

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



**UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES**  
**Faculté de Technologie**  
**Département d'Electrotechnique**

Thèse présentée par :

**NEMMICH Saïd**

Pour l'obtention du diplôme de :

**DOCTORAT en Electrotechnique**

*Au sein de l'Ecole Doctorale « L'Electrotechnique et ses Applications »*

*Option : Matériaux diélectriques et haute tension*

Intitulé :

***Modélisation expérimentale et optimisation du  
procédé de génération d'ozone par décharge à  
barrière diélectrique pour traitement de l'eau***

Devant la commission d'examen constituée de :

<b>Pr.Brahami mostefa</b>	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Président
<b>Pr.Tilmatine Amar</b>	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Encadreur
<b>Pr.Hamid Azzedine</b>	Professeur (U.S.T.O ORAN)	Examineur
<b>Pr.Belarbi Ahmed Wahid</b>	Professeur (U.S.T.O ORAN)	Examineur
<b>Dr.Zelmat Mohammed El Mouloud</b>	MCA (U.S.T.O ORAN)	Examineur
<b>Dr Miloua Farid</b>	MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Examineur
<b>Dr Ramdani Nadia</b>	MCB (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Invitée

Soutenu le : octobre 2015



*Laboratoire de Recherche APELEC (Applications of Plasma, Electrostatics  
& Electromagnetic Compatibility)*



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*In the name of Allah, the Beneficent, the Merciful*

# ***AVANT-PROPOS***

Cette Thèse de doctorat a été préparée au sein de laboratoire de recherche APELEC d'université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès.

Malgré qu'un seul nom d'auteur figure sur la couverture d'un mémoire de thèse, il est important de préciser qu'une telle entreprise constitue surtout 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 le professeur ***Amar TILMATINE*** qui a su encadré et dirigé ce travail avec beaucoup de compétences et de sympathie. En tant qu'encadreur, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de cette thèse, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui cette thèse n'aurait jamais vu le jour. Sous sa direction, j'ai pu apprécier sa rigueur et sa franchise qui ont grandement contribué à la réussite de ce travail. Je tiens à le remercier pour la confiance qu'il m'a témoignée lors de l'attribution et du déroulement de cette thèse. Je le remercie aussi pour la méthodologie rigoureuse qu'il m'a transmise par ses conseils. J'espère sincèrement pouvoir continuer cette collaboration dans le futur.

J'adresse tous mes remerciements à professeur ***BRAHAMI Mostafa*** 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 à professeur ***HAMID AZZEDINE*** professeur à l'université des sciences et de la technologie d'Oran pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être membres du jury

Je remercie également le professeur ***BELARBI Ahmed Wahid***, professeur à l'université des sciences et de la technologie d'Oran, d'avoir participé au jury de cette thèse ainsi que pour les nombreux conseils, les nombreux échanges scientifiques et techniques que nous avons eus.

Je tiens à exprimer mes remerciements pour Monsieur ***MILOUA Farid***, Maître de conférences à l'université Djillali liabès de Sidi-Bel-Abbès pour 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 monsieur ***ZELMAT Mouloud***, maître de conférences à l'université des sciences et de la technologie d'Oran, d'avoir participé au jury de cette thèse.

Je tiens également à remercier madame **REMDANI Nadia**, maitre de conférences à l'université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès, d'avoir participé au jury de cette thèse, pour ses compétences expérimentales, ses conseils, ses discussions fructueuses.

Je remercie également le responsable de la station d'épuration des eaux usée de la wilaya de Sidi-Bel-Abbès (ONA) pour leurs soutiens Ainsi aux ingénieurs de laboratoire de microbiologie.

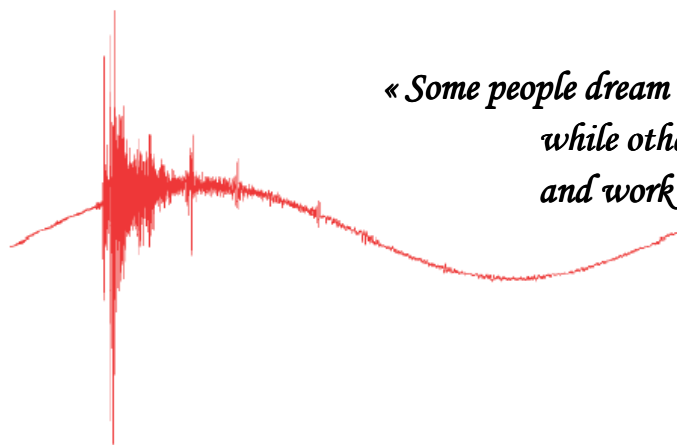
Finalement, je tiens également à remercier tous les professeurs et les doctorants de laboratoires APELEC, IRICOM et ICEPS pour leur soutien, leur disponibilité et leur sympathie.

# Sommaire

<b>Introduction général</b>	1
<b><i>Chapitre 1 : Les décharges à barrière diélectrique et la production d’ozone état de l’art</i></b>	4
<b>1.1. Introduction aux plasmas</b>	4
1.1.1. Paramètres physiques des plasmas	5
1.1.2. Méthodes pour qu’un gaz se transforme en plasma	6
a. Elévation de température	6
b. Elévation du champ	6
<b>1.2. Généralités sur les Décharges à barrières diélectriques</b>	7
1.2.1. Principe	7
1.2.2. Configurations typiques de DBD	9
1.2.2.1. Configurations des DBDs volumiques	9
1.2.2.2. Configurations des DBDs surfaciques	10
1.2.3. Les matériaux diélectriques	11
1.2.4. Méthode pour éviter la transition à l’arc	12
1.2.5. Paramètres de la décharge	12
1.2.5.1. Les micro-décharges de la DBD	13
1.2.5.2. Caractérisation électrique des micro-décharges	15
<b>1.3. Production d’Ozone par DBD</b>	16
1.3.1. Inconvénients et Avantages de l’ozone	17
1.3.2. Instabilité de l’ozone	18
1.3.3. Réactions de l’Ozone Devant les bactéries, virus et germes	18
1.3.4. Traitement des eaux par l’ozone	19
1.3.4.1. Comparaison entre les méthodes de désinfection	21
1.3.4.2. Les domaines d’application de traitement de l’eau par l’ozone	23
a. Eau potable	23
b. Eaux usées	23
c. Eaux des puits	24
d. Eau de piscine	24
e. Domaine agro-alimentaire	24
<b>1.4. Conclusion</b>	26
<b><i>Chapitre 2 : Caractérisation électrique de générateur d’ozone à décharge à barrière diélectrique</i></b>	27
<b>2.1. Paramètres électriques</b>	27
<b>2.2. Influence de la forme de signal de tension sur la production d’ozone</b>	31
2.2.1. Influence des paramètres électriques sur la concentration d’ozone	32
2.2.2. Calcul de la puissance	35
2.2.3. Influence des paramètres électriques sur l’efficacité énergétique de production d’ozone	38
<b>2.3. Conclusion</b>	41
<b><i>Chapitre 3 : Conception et optimisation du procédé de traitement d’eau par l’ozone généré par décharge à barrière diélectrique</i></b>	42
<b>3.1. Développement du générateur d’ozone</b>	42
3.1.1. Matériau des électrodes	43
3.1.2. Barrière diélectrique	43
3.1.3. Bouchons de centrage (téflon)	44
<b>3.2. Développement du procédé de traitement d’eau par l’ozone</b>	47
3.2.1. Choix du gaz d’alimentation du générateur d’ozone	48
3.2.2. Modélisation expérimentale du procédé de traitement d’eau par l’ozone	50
3.2.2.1. Quelques rappels sur la méthodologie des plans d’expériences	50
a) Vocabulaire utilisé	50
b) Notion de modélisation mathématique	51
c) Principaux avantages des plans d’expériences	52

d) Les plans composites	52
3.2.2.2. Logiciel MODDE 5.0	54
3.2.2.3. Application au procédé de traitement des eaux	55
3.2.2.4. Plans d'expériences « un-facteur-à-la-fois »	57
3.2.2.5. Identification du point de fonctionnement optimal	59
a) Graphes d'adéquation du modèle et validation des mesures	60
b) Analyse des résultats obtenus	62
<b>3.3. Conclusion</b>	<b>64</b>
<b>Chapitre 4 : Optimisation des dimensions géométriques du générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique</b>	
<b>4.1. Structure et dimensions du générateur d'ozone étudié</b>	<b>66</b>
<b>4.2. Description du dispositif expérimental</b>	<b>67</b>
<b>4.3. Résultats et Discussion</b>	<b>68</b>
4.3.1. Expériences de criblage	69
4.3.2. Identification du point de fonctionnement optimal	70
4.3.3. Influence de l'échauffement de générateur au cours de fonctionnement sur la concentration et solutions adoptées	77
<b>4.4. Conclusion</b>	<b>79</b>
<b>Chapitre 5 : Réalisation et étude sur un Skid pour traitement des eaux</b>	
<b>5.1. Description de générateur d'ozone étudié</b>	<b>81</b>
<b>5.2. Description du Skid mobile</b>	<b>83</b>
<b>5.3. Détermination de la configuration optimale</b>	<b>85</b>
5.3.1. Montage en série	86
5.3.2. Montage en parallèle	90
5.3.3. Identification du point de fonctionnement optimal	93
<b>5.4. Application pour traitement des eaux</b>	<b>97</b>
5.4.1. Traitement d'eau de la rivière EL-MEKERRA	98
5.4.2. Traitement des eaux usées de la station d'épuration de SIDI-BEL-ABBES	100
5.4.3. Traitement d'eau potable contaminée	101
<b>5.5. Conclusion</b>	
<b>Conclusion générale</b>	<b>103</b>
<b>Annexes</b>	<b>105</b>
<b>Référence Bibliographique</b>	<b>i</b>

# INTRODUCTION GENERALE



*« Some people dream of success...  
while others wake up  
and work hard at it »*

# Introduction générale

Dans notre vie quotidienne, les décharges à barrière diélectrique ont de nombreuses applications, dont les plus courantes sont l'éclairage et certains écrans de télévision (écrans à plasma). Mais, nous le retrouvons dans de nombreux autres domaines tels que la stérilisation, la dépollution, la gravure, la découpe et la génération d'ozone. Cette dernière application est principalement utilisée pour le traitement des eaux, en éliminant les bactéries, les virus et les odeurs désagréables donc il présente une solution écologique et même économique pour les plusieurs problèmes de contamination.

L'eau non traitée ou polluée est responsable de maladies graves chez l'homme, bien souvent mortelles dans les pays en voie de développement. L'eau véhicule des virus, des bactéries, des parasites, des micro-organismes végétaux ou animaux, qui peuvent provoquer des maladies graves, voire mortelles pour l'être humain. Ces maladies liées à l'eau insalubre sont appelées maladies hydriques. La rivière El-mekerra est devenue un collecteur naturel des eaux usées urbaines et industrielles non traitées. Cette eau polluée constitue pour les agriculteurs une source sûre et riche en nutriments, ce qui leur permet de pallier au coût des engrais et à l'irrigation, cela malgré les inconvénients que représente cette pratique dont les plus graves sont relatifs aux risques pour la santé humaine (liés aux germes pathogènes, aux métaux lourds et aux produits chimiques contenus dans ces eaux).

De nouvelles techniques, performantes ont ainsi pu voir le jour, parmi lesquels la désinfection à l'ozone, procédé qui marque une nouvelle rupture technologique dans le domaine du traitement de l'eau. Le traitement à l'ozone apparaît comme un procédé alternatif et/ou complémentaire des techniques conventionnelles telles que la chloration.

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 négligeables 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.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons principalement à la conception et la réalisation de quelques générateurs d'ozone de forme cylindrique (décharge à barrière diélectrique volumique) en utilisant la méthodologie de plans d'expériences pour modéliser et optimiser leur rendements et efficacité en fonction des dimensions géométriques et d'autres



facteurs de commande, qui seront utilisés pour la réalisation d'un SKID mobile qui comprend six générateurs d'ozone.

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes proposé d'appliquer cette technique en premier temps une source d'eau naturelle ; traversant la ville de Sidi Bel Abbès, à savoir l'Oued El-Mekerra. Ensuite, nous traiterons les eaux usées de la station d'épuration de la wilaya de Sidi-Bel-Abbès.

Ce manuscrit est structuré en cinq chapitres, *Le premier chapitre* consiste à étudier les décharges à barrière diélectrique afin de comprendre leur fonctionnement. En se basant sur certaines grandeurs électriques telles que la tension ou la fréquence, nous décrivons le mécanisme de déroulement des micro-décharges. 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, ensuite, 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...). Le traitement par l'ozone offre des solutions écologiques et même économique dans plusieurs applications par rapport aux autres processus chimiques (chlore, l'esprit de cèle...) dans *les domaines de traitement de l'eau* (le but de cette thèse).

Dans *le deuxième chapitre*, nous présentons le générateur d'ozone à DBD réalisé, en décrivant quantitativement l'influence des paramètres électriques sur son rendement, en analysant l'effet de la forme du signal de la tension.

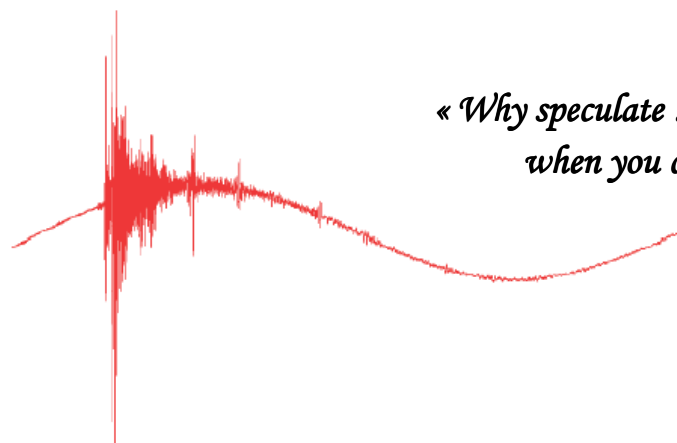
Nous présentons ensuite, au *troisième chapitre* le dispositif expérimental de la génération d'ozone par (DBD) pour son exploitation aux traitement des eaux. Nous exposons son principe de fonctionnement, ainsi que son implémentation dans un procédé de traitement d'eau, en signalant les inconvénients rencontrés et les solutions apportées. Nous présentons également la configuration définitive avec ses améliorations et ses fonctionnalités supplémentaires. Ensuite, nous proposons une méthode expérimentale (la méthodologie des plans d'expérience) afin d'identifier les points de fonctionnement optimaux du procédé de traitement d'eau par l'ozone.

Dans *le quatrième chapitre* nous proposons une procédure expérimentale en se basant sur la modélisation par surfaces de réponse (RSM) pour l'identification de la conception géométrique optimale d'un générateur d'ozone de forme cylindrique, afin d'augmenter la génération d'ozone et de minimiser la consommation d'énergie.

Le *cinquième chapitre* est consacré à la réalisation d'un SKID mobile qui comprend six générateurs d'ozone utilisés pour le traitement des eaux de la rivière El-mekerra, de l'eau infectée et les eaux usées de la station d'épuration de la wilaya de Sidi-Bel-Abbès. Nous

donnons dans cette section les résultats des analyses bactériologiques et physico-chimiques des eaux traitées avant et après traitement.

CHAPITRE 1  
LES DECHARGES A  
BARRIERE  
DIELECTRIQUE  
ELECTRIQUES  
ET LA PRODUCTION  
D'OZONE: ETAT DE  
L'ART



*« Why speculate .....  
when you can calculate? »*

*John Baez*

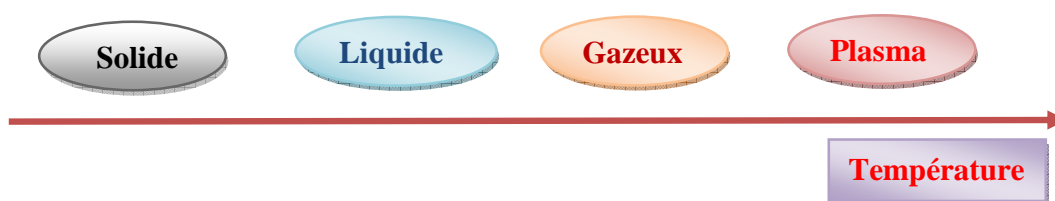
# CHAPITRE 1

## Les décharges à barrière diélectrique et la production d'ozone: état de l'art

L'objectif de ce chapitre est d'introduire les notions essentielles permettant de comprendre et d'appréhender ce travail de thèse. Dans ce chapitre nous allons dans un premier temps, décrire les premières tentatives de compréhension des plasmas. Ensuite, nous expliquons les concepts fondamentaux des décharges à barrière diélectriques, leurs différentes configurations physiques possibles dans un deuxième temps, puis nous présenterons sa célèbre application à savoir la production d'ozone qui sert essentiellement pour le traitement des eaux qui fait l'objet de cette thèse.

### 1.1. Introduction aux plasmas

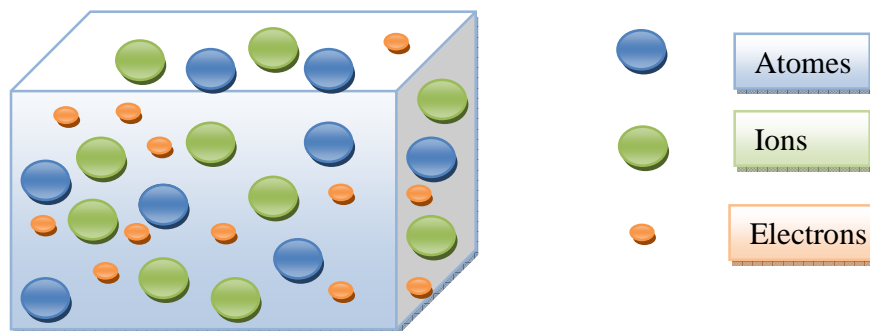
Les plasmas constituent le quatrième état de la matière, faisant suite aux trois états classiques : solide, liquide et gaz donc Si nous prenons un élément de la matière à son état solide et nous commençons à le chauffer, nous retrouverons son évolution comme le montre le schéma de la figure 1.1. Cet élément passe graduellement par son état liquide, ensuite à l'état gazeux, puis au plasma. Pour cette raison le plasma est appelé souvent « le quatrième état de la matière » et constitue environ 99 % de la masse visible de l'univers [1].



**Figure 1.1.** Evolution de l'état de la matière avec la température

Accomplir expérimentalement la transformation entre ces quatre états, est un exercice difficile, voire impossible, à cause de l'énorme différence de température requise, pour passer de l'état solide jusqu'au plasma.

Le plasma est un gaz partiellement ou totalement ionisé suffisamment dense pour être quasi-neutre. Un plasma est constitué de particules neutres (atomes, molécules, radicaux libres), d'ions positifs ou et d'électrons (Figure 1.2). Il existe de nombreux types de plasmas naturels (étoiles, vent solaire, foudre, ionosphère...) et artificiels (les plasmas de laboratoire : décharges dans un gaz, arcs électriques, plasma produit par laser, par onde de choc, plasmas de fusion thermonucléaire) [2].



**Figure 1.2.** Volume pour décrire un plasma de laboratoire et introduire le degré d'ionisation

### 1.1.1. Paramètres physiques des plasmas

Tous les plasmas n'ont pas les mêmes caractéristiques et peuvent être ainsi classifiés en fonction de certains paramètres précis. Ces paramètres sont essentiellement :

**Densité électronique** : la densité électronique  $n_e$  est le nombre d'électrons libres par unités de volume ( $\text{cm}^{-3}$ ).

**Taux d'ionisation** : le taux d'ionisations  $\tau_i$  représente le rapport du nombre d'électrons libre  $n_e$  sur le nombre de particules totales  $n_e + N$ , où  $N$  est le nombre de particules neutres par unité de volume.

Le taux d'ionisation est alors donné par

$$\tau_i = \frac{n_e}{n_e + N} \quad (1.1)$$

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

**Température électronique** :  $T_e$  est la température électronique qui correspond à la température absolue en Kelvin ( $K^\circ$ ) des électrons. On utilise aussi parfois l'énergie électronique  $kT_e$  (en électronvolt eV) avec  $k$  la constante de Boltzman, sachant que  $1 kT_e \approx 1,4 \times 10^4 K$ .

**Libre parcours moyen** : le libre parcours moyen  $\lambda$  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 [3].

### 1.1.2. Méthodes pour qu'un gaz se transforme en plasma

A température ambiante, les gaz ne sont pratiquement pas ionisés : il y a seulement quelques électrons libres par  $cm^3$ , ceux-ci étant généralement dus aux rayons cosmiques. Pour que le gaz se transforme en plasma on a deux méthodes :

#### a. Elévation de température

Un premier moyen de créer un plasma consiste à élever la température du gaz. En effet, dans ce cas certaines molécules acquièrent une énergie d'agitation thermique suffisante pour que, sous l'effet des collisions, une partie de leurs électrons soient arrachés.

Typiquement, si la température atteint environ  $10^4$  à  $10^5 K$ , la plupart de la matière est ionisée. En chauffant le gaz pour créer l'ionisation, on obtient un milieu à l'équilibre thermodynamique ; c'est-à-dire dans lequel toutes les particules (électrons, ions, neutres) ont la même température.

#### b. Elévation du champ électrique

Un deuxième moyen de créer un plasma consiste à élever le champ électrique dans le gaz : Il est également possible de créer un plasma à des températures proches de la température ambiante en appliquant un champ électrique élevé au milieu. On parlera alors de plasma créée par décharge électrique. Dans ce cas, le champ électrique a pour effet d'accélérer les électrons à des énergies suffisantes pour qu'ils puissent, par collision, ioniser les molécules. On a alors un phénomène d'avalanche électronique qui peut, si le champ est suffisamment élevé, conduire à la formation d'un plasma.

Suivant la puissance dissipée, le plasma peut être :

- Proche de l'équilibre thermodynamique : ce qui se traduit par une température électronique  $T_e$  proche de la température du gaz  $T_g$  (arc, flamme...).

- Ou hors-équilibre thermodynamique : dans ce cas, la température électronique  $T_e$  est très grande comparée à la température du gaz  $T_g$ . On parle alors de plasma froid. Dans ces conditions, le plasma est faiblement ionisé (corona, DBD...). Le degré d'ionisation  $\delta$  reste inférieur à  $10^{-4}$  [4].

## I.2. Généralités sur les Décharges à barrières diélectriques

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) sont connues depuis plus d'un siècle et les premières expériences sur ces décharges ont été reportées par Siemens en 1857. Le champ d'application de ce procédé est très large : génération d'ozone, traitement d'effluents gazeux, activation et traitement de surface, laser  $\text{CO}_2$ , lampe écimer, écrans plasmas, etc. et touche de nombreux domaines industriels : traitement de l'eau, environnement, électronique, textile, emballage, automobile... [4].

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 (Figure 1.3). 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, en contre partie, cela impose l'utilisation d'une excitation électrique alternative [5].

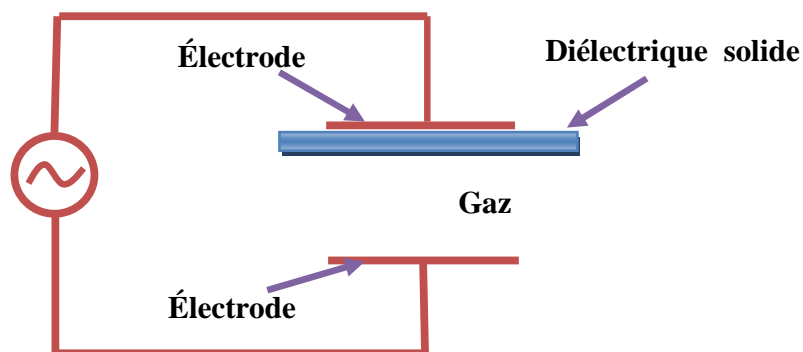


Figure 1.3. Configuration classique d'une DBD

### I.2.1. 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 (Figure 1.4-a). Cette micro-décharge peut être représentée par le schéma équivalent de la Figure 1.4-d.

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

Notons que ce schéma équivalent n'a de sens que si l'on considère uniquement une seule micro-décharge ou une décharge homogène sur toute la surface des électrodes.

Par la suite, nous noterons  $V_a$  la tension appliquée sur la cellule de décharge,  $V_g$  celle sur le gaz et enfin  $V_{ds}$  celle sur le diélectrique [6]. 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  $V_{ds}$ . 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  $V_a$ , elle cause une chute de la tension appliquée sur le gaz  $V_g$ , ce qui conduit à l'extinction de la décharge. Ainsi, la micro-décharge est bloquée bien avant d'avoir atteint un degré d'ionisation suffisant pour transiter en régime d'arc [4].

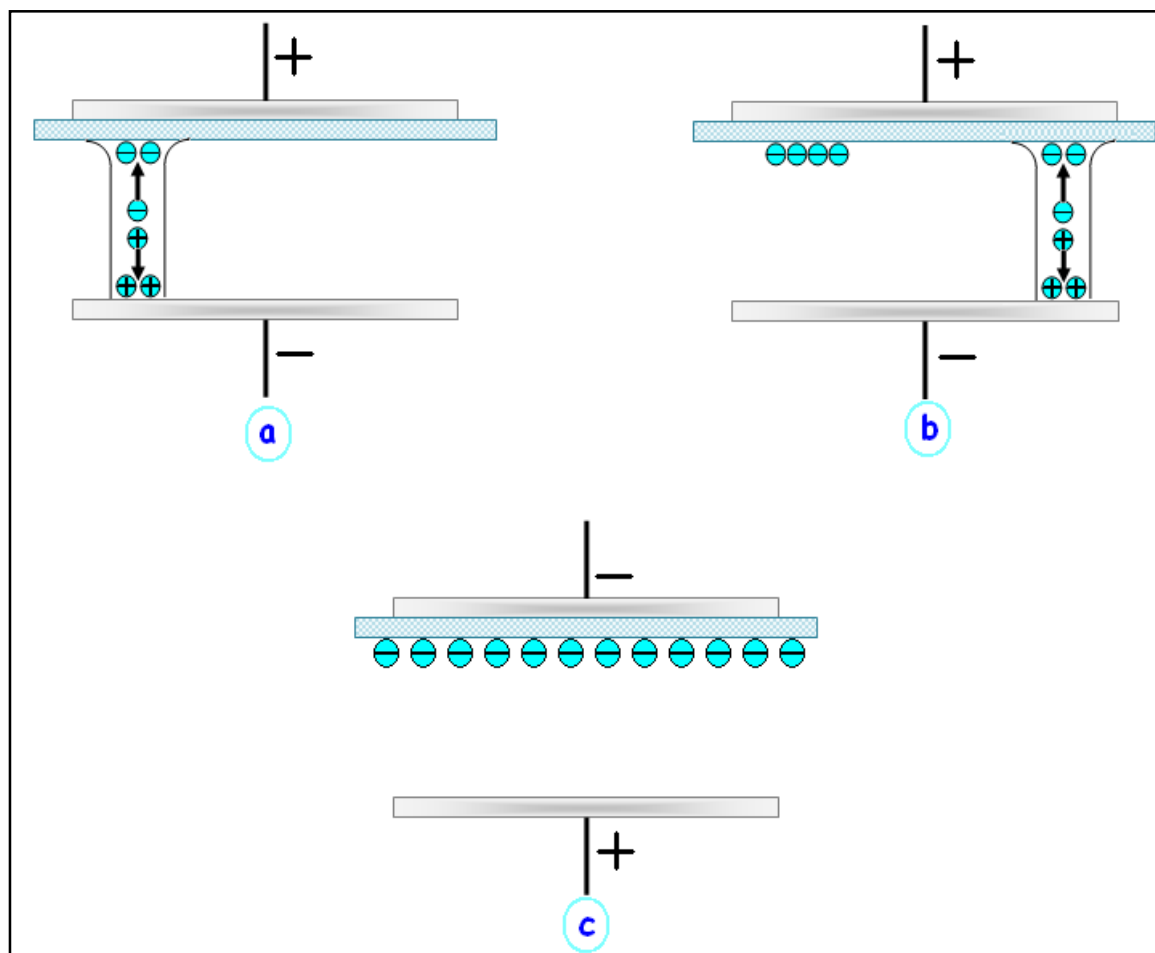
Tant que la tension appliquée augmente, des micro-décharges s'initient à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles sur le diélectrique diminue le champ électrique appliqué sur le gaz aux positions où des micro-décharges se sont déjà développées (Figure 1.4-b).

Au changement de polarité (Figure 1.4-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 pas 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 1.4.** Principe de fonctionnement d'une DBD : (a) établissement d'une première micro-décharge, (b) extinction de la première micro-décharge et amorçage d'une nouvelle, (c) changement de la polarité appliquée sur les électrodes

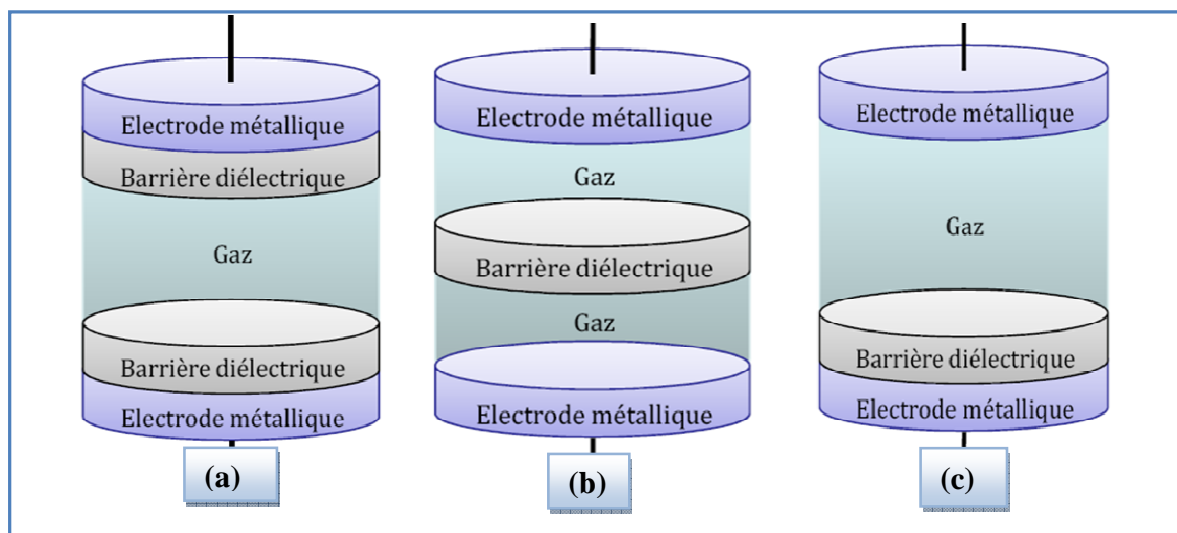
## I.2.2. Configurations typiques de DBD

Selon la nature de décharge, on distingue deux configurations volumiques et surfaciques.

### I.2.2.1. Configurations des DBDs volumiques

Outre la configuration classique présentée précédemment (Figure 1.4), il existe d'autres configurations couramment utilisées. En effet, le terme de DBD regroupe toutes les configurations de cellule de décharge pour lesquelles un courant transite entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant.

Suivant l'application visée, deux couches isolantes peuvent y être placées. Les configurations coplanaires et cylindriques typiques d'électrodes sont données en Figure 1.5.



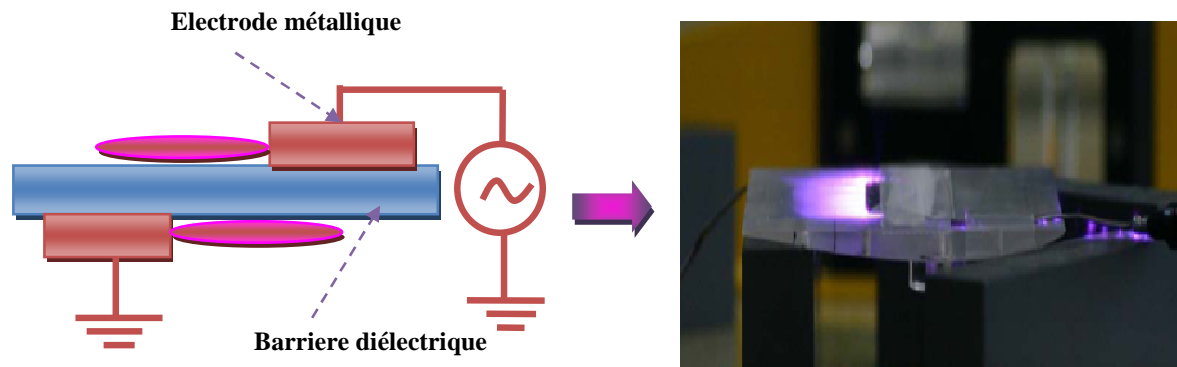
**Figure 1.5.** Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD)

Les configurations coplanaires sont plutôt utilisées pour les applications de traitements de surface tandis que les cylindriques sont plus adaptées aux traitements des gaz. L'arrangement plan-plan (a) de la Figure 1.5 présente l'avantage d'éviter tout contact entre le plasma et les électrodes métalliques, condition parfois utile lors de l'utilisation de plasma corrosif par exemple.

La configuration (b) permet l'obtention simultanée d'une décharge de part et d'autre du diélectrique, propriété intéressante si, par exemple, la barrière diélectrique est réalisée à l'aide du matériau à traiter. Dans ce cas, le matériau est traité sur les deux faces simultanément [6].

### 1.2.2.2. Configurations des DBDs surfaciques

A la fin des années 90 aux Etats-Unis, le Pr Roth met au point une nouvelle configuration de DBD de surface et qu'il nomme « OAUGDP » (One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma). Cette décharge est établie entre au moins deux électrodes placées de part et d'autre d'un diélectrique et est dite surfacique car il n'y a plus, comme précédemment, d'espace gazeux entre les électrodes (le diélectrique occupant tout l'espace inter-électrodes) (Figure 1.6) [7].



**Figure 1.6.** Configurations de décharges de surface

### 1.2.3. Les matériaux diélectriques

Un matériau diélectrique est un milieu qui ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique.

Mais : les charges peuvent se déplacer localement et entraîner une variation des charges (polarisation).

Quelques milieux diélectriques solides usuels

- Le verre, utilisé pour faire des isolateurs de lignes haute tension
- La céramique, très utilisée pour les matériels HTB des postes électriques
- La plus part des plastiques
- Le Polypropylène, utilisé en particulier dans les condensateurs.

Un matériau diélectrique est caractérisé d'un point de vue électrique par sa constante diélectrique (permittivité). Elle permet de décrire la facilité qu'a un *diélectrique* à se polariser.

La constante diélectrique  $\epsilon$  (grandeur tensorielle) dépend de :

- **De la fréquence** : à laquelle le champ électrique est appliqué. La variation de la constante diélectrique complexe en fonction de la fréquence est directement reliée au mouvement d'oscillation des atomes et des électrons du diélectrique.
- **De la température T** : Ceci est une conséquence du point précédent, car le mouvement de vibration des atomes dans un diélectrique dépend de la température [8].

#### 1.2.4. Méthode pour éviter la transition à l'arc

Afin d'éviter la transition en régime d'arc, plusieurs solutions sont généralement employées à pression atmosphérique. Les principales consistent à :

- **diminuer le produit p.d** afin de se ramener à des valeurs similaires à celles obtenues à basse pression. En effet, nous avons vu précédemment que pour des valeurs du produit p.d inférieures à quelques Torr.cm le claquage obtenu est de type Townsend et non plus de type streamer. Ainsi typiquement, il faut utiliser des distances inter-diélectriques de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{m}$ .

