielectric barrier discharge. *Vacuum* 104, 61–64.
- [51] **Koichi Takaki, Yuki Hatanaka, Kaname Arima, Seiji Mukaigawa, Tamiya Fujiwara,** "Influence of electrode configuration on ozone synthesis and microdischarge property in dielectric barrier ischarge reactor" *Vacuum* 83 (2009) 128–132.
- [52] **Nassour, K., Brahami, M., Tilmatine, A., Nemmich, S., Miloua, F., Ramdani, N., & Zouzou, N.** (2018). Comparative experimental analysis of ozone generation between surface and volume DBD generators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(2), 428-434.
- [53] **Draou, A., Nemmich, S., Nassour, K., Benmimoun, Y., and Tilmatine, A.**, 2018, Experimental analysis of a novel ozone generator configuration for use in water treatment applications. *International Journal of Environmental Studies* 76(2), 1–13.
- [54] **Meng Li, Yan Yan, Luyao Zhang, Zihao Zhou, Libiao Zheng, Bin Zhu , Li Wang, Tie Li, Xiaojia Tang, and Yimin Zhu, n Yan, Luyao Zhang, Zihao Zhou, Libiao Zh** a high performance volume-surface hybrid discharge 'c *Appl. Phys. Lett.* 114, 114102 (2019).
- [55] **Pryor, Roger W.** Multiphysics modeling using COMSOL®: a first principles approach. Jones & Bartlett Publishers, 2009.
- [56] MODDE 5.0, "User guide and tutorial", Umetrics, 1999.
- [57] **Frigon, N.L., and D. Mathews.** 1996. *Practical Guide to Experimental Design*. New York: Wiley.
- [58] **Huang, W., Ren, T., and Xia, W.**, 2007, Ozone generation by hybrid discharge combined with catalysis. *Ozone: Science and Engineering* 29(2), 107–112.
- [59] **Hicks, C.R., and K.V. Turner, Jr.** 1999. *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- [60] **Garcia-Diaz, A., and D.T. Phillips.** 1995. *Principles of Experimental Design and Analysis*. New York: Chapman & Hall.
- [61] **Layati, T. M., Nassour, K., Nemmich, S., Zenagui, N. E. H., Jbilou, M., & Tilmatine, A.** (2022). Experimental study of the gas flow path for a dielectric barrier discharge ozone

- generator using for wastewater fish hatchery depollution. *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, 16(e01005), e01004.
- [62] **Bouregba, N., Benmimoun, Y., Meddah, B., Tilmatine, A., & Ouldoumouma, A.**, Ozonation of wastewater in Algeria by dielectric barrier discharge. *Desalination and Water Treatment*, 57(4), 1824-1835, 2016.
- [63] **Rejsek, F.** (2002). Analyse des eaux : Aspects réglementaires et techniques. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine.
- [64] **Y. LIBES**, (2010) : «Les eaux usées et leur épuration».
- [65] Rapport de l'OPECST n° 2152 (2002-2003) de M. **Gérard MIQUEL**, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scient. tech., déposé le 18 mars 2003.
- [66] **Grosclaude, G., & Brulé, G.** (1999). L'eau et l'agroalimentaire.
- [67] **Hamoda, M. F., I. Al-Ghusain, and N. Z. Al-Mutairi.** "Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse." *Desalination* 164.3 (2004) : 203-211.
- [68] **Jbilou, M., Nemmich, S., Nassour, K., Brahami, M. N., Bouhmama, M., Bahami, M., and Tilmatine, A.**, Ozonation of wastewater for irrigation in a plant powered by photovoltaic energy. *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, Vol.16, e01001, 2022.
- [69] **Barnabé, G.** (1989). L'élevage du loup et de la daurade. *Aquaculture*, 675-720.
- [70] **L. Benamrouz** , « Aperçu sur l'aquaculture dans le monde et évaluation de la consommation de la chaire de poisson au sein de l'UMMTO », mémoire de master , Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2016.
- [71] **Pierre- François, Jean, Emmanuel Ducatteau**, « Pisciculture : bilan sur les modes d'élevage et perspectives en matière de durabilité environnementale. Exemple du saumon atlantique en Norvège», thèse de doctorat, école nationale vétérinaire d'Alfort, 2015.
- [72] **Barnabe G, Baudin-laurencin F, Bellon-humbert C et al.**, Bases biologiques et écologiques de l'aquaculture. Paris, Lavoisier, 499 p, 1991.
- [73] Le rôle de l'aquaculture dans le développement rural, (en ligne) [https://www.rural21.com/fileadmin/_migrated/content_uploads/ELR_Le_role_de_l_aquaculture_0205.pdf] (consulté le 05/05/2022).
- [74] Les avantages et inconvénients des poissons cultivés, (en ligne) [https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/aquaculture_fr.pdf] (consulté le 05/05/2022).
- [75] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO).La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture, (en ligne), [<https://www.fao.org/3/ca9231fr/CA9231FR.pdf>] (consulté le 05/05/2022).
- [76] **Abdelhafid CHALABI**, L'AQUACULTURE EN ALGERIE ET SON CONTEXTE MAGHREBIN.
- [77] **Karali. A et Echikh. F**,2005. L'aquaculture en Algérie mémoire. (ISMAL :Institut des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du littoral) 44P.

- [78] **A. BAHRI**, « Contribution à la valorisation des eaux aquacoles dans l'amélioration de la production de l'oignon et de la laitue (cas de Kef es Soltane Ouargla) », mémoire d'ingénieur d'état, Université KASDI-MERBAH- OUARGLA, 2009.
- [79] **Emmanuelle Roque d'Orbcastel**, « Optimisation de deux systèmes de production piscicole : biotransformation des nutriments et gestion des rejets », thèse de doctorat, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE 2008.
- [80] **Brown, J. R., Gowen, R. J., & McLusky, D. S.** (1987). The effect of salmon farming on the benthos of a Scottish sea loch. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 109(1), 39-51.
- [81] **Acierno, R., Blancheton, J. P., Bressani, G., Ceruti, L., Chadwick, D., Roque D'Orbcastel, E., ... & Donaldson, G.** (2006). Manual on effluent treatment in aquaculture: Science and Practice. Aquaetreat.
- [82] **Gonçalves, A. A., and Gagnon, G. A.**, Ozone application in recirculating aquaculture system: an overview. *Ozone: Sci. Eng.*, Vol.33 (5), pp. 345-367, 2011.
- [83] **Alabaster, J. S., Calamari, D., Dethlefsen, V., Konemann, H., Lloyd, R., and Solbe, J. F.**, Water quality criteria for European freshwater fish. *Chemistry and ecology*, Vol.3 (3), pp.165–253, 1988.
- [84] **Makori, A. J., Abuom, P. O., Kapiyo, R., Anyona, D. N., and Dida, G. O.**, Effects of water physico-chemical parameters on tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth in earthen ponds in Teso North Sub-County, Busia County. *Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol.20 (1), pp. 1–10, 2017.
- [85] **Stone, N. M., Shelton, J. L., Haggard, B. E., and Thomforde, H. K.**, Interpretation of water analysis reports for fish culture. Stoneville, Mississippi: Southern Regional Aquaculture Center, 2013.
- [86] **Bauder, T., Waskom, R. M., Sutherland, P. L., and Davis, J. G.**, Irrigation water quality criteria. Colorado State University Extension Fact Sheet No. 0.506, 2014.
- [87] **GAIGNON JL.**, L'élevage intensif des juvéniles en eau douce. In : Gueguen C, Prouzet P. (éditeurs). *Le Saumon Atlantique. Plouzané, Editions de l'IFREMER*, 219–237, 1994.
- [88] **Khan, R. A., and Thulin, J.**, Influence of pollution on parasites of aquatic animals. *Advances in parasitology*, Vol.30, pp. 201–238, 1991.
- [89] **Ramdani, N., Hamou, A., Nemnich, S., Tilmatine, A., Boufadi, M. Y., and del Riquelme, M. L.**, Ozonation of draw wastewater by dielectric barrier discharge and its impact on the elimination of fecal bacteria and inorganic micropollutants. *J. Ecol. Health Environ*, Vol.3 (3), pp. 81–90, 2015.
- [90] **Rossi, G., Mainardis, M., Aneggi, E., Weavers, L. K., and Goi, D.**, Combined ultrasound-ozone treatment for reutilization of primary effluent—a preliminary study, *Environ. Sci. Pollution Res.*, Vol. 28 (1), pp. 700–710, 2021.
- [91] **Chávez, A. M., Gimeno, O., Rey, A., Pliego, G., Oropesa, A. L., Álvarez, P. M., and Beltrán, F. J.**, Treatment of highly polluted industrial wastewater by means of sequential aerobic biological oxidation-ozone based AOPs. *Chem. Eng. J.*, Vol.361, pp. 89–98, 2019.