- **localiser la décharge** en utilisant une répartition non uniforme du champ électrique afin d'éviter de court-circuiter les électrodes par un canal de décharge : il s'agit des décharges couronnes.

- **limiter le courant fourni par l'alimentation** en plaçant en série avec la cellule de décharge un ballast selfique qui limitera la vitesse de variation du courant ou bien un ballast résistif qui entraîne une chute de la tension appliquée sur le gaz lors de l'augmentation du courant de décharge.

- **insérer un diélectrique entre les deux électrodes**, on parlera dans ce cas de Décharge contrôlée par Barrière Diélectrique (DBD).

- **préioniser le gaz et utiliser une source de tension impulsionnelle**, outre le fait d'éviter la transition à l'arc, cela permet surtout d'homogénéiser la décharge [9].

#### 1.2.5. Paramètres de la décharge

Puisque le développement des micro-décharges se produit à une échelle de temps de l'ordre de la nanoseconde et le cycle de fonctionnement dans la plupart des applications est d'une durée beaucoup plus longue, les DBDs sont normalement caractérisées par un grand nombre de micro-décharges par unité de surface d'électrode et par cycle. Une valeur typique est environ 10<sup>6</sup> micro-décharges par  $\text{cm}^2$  par seconde. Pour une configuration donnée et des paramètres fixes, toutes les micro-décharges sont de nature semblable. Elles sont amorcées à une tension de claquage bien définie, et finissent après un écoulement de courant ou un transfert de charge bien définis [10].

La figure 1.7 montre les micro-décharges dans un intervalle de 1 mm dans l'air à pression atmosphérique, photographie par le biais d'une électrode transparente (échelle réelle) [4].

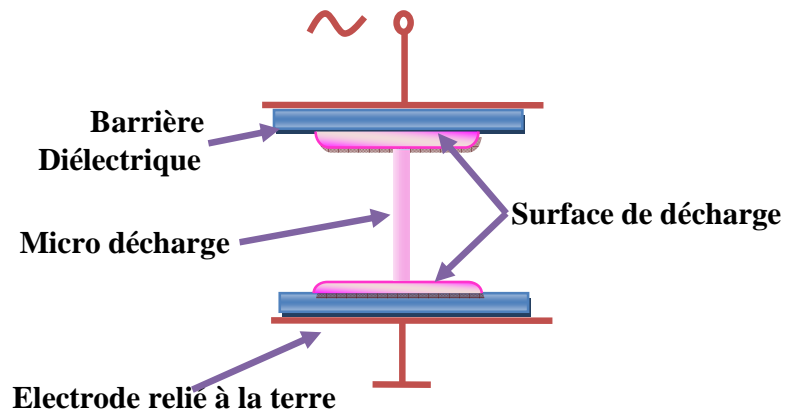


**Figure 1.7.** *Quelques modèles de filament (micro-décharges) d'une DBD*

Le plus souvent, l'apparence de la DBD a haute pression, est celle montrée à la figure ci-dessus. Elle est caractérisée par un grand nombre micro-décharges de courte durée. Chaque micro-décharge est presque un canal de plasma cylindrique, généralement d'environ 100  $\mu\text{m}$  de rayon, et occupe une plus grande surface sur l'électrode à barrière diélectrique [4].

#### **I.2.5.1. Les micro-décharges de la DBD**

En appliquant un champ électrique élève il y a amorçage d'un claquage dans l'intervalle. Tant que la tension appliquée augmente, les micro-décharges (Figure 1.8 et 1.9) occupent des surfaces de plus en plus étendues sur le diélectrique. Ainsi, le diélectrique a un double objectif. Il limite la quantité de charge et l'énergie donnée à chaque micro-décharge et, en même temps, distribue les micro-décharges sur l'ensemble de la zone de l'électrode. La quantité de charge typique transportée par chaque micro-décharge est de l'ordre de 100 pC, et la quantité typique de l'énergie est de l'ordre de  $\mu\text{J}$ . Par conséquent, la dissipation d'énergie par minute produite par une seule micro-décharge, représentant l'effet de chauffage local d'une impulsion de courant, est faible ; dans l'air en général elle est inférieure à 10 °C dans des intervalles de décharge faibles [4, 11].



**Figure 1.8.** Représentation d'une micro-décharge



**Figure 1.9.** Photo de la décharge lumineuse générée entre deux électrodes planes recouvertes d'un diélectrique

Les caractéristiques des micro-décharges sont données ci-dessous :

- Durée:  $10^{-9}$  à  $10^{-8}$  s
- Rayon du canal:  $10^{-4}$  m
- Crête du courant : 0,1 A
- Densité de courant:  $10^{-6}$  à  $10^{-7}$  A/m<sup>2</sup>
- Charge totale :  $10^{-10}$  à  $10^{-9}$  C
- Densité d'électrons :  $10^{20}$  à  $10^{21}$  m<sup>3</sup>
- Energie d'électron moyenne : 1-10 eV
- Température du canal : proche de la température ambiante du gaz

La recherche sur les DBDs a mis l'accent sur l'adaptation et l'amélioration des caractéristiques des micro-décharges en faisant usage des propriétés de gaz spéciaux, en ajustant la pression et la température, et en optimisant la géométrie des électrodes, ainsi que les propriétés du diélectrique [4, 11].

### 1.2.5.2. Caractérisation électrique des micro-décharges

L'allure des micro-décharges est illustrée à la figure ci-dessous, par des pics courts dans les parties ascendantes et descendantes de la tension.

Chaque micro-décharge induit une impulsion de courant visible sur la mesure du courant (Figure 1.10). Lorsque ces micro-décharges se développent indépendamment, l'oscillogramme du courant est constitué d'une multitude d'impulsions comme le montre la figure ci-dessous.

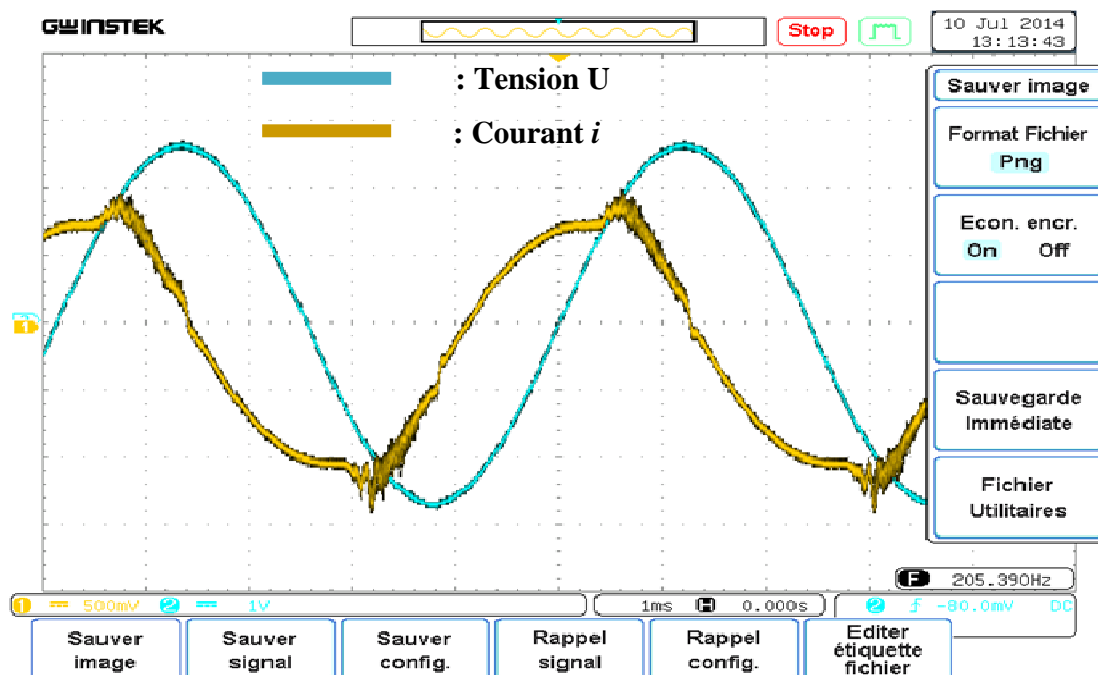
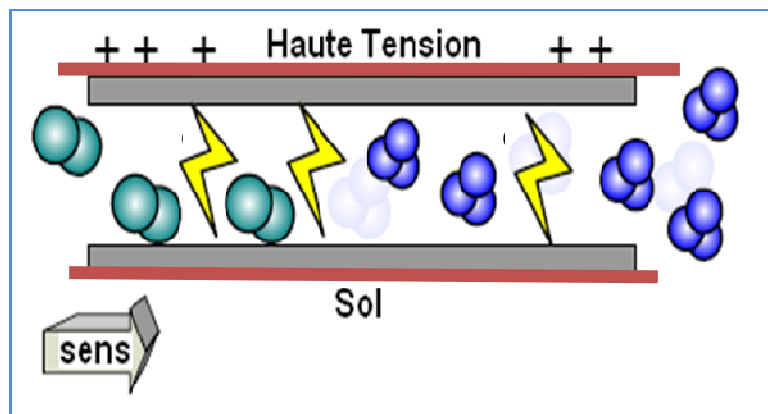


Figure 1.10. Oscillogramme d'une décharge DBD

### 1.3. Production d'Ozone par DBD

Après que l'ozone était identifié en 1839 comme un nouveau composé chimique, Werner Siemens, en 1857, 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. Les deux gaz, l'oxygène et l'air, sont encore utilisés aujourd'hui pour la génération industrielle d'ozone [12, 13].

L'appareil de décharge est constitué de deux plaques de métal séparées par une couche d'air et un isolant électrique de constante diélectrique élevée, comme le mica ou un verre borosilicaté. Une différence de potentiel élevée est appliquée entre les deux plaques, 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.1.11) [12-15].



**Figure 1.11.** Production d'ozone par décharge à barrière diélectrique

Souvent perceptible, au cours des décharges électriques, ainsi que dans la proximité d'équipements électriques, selon ce qu'a mis en évidence le philosophe hollandais Van Marun, en 1785. L'ozone est présent en larges quantités à une certaine hauteur d'atmosphère généralement entre 32 et 48 km d'altitude et se nomme ozonosphère. Sur terre, nous sommes protégés parce que presque toutes les radiations des rayons ultra-violetts sont absorbées constamment, créant et détruisant les molécules d'O<sub>2</sub> et d'O<sub>3</sub>, pour cela on peut dire qu'avant l'ozone, il n'y avait pas de formes vivantes sur terre [16-17].



L'ozone est une forme allotropique de l'oxygène formée de trois atomes de cet élément, Dans son état fondamental, la molécule d'ozone présente deux liaisons oxygène-oxygène d'une longueur de  $1,278 \pm 0,003 \text{ \AA}$  et un angle de  $116,45^\circ$ . Elle possède un faible moment dipolaire de 0,53 Debye dont la fonction la plus connue est la protection contre les dangereuses radiations ultraviolettes du soleil mais c'est aussi un puissant oxydant et un puissant désinfectant ayant une grande variété d'utilisation, la plus remarquable est la désinfection des eaux. Dans les conditions normales de température et de pression, l'ozone est treize fois plus soluble dans l'eau que le dioxygène. Il est, après le fluor, le composé le plus oxydant grâce à sa faculté de capter des électrons, de décomposition rapide et, dans les mêmes conditions, il est plus stable dans l'eau que dans l'air. Il s'agit d'un gaz bleu pale et instable qui, à la température ambiante, se caractérise par une odeur piquante [18-19].

### 1.3.1. Inconvénients et Avantages de l'ozone

Les inconvénients de l'ozone sont compensés par une série d'avantages qui rendent l'ozone très intéressant dans nombre d'applications industrielles.

#### a. Inconvénients de l'ozone

- **Investissement plus élevé** : l'expression usine à gaz est certainement appropriée dans le cas de l'ozonisation, puisque ce gaz est produit sur place : il en résulte que le coût d'exploitation est réduit par rapport à des systèmes où l'on doit acheter le désinfectant, par contre l'installation est inévitablement plus complexe et plus coûteuse.
- **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.
- **Consommation en énergie plus élevée**, puisque l'ozone est produit par décharge électrique [20-22].

#### b. Avantages de l'ozone

- Pas de dérivés dangereux, contrairement au chlore
- La courte durée de vie le retour à l'oxygène ne laisse pas de résidu.

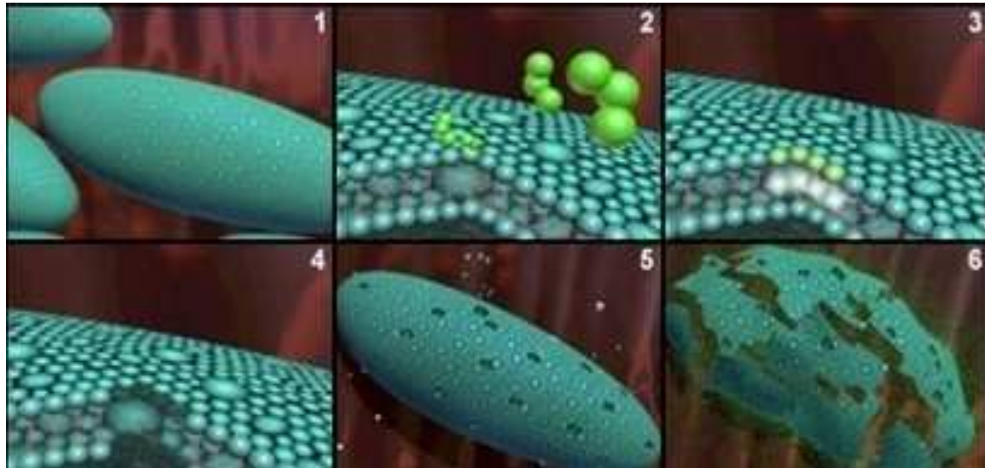
- Pas de stockage de produits dangereux
- Oxydation très complète
- Se décompose ou s'enlève facilement
- Efficace contre toute substance organique – la bactérie, les virus, les mycètes, les spores, le protozoaire, les pathogènes fongiques, les ferments, les kystes, les algues.
- Propriétés pour éliminer les graisses.
- Ozone créé au point d'usage – aucun emmagasinage ou transport de produits chimiques hasardeux exigés.
- Ne produit pas de dérivés toxiques si consommé, contrairement au chlore [21-24].

### 1.3.2. Instabilité de l'ozone

**Demi-vie** : période pendant laquelle la concentration d'ozone diminue de moitié. L'ozone possède un temps de demi-vie maximum d'une demi-heure. Ce temps de demi-vie signifie qu'après 1/2 heure, la moitié de l'ozone résiduel aura été dégradé. En pratique, le temps de demi-vie est inférieur à 30 minutes, à cause de la présence de bactéries et autres contaminants dans l'air. L'ozone est donc composé très puissant, mais de durée de vie courte... il fait son travail et disparaît [22].

### 1.3.3. Réactions de l'Ozone Devant les bactéries, virus et germes

L'ozone sert essentiellement pour la désinfection contre les bactéries, virus, germes et les odeurs. Les bactéries sont des créatures microscopiques, monocellulaires ayant une structure primitive. La bactérie est recouverte d'une membrane relativement résistante. L'ozone se heurte à la paroi de la bactérie, une quantité suffisante d'ozone passe à travers la membrane cellulaire et cela mène à la destruction des bactéries. La Figure 1.11 montre les étapes d'oxydation des bactéries par l'ozone.



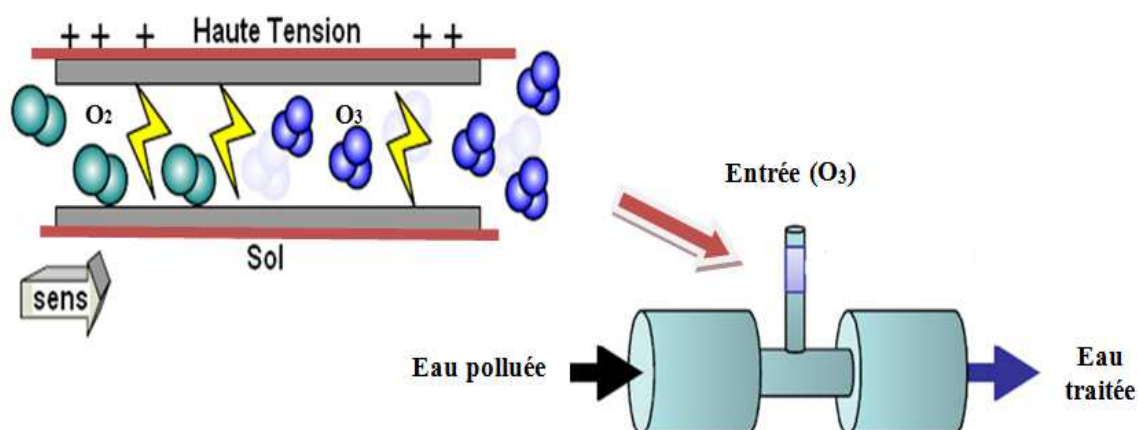
**Figure 1.12.** *Effets de l'ozone sur les bactéries*

1. Image d'une cellule de bactéries
2. Gros plan d'une molécule d'ozone entrant en contact avec mur bactérien
3. Ozone pénétrant et créant un trou dans mur bactérien
4. Gros plan - Effet de l'ozone sur la paroi cellulaire
5. Quelques molécules d'ozone rentrent en contact avec la cellule bactérienne
6. Destruction de la cellule par l'ozone [25-28].

#### 1.3.4. Traitement des eaux par l'ozone

L'ozone a plusieurs applications à savoir la désinfection de l'air mais la plus célèbre sert essentiellement au traitement de l'eau [29-31], en éliminant les bactéries, les virus et les odeurs désagréables. La production d'ozone «  $O_3$  » à pression atmosphérique, est réalisée à partir de l'air «  $O_2$  ».

La figure 1.13 présente le schéma de principe d'un ozoniseur alimenté en oxygène. Ici la DBD est constituée de deux barrières diélectriques coaxiales, la décharge est effectuée dans le volume par lequel le gaz circule. Le courant électrique va convertir une partie du gaz entrant en ozone.

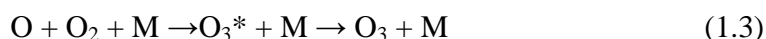


**Figure 1.13.** Schéma de principe d'un ozoniseur utilisé dans le traitement d'eau

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.



Un atome O, s'associe dans un état excité, avec une molécule O<sub>2</sub>, à l'aide d'une troisième espèce M ; ce troisième composant peut être par exemple O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, O. L'état excité généré O<sub>3</sub><sup>\*</sup>, revient à l'état stable le plus proche, correspondant à l'ozone O<sub>3</sub>.



Le système de mélange de l'ozone avec l'eau " La partie la plus importante dans une installation d'ozonisation de l'eau. Le system mélangeur à tube Venturi devient le plus fiable possible grâce à son rendement [26].

La figure 1.13 illustre le principe de fonctionnement du mélangeur a tube Venturi. Le tube Venturi prend son nom de « l'Effet Venturi », qui dit que, si la section d'écoulement diminue, alors la pression diminue aussi et ainsi réaliser une aspiration. Le transfert de l'ozone de la phase gazeuse à la phase liquide se fait en aval du mélangeur, dans un réservoir prévu à cet effet. Un temps de contact de l'ordre de 12 à 15 secondes est suffisant pour obtenir une efficacité de transfert de masse de l'ozone de 90% ou plus [27].

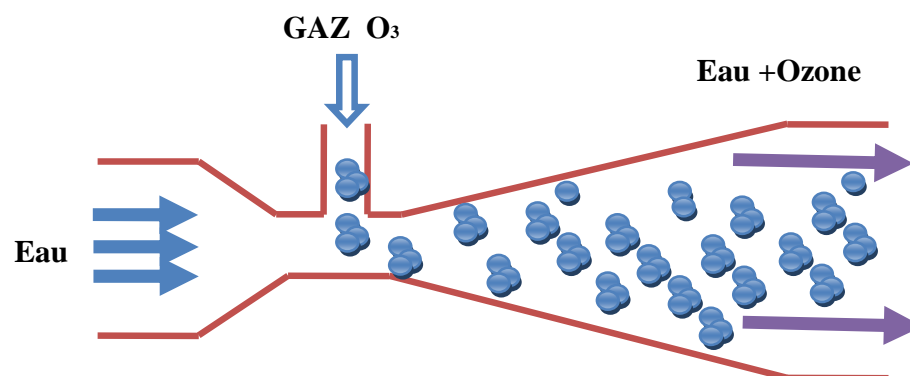


Figure. 1.14. *Injecteur Venturi : principe*

Il existe actuellement cinq méthodes courantes pour la désinfection de l'eau dans l'industrie:

- La chloration de l'eau
- La stérilisation par les rayons U.V
- **L'ozonisation**
- La microfiltration
- L'ultrafiltration [32].

#### 1.3.4.1. Comparaison entre les méthodes de désinfection

Les motifs d'utilisation de la désinfection par l'ozone apparaissent lorsqu'on le compare avec les autres méthodes de désinfection. Il présente une série d'avantages par rapport au chlore. Il est employé, et ce, malgré le coût souvent significatif d'une installation d'ozonisation de l'eau. Ces avantages sont les suivants :

- il ne reste pas présent dans l'eau ;
- il ne provoque pas l'apparition de produits organochlorés, qui peuvent être cancérigènes ;
- il ne laisse pas de mauvais goût peu apprécié des consommateurs d'eau potable.
- L'ozone détruit la bactérie 3500 fois plus rapidement que le chlore.

Le tableau 1.1 montre les coefficients de mortalité biologique des désinfectants communs

**Tableau 1.1.** Coefficients de mortalité biologique des désinfectants communs

Désinfectant	Entérobactéries	Virus	Bactériales-spores	Amoebic Cysts
O <sub>3</sub>	500	5	2	0.5
HOCL	20	1	0.05	0.05
OCL <sup>-</sup>	0.2	< 0.02	< 0.0005	0.0005
NH <sub>2</sub> CL	0.1	0.0005	0.001	0.02

CBM : haute valeur = haute puissance de désinfection.

Le tableau 1.2 montre la comparaison technique et économique entre les différentes méthodes de désinfections de l'eau.

**Tableau 1.2.** Comparaison entre différentes méthodes de désinfection de l'eau

Critères	Ozone	CHLORE	U.V	μ FILTRATION
Grandeur de l'installation	Grande	Grande	Petite-grande	Très petite
Investissement	Important	Important	moyen	faible
Entretien	Faible	faible	moyen	Important
Utilisation	Complexe	complexe	simple	simple
Rémanence	Moyenne	forte	faible	moyenne
Goût/odeur	Nul	caractéristique	nul	nul
Efficacité germicide	Très bonne	bonne	bonne	bonne
Inefficace contre	aucun	Virus* protozoaires	Algues Moisissures**	virus

Une eau pure met l'accent aujourd'hui sur le traitement de l'eau par l'ozone ou système d'ozonation. Une technique encore peu répandue de par les coûts qu'elle engendre mais qui présente des avantages non négligeables sur notre environnement ainsi que sur la qualité de l'eau provenant du réseau publique [32-35].

### 1.3.4.2. Les domaines d'application de traitement de l'eau par l'ozone

Puisque l'ozone sert essentiellement au traitement des eaux, il est appliqué dans tous les domaines d'utilisations des eaux (la désinfection, Eaux usées, domaines agro-alimentaires...)

#### a. Eau potable

Il est désormais admis qu'une eau destinée à la consommation humaine est désinfectée vis-à-vis des virus et bactéries lorsqu'elle est traitée, l'ozone n'assure pas seulement une bonne désinfection. Son introduction dans la chaîne d'eau potable agit sur d'autres paramètres :

- Ozonation améliore la clarification, l'élimination de certaines matières organiques et favorise l'élimination de nombreux micro-organismes, comme les algues.
- En ozonation, il s'attaque aux 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 [36].

#### b. Eaux usées

L'utilisation de l'ozone pour le traitement des eaux usées est en pleine expansion et inclue déjà la destruction et l'élimination de :

- Molécules organiques complexes en vue d'une meilleure dégradation dans les traitements ultérieurs.
- Odeurs des condensats issus de l'évaporation des eaux de lavages, en vue de leur recyclage
- Couleurs des effluents de teintureries, de papeteries,...
- Tensioactifs de tout effluent de laveries industrielles.
- Odeur : stations résiduaires urbaines, effluent gazeux industriel.

En outre, le traitement final à l'ozone d'une eau résiduaire urbaine, ou combinée à des effluents industriels, permet sa réutilisation pour le lavage, pour l'irrigation ou pour la protection incendie [37].

### c. Eaux des puits

La vitesse à laquelle l'ozone tue les bactéries est trois mille fois supérieure que celle du chlore, du fait que bien qu'ils soient tous deux des oxydants, le mécanisme d'action est différent. L'ozone tue la bactérie via une rupture de la membrane cellulaire, en revanche, le chlore doit s'introduire à travers la paroi cellulaire de la bactérie et diffuser dans le cytoplasme, action qui dépend en grande partie du temps de contact. L'ozone élimine les goûts et les odeurs de l'eau tels que: odeur de chlore, goûts de métaux, odeur d'œuf pourris, etc [38].

### d. Eau de piscine

La qualité de l'eau peut être éminemment améliorée et les coûts peuvent être moindre dans le long terme lorsque de l'ozone est appliquée pour le traitement de l'eau de piscine. Parmi ses avantages

- Supprime l'irritation des yeux, de la peau et du système respiratoire
- Absence d'odeur désagréable de "chlore".
- Moins de produits chimiques à stocker.
- Moins de détérioration du bâtiment.
- Moins d'appoint en eau.

Donc une clarté de l'eau incomparable avec la désinfection par l'ozone [38].

### e. Domaine agro-alimentaire

L'Ozone est utilisé de plus en plus dans les domaines agro-alimentaires notamment lavage des fruits et productions de glace ozoné

#### 1) Lavage de légumes, fruits, poissons et des œufs et les produits alimentaires.

Stériliser l'extérieur des fruits et des légumes avec de l'eau ozonisée peut éliminer les engrais et les bactéries extérieurs et d'autres pathogènes et prolonger la durée de conservation de 3 à 10 fois. Des scientifiques recommandent aussi de nettoyer la surface de la viande, du poisson et crevettes avec de l'eau ozonisée, pour décomposer les restes d'antibiotiques et d'hormones, pour se débarrasser des bactéries et des vers. Ce processus rend la viande sûre et fraîche. Rincer et cuire du riz avec de l'eau ozonisée peut lui enlever l'odeur de moisi et rendre le riz beaucoup plus savoureux [39].



## 2) Production de glace ozonée employée pour la conservation d'aliments

La conservation de la pêche par exemple avec la glace Ozonée et la réfrigération basée sur la technologie de la glace liquide et de son action avec l'ozone évalue la qualité biochimique, physicochimique, sensorielle et microbiologique des sardines conservées dans la glace liquide ozonisée, dans le but d'allonger la vie utile et augmenter le rendement de la pêche (Figure.1.15). Cette technique augmente la vie utile des sardines de 15 jours pour celles traitées avec de la glace liquide ozonisée [40].



**Figure 1. 15.** *Système portable de production d'eau ozonée*

## 3) Ozone dans 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 [40].

### a. Eaux potables pour l'agriculture et l'irrigation.

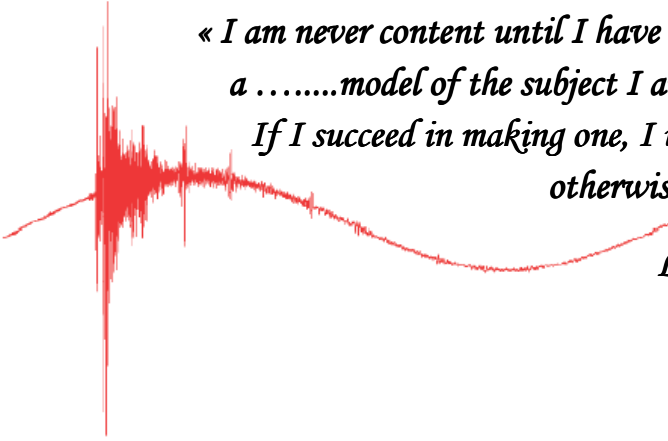
Grâce à ses excellentes qualités de désinfection et d'oxydation, l'ozone est énormément utilisé pour l'eau potable pour l'agriculture et l'irrigation [40].

#### 1.4. Conclusion

Les DBDs et son utilisation pour la production d'ozone constituent des objets d'étude très polyvalents. Dans ce chapitre nous avons introduit le concept de décharge à barrière diélectrique et les éléments physiques qui la caractérisent. Les grandeurs électriques importantes ont été présentées. Ainsi, nous avons présenté de manière bibliographique les propriétés de l'ozone comme un produit industriel (avantages, inconvénients, production ainsi que la désinfection...) qui présentent des solutions écologiques et même économiques dans plusieurs applications par rapport aux autres processus chimiques (chlore, l'esprit de cèdre...).

On s'est basé surtout sur le traitement de l'eau car l'ozone sert essentiellement à cette application (en éliminant les bactéries, les virus et les odeurs désagréables). Dans le prochain chapitre nous allons présenter notre générateur d'ozone à DBD réalisé, en décrivant quantitativement l'influence des paramètres électriques sur le rendement de générateur d'ozone, en analysant l'effet de la forme du signal de la tension appliquée.

CHAPITRE 2  
CARACTERISATION  
ELECTRIQUE DE  
GENERATEUR D'OZONE A  
DECHARGE A BARRIERE  
DIELECTRIQUE



*« I am never content until I have constructed  
a .....model of the subject I am studying.  
If I succeed in making one, I understand;  
otherwise I do not »*

*Lord Kelvin*

## **CHAPITRE 2**

# **Caractérisation électrique de générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique**

L'utilisation d'une décharge à barrière diélectrique volumique pour la production d'ozone a été considérée et étudiée durant ces dernières années, en se basant sur l'influence de paramètres électriques sur la production d'ozone et la puissance consommée. Cependant, peu d'études ont examiné l'influence de la forme du signal de la tension appliquée au générateur d'ozone en cherchant la forme adéquate pour que la production d'ozone soit maximale et la puissance consommée soit minimale.

Le but de ce chapitre est de décrire quantitativement l'influence des paramètres électriques sur le rendement de générateur d'ozone, en analysant l'effet de la forme du signal de la tension appliquée. Il s'agit d'étudier l'influence des signaux électriques, de façon à pouvoir analyser, comprendre et interpréter les résultats afin de les utiliser ultérieurement pour aider à réaliser des alimentations électriques dont la forme du signal soit adéquate pour un rendement de production d'ozone optimal.

### **2.1. Paramètres électriques**

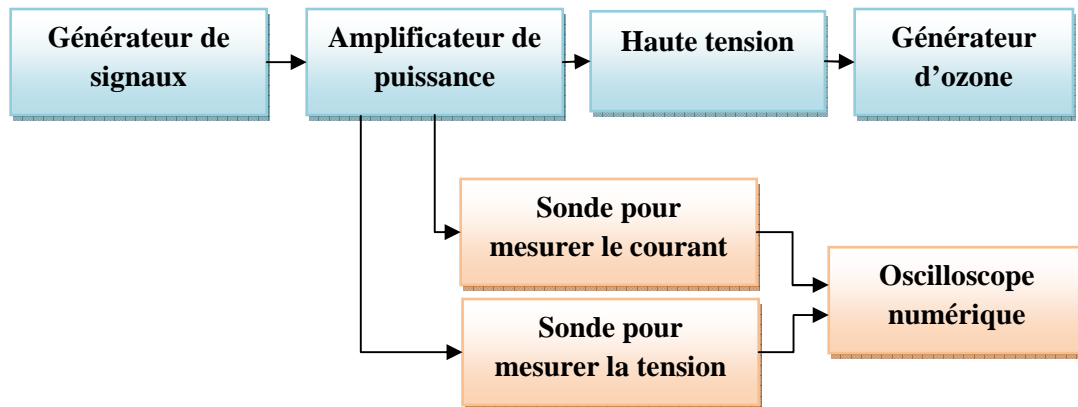
Le but de cette partie est de mieux examiner l'influence de la forme des signaux de la tension appliquée au réacteur à DBD sur la concentration d'ozone et la puissance consommée. Les signaux utilisés sont : sinusoïdal, triangulaire et rectangulaire.

Les figures 2.1 et 2.2 représentent le schéma synoptique et une photographie du dispositif expérimental utilisé.

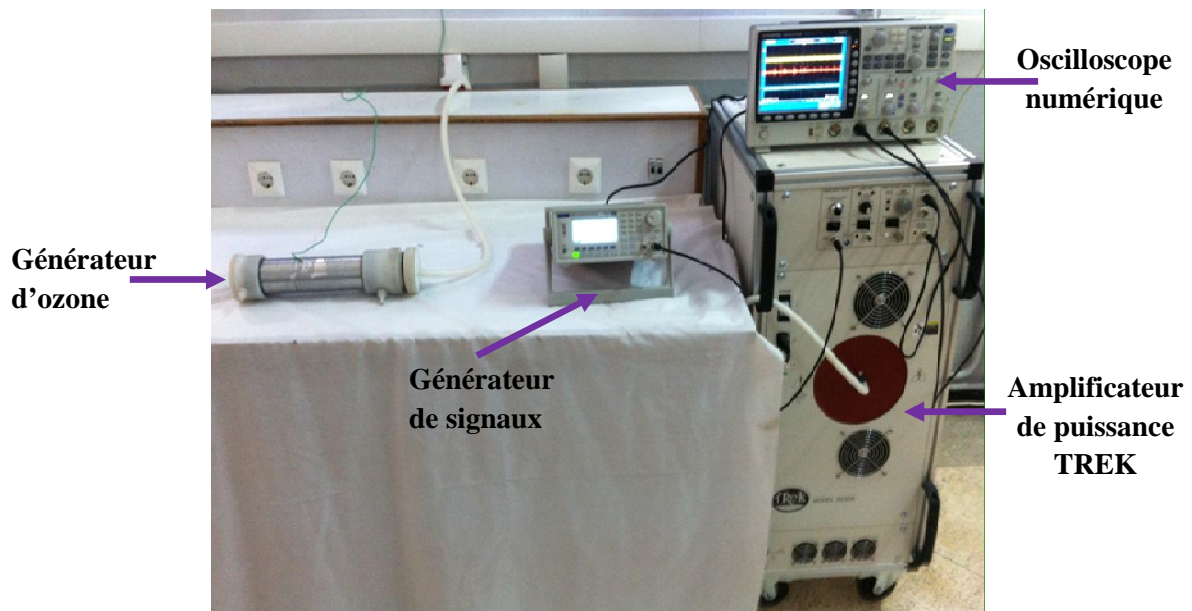
L'alimentation électrique utilisée comprend deux éléments principaux, un amplificateur de puissance (TREK 30/20A) et un générateur de signaux électrique (Toellener toe 7301) qui délivre des signaux alternatifs avec une gamme de fréquence réglable de 0 à 3 kHz, pour alimenter le générateur d'ozone.

Les caractéristiques de l'amplificateur de puissance sont les suivantes :

- Tension de sortie : 0 à  $\pm 30$  kV CC ou CA crête
- Courant de sortie : 0 à  $\pm 20$  mA DC ou AC crête
- Rapport de multiplication: 3000



**Figure. 2.1.** Schéma synoptique du dispositif de mesure de tension, du courant et de la puissance dans le générateur d'ozone



**Figure. 2.2.** Photographie du dispositif expérimental

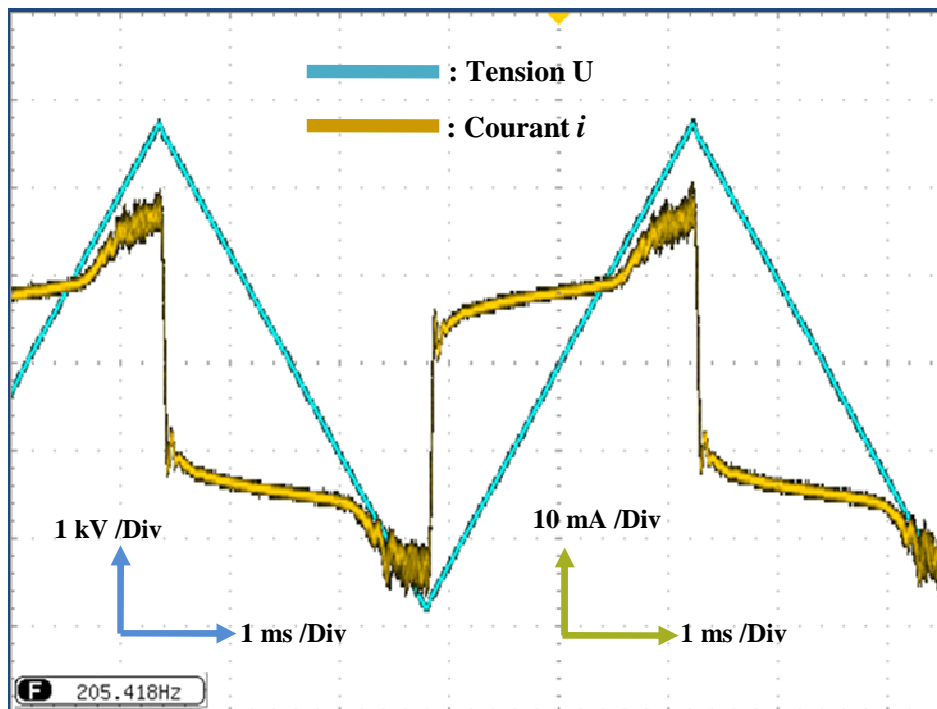
La tension  $V$  délivrée par l'amplificateur de puissance appliquée au générateur d'ozone et le courant  $I$  ont été mesurés à l'aide d'un oscilloscope numérique (GWINSTEK GDS-3153). Pour que le générateur d'ozone soit compatible avec la source haute tension et dont le but d'éviter la déformation des signaux.

Le générateur d'ozone utilisé dans cette étude, est un réacteur à décharge à barrière diélectrique de la forme cylindrique dont l'électrode haute tension interne est une bande en adhésif aluminium insérée et collée à l'intérieur d'un tube en verre ; celui-ci, agissant comme une barrière diélectrique d'une épaisseur de 2,5 mm, a un diamètre extérieur de 50 mm.

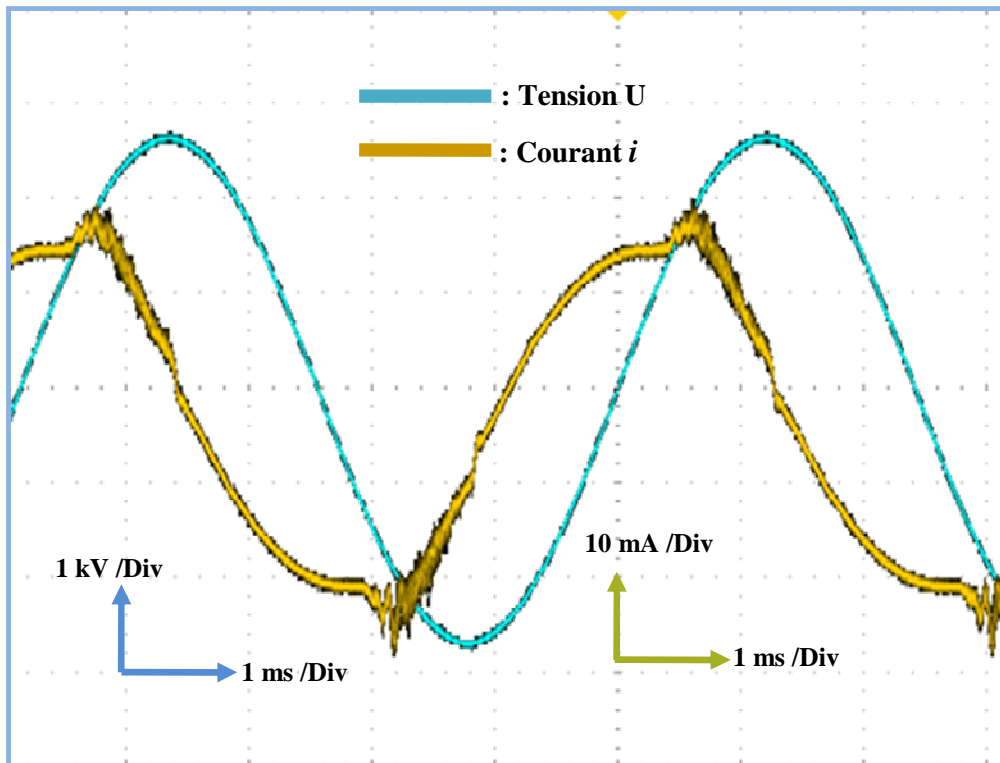
L'électrode cylindrique reliée à la terre est un tube en acier inoxydable de 250 mm de longueur, en diminuant la longueur de l'électrode interne en adhésif aluminium  $L= 50$  mm car l'amplificateur TREK est conçu pour fonctionner avec une capacité plus faible [41].

L'application de divers signaux de tension sur le générateur d'ozone provoque des allures de courant qui diffèrent entre eux selon le type du signal de la tension appliquée. L'ensemble de trois signaux électriques de tension et de courant sont enregistrés par oscilloscope numérique et représentés dans les figures 2.3, 2.4 et 2.5.

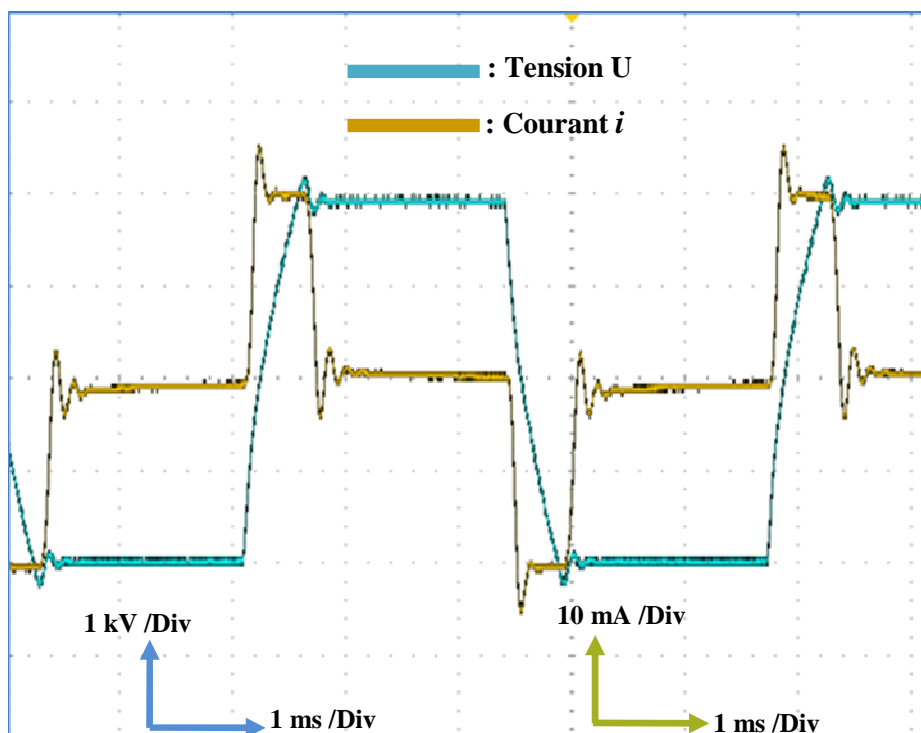
Ces trois figures montrent que le courant prend sa valeur maximale positive ou négative dans les zones où la tension est variable ce qui prouve que le réacteur DBD est une charge capacitive ( $i = c \frac{\partial U}{\partial t}$ ). Par contre la présence de micro-décharges est visible dans les courants caractérisés par des signaux de tension sinusoïdale et triangulaire.



**Figure. 2.3.** Signaux électriques du courant et de la tension, dans une DBD avec un signal triangulaire



**Figure. 2.4.** Signaux électrique du courant et de la tension, dans une DBD avec un signal sinusoïdale



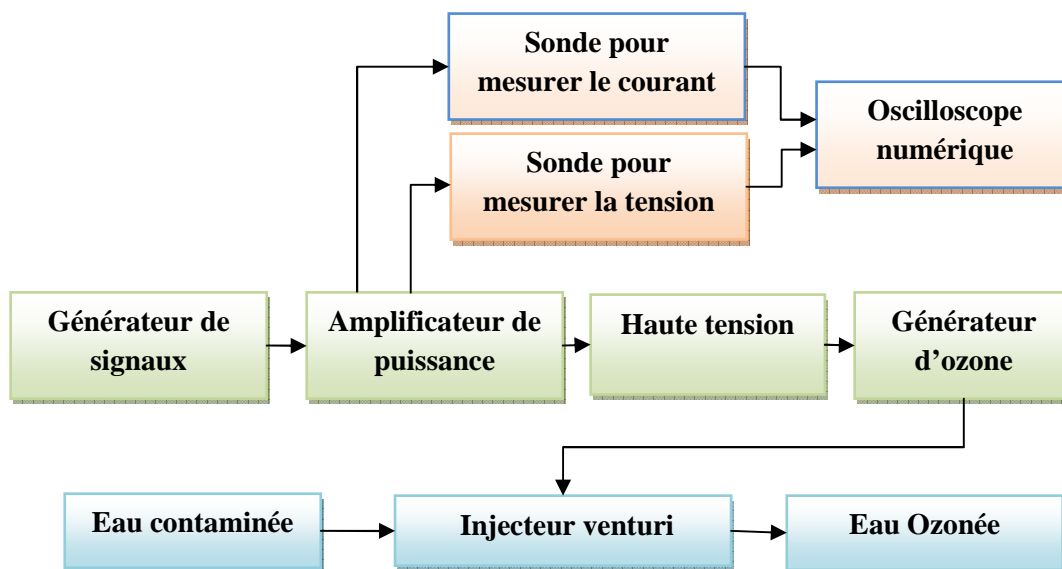
**Figure. 2.5.** Signaux électriques du courant et de la tension, dans une DBD avec un signal rectangulaire.

## 2.2. Influence de la forme de signal de tension sur la production d'ozone

Afin de quantifier l'influence de la variation des paramètres électriques sur la production d'ozone, nous avons utilisé le dispositif expérimental représenté et décrit aux figures 2.6 et 2.7, en utilisant le générateur d'ozone décrit au début de ce chapitre.

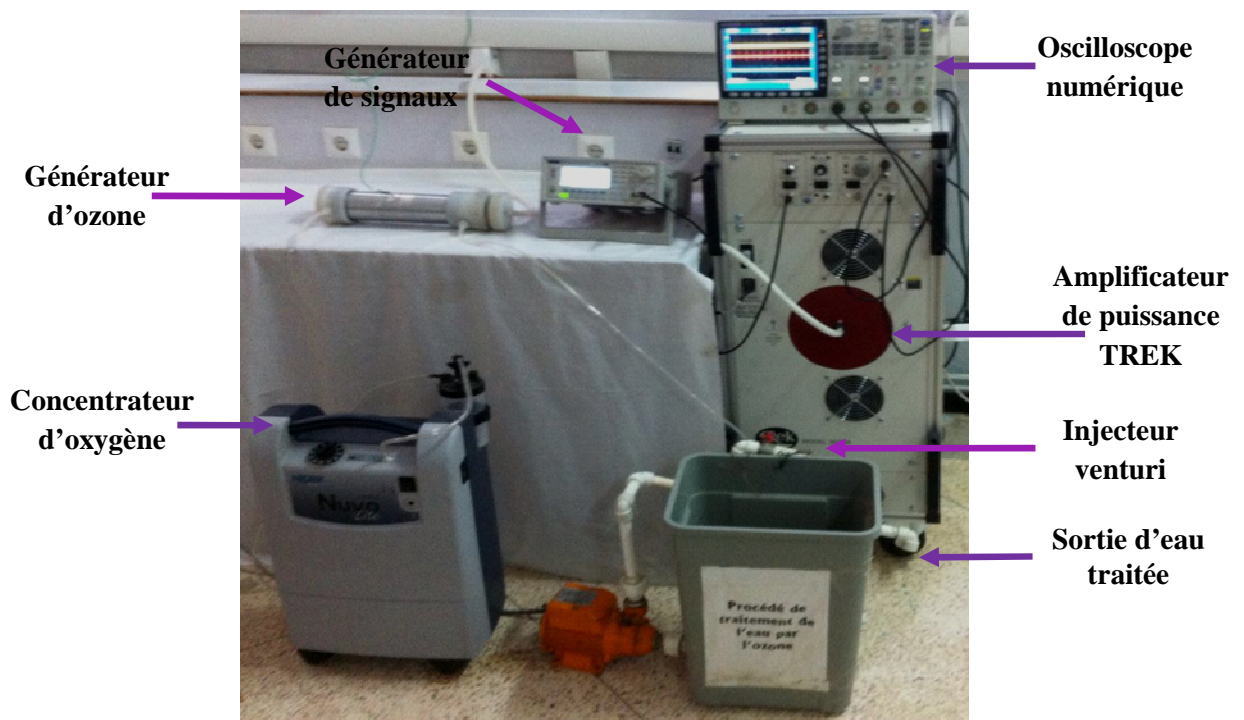
L'eau à traiter est mise en mouvement au moyen d'une pompe à eau. Un système Venturi permet l'injection d'ozone dans la boucle de l'eau, l'eau ozonée est ainsi considérée comme de l'eau traitée. L'ozone est généré à l'aide d'un générateur d'ozone qui est alimenté par un concentrateur d'oxygène (NIDEK médical Nuvo Lite Mark), avec un débit constant de 5 l/min.

La concentration d'ozone dans l'eau (mg/l) a été mesurée avec un mesureur d'ozone dissous dans l'eau (Eco Sensors/Etats-Unis). Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions climatiques stables de température (20-25 ° C) et d'humidité (60 à 70 %).



**Figure. 2.6.** Schéma synoptique du dispositif de mesure et traitement d'eau.





**Figure. 2.7.** Photographie du dispositif de mesure et traitement d'eau.

### 2.2.1. Influence des paramètres électriques sur la concentration d'ozone

La production d'ozone est influencée par les paramètres électriques de la décharge, à savoir la tension appliquée au réacteur qui doit être supérieure à la tension critique de la décharge ainsi la fréquence qui doit être proche de la valeur de résonance. Dans cette partie, nous avons examiné l'influence de ces paramètres en utilisant trois signaux électriques ; sinusoïdal, triangulaire et carré. Les figures 2.8, 2.9 et 2.10 représentent la Variation de la puissance en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension les trois tensions, pour  $V = 7, 9$  et  $12$  kV.

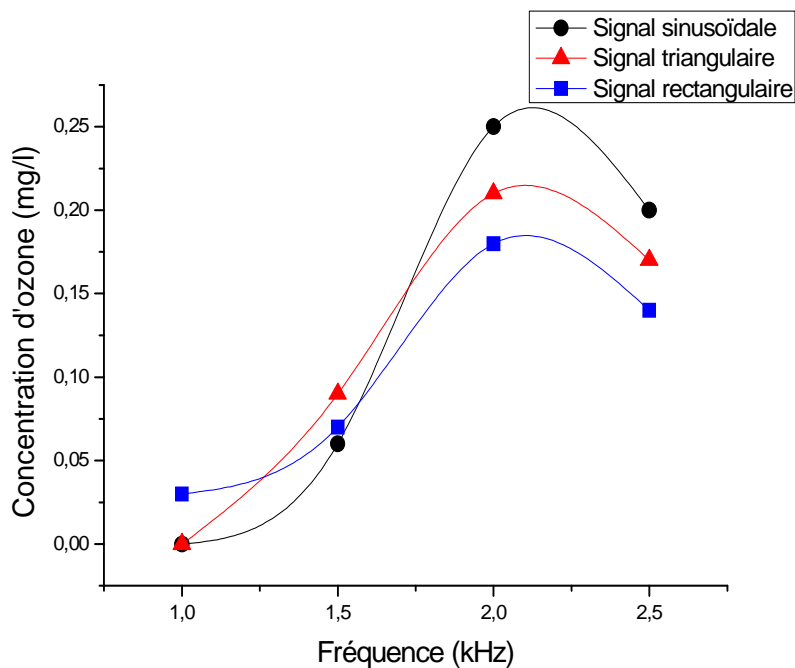
Les résultats montrent que la concentration d'ozone est très influencée par la variation de la tension appliquée au réacteur pour les trois types de signaux. Il ressort de ces caractéristiques que la production d'ozone augmente quasi linéairement avec l'augmentation de la tension. Notons que cette augmentation est variée de 30 % à 130 % en augmentant la tension de 7kV à 12kV.

Cela pourrait s'expliquer par le fait que l'augmentation de la tension fait augmenter le nombre des micros-décharges par unité de surface, et fait augmenter aussi l'énergie d'ionisation dans l'espace de décharge qui finit par produire plus d'atomes d'oxygène et par conséquent plus de molécules d'ozone.

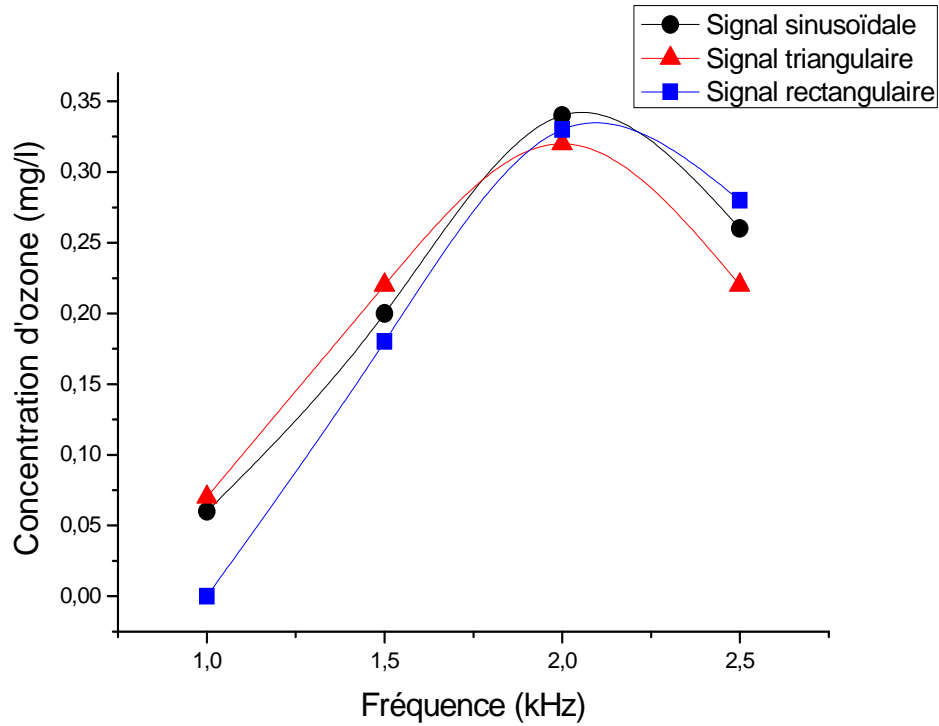
En outre, ces résultats montrent que la concentration d'ozone augmente en fonction de la fréquence jusqu'aux valeurs maximale à une fréquence de  $f= 2$  kHz puis elle diminue, pour tous les signaux et les tensions. Cela pourrait s'expliquer d'un côté par le fait que l'augmentation de la fréquence fait augmenter le nombre des micros-décharges par unité de temps, et que cette valeur représente la fréquence de résonance pour laquelle la décharge est maximale.

En comparant les résultats des trois signaux, on constate que la différence entre les valeurs optimales de la concentration d'ozone ne dépasse pas  $\Delta C= 0.05$  mg/l pour une tension  $V= 7$  kV et une différence  $\Delta C= 0.025$  mg/l pour des tensions  $V= 9$  kV et 12 kV. Notant aussi que la meilleure valeur de la concentration d'ozone a été mesurée à une tension de  $V=12$  kV (signal triangulaire) avec une valeur  $C=0.65$  mg/l.

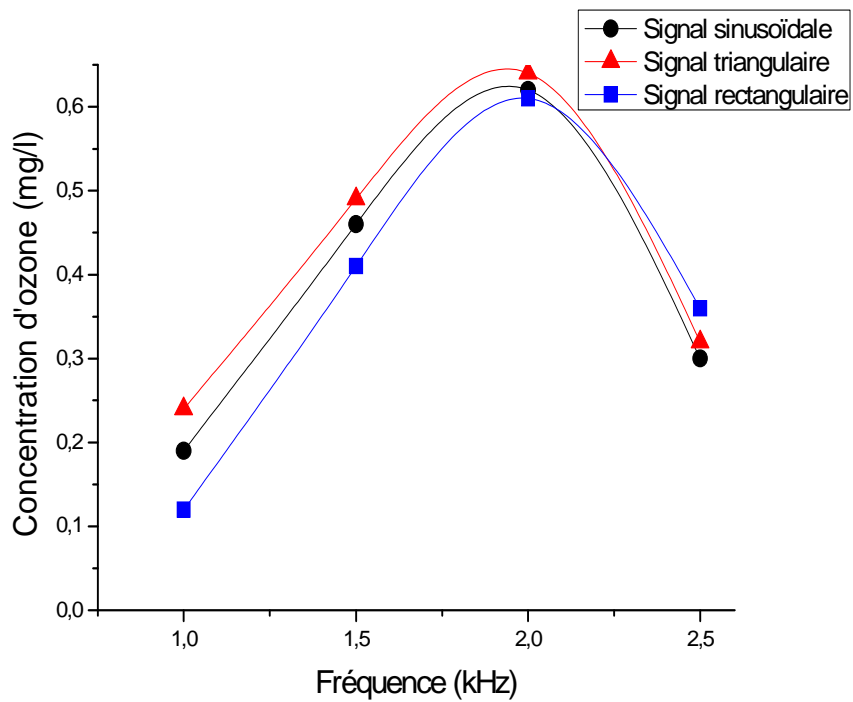
C'est-à-dire, quelque soit la forme du signal, la concentration d'ozone atteint la valeur maximale d'environ 0.6 mg/l, qui semble être indépendante de la forme de la tension.



**Figure. 2.8.** Variation de la concentration d'ozone en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U= 7$  kV)



**Figure. 2.9.** Variation de la concentration d'ozone en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U = 9 \text{ kV}$ )



**Figure. 2.10.** Variation de la concentration d'ozone en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U = 12 \text{ kV}$ )

### 2.2.2. Calcul de la puissance

Le calcul de la puissance est obtenu en effectuant le produit de la tension d'alimentation par le courant de décharge.

Lorsque le signal est périodique, la puissance est donnée par la relation suivante :

$$P = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T U(t) \cdot I(t) \cdot dt \quad (2.1)$$

Avec P = puissance (W)

U(t) = tension appliquée (V)

I(t) = courant de décharge (A)

Dans le cas de notre configuration expérimentale, l'amplificateur de puissance TREK dispose de deux voix pour mesurer la tension U(t) et le courant I(t).

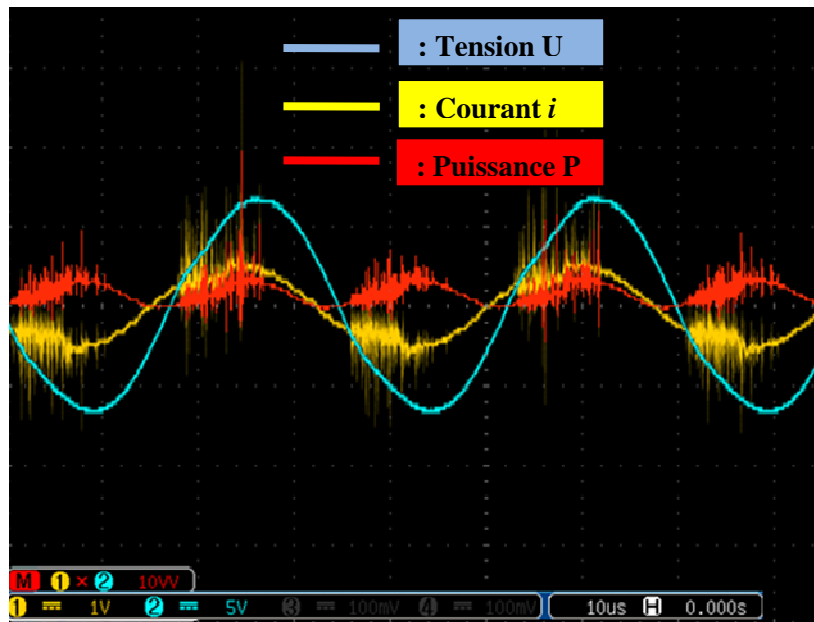
U(t) est la mesure de la voix de tension multipliée par le coefficient de la sonde intégrée dans le TREK (coefficient égale à 3000).

I(t) est la mesure de la voix du courant divisée par 100 (coefficient fournit par le constructeur du TREAK).

La puissance peut s'exprimer de la façon suivante :

$$P(W) = \int_0^f \frac{1}{3000} \cdot [voix\ de\ tension] \cdot \frac{1}{100} \cdot [voix\ de\ courant] dt \quad (2.2)$$

Nous pouvons obtenir directement l'affichage d'une puissance moyennée (cumul de 25000 mesures élémentaires sur une période (figure 2.11), en utilisant notre oscilloscope à mémoire, qui dispose de fonctions intégrées (math) en calculant la valeur moyenne du produit V \* I sur 25000 points à partir d'un fichier Excel fournit par l'oscilloscope.



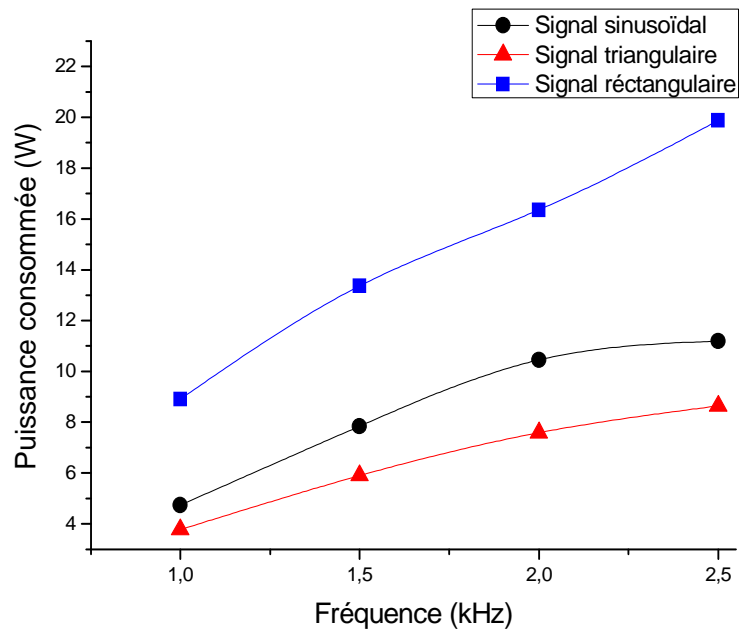
**Figure 2.11.** Evolution du courant, tension et de la puissance à une tension de 7 kV et une fréquence de 1.5 kHz.

Cette section est consacrée pour étudier l'influence de la tension et la fréquence sur la puissance consommée pour les trois signaux de la tension appliquée. La fréquence a été variée de 1 à 2.5 kHz à l'aide du générateur de fonction pour trois valeurs de tension (7, 9 et 12 kV). Les signaux alternatifs étudiés de la tension appliquée offerts par le générateur de fonction sont : signal sinusoïdal, carré et triangulaire.

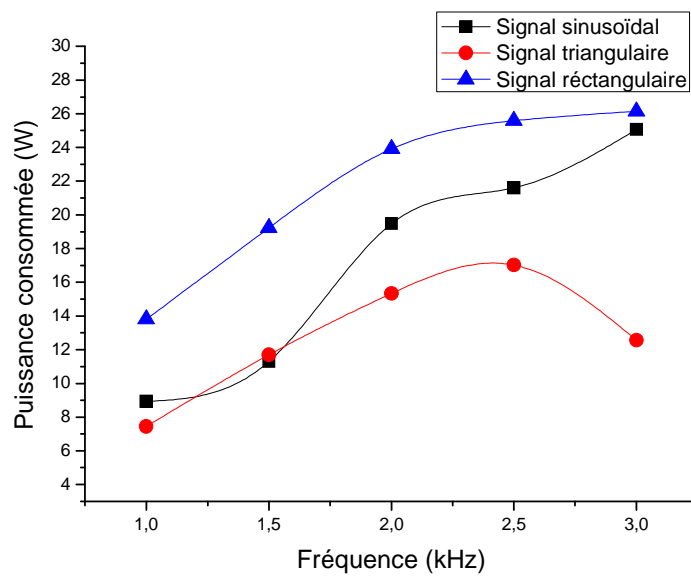
Les résultats de mesure de la puissance en fonction de la fréquence et la tension appliquée pour les trois signaux sont présentés aux figures 2.12, 2.13 et 2.14.

On constate qu'avec l'application de la tension de 7 et 9 kV le signal triangulaire consomme une puissance bien inférieure que d'autres signaux quelque soit la valeur de la fréquence, par contre l'application de cette tension avec un signal rectangulaire provoque un courant de décharge très élevé et donc une consommation bien supérieure par rapport aux autres signaux (figure 2.12 et 2.13). Les résultats présentés à la figure 2.8 montrent une puissance inférieure pour le signal triangulaire dans l'intervalle de 1 à 2 kHz de fréquence.

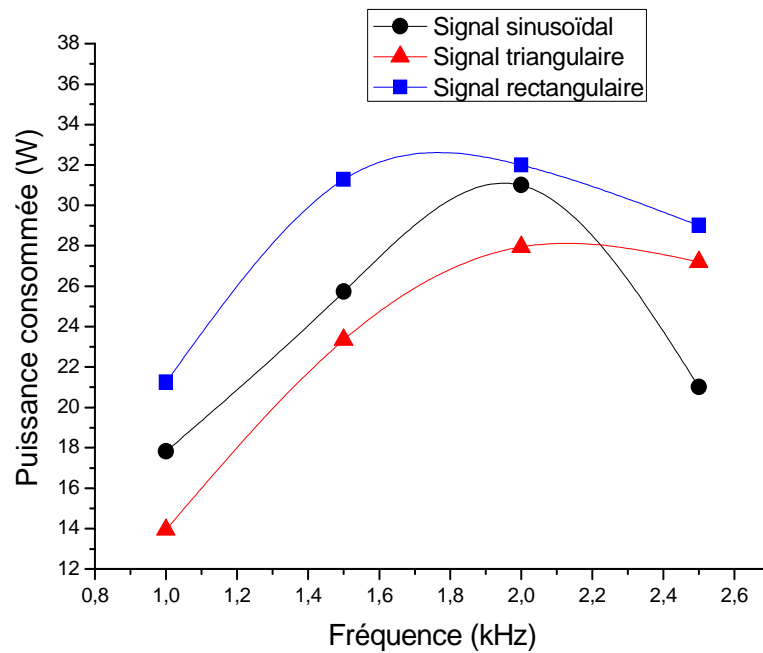
Ces résultats confirment que l'application de la haute tension avec un signal triangulaire revendique une consommation de puissance inférieure à celles de signaux sinusoïdal et rectangulaire. Cela due au temps de maintien de la valeur crête de la tension, pendant une demi-période, qui est inférieur pour le signal triangulaire que celui pour des signaux sinusoïdal et rectangulaire. Par contre, la valeur crête de la tension pour le signal carré reste stable le long des demi-périodes positives et négatives ce qui rend la puissance considérable.



**Figure. 2.12.** Variation de la puissance en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U = 7 \text{ kV}$ )



**Figure. 2.13.** Variation de la puissance en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U = 9 \text{ kV}$ )



**Figure. 2.14.** Variation de la puissance en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U=12\text{ kV}$ )

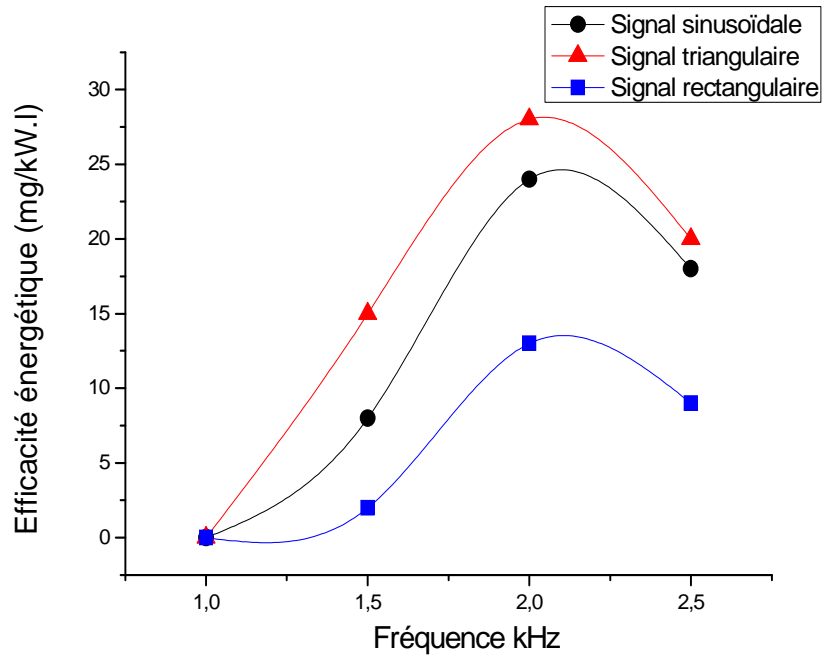
### 2.2.3. Influence des paramètres électriques sur l'efficacité énergétique de production d'ozone

L'efficacité énergétique de production d'ozone  $E$  (mg/W.l), est le rapport entre ce que produit le dispositif (eau ozonée  $C_o$  (mg/l)), et ce qu'il consomme comme puissance. Elle est d'autant meilleure que le système énergétique utilise le moins d'énergie.