- [92] Normes de Qualité Eaux piscicoles, Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement, Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, Rabat-Maroc, 2007.
- [93] **Correll, D. L.**, The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Quality*, Vol.27 (2), pp. 261–266, 1998.
- [94] **Burgin, A. J.**, and **Hamilton, S. K.**, NO³⁻-driven SO₄²⁻ production in freshwater ecosystems: implications for N and S cycling. *Ecosystems*, Vol.11 (6), pp. 908–922, 2008.
- [95] **Smith, C. E.**, and **Williams, W. G.**, Experimental nitrite toxicity in rainbow trout and chinook salmon. *Trans.Am. Fisheries Society*, Vol.103 (2), pp. 389–390, 1974.
- [96] **Emmanuel, E.** (2004). *Evaluation des risques sanitaires et écotoxicologiques liés aux effluents hospitaliers* (Doctoral dissertation, Insa Lyon).
- [97] **Boillot, C.** (2008). *Évaluation des risques écotoxicologiques liés aux rejets d'effluents hospitaliers dans les milieux aquatiques. Contribution à l'amélioration de la phase «caractérisation des effets»* (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).
- [98] **Todedji, J. N., Degbey, C. C., Soclo, E., Yessoufou, A., Goudjo, F., Hounfodji, J. W., ... & Mama, D.** (2020). Caractérisation physico-chimique et toxicologique des effluents des Centres Hospitaliers et Universitaires du département du Littoral du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(3), 1118-1132.
- [99] **Verlicchi P, Galletti A, Petrovic M, Barcelo D.** 2010. Hospital effluents as a source of emerging pollutants: an overview of micropollutants and sustainable treatment options. *J Hydrol*, 389: 416–428. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.005
- [100] **Evens E.** 2004. Evaluation des risques sanitaires et écotoxicologiques liés aux effluents hospitaliers. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, p. 259. El-Ogri F, Ouazzani N,
- [101] **Emmanuel, E., Keck, G., Blanchard, J. M., Vermande, P., & Perrodin, Y.** (2004). Toxicological effects of disinfections using sodium hypochlorite on aquatic organisms and its contribution to AOX formation in hospital wastewater. *Environment international*, 30(7), 891-900.
- [102] **Boillot, C., Bazin, C., Tissot-Guerraz, F., Droguet, J., Perraud, M., Cetre, J. C., ... & Perrodin, Y.** (2008). Daily physicochemical, microbiological and ecotoxicological fluctuations of a hospital effluent according to technical and care activities. *Science of the total environment*, 403(1-3), 113-129.
- [103] **Ory, J.** (2017). *Effluents hospitaliers: sources de pollution en antibiotiques et de résistances bactériennes potentiellement transmissibles via un biofilm?: Microbiologie* (Doctoral dissertation, Université Clermont Auvergne).
- [104] **Carraro, E., Bonetta, S., Bertino, C., Lorenzi, E., Bonetta, S., & Gilli, G.** (2016). Hospital effluents management: chemical, physical, microbiological risks and legislation in different countries. *Journal of environmental management*, 168, 185-199.
- [105] **Lasek, F.** (2018). *Présence, devenir et traitement des biocides dans les rejets d'un établissement hospitalier* (Doctoral dissertation, Université de Poitiers).

- [106] **Zaviska, F., Drogui, P., Mercier, G., & Blais, J. F.** (2009). Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels: Application à la dégradation des polluants réfractaires. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 22(4), 535-564.
- [107] **Hoigné, J., & Bader, H.** (1983). Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water—II: dissociating organic compounds. *Water research*, 17(2), 185-194.
- [108] **Elmghari-Tabib, M., Laplanche, A., Venien, F., & Martin, G.** (1982). Ozonation des amines dans l'eau ozonation of amines in aqueous solutions. *Water Research*, 16(2), 223-229.
- [109] **De Laat, J., Berger, P., Poinot, T., vel Leitner, N. K., & Doré, M.** (1997). Modeling the oxidation of atrazine by H₂O₂/UV. Estimation of kinetic parameters. *Ozone: science & engineering*, 19(5), 395-408.
- [110] **Ramdani, N., Benouis, K., Lousdad, A., Hamou, A., & Boufadi, M. Y.** (2018). Physicochemical and bacteriological characterization of hospital effluents and their impact on the environment. *Chem Int*, 4(2), 102-108.
- [111] **Rodier, J.**, 1996. Analysis of water: natural waters, sedimentary waters, seawater (8th edition). Dunod, Paris.
- [112] WHO (World Health Organization). 1989. The use of wastewater in agriculture and aquaculture: recommendations to health warnings. Report of a WHO Scientific Group. Technical Report Series, Geneva.

Liste des travaux de recherche

Publications :

1. Layati, M. T., Nassour, K., Nemmich, S., Brahami, M., & Tilmatine, A. (2021). Experimental Analysis of a Cylindrical Ozone Generator with a Partitioned High-voltage Electrode. *Ozone: Science & Engineering*, 43(4), 339-350. DOI: 10.1080/01919512.2020.1812376
2. Layati, T. M., Nassour, K., Nemmich, S., Zenagui, N. E. H., Jbilou, M., & Tilmatine, A. (2022). Experimental study of the gas flow path for a dielectric barrier discharge ozone generator using for wastewater fish hatchery depollution. *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol*, 16(e01005), e01004. DOI: 10.34343/ijpest.2022.16.e01005

Communications :