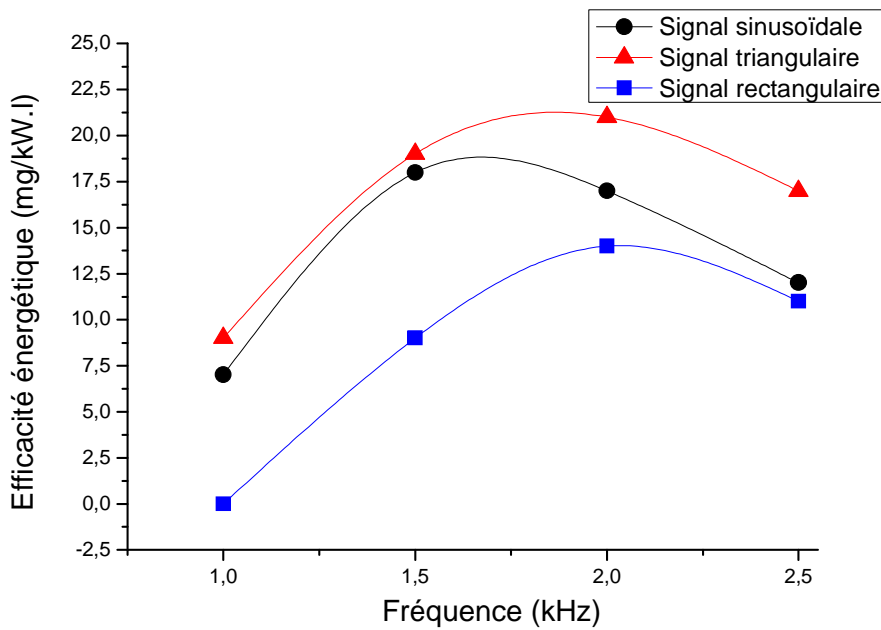
$$E \text{ (mg/W.l)} = C_o \text{ (mg/l)} / P \text{ (W)} \quad (2.3)$$

L'étude de l'efficacité énergétique  $E$  de production d'ozone (mg/W.l), vise à réduire les dépenses en énergie tout en maintenant une qualité de service identique pour l'utilisateur (la concentration d'ozone dans l'eau) de faire en sorte que la production soit maximale en minimisant l'énergie consommée.

Les figures 2.15, 2.16 et 2.17 montrent la variation de l'efficacité énergétique en fonction de la fréquence en utilisant les trois signaux à des tensions de  $V=7, 9$  et  $12\text{ kV}$  respectivement.

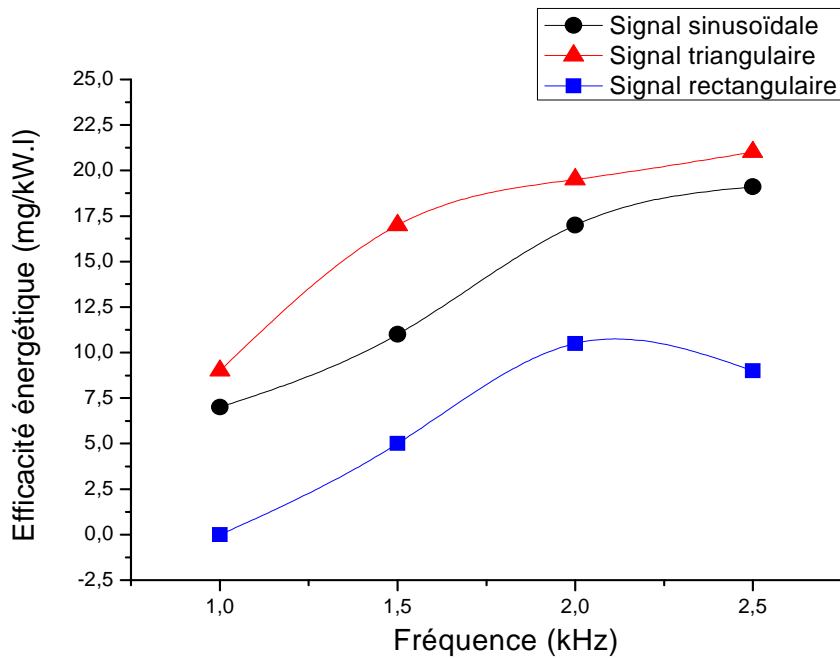


**Figure. 2.15.** Variation de l'efficacité énergétique de production d'ozone en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U = 7$  kV)



**Figure. 2.16.** Variation de l'efficacité énergétique de production d'ozone en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U = 9$  kV).





**Figure. 2.17.** Variation de l'efficacité énergétique de production d'ozone en fonction de la fréquence pour les trois signaux de tension ( $U = 12$  kV)

Ces résultats montrent que quelque soit le signal de la tension, l'efficacité énergétique augmente avec l'augmentation de fréquence jusqu'à une valeur maximale, correspondante à une fréquence globalement constante quelque soit le niveau de tension ( $f = 2$  kHz).

Ce résultat est dû au fait que l'augmentation de la fréquence qui fait augmenter le nombre de micro-décharges par unité du temps et donc fait accroître la dissociation des molécules d'oxygène en favorisant leur recombinaison en ozone, en s'approchant de la fréquence de résonance.

En s'éloignant de la fréquence de résonance, l'intensité des micros-décharges diminue, ce qui fait réduire la formation d'oxygène atomique et la production d'ozone.

Par ailleurs, on remarque que le signal triangulaire correspond à la meilleure efficacité énergétique et quelque soit le signal et la valeur de la tension.

Par contre la comparaison entre les résultats présentés aux trois figures montre que l'efficacité énergétique de production d'ozone diminue avec l'augmentation de la tension appliquée. C'est compréhensible, car la règle générale est que l'efficacité de la production d'ozone diminue avec l'augmentation de la tension appliquée, mais lorsque la tension appliquée est très faible et proche de la tension critique de décharge, le rendement de génération d'ozone diminue fortement en raison de la décharge instable [42,43].

### **2.3. Conclusion**

L'étude de l'influence de la forme du signal sur le rendement de générateur d'ozone est un travail très important qui sert à déterminer la forme adéquate du signal de tension appliquée au générateur d'ozone pour mieux contrôler la production d'ozone en améliorant son efficacité énergétique.

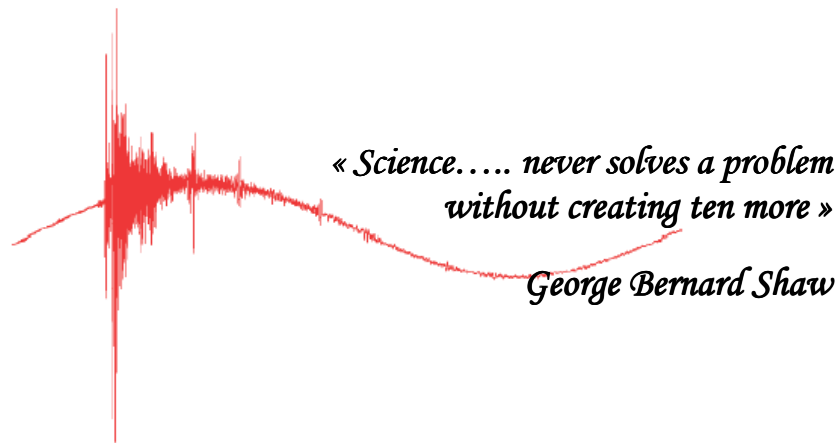
Les résultats obtenus montrent que la forme de signal alternatif de la haute tension appliquée au générateur d'ozone à DBD, a une influence significative que ce soit sur la production d'ozone ou l'efficacité énergétique.

Nous avons conclu que la meilleure façon de contrôler la puissance et la production d'ozone, est l'imposition d'une haute tension avec un signal alternatif triangulaire. Ce signal représente la forme adéquate pour maximiser la production d'ozone et minimiser la consommation de l'énergie.

Le chapitre suivant sera consacré pour la réalisation et l'étude des générateurs d'ozone à DBD, en proposant une procédure expérimentale (méthode des plans d'expérience) pour identifier les points de fonctionnement optimaux de ces générateurs.

# CHAPITRE 3

## CONCEPTION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE TRAITEMENT D'EAU PAR L'OZONE GENERE PAR DECHARGE A BARRIERE DIELECTRIQUE



# CHAPITRE 3

## Conception et optimisation du procédé de traitement d'eau par l'ozone généré par décharge à barrière diélectrique

Ce chapitre est dédié à la présentation des réalisations expérimentales et méthodes spécifiques utilisées pour la génération d'ozone par décharge à barrière diélectrique (DBD) et leur exploitation pour traitement des eaux. Nous présentons dans un premier temps, la réalisation du générateur d'ozone à (DBD) de configuration cylindrique. Nous exposons son principe de fonctionnement, ainsi que son implémentation dans un procédé de traitement d'eau, en signalant les inconvénients rencontrés et les solutions apportées.

Nous présentons également la configuration définitive avec ses améliorations et ses fonctionnalités supplémentaires.

En deuxième temps, nous proposons une méthode expérimentale (la méthodologie des plans d'expérience) afin d'identifier les points de fonctionnement optimaux du procédé de traitement d'eau par l'ozone.

### 3.1. Développement du générateur d'ozone

Après plusieurs tentatives, nous sommes arrivés à développer un générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique (DBD) volumique de forme cylindrique avec des dimensions bien déterminées, donnant des résultats satisfaisants.

La réalisation du générateur d'ozone peut sembler facile à faire mais nous avons rencontré en cours de chemin plusieurs difficultés liées à la disponibilité des matériaux adéquats pour réaliser les électrodes cylindriques métalliques et diélectriques et la fiabilité des générateurs. Il n'était pas évident de trouver des tubes en verre avec les dimensions requises. La grande difficulté qu'on a rencontrée est le système qui permet de maintenir les électrodes cylindriques à des positions concentriques pour garder la distance inter-électrodes fixe et donc l'obtention d'une décharge homogène sur toute la surface du générateur.

Parmi les différentes conceptions de générateur d'ozone nous avons opté pour la configuration qui est la plus souvent utilisée dans les laboratoires, afin de répondre à différentes options opératoires (essais avec différents diamètres de réacteurs) ou pour corriger certains défauts de conception (problèmes d'alignement de l'électrode HT dans le

réacteur, changement peu aisé de l'électrode haute-tension...). La forme cylindrique possède l'avantage d'offrir une surface de décharge plus grande comparativement aux formes planes, par conséquent elle permet de générer plus d'ozone.

### 3.1.1. Matériau des électrodes

Pour nos travaux, nous avons utilisé des électrodes usinées dans différents métaux comme l'acier inoxydable et l'aluminium.

➤ **Electrode métallique externe :** Pour le choix du matériau de l'électrode métallique externe, nous avons opté pour l'acier inoxydable car il est relativement léger par rapport aux autres matériaux mais surtout résiste à l'effet corrosif de l'ozone. Nous avons utilisé une électrode cylindrique

➤ **Electrode métallique interne :** Nous avons choisi de l'adhésif (aluminium) collé à l'intérieur de la barrière diélectrique qui est un tube en verre (figure 3.1).

### 3.1.2. Barrière diélectrique

Le rôle du diélectrique est multiple : sa constante diélectrique conditionne le comportement électrique du réacteur en modifiant, par exemple, la tension de claquage de la décharge, le courant moyen ou la puissance consommée. La nature chimique du diélectrique, sa structure, et sa surface spécifique peuvent, quand à elles, avoir une grande influence sur les propriétés catalytiques de ce support.

La température du diélectrique, qui contrôle sa réactivité de surface, est enfin affectée par le comportement électrique du système. Nous voyons donc la complexité du choix du diélectrique puisqu'il influence, par ses paramètres interdépendants, le comportement du réacteur à tous les niveaux (électrique, catalytique ou thermique).

Parmi les différents matériaux diélectriques utilisés nous avons opté pour le verre (figure 3.1). Il permet de stabiliser la décharge sur toute sa surface, avec limitation de courant et empêchement de l'arc électrique. En plus il résiste à la température élevée et surtout résiste à l'effet corrosif de l'ozone.



**Figure 3.1.** Photographie d'une électrode métallique interne en adhésif aluminium à l'intérieur de la barrière diélectrique en verre.

### 3.1.3. Bouchons de centrage (téflon)

Plusieurs réacteurs ont été réalisés au niveau de notre laboratoire avec des inconvénients au niveau de bouchons de centrage et l'emplacement des ouvertures d'entre et de sortie du gaz. Le réacteur que nous avons réalisé comprend deux bouchons en téflon placés aux extrémités du générateur. Leur rôle est très important, il garde la distance inter-électrodes fixe et stabilise la décharge sur toute la longueur du générateur. Les deux bouchons comprenant des ouvertures d'entrée et de sortie de gaz afin d'éloigner le contact entre la sortie d'ozone et l'électrode métallique externe. Pour cela, nous avons préféré de placer l'entrée et la sorties des gaz sur les bouchons de téflon grâce à sa bonne isolation thermique (figure 3.2). En effet le téflon n'est pas un conducteur thermique contrairement à l'acier.



**Figure 3.2.** Photographie de bouchon de centrage en téflon assurant une distance inter-électrode homogène.

Les figures (3.3 et 2.4) représentent un schéma de la cellule de décharge des réacteurs avec ses dimensions, et schéma explicatif comprenant la photographie de générateur d'ozone développé.

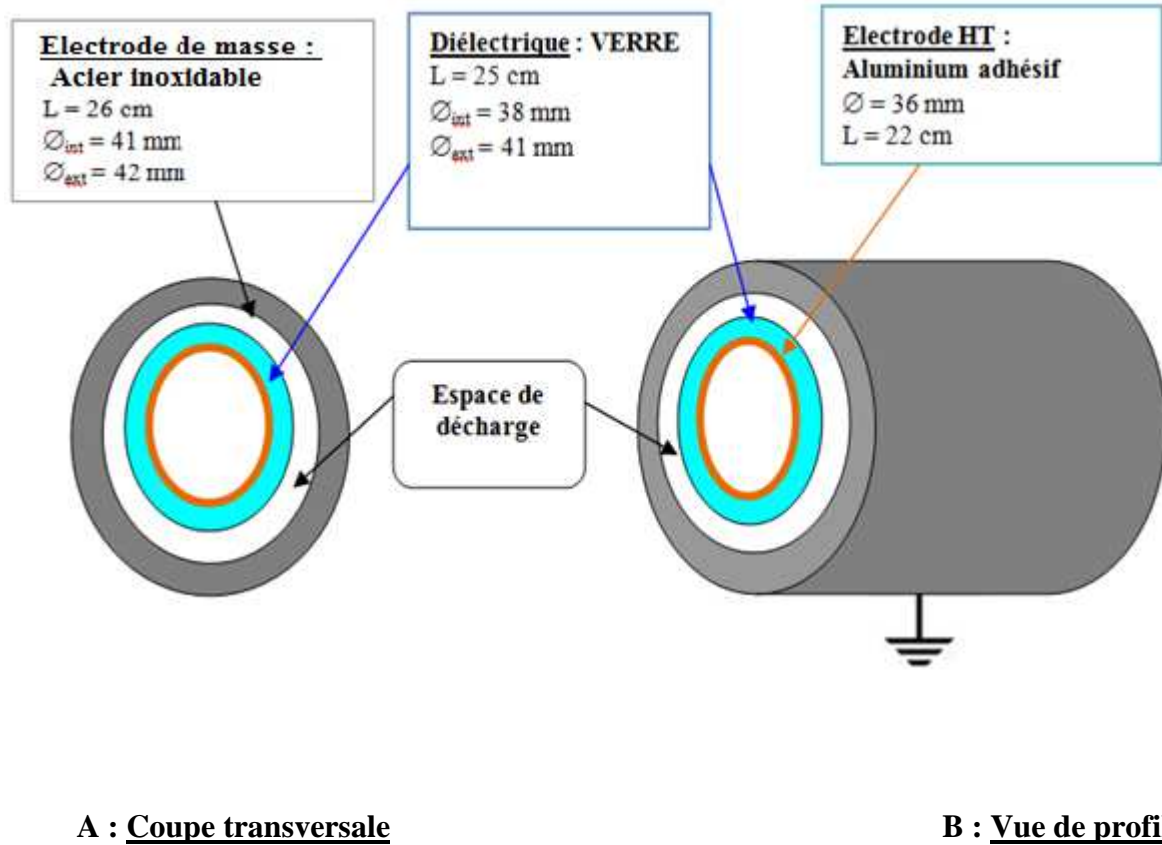


Figure 3.3. Schéma de la cellule de décharge des réacteurs.

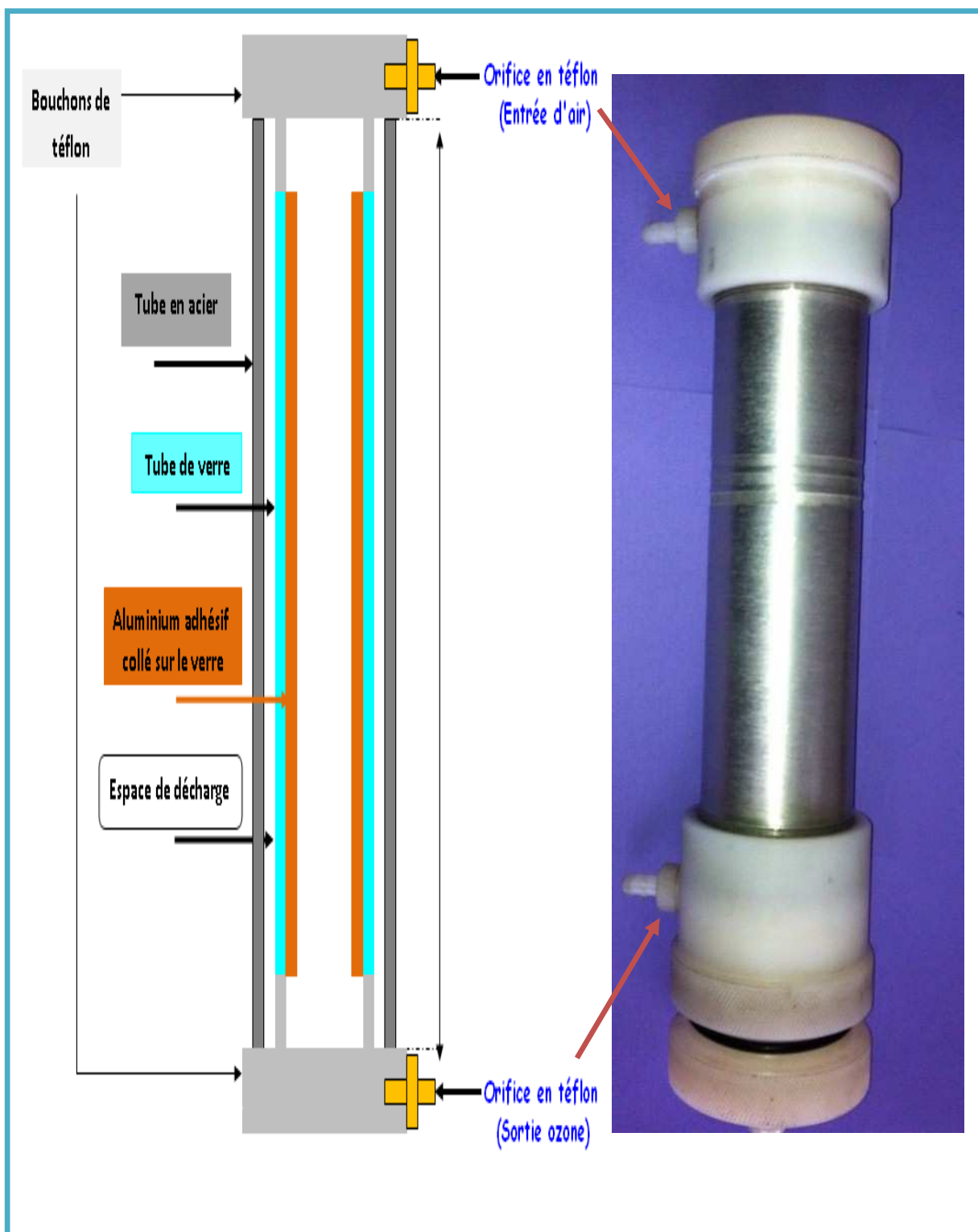


Figure 3.4. Schéma représentatif et photographie de générateur d'ozone développé.

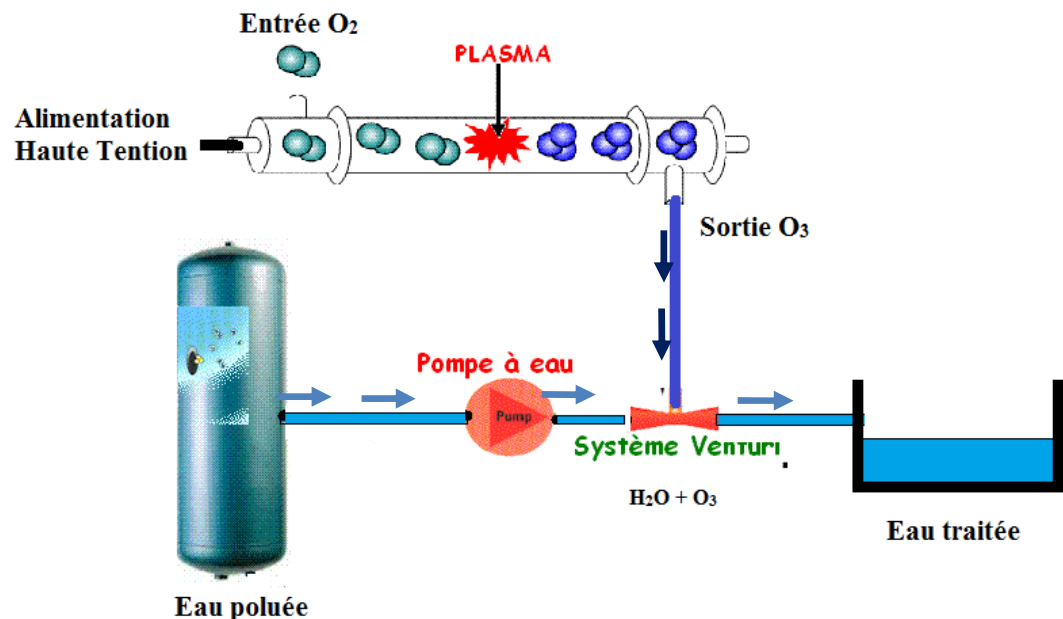


### 3.2. Développement du procédé de traitement d'eau par l'ozone

Nous avons choisi d'utiliser ce réacteur en tant qu'un générateur d'ozone afin de l'exploiter dans une installation de traitement des eaux (figure 3.5).

L'eau contaminée à traiter a été mis en mouvement à l'aide d'une pompe à eau. Un système Venturi permet l'injection d'ozone dans le circuit de l'eau et de la mélanger avec de l'ozone pour avoir une eau traitée. L'ozone est généré par le générateur d'ozone réalisé qui est alimenté par une source de gaz comprenant l'oxygène.

Une alimentation haute tension à haute fréquence réalisée au niveau du laboratoire a été utilisée. Cette alimentation est à base d'un convertisseur (onduleur) constitué de quatre IGBTs. L'alimentation continue de l'onduleur est délivrée par un générateur de marque LEYBOD-HERAEUS, 0-250V, 6A. Un transformateur élévateur de tension, dont le primaire est alimenté par le signal carré de l'onduleur, fournit le signal HT sinusoïdal au générateur DBD. Dans ce travail, la fréquence optimale pour le tube de décharge est de 20 kHz.



**Figure 3.5.** Schéma explicatif de l'exploitation du générateur d'ozone pour traitement des eaux.

### 3.2.1. Choix du gaz d'alimentation du générateur d'ozone

Afin d'étudier l'influence de la nature de gaz d'alimentation sur la production d'ozone et leur concentration dans l'eau, nous avons utilisé trois différents types de source de gaz dont le débit a été varié de 1 à 5 (l/mn) [44].

➤ **Oxygène de haute pureté (90%)** est produit à l'aide d'un concentrateur d'oxygène (NIDEK medical Nuvo lite Mark 5), qui élimine de l'azote, le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau et les hydrocarbures à partir de l'air. Cette méthode est semblable à la qualité de l'oxygène qui provient d'une bouteille d'oxygène.

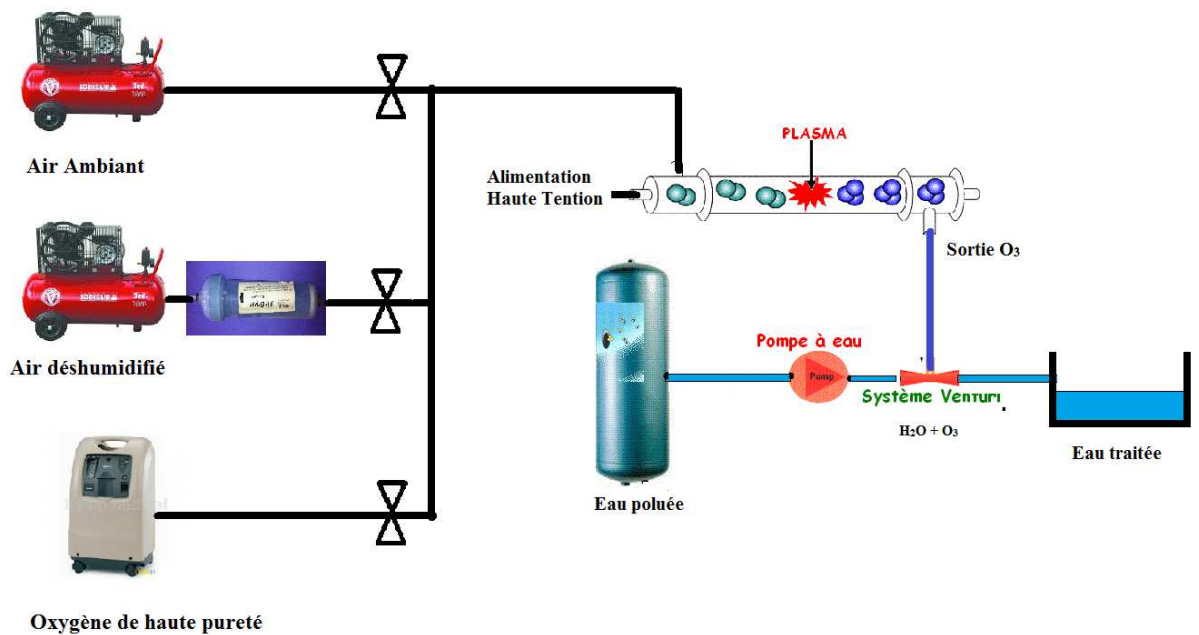
➤ **Air ambiant** en utilisant un compresseur à air (Black Dekker).

La température ambiante était de 23 °C.

L'humidité de l'air ambiant était de 77%.

➤ **Air déshumidifié** en plaçant un déshumidificateur (BOYEK OZONE) en série avec le compresseur.

Le dispositif expérimental de laboratoire réalisé est décrit dans la figure 3.6.



**Figure 3.6.** Procédé de traitement d'eau par l'ozone avec trois sources d'alimentation en gaz.

Afin de mesurer la concentration d'ozone, nous avons utilisé un analyseur d'ozone dissous dans l'eau (Figure 3.7) dont le fonctionnement est basé l'absorption des rayons UV,

Marque : Eco Sensors /USA

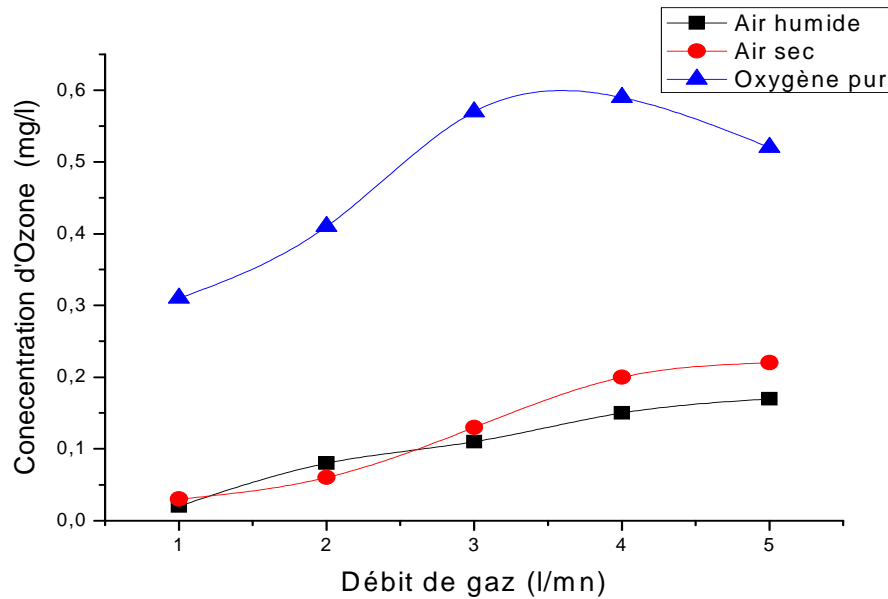
Intervalle de mesure : 0.00-5.00 mg/l



**Figure 3.7.** Photographie d'un Analyseur d'ozone utilisé pour mesurer la concentration d'ozone dissous dans l'eau.

La figure 3.8 montre les résultats de mesure de la concentration d'ozone en fonction de débit de gaz pour les trois cas d'alimentation en gaz. Avec l'augmentation de débit du gaz injecté, la concentration d'ozone dans l'eau a été augmentée. Cela signifie que le nombre de molécules d'oxygène excitées qui affecte la production d'ozone augmente. On voit que le rendement de génération d'ozone est sensiblement dépendant de la composition de la source de gaz. L'efficacité avec le gaz  $O_2$  est environ 2,5 fois plus grande que celle de l'air sec, dans laquelle la teneur en oxygène est d'environ 21%. A la différence de l'air sec, l'air ambiant a entraîné une diminution de l'efficacité probablement due en raison de son taux d'humidité. Il a été rapporté que le taux d'humidité réduit l'efficacité de la production d'ozone au cours de la décharge électrique [44].

Ces résultats nous ont conduits à utiliser le concentrateur d'oxygène (oxygène pur) comme une source du gaz pour toutes les expériences qui vont suivre.



**Figure 3.8.** Concentration d'ozone en fonction du débit du gaz d'alimentation pour différents types d'alimentation en gaz.

### 3.2.2. Modélisation expérimentale du procédé de traitement d'eau par l'ozone

La méthodologie des plans d'expérience permet de déterminer le nombre d'expériences qui seront réalisées conformément à un objectif bien défini, afin d'étudier plusieurs facteurs simultanément, à réduire la dispersion associée à des mesures, d'apprécier les effets de couplage entre les facteurs et enfin d'évaluer les influences respectives des facteurs et leurs interactions. De nombreux articles ont été écrits sur l'application de cette méthodologie dans les processus électriques [45].

Nous présenterons les principes de base de la modélisation expérimentale avec le logiciel MODDE 5.0 [46] que nous avons utilisé pour modéliser l'efficacité du procédé.

#### 3.2.2.1. Quelques rappels sur la méthodologie des plans d'expériences

##### a) Vocabulaire utilisé

##### 1) Réponses, facteurs, niveaux

Avant d'aborder le principe des plans d'expériences, il est important de préciser le vocabulaire utilisé.

Les phénomènes étudiés sont mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(U_{ij}) \quad (3.1)$$

Où  $Y$ , la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur, est appelée **la réponse**,  $U_{ij}$ , les variables (naturelles) qui influencent un phénomène, sont appelées **les facteurs**.

$f$  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 ( $+$ ).

## 2) 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 :

$$X_{ij} = (U_{ij} - U_j^0) / \Delta U_j \quad (3.2)$$

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

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

$U_j^0$  : valeur de la variable naturelle au centre du domaine ;

$\Delta U_j$  : 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 [47].

## b) 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:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (3.3)$$

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" [48].

#### c) 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 et sans équivoque en fournissant un modèle expérimental précis du système étudié [48].

#### d) Les plans composites

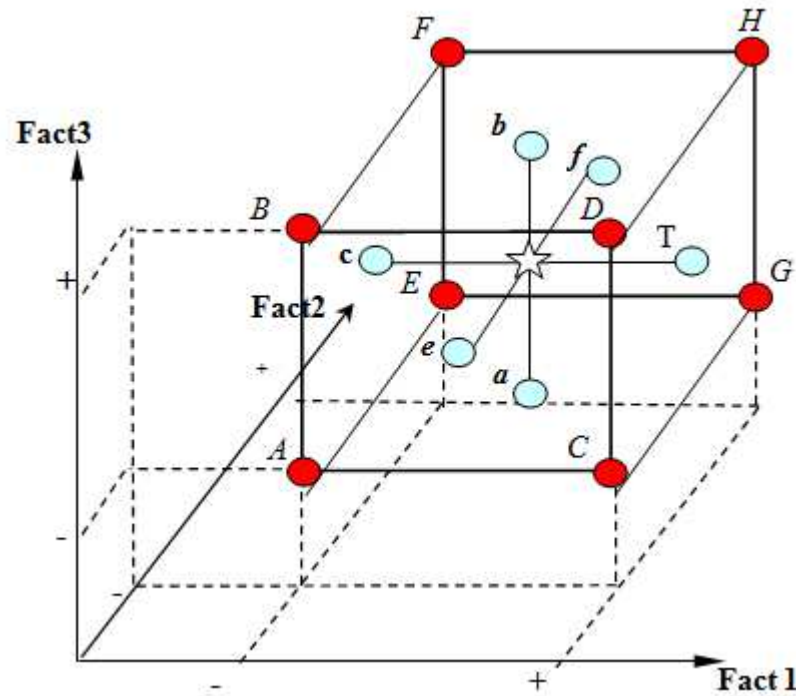
Les plans composites centrés, connue dans la littérature anglo saxon par « design of experiment », font partie des plans d'expérience pour l'étude des surfaces de réponse. Ce type de dispositif expérimental, permet d'estimer les effets moyens des facteurs et les interactions entre les effets des facteurs. Lorsque ces derniers sont quantitatifs, il arrive que l'on souhaite compléter cette première approche par une étude d'optimisation.

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. Les essais supplémentaires constituent la seconde étape du déroulement de l'étude. 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 3.9).

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.



**Figure 3.9.** Disposition des expériences dans un plan composite centré.

- 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).

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

- des essais du plan factoriel, soit  $n_f$  ;
- des essais du plan en étoile, soit  $n_\alpha$  ;
- des essais au centre, soit  $n_0$

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

$$n = n_f + n_\alpha + n_0 \quad (3.4)$$

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 :

$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (3.5)$$

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. Le nombre de niveaux d'un plan composite est de cinq par facteur :

Le point central, les deux niveaux du plan factoriel et les deux niveaux des points en étoile.

Les points en étoile sont sur les axes des facteurs, mais quelle coordonnée faut-il leur donner ?

Mettons nous dans le cas idéal où tous les emplacements sont possibles et où les contraintes expérimentales ne gênent pas. La disposition des points expérimentaux dépend alors du critère d'optimalité que l'on choisit. En général, on s'arrange pour que les erreurs sur les coefficients du modèle soient les plus petits possibles [49].

### 3.2.2.2. Logiciel MODDE 5.0

Nous avons utilisé le logiciel MODDE 5.0 qui est un programme 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.

En outre, le programme calcule deux importants critères statistiques qui permettent de valider ou non le modèle mathématique, symbolisé par  $R^2$  et  $Q^2$ . Le premier est appelé la qualité de l'ajustement, et est une mesure de la façon dont le modèle peut être adapté à des données brutes, il varie entre  $0$  et  $1$ , où  $1$  indique un modèle parfait et  $0$  indique aucun modèle. Le deuxième critère est appelé la qualité de prédiction, et estime la puissance



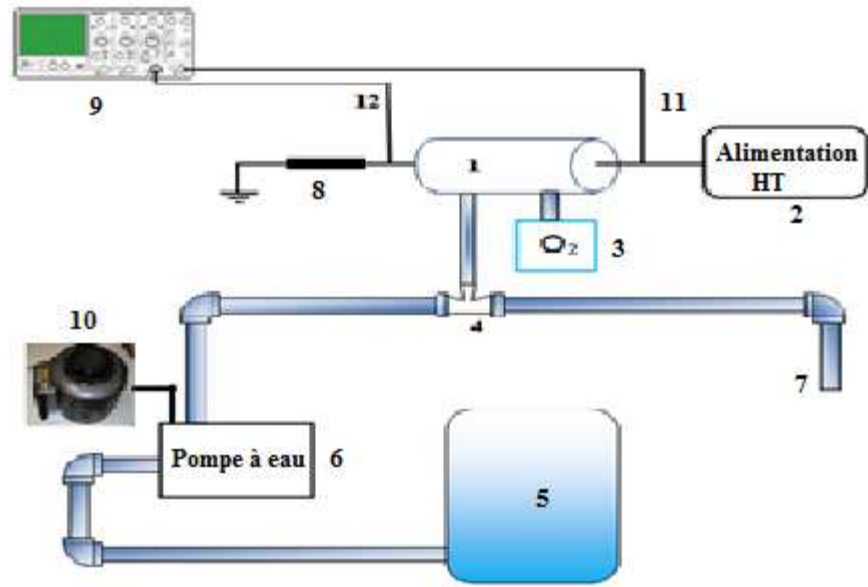
prédictive du modèle. Comme  $R^2$ ,  $Q^2$  a une limite supérieure  $I$ , mais sa limite inférieure est moins l'infini ( $-\infty$ ). Pour qu'un modèle puisse passer le test de diagnostic, les deux paramètres doivent être élevés, et de préférence non séparés par plus de **0,2 à 0,3** [46].

### 3.2.2.3. Application au procédé de traitement des eaux

L'efficacité d'un processus de traitement de l'eau par l'ozone dépend d'une multitude de facteurs, y compris les facteurs de commande et les conditions environnementales. Le but du travail actuel est d'analyser l'application des techniques de plan d'expérience utilisant des fonctions quadratiques pour modéliser le processus de traitement de l'eau par l'ozone. En raison de l'importance de la robustesse d'un tel processus de traitement, le but de ce travail est de valider une procédure expérimentale pour optimiser l'efficacité de traitement et pour déterminer le de point optimal. Les expériences ont été effectuées sur un banc expérimental de laboratoire utilisant le système d'injection Venturi, où trois facteurs contrôlables ont été analysés : le niveau de la haute tension, le débit de l'oxygène et le débit d'eau. Trois expériences de type « un-facteur-à-la-fois » suivies d'un plan composite à faces centrés ont été exécutées. Une fois les limites de variation des variables d'entrée sont déterminées, un modèle mathématique a été proposé qui a servi à analyser l'influence des facteurs et de leurs interactions.

Le dispositif expérimental utilisé est présenté à la figure 3.10. L'eau à traiter est mise en mouvement à l'aide d'une pompe à eau dont le débit d'eau est contrôlé par autotransformateur. Un système Venturi permet l'injection d'ozone dans le circuit de l'eau et de la mélanger avec de l'ozone pour avoir une eau traitée. L'ozone est généré par le réacteur DBD qui est alimenté en oxygène par concentrateur d'oxygène dont le débit est réglable de 1 à 5 l/mn.

Une alimentation haute tension à haute fréquence réglable a été utilisée pour alimenter le générateur DBD dont le signal est sinusoïdal avec une fréquence de 20 kHz.



a)



b)

**Figure 3.10.** Dispositif du dispositif utilisé pour les expériences  
a) schéma descriptif du dispositif utilisé ; b) Photographie du montage réalisé

1. générateur d'ozone ; 2. alimentation HTHF ; 3. canal vers l'injecteur venturi ; 4. pompe à eau ; 5. réservoir d'eau ; 6. sortie d'eau traitée ; 7. concentrateur d'oxygène ; 8. autotransformateur pour alimenter la pompe à eau ; 9. Oscilloscope ; 10. sonde HT

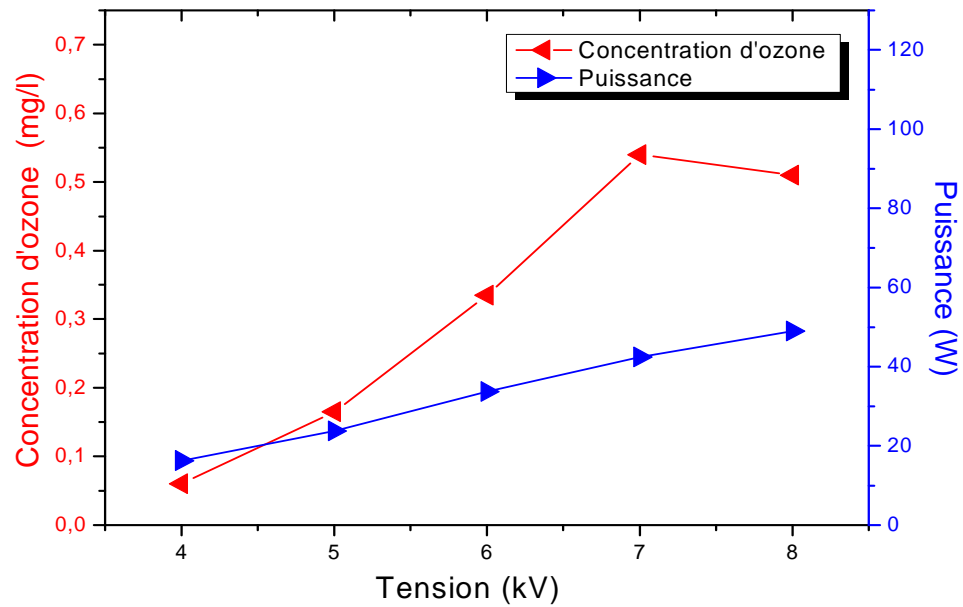
#### 3.2.2.4. Plans d'expériences « un-facteur-à-la-fois »

Des expériences de criblage sont conçues pour identifier le domaine de variation des trois facteurs, expériences classiques de type « un-facteur-à-la-fois ». L'étape d'optimisation d'un procédé expérimental devrait permettre la détermination des valeurs de facteur pour lesquelles la concentration en ozone est maximale et la puissance consommée est minimale.

➤ **Influence de la tension appliquée sur la concentration d'ozone:**

L'acquisition d'énergie cinétique par les électrons et l'intensité de courant dans l'espace de décharge dépendent de la tension appliquée, laquelle a un effet direct sur la concentration de l'ozone. Dans cette partie, nous avons étudié l'influence de la tension appliquée sur la concentration d'ozone. La tension appliquée au générateur d'ozone a été varié de 4 kV à 8 kV à l'aide d'un autotransformateur alimentant le transformateur HT, en mesurant la concentration d'ozone.

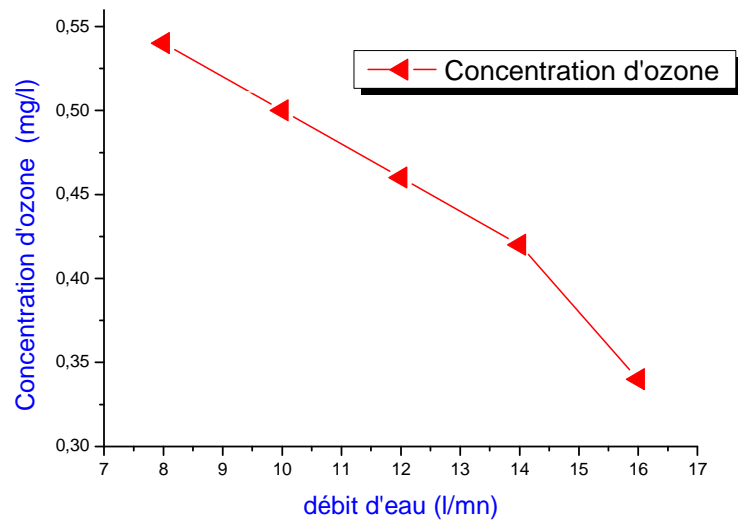
La figure 3.11 montre la variation de la concentration d'ozone produit par ce générateur, et transféré par l'injecteur venturi dans l'eau, en fonction de la tension appliquée. Selon les résultats obtenus, la concentration d'ozone augmente avec l'élévation de la tension, la concentration d'ozone dans l'eau atteint son maximum 0.55 mg/l à la tension de 7 kV, après on constate une diminution. L'augmentation de la tension fait augmenter l'intensité de courant électrique de la DBD, par conséquent élever la densité d'électrons libres et le taux de dissociation des molécules d'oxygène, donc entraîne l'augmentation de la concentration d'ozone produit. La diminution de la concentration d'ozone en dépassant la valeur de la tension égale à 07 kV due à la transformation de l'énergie cinétique qui est supérieur à l'énergie d'ionisation (l'énergie supplémentaire). Surplus d'énergie qui se transforme en énergie thermique qui influe négativement sur la production d'ozone [50].



**Figure 3.11.** *Évolution de la concentration d'ozone dissous dans l'eau et la puissance en fonction de la tension appliquée (Débit d'eau=8 l/mn ; débit d'oxygène=5 l/mn)*

➤ **Variation de la concentration d'ozone en fonction de débit d'eau**

Le débit et la quantité d'eau à traiter influe sur l'efficacité, dans cette expérience nous avons varié le débit d'eau de 8 l/mn à 16 l/mn, en mesurant la concentration d'ozone dans l'eau. Les résultats obtenus représentés à la figure 3.12 montrent qu'il y a une relation inversement proportionnelle entre le débit d'eau à traiter et la concentration d'ozone dissous dans l'eau. Cela peut s'expliquer par le fait que l'augmentation du débit d'eau à traiter n'était pas suivie par une élévation de la production d'ozone.



**Figure 3.12.** Évolution de la concentration d'ozone dissous dans l'eau en fonction de débit d'eau  
(Débit d'O<sub>2</sub>=5 l/mn ; Tension=7 kV)

### 3.2.2.5. Identification du point de fonctionnement

Après les expériences préliminaires « un-facteur-à-la-fois » les intervalles de variation de chaque facteur ont été déterminés comme suit :

- Tension Appliquée  $U$  :  $U_{\min}= 4 \text{ kV}$  ;  $U_{\max}= 14 \text{ kV}$
- Débit d'oxygène  $Do$  :  $Do_{\min}= 3 \text{ l/mn}$  ;  $Do_{\max}=5 \text{ l/mn}$
- Débit d'eau  $De$   $De_{\min}=8 \text{ l/mn}$  ;  $De_{\max}= 13 \text{ l/mn}$

L'identification des valeurs centrales de trois facteurs étudiés  $U_c$ ,  $Do_c$  et  $De_c$ , en utilisant une conception de CCF central a été réalisée, les deux niveaux "max" et "min" sont les limites établies dans la section précédente pour chacune des trois variables de contrôle ( $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$ ), ( $Do_{\min}$ ,  $Do_{\max}$ ) et ( $De_{\min}$ ,  $De_{\max}$ ), le point central ( $U_c$ ,  $Do_c$  et  $De_c$ ) est calculé comme suit:

$$U_c = (U_{\min} + U_{\max})/2 = \frac{6 + 8}{2} = 7 \text{ kV} \quad (3.6)$$

$$Do_c = (Do_{\min} + Do_{\max})/2 = \frac{3 + 5}{2} = 4 \text{ l/min} \quad (3.7)$$

$$De_c = (De_{\min} + De_{\max})/2 = \frac{8 + 16}{2} = 12 \text{ l/min} \quad (3.8)$$

Les résultats de 17 expériences obtenus sont montrés dans le tableau 2.1

Tableau 3.1. Résultats du plan composite à faces centrés

Exp n :	Tension (kV)	Débit d'Oxygène (l/mn)	Débit d'eau (l/mn)	Concentration d'ozone (mg/l)
1	6	3	8	0,35
2	8	3	8	0,52
3	6	3	16	0,24
4	8	3	16	0,475
5	6	5	8	0,34
6	8	5	8	0,495
7	6	5	16	0,26
8	8	5	16	0,43
9	6	4	12	0,28
10	8	4	12	0,505
11	7	4	8	0,44
12	7	4	16	0,36
13	7	3	12	0,52
14	7	5	12	0,51
15	7	4	12	0,455
16	7	4	12	0,455
17	7	4	12	0,455

Après l'élimination des effets non significatifs, le modèle mathématique proposé par MODDE 5.0 est le suivant :

$$C = 0.46 + 0.096 U^* - 0.038 DE^* - 0.07 U^{*2} - 0.06 DE^{*2} + 0.05 DO^{*2} \quad (5.6)$$

Les tests statistiques conduisent à un modèle mathématique validé puisque les deux critères  $R^2$  et  $Q^2$  atteignent des valeurs élevées proches de l'unité:

$$R^2 = 0,98 \text{ et } Q^2 = 0,90.$$

#### a) Graphes d'adéquation du modèle et validation des mesures

Le graphe d'adéquation du modèle est un moyen simple de porter un jugement sur la qualité descriptive du modèle. La figure 3.14 restitue le nuage de points défini, à partir des valeurs des réponses mesurées et des réponses calculées par le modèle. Plus le nuage de points est aligné sur la première bissectrice, plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante. En outre, le logiciel MODDE.05 vérifie si les résultats expérimentaux

obtenus sont raisonnables et détecte tout résultat «douteux». Le type de graphe représenté à la figure 2.15 montre que toutes les expériences sont situées à l'intérieur des limites de validation et permet de valider les résultats des mesures.

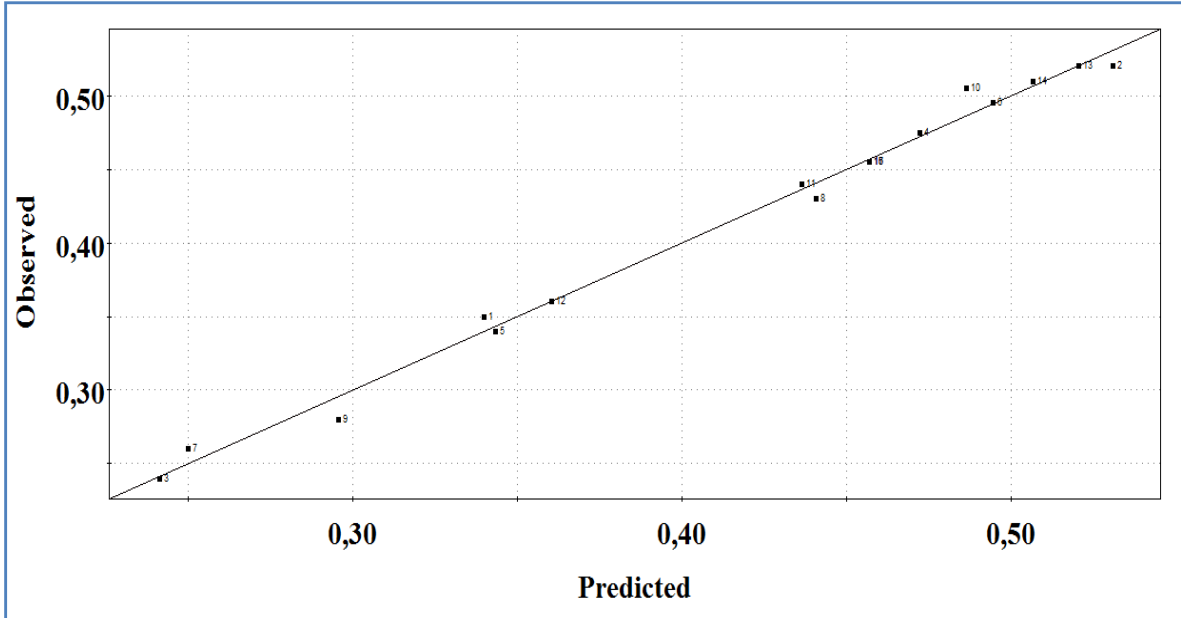


Figure 3.14. Graphe d'adéquation du modèle

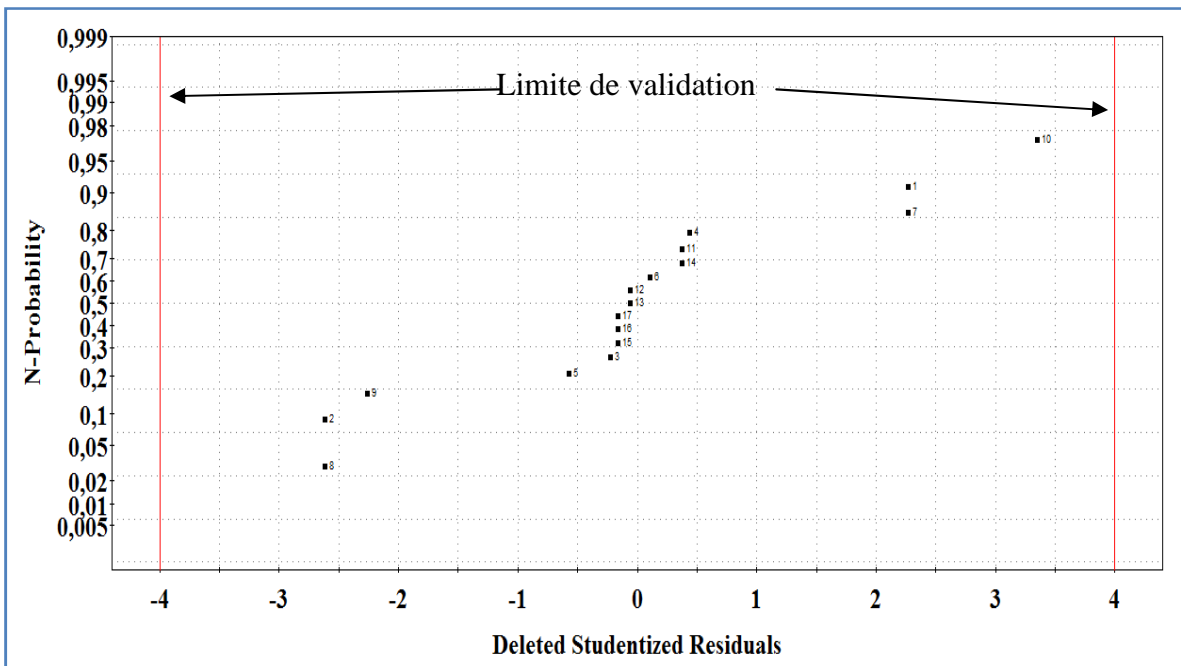


Figure 3.15. Graphique pour la validation des mesures.

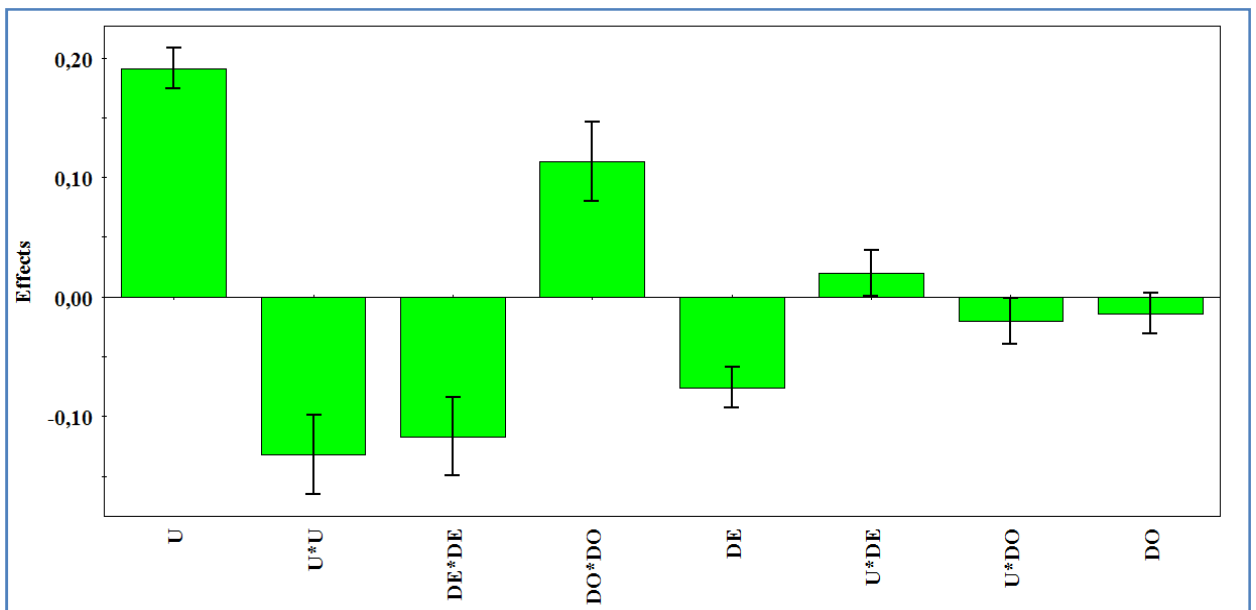
### b) Analyse des résultats obtenus

Les valeurs des coefficients associés aux facteurs dans le modèle mathématique montrent le degré d'influence de chaque facteur. Le tracé des coefficients est représenté à la figure 3.16. Il découle du modèle mathématique proposé que dans les limites de la variation des intervalles choisis, la tension appliquée au réacteur  $U$  est celle qui a le plus d'effet.

Le débit d'eau  $De$  a un effet négatif sur la concentration ce qui signifie que la réduction du débit conduit à des valeurs plus élevées de la concentration d'ozone dans l'eau.

Le débit d'oxygène  $Do$ , dans l'intervalle que nous avons choisi, semble avoir peu d'influence en comparaison avec les autres facteurs. Les différentes interactions entre les facteurs sont très faibles et ne présentent aucun effet sur la concentration d'ozone.

Selon ce modèle, l'optimum du processus  $C=0.56$  mg/l, (la valeur la plus élevée de la concentration d'ozone correspondant à la valeur la plus faible de la puissance consommée) doit être obtenu pour  $U= 7.67$  kV  $De = 9.6$  l/mn et  $Do= 3$  l/mn.

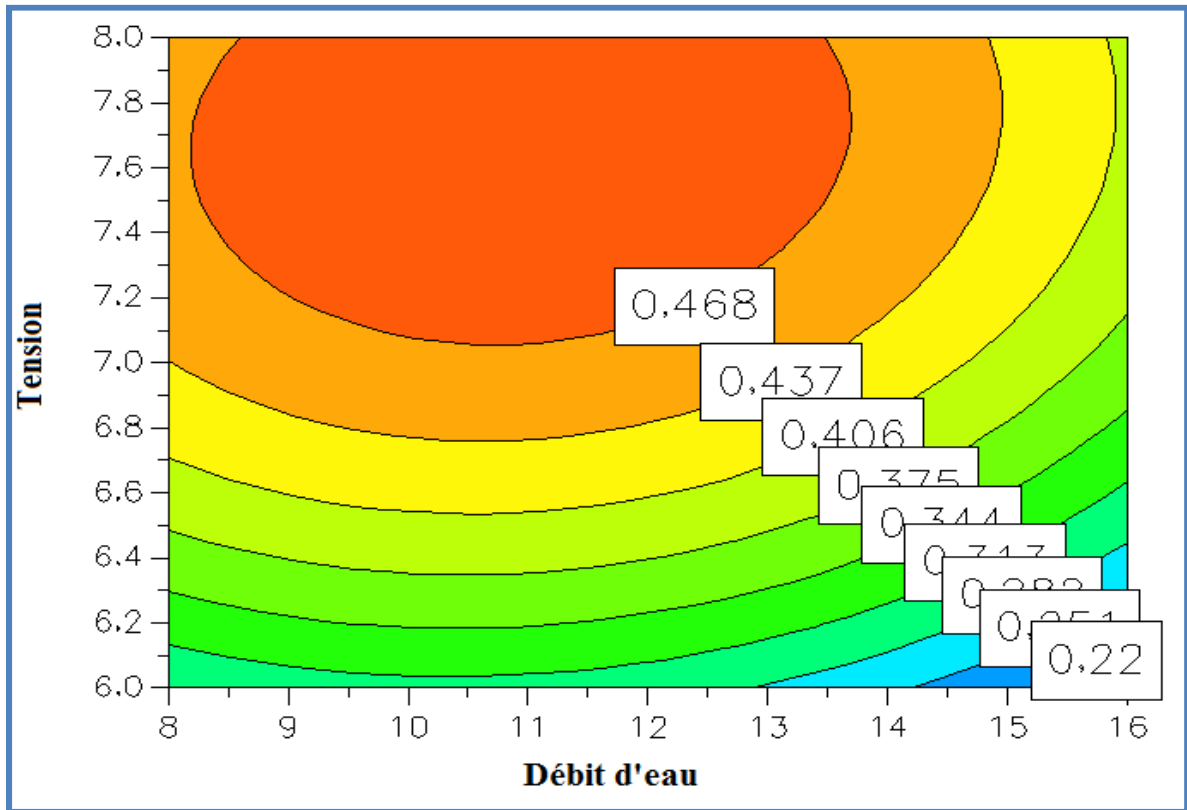


**Figure 3.16.** Histogramme montrant l'influence des différents facteurs.

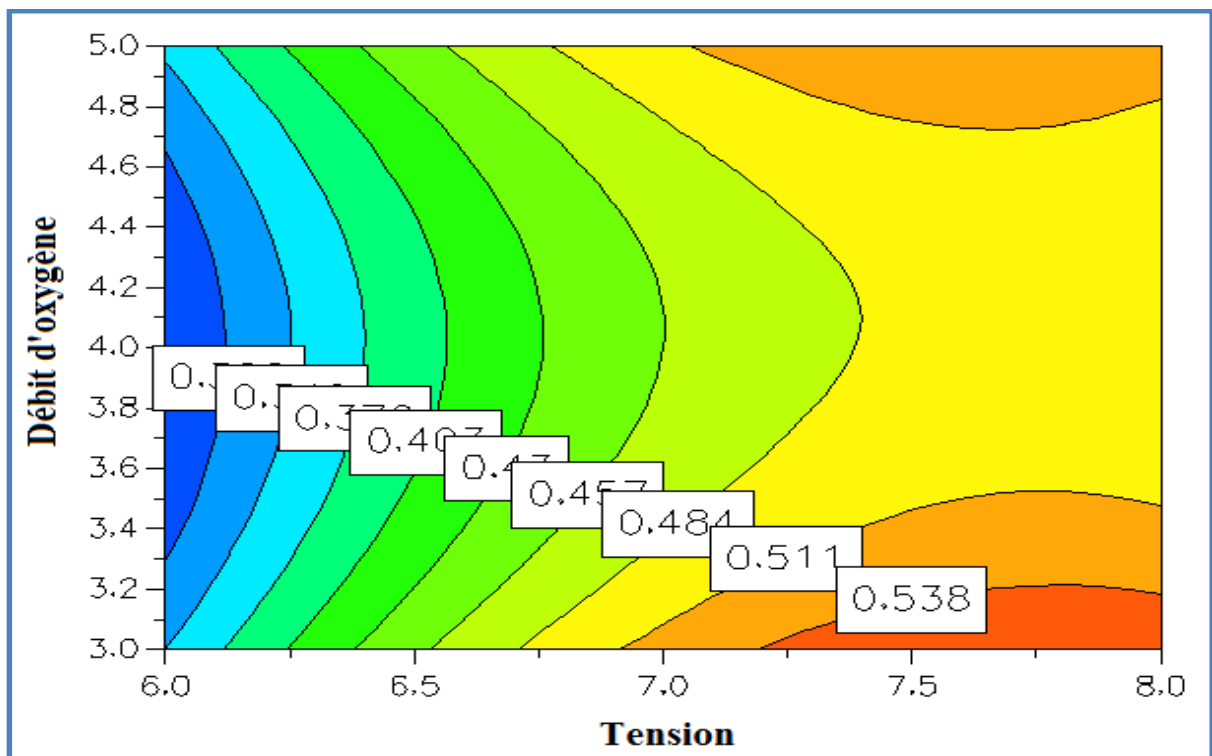
Les tracés de contours iso-réponse obtenus avec MODDE 5.0 sont représentés à la figure 3.17. Ces courbes illustrent que la concentration d'ozone est très influencée par le facteur "Tension appliquée" en comparaison avec les deux autres facteurs. Ces résultats montrent que les zones optimales (en orange) où la concentration d'ozone est maximale,



sont obtenues pour un intervalle de tension de 07 à 8 kV, un débit d'oxygène de 3 à 3,2 l/mn et un débit d'eau de 8,5 à 14 l/mn.



a) Pour  $Do = 4$  l/mn



b) Pour  $De = 12$  l/mn

**Figure 3.17.** Tracés des contours iso-réponses du modèle.

### 3.3. Conclusion

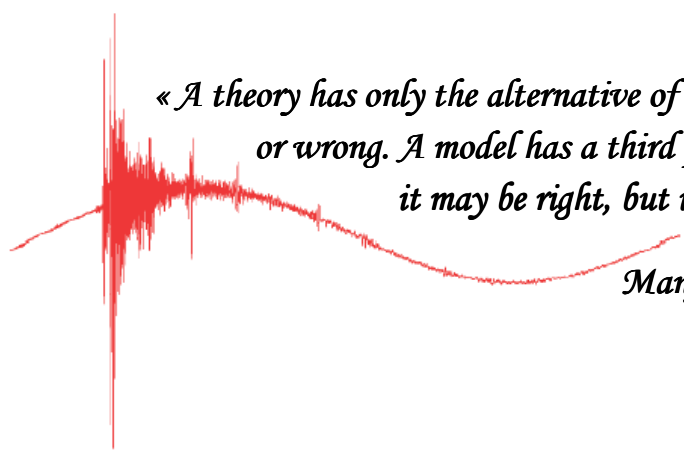
Un procédé de traitement d'eau par l'ozone, en se basant sur un réacteur à décharge à barrière diélectrique a été développé et testé de manière satisfaisante ;

La méthodologie des plans d'expériences est un outil puissant pour l'identification du point optimal d'un processus de traitement de l'eau par l'ozone. Grâce à la sélection appropriée des conditions de fonctionnement, le procédé peut être rendu moins sensible aux variations, en évitant ainsi les éventualités coûteuses de mauvais traitement.

Il est recommandé d'effectuer d'autres études pour déterminer et minimiser par la suite les effets de facteurs qui peuvent causer des variations dans la réponse du processus assavoir les dimensions géométriques du générateur d'ozone (longueur des électrodes et la distance inter-électrodes)

Le chapitre suivant sera consacré pour l'identification de la conception géométrique optimale d'un générateur d'ozone de forme cylindrique, en utilisant la même méthodologie des plans d'expérience, afin d'augmenter l'efficacité énergétique de production d'ozone.

CHAPITRE 4  
OPTIMISATION DES  
DIMENSIONS  
GEOMETRIQUES DU  
GENERATEUR D'OZONE  
A DECHARGE A  
BARRIERE  
DIELECTRIQUE



*« A theory has only the alternative of being right  
or wrong. A model has a third possibility:  
it may be right, but irrelevant »*

*Manfred Eigen*

# **CHAPITRE 4**

## **Optimisation des dimensions géométriques du générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique**

L'utilisation des réacteurs à Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) en tant que des générateurs d'ozone est de nos jours bien répandue et sont largement utilisés pour le traitement de l'eau et la désinfection de l'air. Le but de ce chapitre est de proposer une méthode expérimentale basée sur la modélisation par surfaces de réponse afin de modéliser et d'optimiser les dimensions géométriques d'un générateur d'ozone de forme cylindrique, c'est-à-dire l'espace de décharge et la longueur des électrodes. Du moment qu'un générateur d'ozone efficace devrait donner une grande concentration d'ozone avec un minimum de puissance consommée, la haute tension appliquée a été associée à ces facteurs géométriques pour réaliser un plan d'expériences composite à faces centrées.

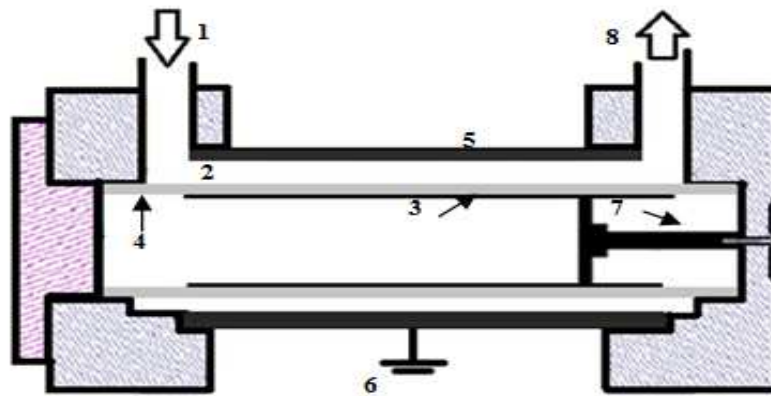
En raison des coûts élevés d'investissement des générateurs d'ozone, il faut accorder toute l'attention lors de leur conception et leur fabrication. En outre, lors de la détermination des besoins en énergie pour la génération d'ozone, l'énergie pour la production du gaz (oxygène ou air comprimé) ainsi que l'énergie électrique doivent être soigneusement estimées [51].

Les réacteurs à (DBD) ont été largement étudiés pour optimiser le taux de la génération d'ozone et le rendement énergétique, en fonction de plusieurs paramètres tels que le niveau de la haute tension appliquée, le débit d'oxygène, la fréquence de la tension et d'autres facteurs [52]. Cependant, peu d'études expérimentales ont été réalisées afin d'identifier les dimensions géométriques optimales d'un générateur d'ozone, c'est-à-dire les dimensions de l'intervalle inter-électrodes et la longueur efficace du générateur, permettant de délivrer une concentration d'ozone maximale avec une consommation d'énergie minimale. Il est bien connu que la concentration d'ozone élevée est obtenue lorsque l'intervalle de décharge est minimal et la longueur des électrodes maximale, cependant comme un générateur d'ozone efficace devrait consommer peu d'énergie que possible, ces deux dimensions doivent être optimisées.

Le but de ce chapitre est de proposer une procédure expérimentale en se basant sur la modélisation par surfaces de réponse (RSM) pour l'identification de la conception géométrique optimale d'un générateur d'ozone de forme cylindrique, afin d'augmenter la génération d'ozone et de minimiser la consommation d'énergie.