1. LAYATI Tayeb Mehdi, NASSOUR Kamel, TILMATINE Ammar, NEMMICH Said, “optimisation de la production d'ozone par un nouveau générateur d'ozone à base de DBD », Troisièmes Journées Doctorales de Génie Electrique 17-18 Décembre 2019, Sidi Bel Abbès.
2. Nassour Kamel, Layati tayeb mehdi, Nemmich Said, Ramdani nadia, Brahami mostéfa, Tilmatine amar, «Analyse expérimentale de la décharge à barrière diélectrique. Application à la dépollution des rejets textiles par ozonation », séminaire national sur les nouvelles technologies de traitement de l'eau en Algérie, SNNTTE '21 Tizi Ouzou le 8/9 décembre 2021.
3. Tayeb Mehdi Layati, kamel Nassour, Said Nemmich, Nour El Houda Zenagui, Amar Tilmatine, “Optimization of ozone production by dielectric barrier discharge. Application to aquaculture waters treatment of the breeding center of TABIA Sidi bel abbes”, 1st International Seminar on Pollution, Health, Environment and Bio-monitoring, SIPSEB'21 December 27-28, 2021, Skikda, ALGERIA.
4. ZENAGUI Nour Elhouda, NASSOUR Kamel; Mohammed L BENINE, SMAIL Latifa, LAYATI tayeb Mehdi, Youcef Benaissa keddar, NEMMICH Said, Amar TILMATINE, “Analysis of a new sterilization device based on ozone generation by dielectric barrier discharge”, the 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering, ICAEE 29th to 31st October, 2022, Constantine 1 University in Constantine, Algeria.

Résumé

« Réalisation d'une installation prototype industrielle de génération d'ozone par décharge à barrière diélectrique. Application pour le traitement d'eau »

De nombreux travaux de recherche ont été réalisés dans le domaine des plasmas réactifs hors équilibre générés par des décharges électriques dans l'air à pression atmosphérique dont il a été prouvé que ces techniques présentent de nombreux avantages par rapport à d'autres procédés de plasma thermique. L'objectif de cette thèse est d'évaluer le potentiel de l'ozone généré par plasmas à pression atmosphérique et d'évaluer sa faisabilité dans la dépollution de l'eau. Des analyses expérimentales d'un générateur d'ozone cylindrique à décharge à barrière diélectrique volumique (VDBD) ont été réalisées afin d'optimiser la quantité d'ozone produite, tout en agissant sur les paramètres géométriques et la trajectoire de gaz injecté. D'un autre côté l'objectif sera d'introduire ce procédé dans un processus de traitement d'eaux piscicoles et hospitalières.

Mots-clés : décharge à barrière diélectrique, générateur d'ozone, écoulement de gaz. traitement de l'eau.

Abstract

"Realization of a prototype industrial installation of ozone generation by dielectric barrier discharge. Application for water treatment"

A lot of research work was carried out in the field of non-equilibrium reactive plasmas generated by electric discharges in air at atmospheric pressure. It has been proven that these techniques have many advantages compared to other thermal plasma processes. This thesis aims to evaluate the potential of ozone generated by atmospheric pressure plasmas and to evaluate its feasibility for water depollution. Experimental analyses of a cylindrical volume dielectric barrier discharge (VDBD) ozone generator were performed in order to optimize the amount of ozone produced, while acting on the geometrical parameters and the trajectory of the injected gas. On the other hand, the objective will be to introduce this process in the treatment of aquaculture and hospital wastewater.

Keywords: dielectric barrier discharge, ozone generator, gas flow. water treatment.

ملخص

"انشاء محطة نموذجية صناعية لتوليد الأوزون عن طريق التفريغ الكهربائي بالحاجز العازل لاستخدامها في معالجة المياه"

تم إجراء العديد من الأعمال البحثية في مجال البلازما التفاعلية غير المتوازنة الناتجة عن التفريغ الكهربائي في الهواء عند الضغط الجوي، وقد ثبت أن لهذه التقنيات مزايا عديدة مقارنة بعمليات البلازما الحرارية الأخرى. الهدف من هذه الأطروحة هو تقييم إمكانيات الأوزون الناتج عن البلازما عند الضغط الجوي وتقييم جدواها في إزالة تلوث المياه. تم إجراء تحليلات تجريبية لمولد الأوزون ذو الحجم الأسطوانى بواسطة التفريغ الكهربائي عن طريق الحاجز العازل من أجل تحسين كمية الأوزون المنتج، مع العمل على المعلمات الهندسية ومسار الغاز المحقون. من ناحية أخرى، كان الهدف هو إدخال هذه التقنية في معالجة مياه احواض تربية الأسماك ومياه الصرف الصحي في المستشفيات.

كلمات البحث: التفريغ الكهربائي بواسطة الحاجز العازل، مولد الأوزون، تدفق الغاز. معالجة المياه.