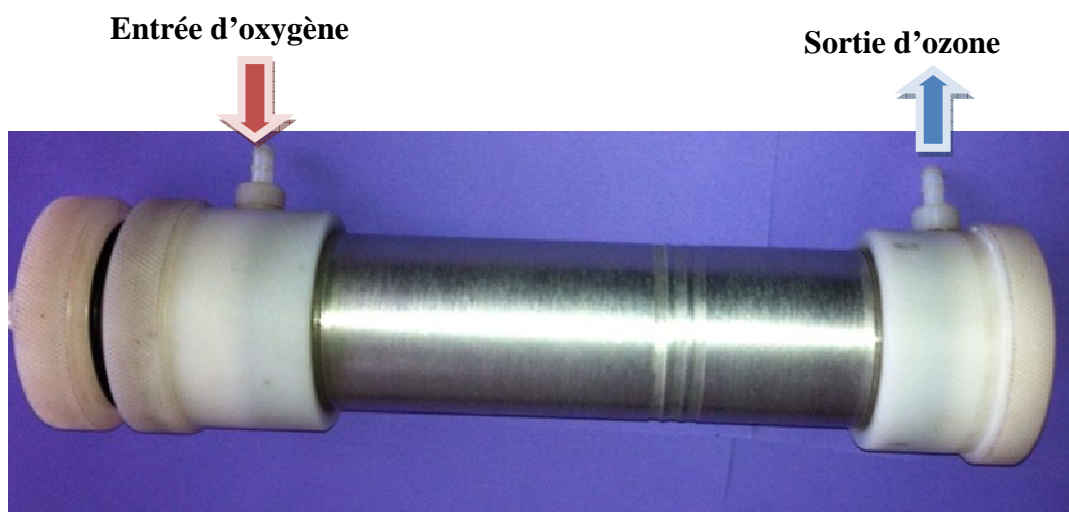
#### 4.1. Structure et dimensions du générateur d'ozone étudié

Les figures 4.1 et 4.2 montrent le générateur d'ozone utilisé dans cette étude, qui est un réacteur de forme cylindrique. L'électrode haute tension interne est une bande en adhésif aluminium insérée et collée à l'intérieur d'un tube en verre ; celui-ci, agissant comme une barrière diélectrique d'une épaisseur de 2,5 mm, a un diamètre extérieur de 50 mm et une longueur de 300 mm. L'électrode cylindrique reliée à la terre est un tube en acier inoxydable de 250 mm de longueur (Figure 4.2). Pour faire varier l'intervalle de décharge, trois électrodes métalliques de diamètres différents ont été réalisés (52, 54 et 56 mm). Ainsi, l'intervalle de décharge peut prendre trois valeurs différentes de 1, 2 et 3 mm respectivement. De plus, la longueur des électrodes a été variée en utilisant des longueurs correspondantes de la bande adhésive en aluminium (électrode HT).



**Figure. 4.1.** Coupe longitudinale du générateur d'ozone développé.

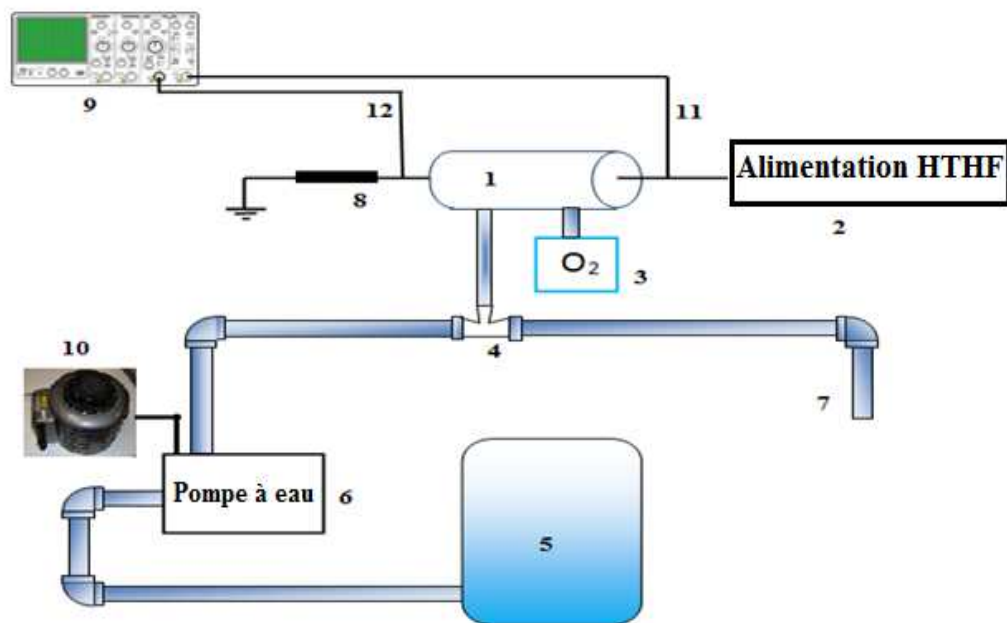
(1) entrée d'oxygène. (2) intervalle de décharge. (3) électrode cylindrique interne (adhésif d'aluminium). (4) barrière diélectrique (verre). (5) électrode cylindrique externe (6) mise à la terre. (7) borne haute tension. (8) sortie d'ozone.



**Figure.4.2.** photographie du générateur d'ozone réalisé

## 4.2. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour les expériences de traitement de l'eau est décrit à la figure. 4.3. L'eau contaminée à traiter (5) est mise en mouvement au moyen d'une pompe à eau (6). Un système Venturi (4) permet l'injection d'ozone dans la boucle de l'eau, l'eau ozonée (7) est ainsi considérée comme de l'eau traitée. L'ozone est généré à l'aide d'un générateur d'ozone développé au laboratoire (1) qui est alimenté par un concentrateur d'oxygène (3) (NIDEK médical Nuvo Lite Mark 5), avec un débit de 5 l/min.



**Figure.4. 3.** Schéma descriptif du procédé.

1. Générateur d'ozone, 2. Alimentation haute tension (Onduleur à résonance),
3. Concentrateur d'oxygène, 4. Injecteur Venturi, 5. Réservoir d'eau, 6. Pompe à eau, 7. la sortie d'eau traitée. 8. résistance de 100  $\Omega$ , 9. Oscilloscope numérique,
10. Autotransformateur, 11. Sonde de mesure de la haute tension. 12. sonde basse tension.

L'alimentation électrique de haute tension utilisée dans cette étude est de type à commutation. Une tension AC 220 V est abaissée à l'aide d'un transformateur abaisseur et redressée en une tension continue d'environ 72 V. Un interrupteur commandé IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) a été utilisé comme interrupteur électronique et commandé par un oscillateur pour générer un courant à haute fréquence. Un transformateur à ferrite a été utilisé pour transformer la basse tension haute fréquence en une haute tension, une tension de 1-10 kV à une fréquence de 0-30 kHz a été obtenue. Dans ce travail, la fréquence de résonance produisant la DBD est de 20 kHz [30].

La tension  $V$  délivrée par cette alimentation appliquée au générateur d'ozone a été mesurée à l'aide d'un oscilloscope numérique (GWINSTEK GDS-3154) en utilisant une sonde à haute tension (Tektonix P6015A), tandis que le courant  $I$  a été estimé en mesurant la chute de tension aux bornes d'une résistance ohmique de  $100 \Omega$ .

Le calcul de la puissance est obtenu en effectuant le produit de la tension d'alimentation par le courant de décharge. Lorsque le signal est périodique, la puissance est donnée par la relation suivante :

$$P = \left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T U(t).I(t).dt \quad (4.1)$$

Avec  $P$  = puissance (W)

$U(t)$  = tension appliquée (V)

$I(t)$  = courant de décharge (A)

Dans le cas de notre configuration expérimentale,  $U(t)$  est la mesure de la voie 1 multipliée par le coefficient de la sonde.  $I(t)$  est obtenu en divisant la mesure de la voie 2 (qui est une tension) par la résistance de  $100\Omega$ .

En effet, comme  $U = R.I$ , nous avons :  $I(t)$  (en ampères) = [sonde basse tension (en volts)]/100. Comme la fréquence du signal électrique est de 20 kHz, la mesure de la puissance peut s'exprimer de la façon suivante :

$$P(W) = \int_0^{\frac{1}{20 \times 10^3}} 1000. [sonde HT]. \frac{1}{100}. [sonde basse tension] dt \quad (4.2)$$

Comme notre l'oscilloscope à mémoire, dispose de fonctions intégrées (math), nous pouvons obtenir directement l'affichage d'une puissance moyennée (cumul de 25000 mesures élémentaires sur une période), en calculant la valeur moyenne du produit  $V * I$  sur 25000 points.

La concentration d'ozone dans l'eau (mg/l) a été mesurée avec un mesureur d'ozone dissous dans l'eau (Eco Sensors/Etats-Unis).

Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions climatiques stables de température (20-25 °C) et humidité (60 à 70 %).

### 4.3. Résultats et Discussion

La méthodologie des plans expériences est utile pour le criblage, l'optimisation et les tests de robustesse. Des expériences classiques de type "un facteur-à-la-fois" ont été effectuées dans cette section pour identifier le domaine de variation des trois facteurs. L'étape d'optimisation d'un procédé expérimental doit permettre la détermination des valeurs des facteurs pour lesquels la concentration d'ozone est maximale et la puissance consommée est minimale.

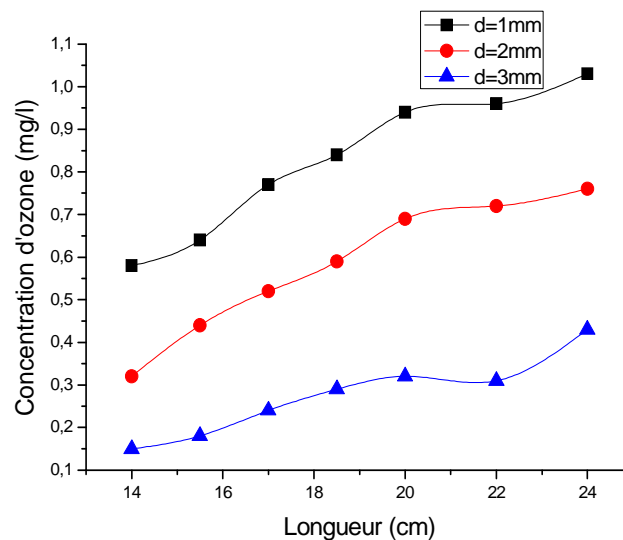
Dans ce travail, l'étude a été effectuée en prenant en compte les deux dimensions les plus importantes d'un générateur d'ozone cylindrique, qui sont l'intervalle inter-électrodes  $d$ (mm) et la longueur des électrodes  $L$ (cm) [53, 54]. Comme la tension d'amorçage de la DBD  $V$  (kV) dépend directement de  $d$ , ce facteur a été également pris en compte dans cette étude.

#### 4.3.1. Expériences de criblage

Les limites de variation de la longueur  $L$  et de la tension  $V$  ont été définies en effectuant des expériences de type « un-facteur-à-la fois ». Vu que l'intervalle de décharge  $d$  ne peut prendre que trois valeurs différentes seulement ( $d= 1$  mm,  $2$  mm ou  $3$  mm), les expériences correspondantes n'ont pas été effectuées. La longueur des électrodes de réacteur DBD a été variée, en modifiant la longueur de l'électrode interne en adhésif en aluminium collé à l'intérieur de la barrière diélectrique.

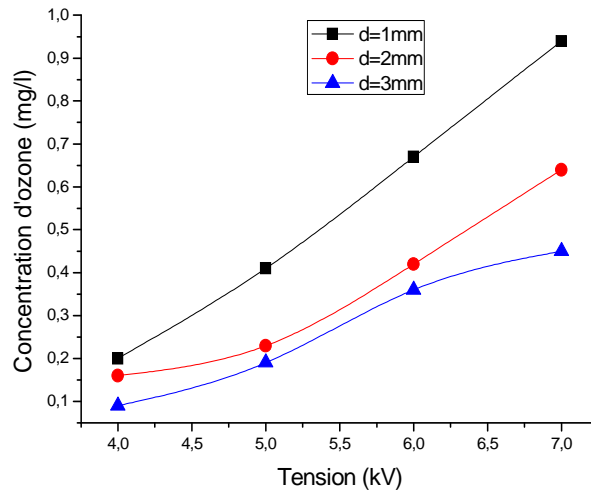
- Expérience 1.1. Longueur des électrodes variable  $L$  (14-24) cm pour une tension constante  $V = 6$  kV et trois valeurs différentes de la distance  $d$ .
- Expérience 1.2. Tension variable  $V$  (4-7) kV, pour une longueur des électrodes constante  $L = 20$  cm et trois valeurs différentes de la distance  $d$ .

Les résultats obtenus des expériences sont représentés aux figures 4.4 et 4.5. La concentration d'ozone dans l'eau (mg/l) a été considérée comme significative pour l'évaluation du processus et représentée comme fonction des deux facteurs.



**Figure.4.4.** Variation de la concentration d'ozone en fonction de la longueur des électrodes, pour différentes valeurs de l'intervalle inter-électrodes  $d$ .





**Figure.4.5.** Variation de la concentration d'ozone en fonction de la tension  $V$ , pour différentes valeurs de l'intervalle inter-électrodes  $d$ .

Les domaines de variation de  $L$  et  $V$  ont été ensuite définis sur la base des résultats obtenus dans cette section. Ainsi, les résultats des expériences 1.1 (Fig.4.4) obtenus en fonction de la longueur  $L$  des électrodes montrent que la concentration d'ozone  $C$  (mg/l) est quasi-linéaire en fonction de  $L$  et ce quelque soit la valeur de l'intervalle 'd'. Le domaine de variation de la longueur a été défini comme suit :  $L_{\min} = 14$  cm et  $L_{\max} = 20$  cm.

En outre, comme on pouvait s'y attendre, la concentration  $C$  pour les petites valeurs de  $d$  était nettement supérieure, en raison du pourcentage plus élevé de l'ozone lorsque le volume de décharge diminue. En effet, pour un volume de décharge élevé, une quantité plus importante d'oxygène passe à travers le générateur sans être transformé en ozone.

Par ailleurs, le graphique de la figure 4.5 montre que, dans les conditions de l'expérience 1.2, la concentration d'ozone dissous croît continuellement en fonction de la tension appliquée. Comme la concentration est presque négligeable pour  $V = 4$  kV, le domaine de variation de la tension a été défini comme  $V_{\min} = 5$  kV et  $V_{\max} = 7$  kV.

#### 4.3.2. Identification du point de fonctionnement optimal

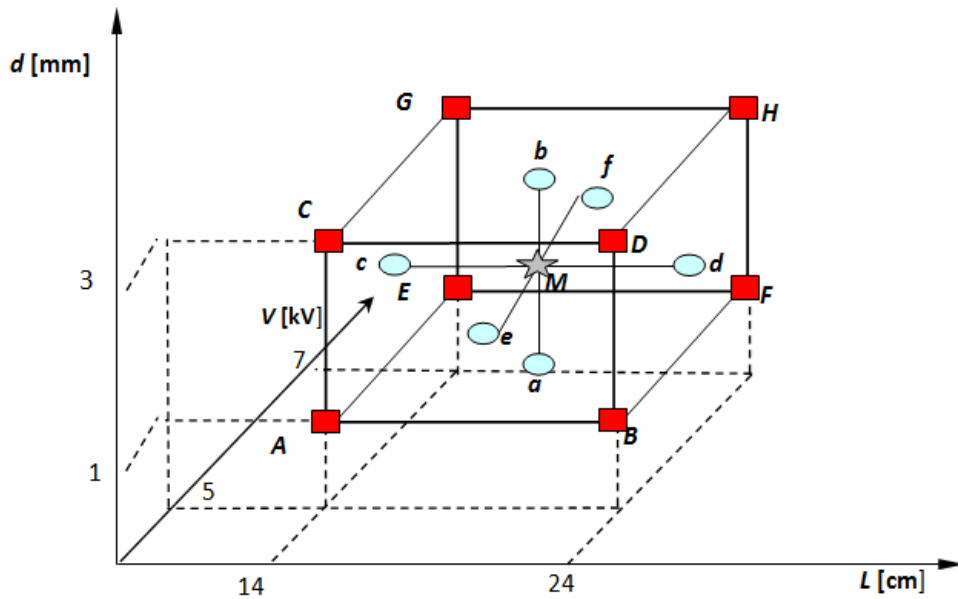
L'identification des valeurs optimales de dimensions géométriques a été réalisée en utilisant un plan composite à faces centrées (CCF), les deux niveaux "max" et "min" sont les limites établies dans la section précédente pour chacune des deux variables ( $L_{\min}$ ,  $L_{\max}$ ) et ( $V_{\min}$ ,  $V_{\max}$ ). Le point central ( $L_c$ ,  $V_c$ , et  $d_c$ ) étant calculé comme suit:

$$L_c = (L_{\min} + L_{\max})/2 = (14 + 24)/2 = 19 \text{ cm} \quad (4.3)$$

$$V_c = (V_{\min} + V_{\max})/2 = \frac{5+7}{2} = 6 \text{ kV} \quad (4.4)$$

$$d_c = (d_{min} + d_{max})/2 = (1 + 3)/2 = 2 \text{ mm} \quad (4.5)$$

La figure .4.6 montre les expériences d'un plan composite à faces centrées (CCF) avec 3 facteurs. Il se compose de 8 expériences situées au sommet du cube (points carrés A, B ... H), 6 expériences situés dans les centres des faces du cube (points ronds a, b ... f) et 3 expériences identiques dans le point central M (point étoile). Ainsi, un plan d'expériences CCF avec 3 facteurs comprend (2x17) expériences.



**Figure .4.6.** Schéma représentatif d'un plan CCF avec 3 facteurs : Longueur d'électrode  $L$  (cm); Distance inter-électrode  $d$  (mm); Tension appliquée  $V$  (kV).

Les résultats des expériences sont donnés dans le tableau I. En plus de la concentration d'ozone  $C_o$  (mg/l), la puissance spécifique  $P_s$  (W/(mg / l)) a été également considéré comme une réponse significative et rapportée dans le tableau.

**Tableau 4.1** : Résultats du plan expérimental CCF

Tension V (kV)	Longueur L (cm)	Intervalle de décharge d (mm)	Concentration d'ozone C (mg/l)	Puissance spécifique P <sub>s</sub> (W/(mg/l))
5	14	1	0,29	317,724
7	14	1	0,58	166,034
5	24	1	0,8	133,188
7	24	1	1,03	108,107
5	14	3	0,11	1140,36
7	14	3	0,15	933,333
5	24	3	0,24	584,583
7	24	3	0,44	355,682
5	19	2	0,46	300
7	19	2	0,59	247,458
6	14	2	0,26	508,462
6	24	2	0,69	197,246
6	19	1	0,77	150,649
6	19	3	0,29	550,448
6	19	2	0,52	273,077
6	19	2	0,5	284
6	19	2	0,51	278,431

Les modèles mathématiques de la concentration C et de la puissance spécifique P<sub>s</sub> (W/mg/l) ont été obtenus avec MODDE.05 et représentés à la figure 4.6, où les effets non significatifs ont été négligés.

Les modèles mathématiques proposés par MODDE 5.0 sont montrés par les équations suivantes et les tracés des coefficients à la figure 4.6 :

$$C = 0.484 + 0.089 V^* - 0.224 d^* + 0.181 L^* - 0.061 L^*L^* - 0.035 V^*d^* - 0.068d^*L^* \quad (4.6)$$

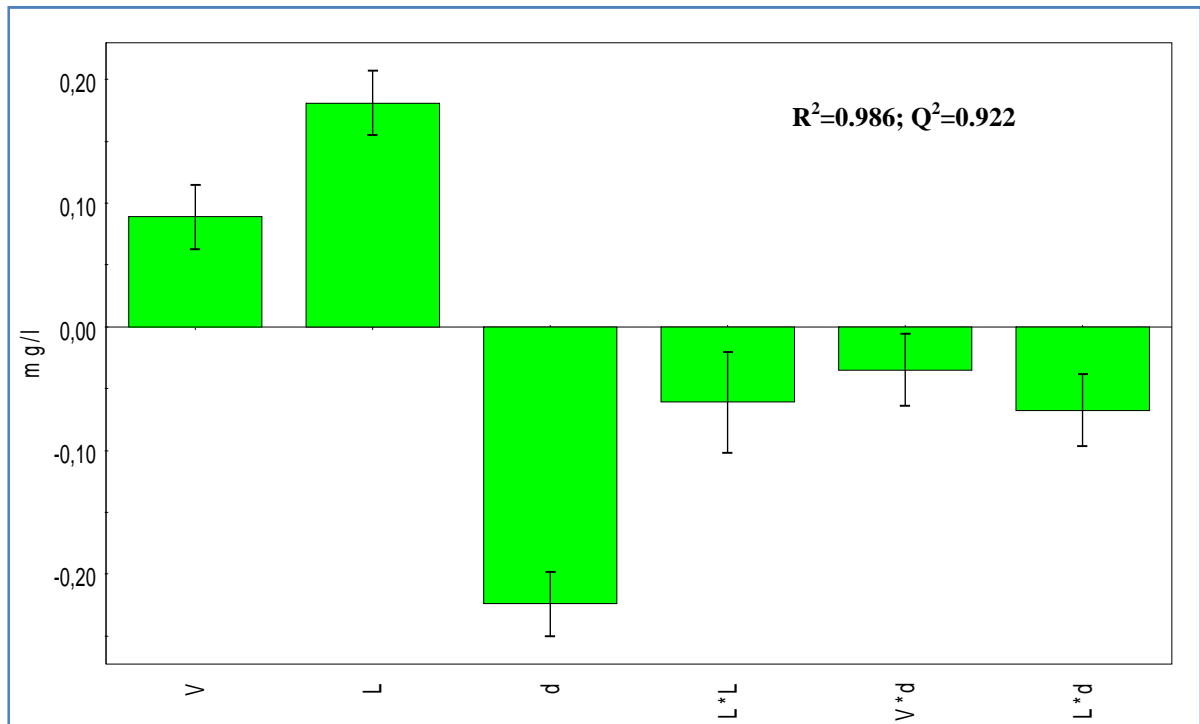
$$P_s = 0.74 - 0.695 V^* + 2.06 d^* - 1.59 L^* + 1.64 L^{*2} - 0.630 V^*d^* - 1.59 d^*L^* \quad (4.7)$$

Comme les critères statistiques de validation sont proches de l'unité, R<sup>2</sup> = 0,986 et Q<sup>2</sup> = 0,922 pour la réponse C et R<sup>2</sup> = 0,953 et Q<sup>2</sup> = 0,850 pour la réponse P<sub>s</sub>, les deux modèles ont été validés et ont été utilisés pour la prédiction et l'optimisation.

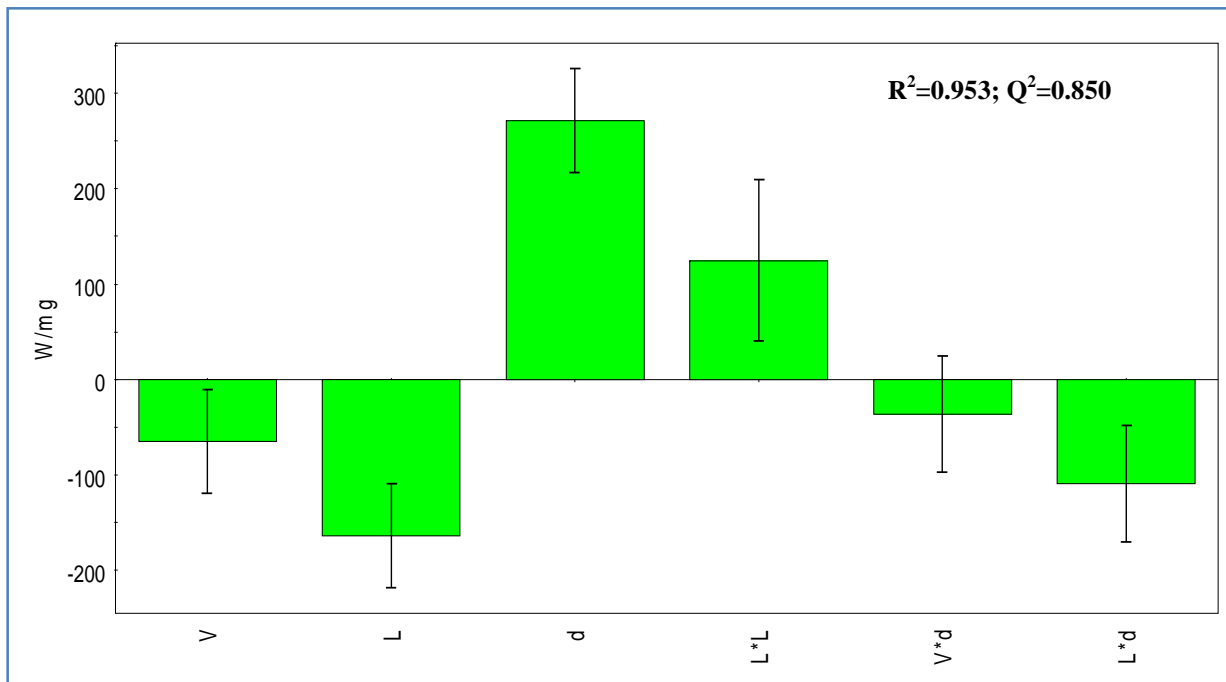
Selon les résultats obtenus (figure.4.6.), nous remarquons que les effets des trois facteurs sont significatifs pour les deux réponses. Comme prévu, tandis que la concentration augmente en fonction de la tension V et la longueur L, la puissance diminue en fonction de ces deux facteurs.

En outre, l'effet de l'intervalle de décharge d est négatif tandis que celui de la longueur L est positif pour la concentration d'ozone, ce qui confirme que de petites valeurs de d et de grandes valeurs de L sont recommandées pour augmenter la quantité d'ozone produite.

D'un autre côté, les résultats obtenus à partir des modèles mathématiques n'ont pas indiqué d'interaction significative entre la tension et les facteurs géométriques L ou D. Toutefois, l'interaction entre la longueur L et l'intervalle d est significatif pour les deux réponses, ce qui confirme l'intérêt d'optimiser les dimensions géométriques du générateur.



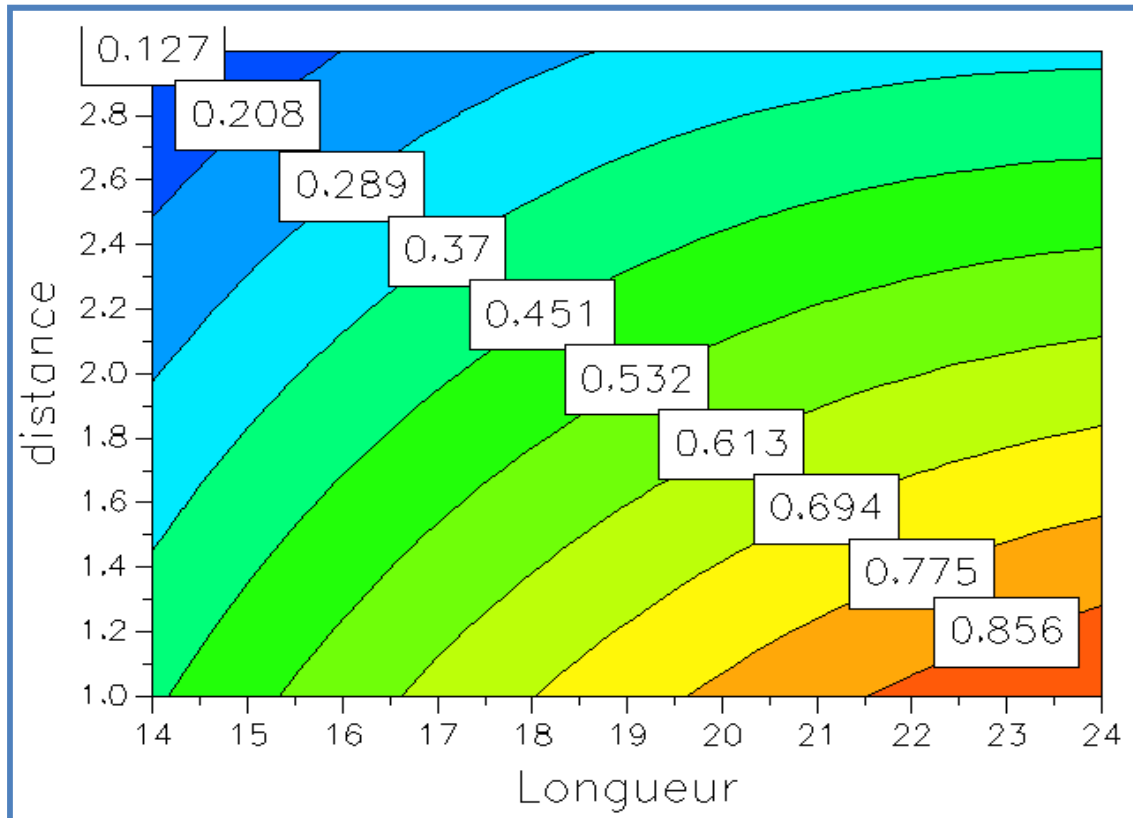
a)



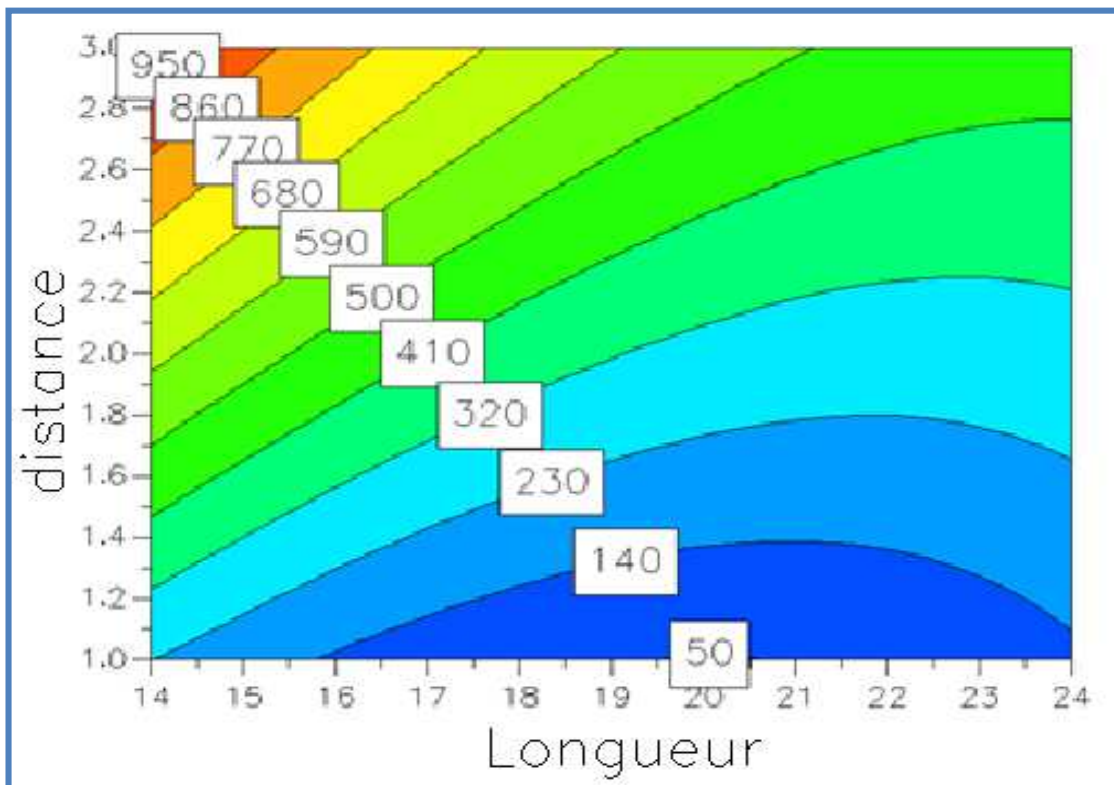
b)

**Figure 4.6.** Coefficients des modèles obtenus pour a) concentration d'ozone  $C_o$  et b) puissance spécifique  $P_s$ .

La figure .4.7 trace les contours d'iso-réponse obtenues avec le présent modèle. Le logiciel offre par ailleurs la possibilité d'identifier les valeurs optimales des facteurs pour une concentration d'ozone maximale avec une consommation d'énergie minimale. Il contient une routine d'optimisation qui est capable de traiter simultanément plusieurs réponses, affectés par différents coefficients de pondération. MODDE.05 dispose d'un outil d'optimisation qui propose les valeurs optimales des facteurs en maximisant la concentration en ozone et en réduisant la puissance.



a)



b)

**Figure 4.7.** Contours de réponse pour a) concentration d'ozone et b) puissance spécifique.

Selon ce modèle, l'optimum du processus, en maximisant la concentration d'ozone et en minimisant la puissance spécifique, est obtenue pour  $V = 6,99$  kV,  $L = 23,3$  cm et  $d = 1$  mm correspondant à  $C = 1,03$  mg/l et  $P = 72,16$  W/mg/l (figure 4.8). Toutefois, si la consommation d'énergie est considérée comme une réponse plus importante que la concentration d'ozone, l'optimiseur propose un autre point de fonctionnement en minimisant la puissance spécifique qui est  $V = 6,99$  kV,  $L = 20,15$  cm et  $d = 1$  mm correspondant à  $C = 0,92$  mg/l et  $P = 19,14$  W/mg/l (figure 4.9). Selon ces résultats, en réduisant la longueur du générateur d'ozone par plus de 3 cm (de 23,3 cm à 20,15 cm) la concentration d'ozone diminue de 10,7%  $[(1.03-0.92)/1,03*100]$ , pour une diminution de la puissance spécifique de 73,4 %  $[(72,01 \text{ à } 19,14) / 72.01 * 100]$ .

Les résultats obtenus prouvent qu'il n'est pas recommandé d'utiliser forcément des tubes d'ozone de grande longueur et il est plus approprié d'utiliser plusieurs générateurs de longueur plus courte.

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	Concentration d'ozone	Maximize	1	1,0061	1,1049	
2	puissance spécifique	Exclude				

Iteration:	5000	Iteration slider:					
	1	2	3	4	5	6	7
	tension	longueur	Intervalle de décharge	Concentration d'ozone	puissance spécifique	iter	log(D)
1	6,9989	23,3448	1,001	1,0374	72,4185	2538	-0,331
2	6,9958	23,3681	1,0001	1,038	73,1531	5000	-0,33
3	6,9993	23,3676	1,0001	1,0384	73,0374	2149	-0,3333
4	6,8	23,6466	1,0001	1,0214	88,2284	2619	-0,1514
5	6,9992	23,3729	1,0003	1,0385	73,2394	2776	-0,3326
6	6,9993	23,3676	1,0001	1,0384	73,0374	2149	-0,3333
7	6,9987	23,3404	1,0001	1,0376	72,16	1732	-0,3334
8	6,9989	23,3344	1,0012	1,0371	72,1105	3130	-0,3305

**Figure .4.8.** Résultats du programme d'optimisation de MODDE 5.0 pour la maximisation de la concentration d'ozone.

	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	Concentration d'ozone	Exclude				
2	puissance spécifique	Minimize	1		1,26012	105,375

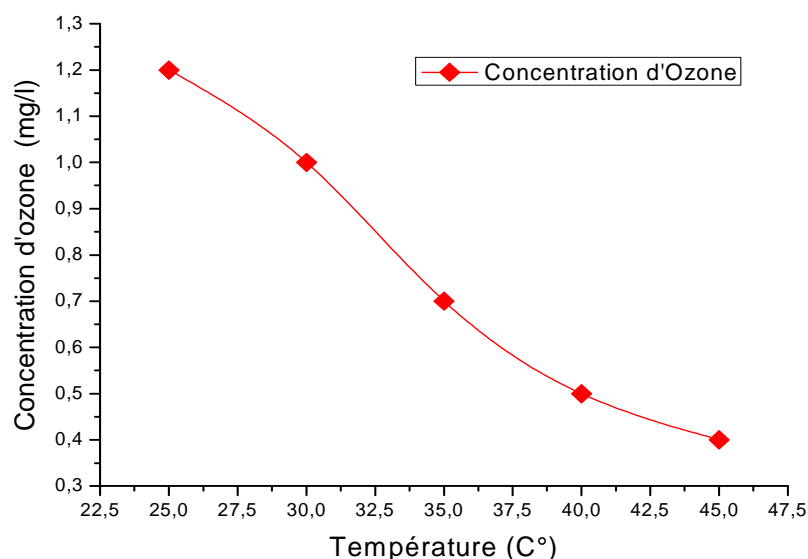
  

Iteration: 5000		Iteration slider: <input type="text"/>					
	1	2	3	4	5	6	7
	tension	longueur	Intervalle de décharge	Concentration d'ozone	puissance spécifique	iter	log(D)
1	6,9717	20,0075	1,1812	0,8629	58,6827	1440	-0,5169
2	6,9988	20,0994	1,0257	0,9125	24,5556	5000	-1,3005
3	6,8358	20,1115	1,0371	0,8899	31,7919	1572	-1,0655
4	6,8	19,7998	1	0,8814	25,1735	2002	-1,2777
5	6,9995	20,156	1	0,9221	19,1408	1770	-1,5303
6	6,8358	20,1115	1,0371	0,8899	31,7919	1572	-1,0655
7	7	22	1	0,9951	37,4462	889	-0,9179
8	6,4	20	1	0,8409	36,1367	889	-0,95

**Figure .4.9.** Résultats du programme d'optimisation de MODDE 5.0 pour la minimisation de la puissance spécifique.

#### 4.3.3. Influence de l'échauffement de générateur au cours de fonctionnement sur la concentration et solutions adoptées

La génération d'ozone par le réacteur à décharge à barrière diélectrique, est accompagnée par un échauffement important du générateur. Dans cette expérience nous avons examiné l'influence de la chaleur générée par la décharge en mesurant la température du réacteur, et en mesurant le taux d'ozone correspondant. La figure 4.10 montre les résultats obtenus.



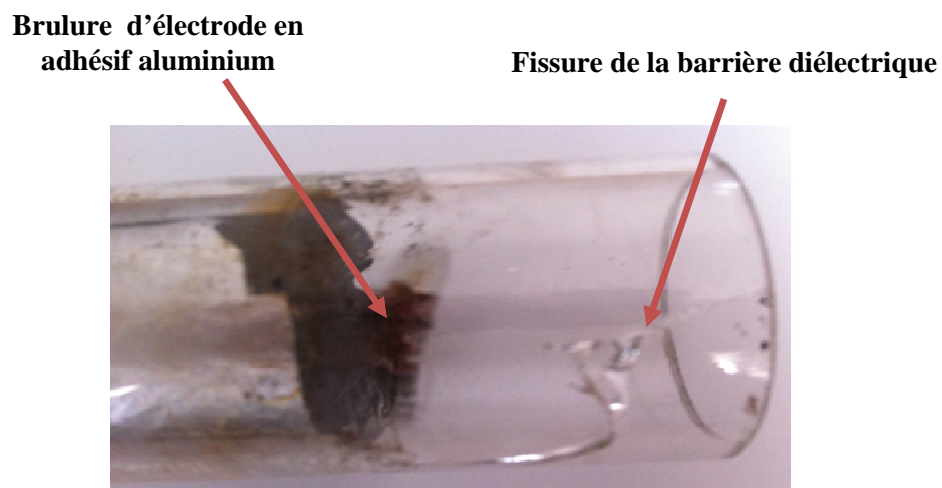
**Figure 4.10.** Évolution de concentration d'ozone mesuré dans l'eau en fonction de la température du générateur d'ozone ( $U=7kV$ ).



Les résultats trouvés affirment les conclusions dans plusieurs travaux de recherche que l'échauffement de réacteur influe négativement sur la concentration d'ozone [18-19] et qui peut aussi endommager la barrière diélectrique.

D'autres expériences ont été faites afin d'examiner la robustesse de notre générateur d'ozone au niveau de sa barrière diélectrique. Nous avons laissé fonctionner le générateur d'ozone sans arrêt, pour constater tout endommagement éventuel au niveau de la barrière diélectrique.

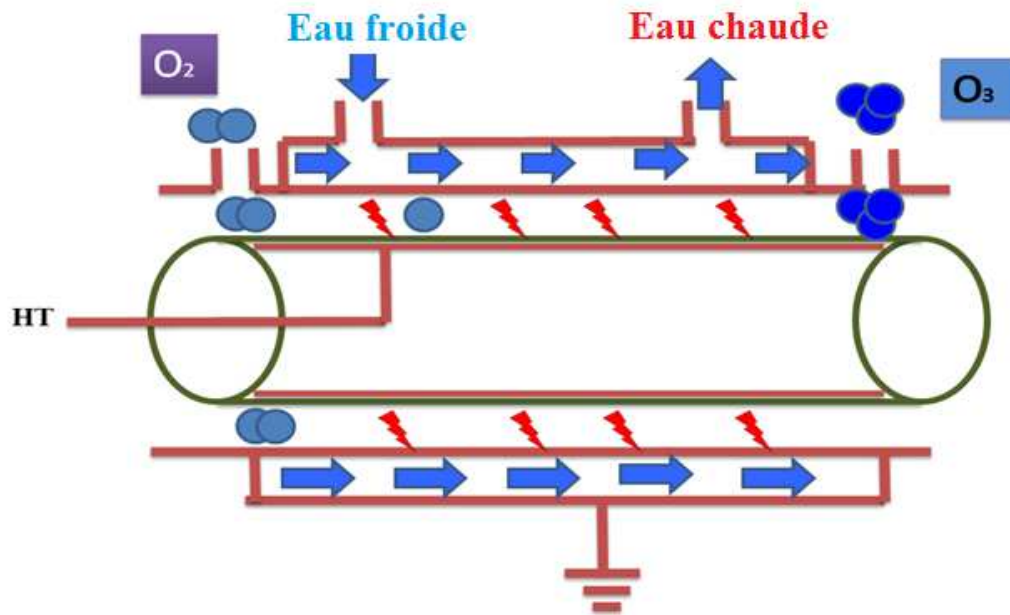
Après 40 min de fonctionnement nous avons constaté un grand endommagement et une fissure au niveau de la barrière diélectrique à cause de l'échauffement excessif dégagé par la décharge électrique (Figure 4.11).



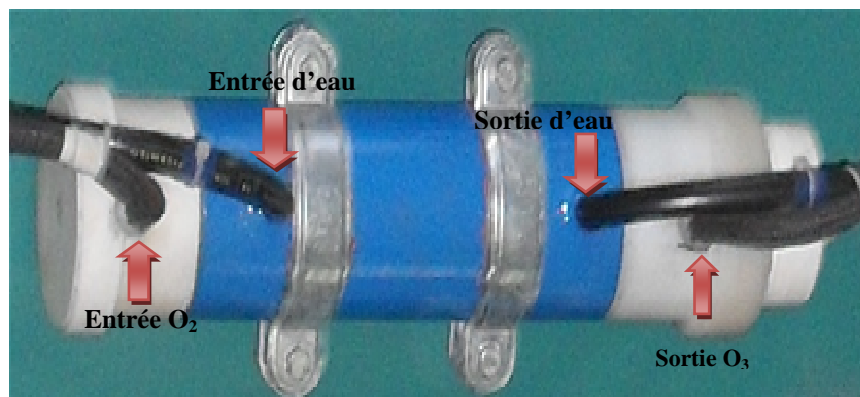
**Figure 4.11.** *Endommagement de la barrière diélectrique après un fonctionnement de 40 mn sans refroidissement.*

A la suite de ces résultats un nouveau générateur d'ozone comprenant un système de refroidissement à eau a été développé (figure.4.11 et 4.12).

Un système de refroidissement est utilisé pour refroidir le réacteur, en utilisant un tube en acier inoxydable relié à la masse, employé comme un échangeur thermique lorsque le liquide de refroidissement est distribué sur sa surface. Le procédé de refroidissement à eau est un circuit ouvert, où l'eau froide sort d'un réservoir et l'eau chaude revient dans un autre réservoir.



**Figure 4.12.** Schéma descriptif du nouveau générateur d'ozone réalisé avec un système de refroidissement à eau.



**Figure. 4.12.** Photographie du nouveau générateur d'ozone réalisé avec un système de refroidissement à eau.

#### 4.4. Conclusion

L'efficacité de la génération d'ozone est liée aux dimensions géométriques du générateur lui-même. Une procédure expérimentale sur la base de techniques de surface de réponse a été proposée pour la détermination des dimensions optimales du générateur. Les résultats obtenus ont montré que l'intervalle de la décharge DBD doit être aussi petit que possible, tandis que la longueur des électrodes doit être optimisée pour un rendement optimal.

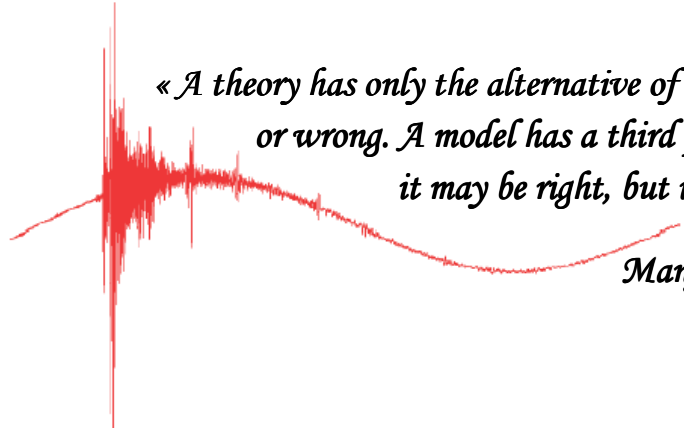
Par ailleurs, nous avons étudié dans ce chapitre l'influence de l'échauffement du générateur au cours de fonctionnement généré par un réacteur à DBD sur la production d'ozone et sur sa robustesse. Les résultats obtenus ont conduit à la réalisation d'un générateur d'ozone

robuste comprenant un système de refroidissement à eau, afin d'assurer la continuité de fonctionnement pendant de longues durées.

La concentration d'ozone atteint une valeur de 0.96 mg/l ce qui confirme que le système est bien efficace pour la désinfection des eaux, alors que le traitement des eaux usées comprenant des métaux lourds nécessite une concentration d'ozone beaucoup plus élevée, ce qui nous a motivé à réaliser un SKID mobile comprenant plusieurs générateurs d'ozone, pour l'appliquer ultérieurement dans l'industrie et qui sera notre objectif au chapitre suivant.

# CHAPITRE 5

## REALISATION ET ETUDE SUR UN SKID POUR TRAITEMENT DES EAUX



*« A theory has only the alternative of being right  
or wrong. A model has a third possibility:  
it may be right, but irrelevant »*

*Manfred Eigen*

# CHAPITRE 5

## Réalisation et étude sur un Skid pour traitement des eaux

Le traitement efficace d'une quantité considérable d'eau par l'ozone nécessite au moins un dispositif semi-industriel comprenant plusieurs générateurs d'ozone afin d'augmenter la quantité d'ozone à produire.

Dans ce chapitre, nous utilisons les résultats du chapitre précédent, concernant les dimensions géométriques optimales du générateur d'ozone (décharge à barrière diélectrique volumique) pour réaliser, présenter et décrire un SKID mobile qui comprend six générateurs d'ozone utilisés pour le traitement des eaux.

En premier temps, nous étudions expérimentalement le SKID mobile, en examinant les différentes configurations pour trouver la conception optimale, en termes de production d'ozone.

Dans la deuxième partie nous allons utiliser ce dispositif pour traiter l'eau de la rivière El-mekerra, d'une eau potable infectée ainsi que les eaux usées de la station d'épuration de la wilaya de Sidi-Bel-Abbès, en citant les résultats des analyses bactériologiques et physico-chimiques des eaux traitées avant et après traitement.

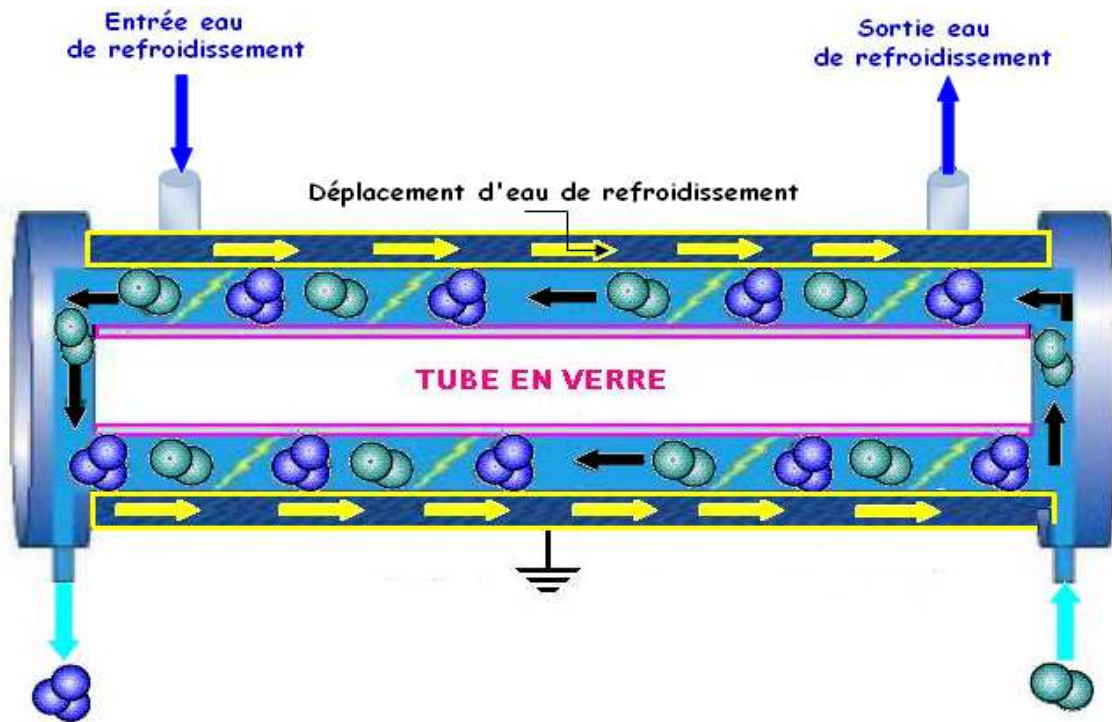
### 5.1. Description de générateur d'ozone étudié

Nous avons tiré profit des résultats de chapitre précédent concernant les dimensions géométriques optimales pour un meilleur rendement énergétique de production d'ozone afin de réaliser six générateurs d'ozone à DBD, munis d'un système de refroidissement à eau, dont les dimensions sont les suivantes :

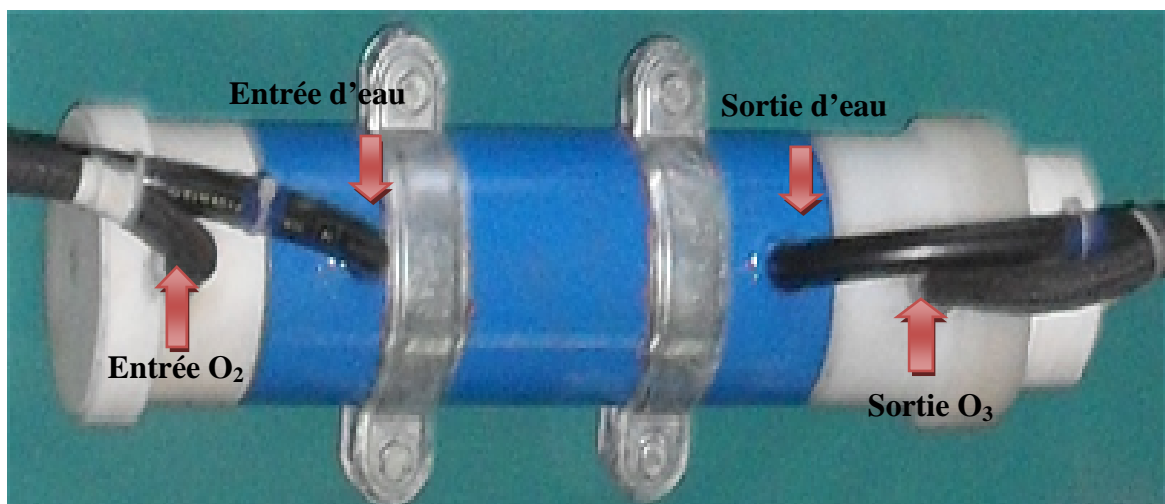
- Tube cylindrique en acier inoxydable:
  - Diamètre intérieur : 52 mm
  - Épaisseur : 1 mm
  - longueur : 200 cm
- Barrière diélectrique (tube en verre)
  - Diamètre extérieur =50 mm
  - Épaisseur : 2.5 mm

- Longueur : 200 mm

Les figures 5.1 et 5.2 montrent un schéma descriptif et une photographie du nouveau générateur d'ozone réalisé.



**Figure. 5.1.** Schéma descriptif du générateur d'ozone avec système de refroidissement



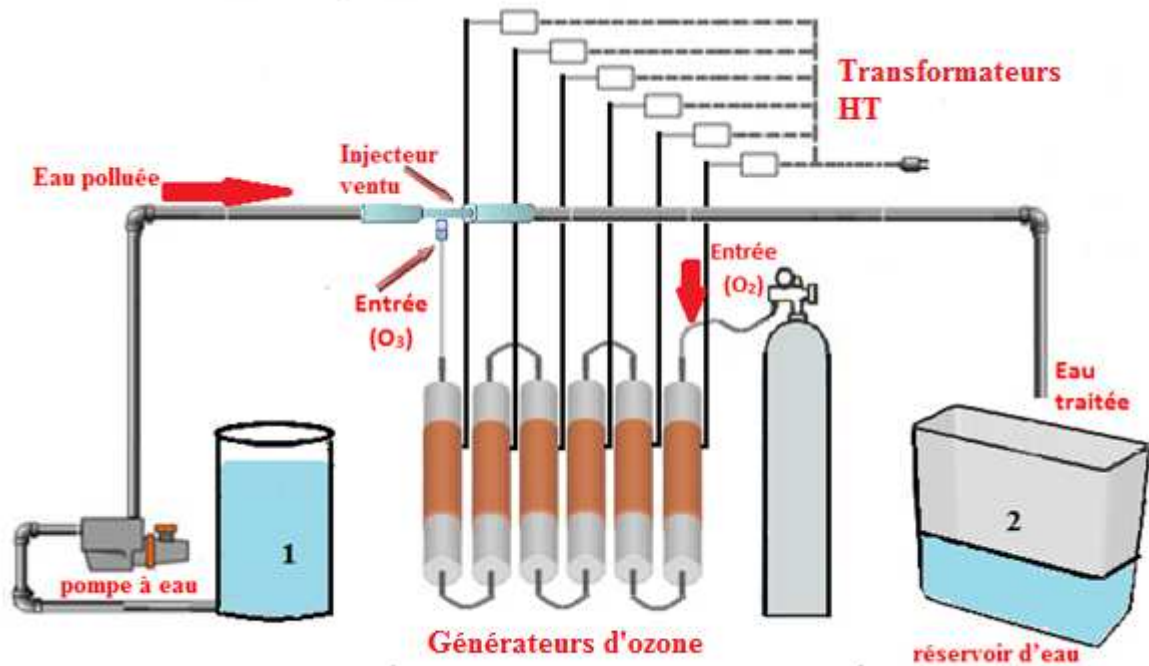
**Figure. 5.2.** Photographie du nouveau générateur d'ozone avec un système de refroidissement

## 5.2. Description du Skid mobile

L'idée générale est de regrouper plusieurs générateurs d'ozone afin de les exploiter dans une installation de traitement des eaux produisant taux d'ozone élevé (figure 5.3).

Le dispositif comprend six générateurs d'ozone à décharge à barrière diélectrique qui peuvent être montés en série ou en parallèle, pour une meilleure production d'ozone. Ces générateurs d'ozone sont fournis en oxygène par une bouteille en oxygène de pureté 96% avec un régulateur de débit, chaque générateur étant alimenté par un transformateur haute tension.

L'eau contaminée à traiter, est mise en mouvement au moyen d'une pompe à eau. Un système Venturi, permet l'injection d'ozone dans de l'eau contaminée, l'eau ozonée est considérée comme de l'eau traitée (figure 5.3).

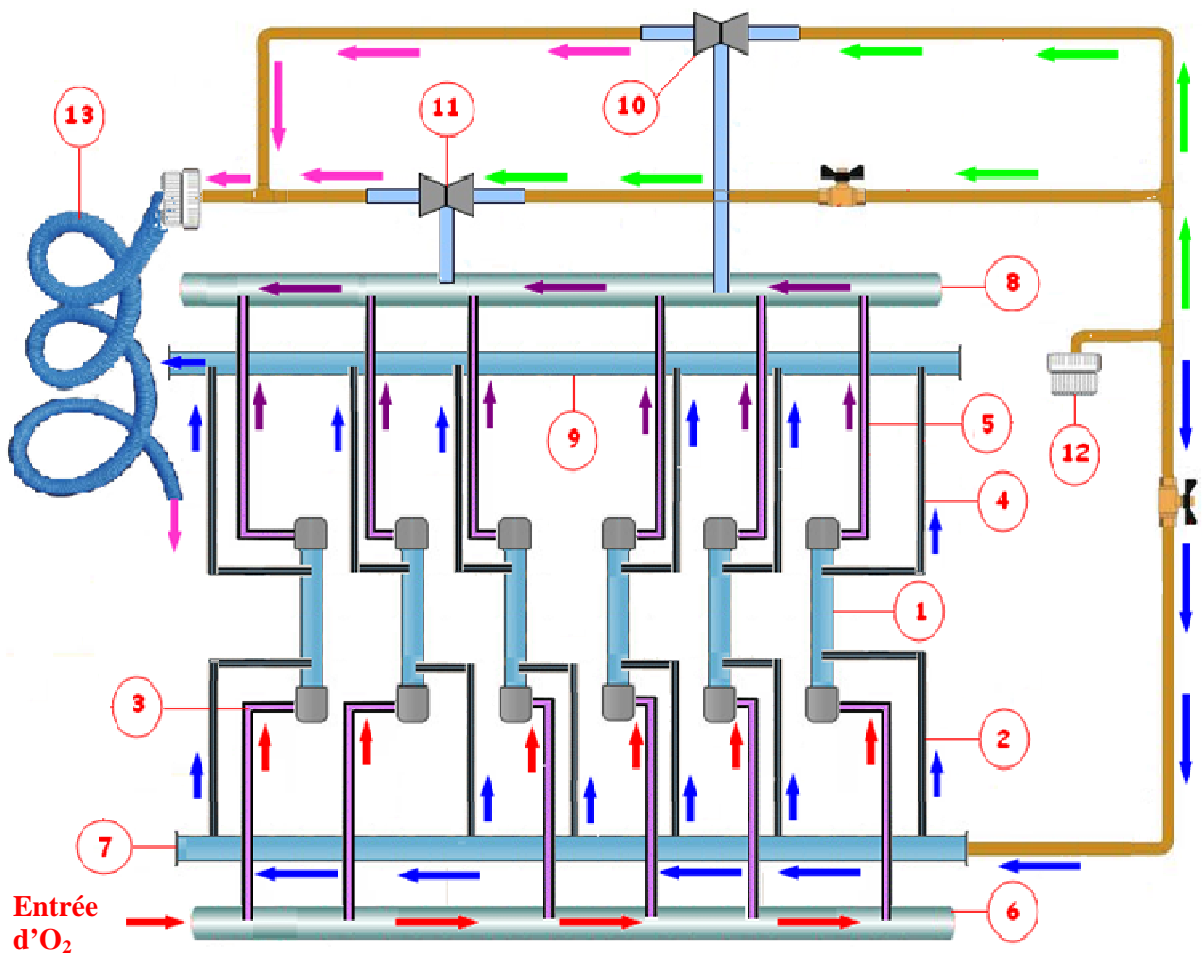


**Figure. 5.3.** Schéma de principe du procédé de traitement d'eau par l'ozone

Le Skid mobile est un modèle à échelle semi-industrielle qui comprend six générateurs d'ozone pour satisfaire la demande dans les applications industrielles et commerciales. Cette unité peut fonctionner avec de l'oxygène ou de l'air sec. Une description schématique du SKID est montrée à la figure 5.4 et une photo de ce SKID est illustrée à la figure 5.5.

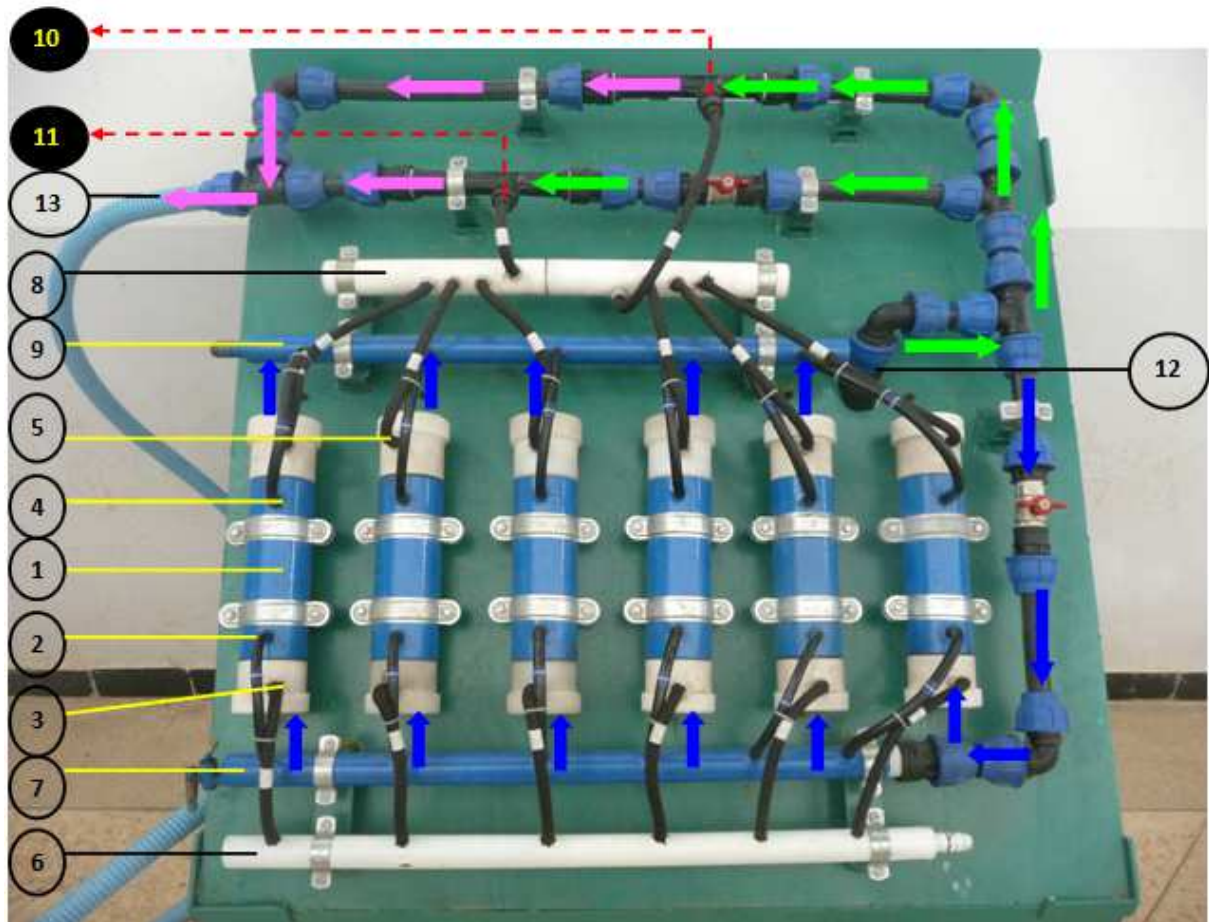
Ce Skid comprend :

- ✓ Six générateurs d'ozone avec circuit de refroidissement à eau,
- ✓ Six transformateurs élévateurs de tension avec deux armoires de commande comprenant chacun un disjoncteur unipolaire,
- ✓ Une bouteille d'oxygène pure munis d'un manomètre et une vanne de régulation de débit d'oxygène de 0 à 30 l/mn,
- ✓ deux injecteurs venturi pour assurer le mélange eau-ozone,
- ✓ Un réservoir d'eau de 400 litres,
- ✓ Un bassin pour remplissage de l'eau ozonée,
- ✓ Pompe à eau dont le débit est de 70 l/mn.



a)





b)

1- Générateur d'ozone. 2- Entrée d'eau de refroidissement. 3- Entrée de l'air dans le générateur. 4- Sortie d'eau de refroidissement. 5- Sortie de l'ozone du générateur. 6- Colonne d'entrée d'air. 7- Colonne d'entrée d'eau de refroidissement. 8- Colonne d'O<sub>3</sub> généré par les six générateurs. 9- Colonne d'évacuation d'eau de refroidissement. 10- Venturi d'aspiration 1. 11- Venturi d'aspiration 2. 12- Entrée d'eau à traiter. 13- Sortie eau ozonée.

- ➔ Entrée d'O<sub>2</sub>.
- ➔ Sortie ozone.
- ➔ Eau de refroidissement.
- ➔ Eau polluée à traiter.
- ➔ Eau ozonée.

**Figure. 5.4.** a) Schéma descriptif du fonctionnement du SKID, b) photographie du SKID.

### 5.3. Détermination de la configuration optimale

Afin d'étudier expérimentalement le procédé de traitement d'eau par l'ozone, plusieurs configurations et expériences ont été réalisées, en se basant sur l'influence de différents montages de générateurs d'ozone sur la concentration d'ozone et de faire en sorte que la concentration d'ozone soit maximale et la consommation de gaz d'oxygène minimale.

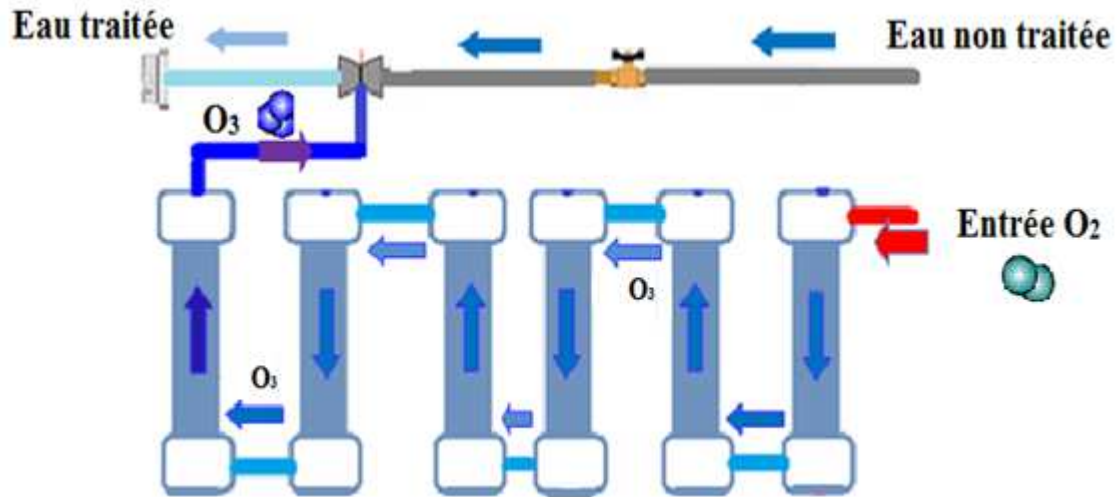
Le débit d'oxygène et le nombre de générateurs utilisés sont les facteurs influant la production d'ozone et sa concentration dans l'eau. Ces deux paramètres sont étudiés dans toutes les configurations, en introduisant un nouveau paramètre qui est la concentration spécifique  $C_s$ , qui représente le rapport entre la concentration d'ozone  $C_o$  et le débit d'oxygène  $Q$  ( $C_s = C_o/Q$ ), pour comparer entre toutes les configurations.

On souligne que la puissance consommée par chaque générateur d'ozone est de 90 W quelque soit la configuration utilisée.

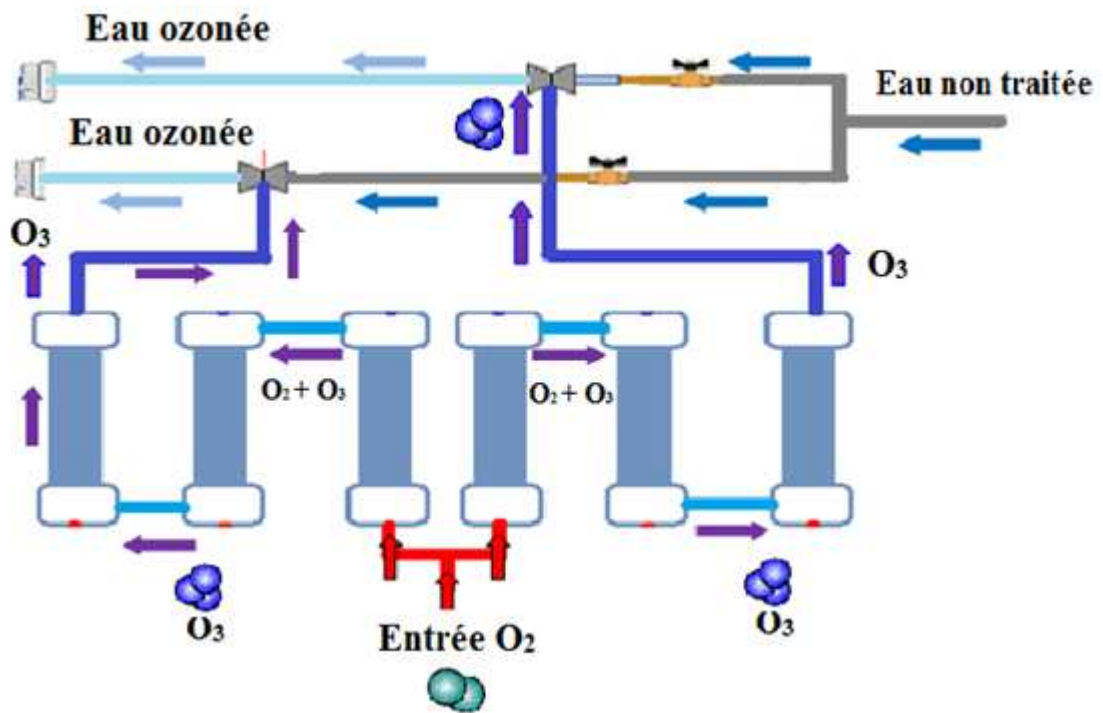
### 5.3.1. Montage en série

Les montages étudiés sont représentés sur les figures 5.6.a et 5.6.b,

- ❖ **Configuration 1** : Cette configuration comprend une seule rangée constituée de six générateurs montés en cascade. Les six générateurs d'ozone sont montés en cascade pour alimenter en ozone un seul injecteur Venturi (figure 5.6.a).
- ❖ **Configuration 2** : cette configuration comprend deux branches de trois générateurs montés en cascade (série). Les trois générateurs d'ozone sont montés en cascade pour alimenter en ozone un injecteur venturi : l'ozone sortant par le premier générateur entre dans le deuxième générateur et ainsi de suite jusqu'au dernier générateur. Ceci va permettre d'augmenter la concentration d'ozone à l'entrée de l'injecteur venturi (figure 5.6.b).



a)



b)

- O<sub>2</sub> pure
- O<sub>3</sub>
- Eau polluée
- Eau ozonée

**Figure. 5.5.** Montage en cascade a) un seul injecteur venturi  
b) c deux injecteurs venturi

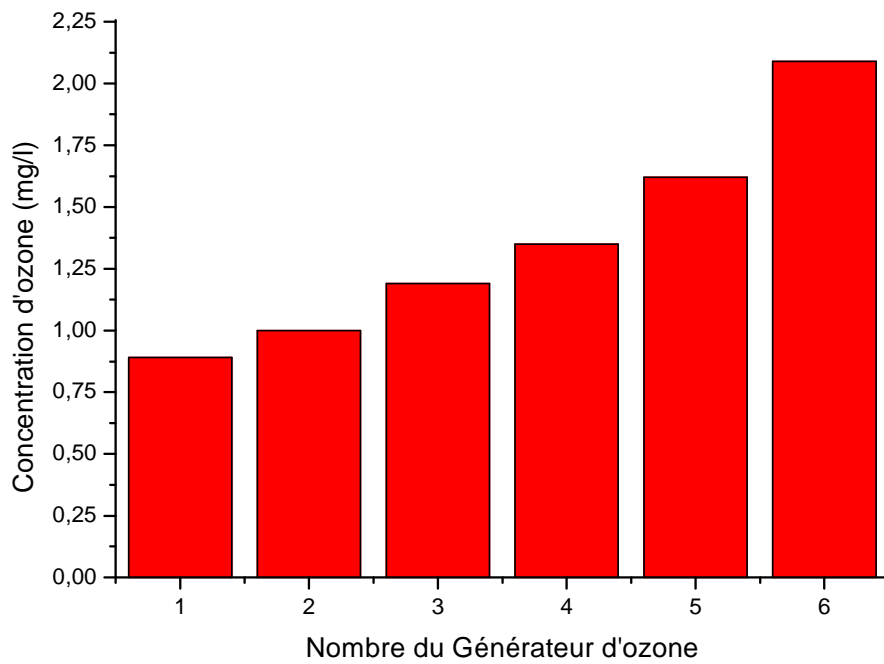
Afin de comparer entre les deux configurations, nous avons varié le débit d'oxygène et le nombre de générateurs d'ozone pour chaque configuration en mesurant la concentration d'ozone dans l'eau.

Le débit d'oxygène a été varié à l'aide d'un régulateur du débit installé à la sortie de la bouteille d'oxygène, par contre le nombre de générateurs d'ozone a été contrôlé par les deux armoires de commande. , les résultats obtenus sont présentés sur les figures 5.6, 5.7 et 5.8.

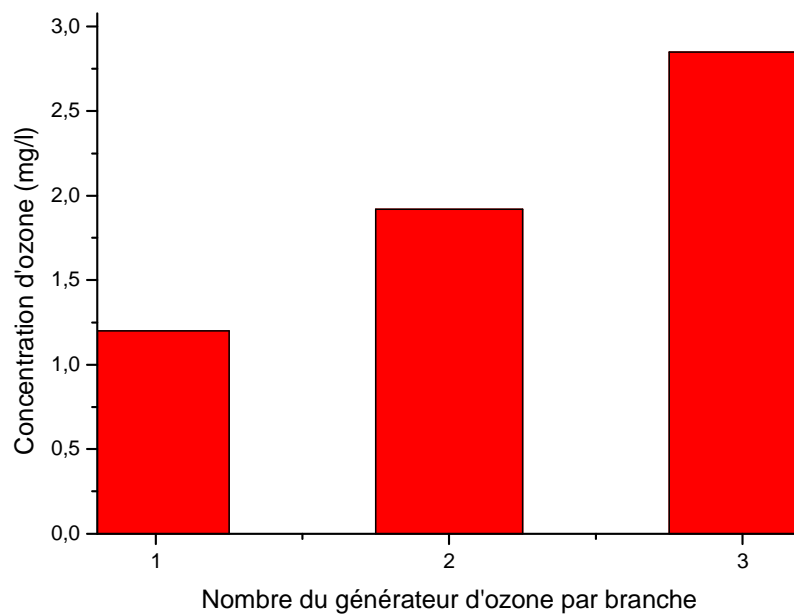
Les résultats trouvés montrent que l'augmentation du nombre de générateurs d'ozone montés en série augmente la production d'ozone, ce qui peut être justifié par l'accroissement de la quantité de molécules d'oxygène se transformant en ozone. Au vu des résultats obtenus, nous pouvons remarquer que l'utilisation de deux injecteurs venturi ne montre pas une grande utilité, sachant que cette configuration a été alimentée par un débit d'oxygène de 5 l/mn pour chaque injecteur soit un débit total d'oxygène de 10 l/mn. La concentration maximale d'ozone mesurée dans l'eau est de 2.87 mg/l ( $C_s=0,29$  mg/l). Par contre, l'utilisation d'un seul injecteur venturi permet d'avoir presque la même valeur de concentration pour un débit d'oxygène qui est inférieur de 50% par rapport à la configuration 2 ( $C_s=0,56$  mg/l) soit un débit total de 5 l/mn.

D'un autre côté, la figure 5.6 montre que l'augmentation du débit d'oxygène fait augmenter la concentration d'ozone et cela est dû à l'augmentation du nombre de molécule d'oxygène soumis aux décharges électrique pour se transformer en ozone.

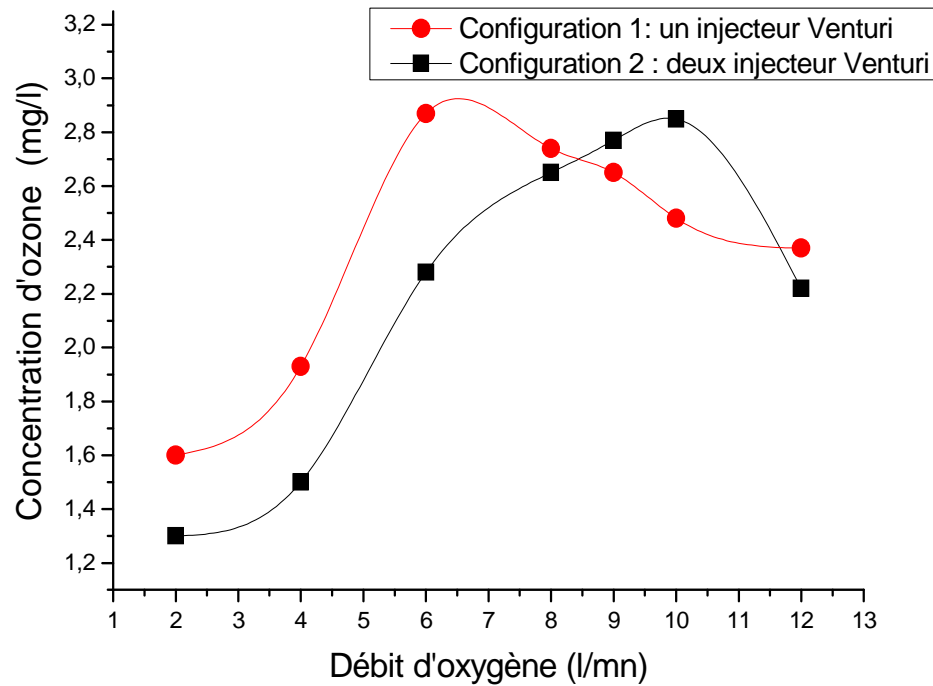
La comparaison entre les deux configurations montre l'intérêt d'utiliser un seul injecteur venturi en économisant la consommation en oxygène ( $C=0.56$  mg/).



**Figure. 5.6.** Concentration d'ozone en fonction du nombre de générateurs d'ozone par branche par le montage de la configuration 1 à un injecteurs Venturi



**Figure. 5.7.** Concentration d'ozone en fonction du nombre de générateurs d'ozone par branche par le montage de la configuration 2 à deux injecteurs Venturi

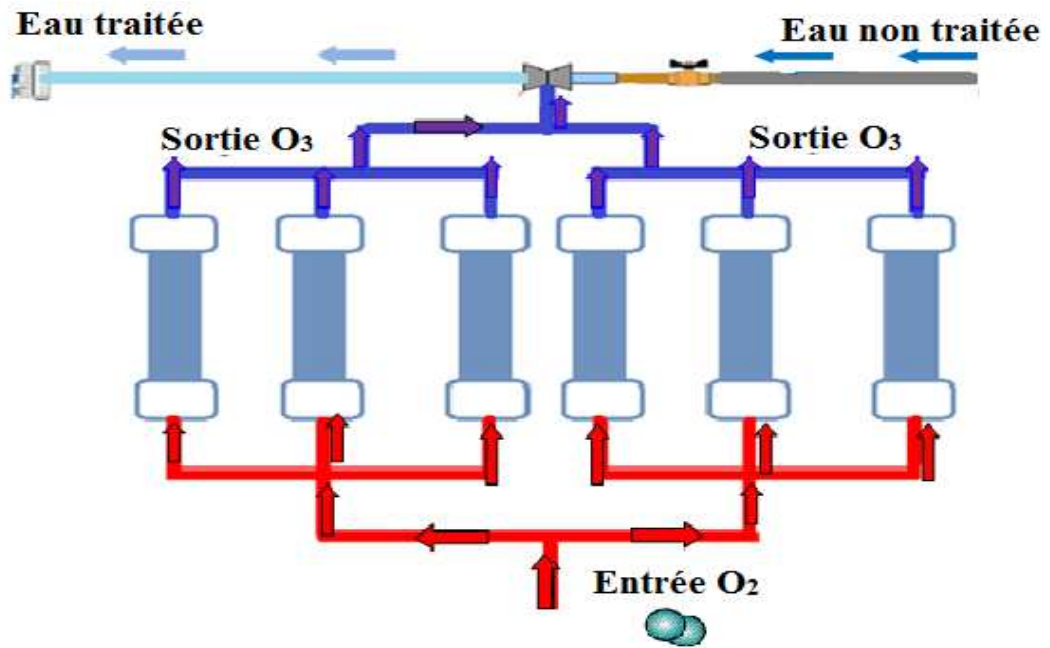


*Figure. 5.8. Concentration d'ozone en fonction du débit d'oxygène par branche pour les deux montages (un et deux injecteur Venturi)*

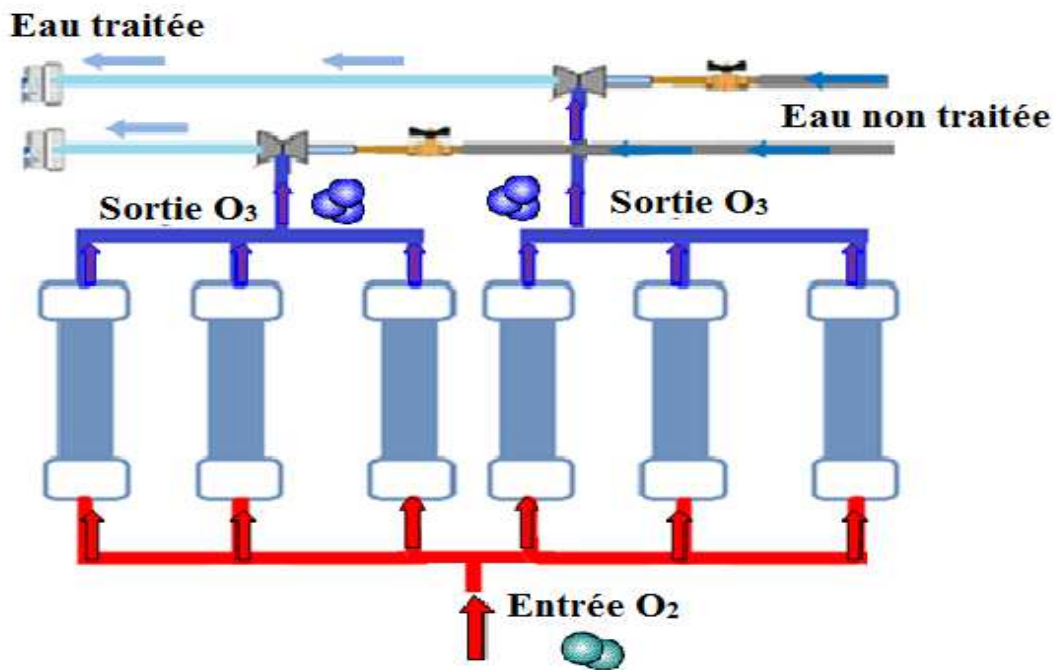
### 5.3.2. Montage parallèle

Les montages étudiés sont représentés sur la figure 5.9,

- ❖ **Configuration 1 : un seul injecteur venturi:** cette configuration comprend une seule branche constituée de six générateurs montés en parallèle pour alimenter un seul injecteur venturi figure 5.9.a).
- ❖ **Configuration 2 : deux injecteur venturi:** cette configuration comprend deux branches de trois générateurs chacune, chaque branche étant constituée de trois générateurs monté en parallèle. Dans ce cas, l'ozone sorti par chaque générateur se dirige directement vers l'injecteur venturi sans passer par les autres générateurs (figure 5.9.b).



a)



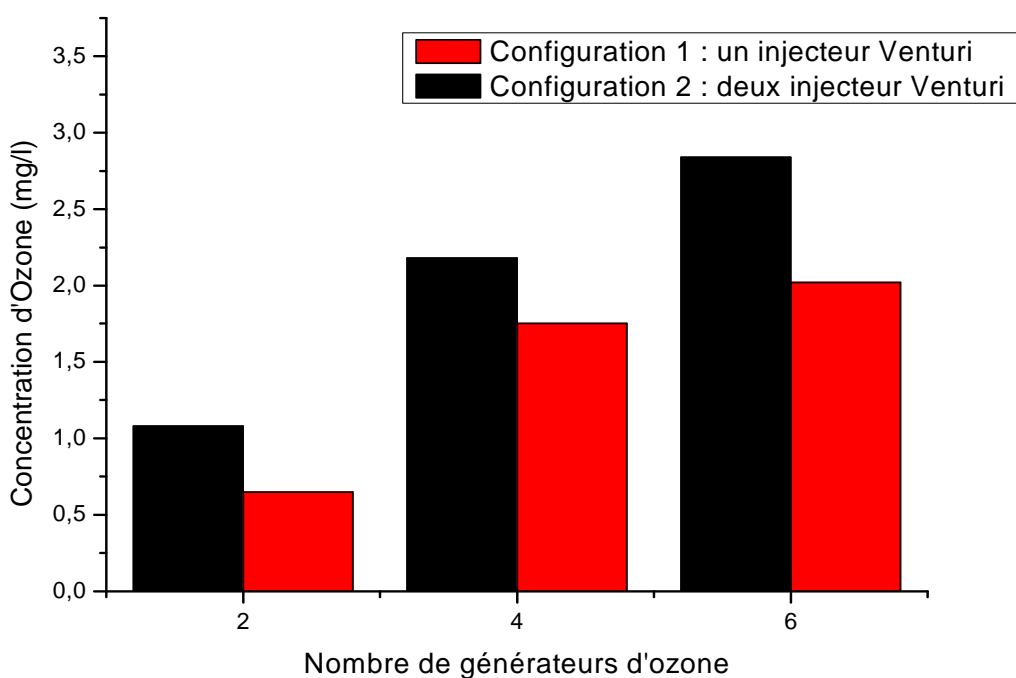
b)

- O<sub>2</sub> pur
- O<sub>3</sub>
- Eau polluée
- Eau ozonée

**Figure. 5.9.** Montage parallèle a) un injecteur venturi  
b) deux injecteur venturi

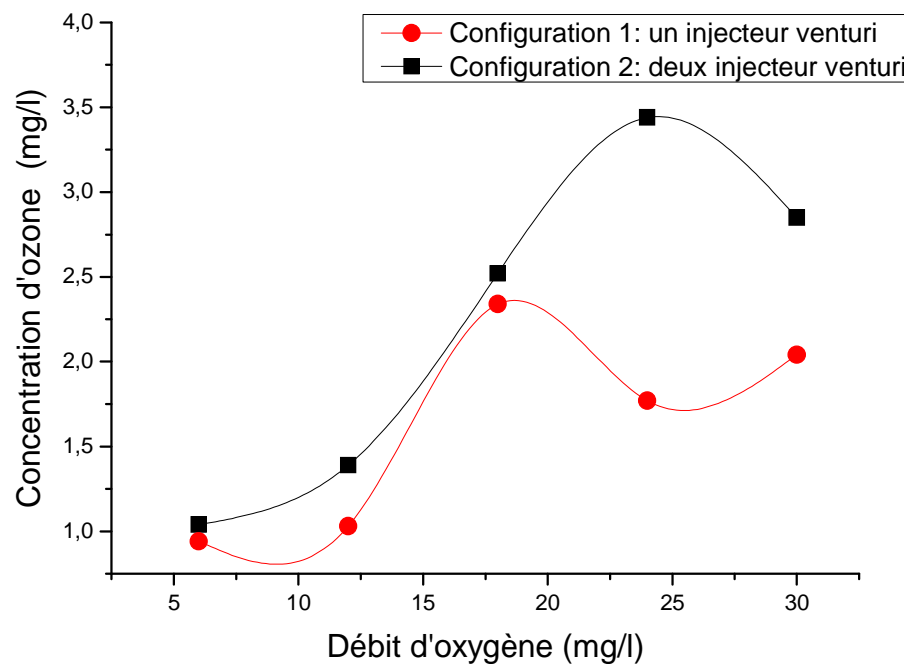
Les expériences ont été effectuées pour analyser l'influence du nombre de générateurs utilisé et le débit d'oxygène. Les résultats obtenus (figure 5.10 et 5.11) montrent que pour les deux montages l'augmentation du nombre de générateurs d'ozone augmente la production d'ozone et sa concentration dans l'eau. Par ailleurs, l'augmentation de débit d'oxygène permet d'augmenter le nombre de molécules d'oxygène dans l'intervalle de décharge pour se transformer en ozone.

La concentration maximale atteinte avec la configuration 1 est de 2,34 mg/l pour un débit d'oxygène de 18 l/mn (une concentration spécifique de 0,13 mg/l<sup>2</sup>\*mn). Par contre l'utilisation de deux injecteurs Venturi permet d'atteindre une concentration maximale de 3 mg/l pour un débit d'oxygène de 24 l/mn, avec une concentration spécifique  $C_s$  qui est presque égale à la première configuration  $C_s = 0,125$  mg/l<sup>2</sup>\*mn. Ce qui montre que chaque configuration présente des avantages et des inconvénients par rapport à l'autre. Il faut souligner que ces configurations (générateurs d'ozone montés en parallèle) ne représentent pas un grand intérêt économique, par rapport au montage série, à cause de sa consommation importante en oxygène.



**Figure. 5.10.** Concentration d'ozone produit par le Skid pour les deux configurations.





**Figure. 5.11.** Concentration d'ozone en fonction de débit d'oxygène pour les deux configurations (1 et 2 injecteur Venturi)

Le choix final de la configuration optimale se base sur la nécessité d'augmenter la concentration d'ozone pour que tous les types d'eaux soient traités, en minimisant le besoin en alimentation d'oxygène pour les générateurs d'ozone. Vue ces nécessités, les résultats obtenus montrent que pour chaque unité de volume d'oxygène la concentration d'ozone spécifique  $C_s$  pour chaque montage de générateurs d'ozone, sont résumés comme suit :

- Montage en série en utilisant un injecteur venturi ( $C_s=0,56 \text{ mg/l}^2*\text{mn}$ )
- Montage en série en utilisant un injecteur venturi ( $C_s=0,29 \text{ mg/l}^2*\text{mn}$ )
- Montage en parallèle en utilisant deux injecteur venturi ( $C_s=0,14 \text{ mg/l}^2*\text{mn}$ )
- Montage en parallèle en utilisant un injecteur venturi ( $C_s=0,13 \text{ mg/l}^2*\text{mn}$ )

Ces résultats nous recommandent à opter pour le montage comprenant des générateurs d'ozone montés en série en utilisant un seul injecteur Venturi pour les prochaines expériences.

### 5.3.3. Identification du point de fonctionnement optimal

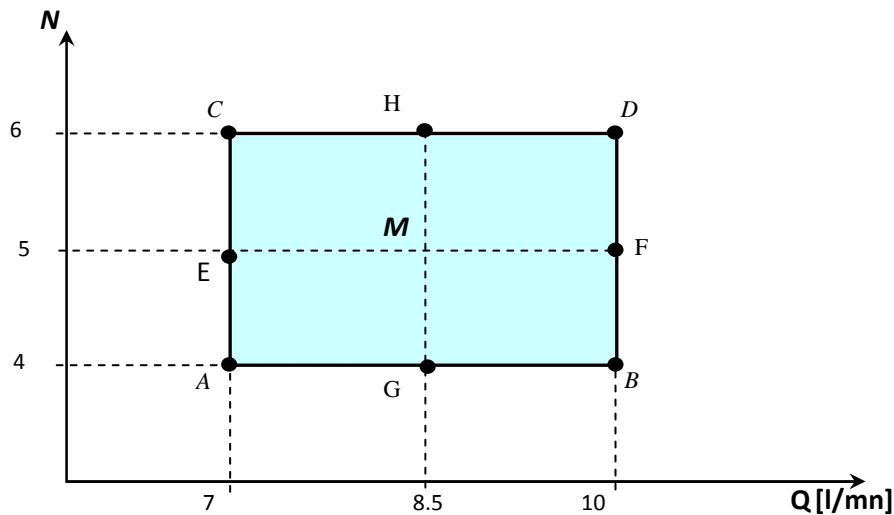
Dans cette partie nous allons identifier le point de fonctionnement optimal de ce dispositif en utilisant la méthodologie des plans d'expériences en se basant sur les facteurs contrôlables les plus influant sur la concentration d'ozone dans l'eau.

Les limites de variation du nombre de générateurs d'ozone et du débit d'oxygène ont été définies en effectuant des expériences de type « un-facteur-à-la fois ».

Les intervalles de variation de chaque facteur ont été déterminés comme suit :

- Nombre de générateur  $N$  :  $N_{\min} = 4$  ;  $N_{\max} = 6$  ;
- Débit d'oxygène  $Q$  :  $Q_{\min} = 7$  l/mn ;  $Q_{\max} = 10$  l/mn ;

La figure 5.12 montre les expériences d'un plan simple composite à faces centrées (CCF) avec 2 facteurs. Il se compose de 4 expériences situées au sommet du carré (points carrés A, B, D et C), 4 expériences situées dans les centres de quatre segments (E, F, G et H) et 3 expériences identiques dans le point central M. Ainsi, un plan d'expériences CCF avec 2 facteurs comprend (11) expériences.



**Figure. 5.12.** Diagramme du plan composite à deux facteurs

L'identification des valeurs optimales de débit d'oxygène et le nombre de générateurs d'ozone a été réalisée en utilisant un plan composite à faces centrées (CCF), les deux niveaux "max" et "min" sont les limites établies ci-dessus pour chacune des deux variables (N) et (Q). Le point central ( $N_c$  et  $Q_c$ ) étant calculé comme suit:

$$N_c = (N_{\min} + N_{\max})/2 = (4 + 6)/2 = 5 \quad (5.1)$$

$$Q_c = (Q_{\min} + Q_{\max})/2 = (7 + 10)/2 = 8.5 \text{ l/mn} \quad (5.2)$$

Les résultats des 11 expériences obtenus sont montrés dans le tableau 5.1

**Tableau 5.1 : Résultat du plan composite à 11 expériences**

Exp n :	Nombre de générateur	Débit d'Oxygène (l/mn)	Concentration d'ozone (mg/l)
1	4	7	1,08
2	6	7	2,35
3	4	10	1,9
4	6	10	2,5
5	4	8,5	2,23
6	6	8,5	3,12
7	5	7	1,42
8	5	10	1,77
9	5	8,5	1,93
10	5	8,5	2,07
11	5	8,5	2,1

Les tests statistiques conduisent à un modèle mathématique validé puisque les deux critères  $R^2$  et  $Q^2$  atteignent des valeurs élevées :

$$R^2 = 0,97 \text{ et } Q^2 = 0,85.$$

Le modèle mathématique proposé par MODDE 5.0 est le suivant :

$$C = 2,09 + 0,46 N^* + 0,22 Q^* - 0,07 N^{*2} - 0,06 Q^{*2} + 0,05 N^* Q^* \quad (5.3)$$

Les valeurs des coefficients associés aux facteurs dans le modèle mathématique montrent le degré d'influence de chaque facteur. Le tracé des coefficients est représenté à la figure 5.13. Il découle du modèle mathématique proposé que dans les limites de la variation des intervalles choisis, le nombre de générateur d'ozone utilisés  $N$  est le facteur qui a le plus d'effet. Le débit d'Oxygène  $Q$  a un effet positif sur la concentration ce qui signifie que l'élévation du débit conduit à des valeurs plus élevées de concentration d'ozone dans l'eau

L'interaction entre Le débit d'oxygène et le nombre de générateurs, dont les intervalles que nous avons choisis, semble avoir peu d'influence en comparaison avec les autres facteurs sur la concentration d'ozone

En utilisant le modèle mathématique, le logiciel MODE.05 estime les valeurs de la concentration d'ozone de toutes les expériences situées à l'intérieur des intervalles de paramètres étudiés (figure 5.14), en constatant que la zone, ou le rendement est optimal (en

orange), limité par un intervalle de débit d'oxygène de 7.75 à 9.25 l/mn correspond à six générateur d'ozone.

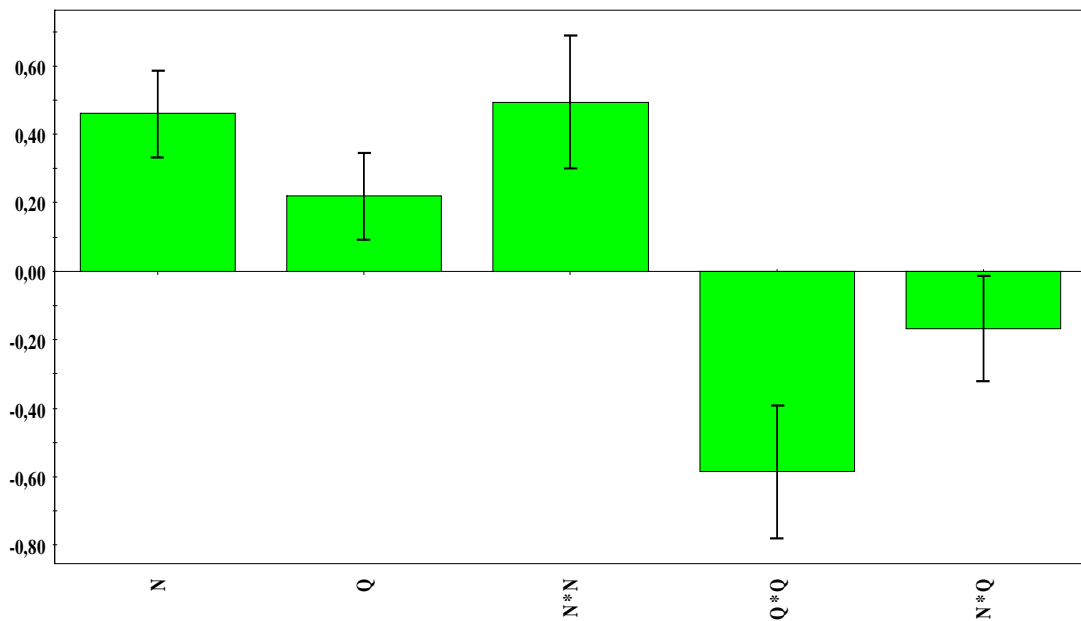


Figure 5.13. Coefficients du modèle obtenu pour la concentration d'ozone

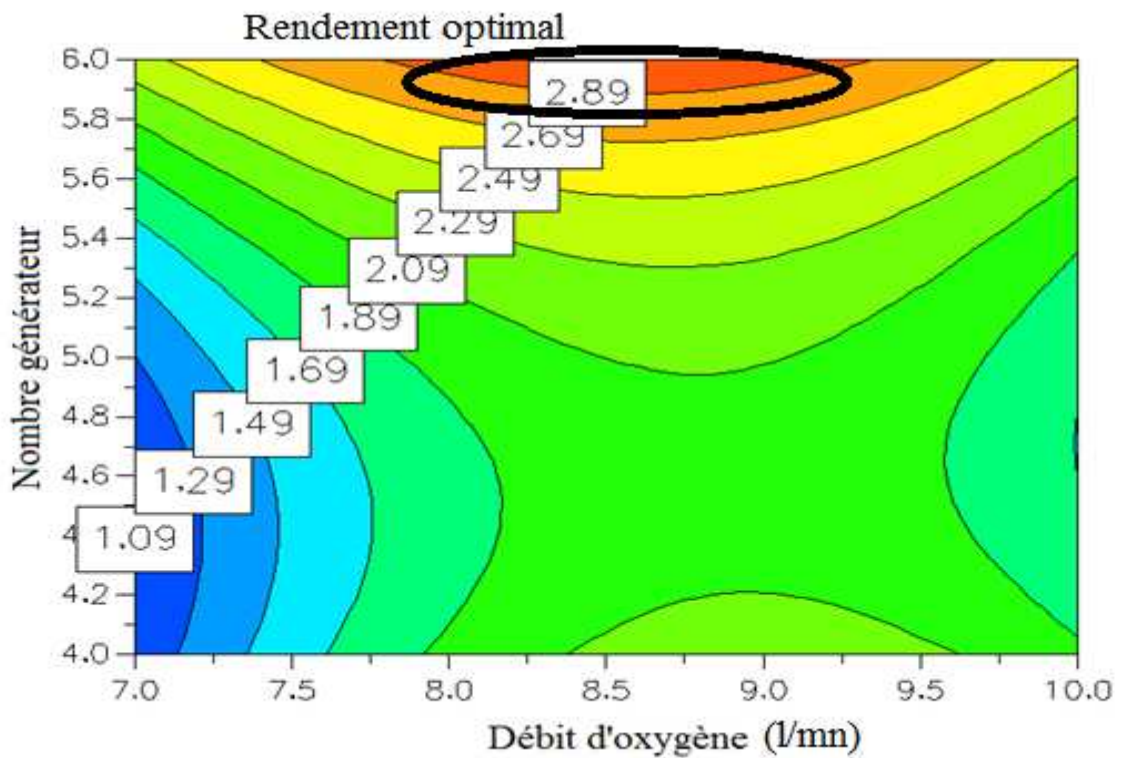
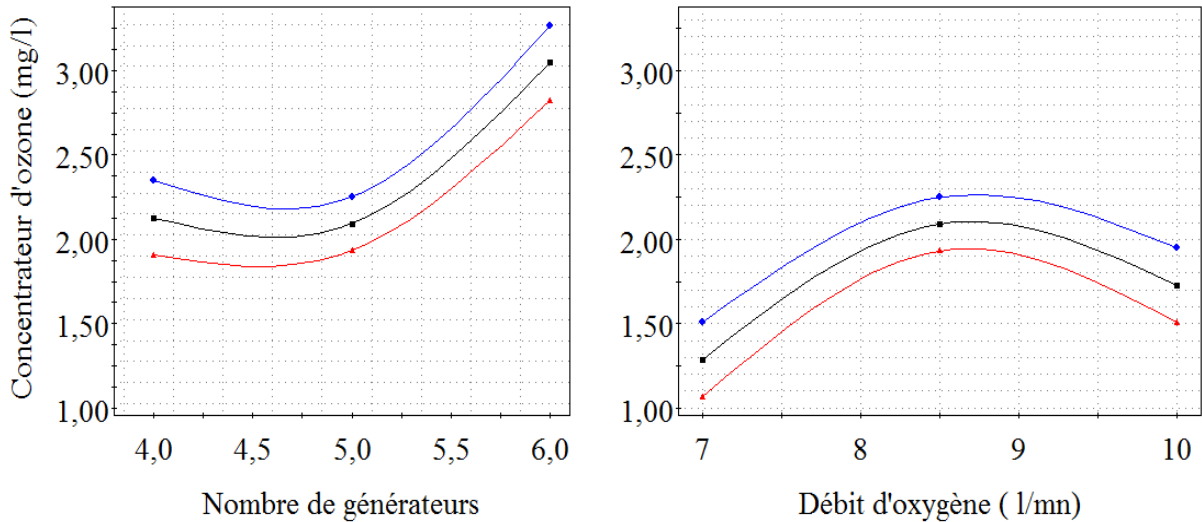


Figure. 5.14. Contours iso-réponses de la concentration d'ozone prédite par le logiciel MODDE 5.0, en fonction du nombre de générateur et le débit d'oxygène

A partir du modèle mathématique obtenu, on peut aussi déterminer l'influence de chaque facteur sur la réponse, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis (figure 5.15)



**Figure. 5.15.** Effet de chaque facteur sur les réponses

Le programme dispose également d'une sub-routine d'optimisation qui donne les valeurs optimales des facteurs pour obtenir la concentration d'ozone maximale. Les valeurs optimales proposées sont :

$$N = 6, Q = 8,654 \text{ l/mn} \text{ Pour } C = 3,04 \text{ mg/l}$$

#### 5.4. Application pour traitement des eaux

Cette section regroupe un ensemble d'expériences de traitement d'eau, en mesurant l'efficacité du procédé par une analyse bactériologique et physico-chimique de l'eau avant et après traitement.

Nous avons appliqué ce procédé dans trois sites pour traiter trois types d'eau différents :

- Station d'épuration d'eaux usées STEP de Sidi-Bel-Abbès ;
- Eau de la rivière El-mekerra à Sidi-Bel-Abbès;
- Une eau infectée.

#### **5.4.1. Traitement d'eau de la rivière EL-MEKERRA**

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes proposé d'étudier une ressource d'eau naturelle ; traversant la ville de Sidi Bel Abbés, il s'agit de l'Oued El-Mekerra, le cours d'eau affecté par des pollutions ponctuelles et chroniques. Ces atteintes résultent pour l'essentiel de l'activité des industries, des exploitations agricoles, des collectivités ou des transports.

Notre travail concerne d'une part, la caractérisation microbiologique et physico-chimique de la pollution des eaux usées déversées dans l'Oued El-mekerra qui traverse la ville de Sidi Bel Abbés (ville du Nord -Ouest de l'Algérie), où les dernières statistiques (2015) donnent une augmentation de plus de 50% du taux de maladies à transmission hydriques. D'autre part, on appliquera notre procédé biologique pour l'épuration des eaux usées et leur valorisation (réutilisation en agriculture par exemple).

L'Oued EL-MEKERRA est devenu un collecteur naturel des eaux usées industrielles non traitées. Cette eau polluée constitue pour les agriculteurs une source sûre et riche en nutriments, ce qui leur permet (après le traitement) de pallier au coût des engrais et à l'irrigation, cela malgré les inconvénients que représentent cette pratique dont les plus graves sont relatifs aux risques pour la santé humaine (liés aux germes pathogènes, aux métaux lourds et aux produits chimiques contenus dans ces eaux).

En ce qui concerne la recherche bactériologique, la présence de coliformes fécaux, E.coli, streptocoques fécaux, et clostridium sulfitoréducteurs et la détermination des paramètres chimiques caractérisent le site étudié [55].

Nous avons utilisé le SKID mobile dont la configuration choisie comprend une seule rangée constituée de trois générateurs montés en cascade pour alimenter en ozone un seul injecteur Venturi. Les générateurs d'ozone ont été alimentés en oxygène par un concentrateur d'oxygène à un débit est de 5 l/mn. Avec une concentration d'ozone dans l'eau est 6.25 mg / l a été mesurée avec un mesureur d'ozone dissous dans l'eau (Eco Sensors/Etat-Unis).

Pour remédier aux objectifs de notre travail, les analyses sont effectuées aux mois de juillet 2013 Les prélèvements d'eau brute ont été réalisés au niveau de l'oued El-Mekerra ont été soumis aux analyses physico-chimiques avant et après le traitement par l'ozone.

L'analyse physico-chimique ne peut à elle seule renseigner sur l'état de la qualité des eaux. Des échantillons similaires ont été soumis aux analyses bactériologiques. Les germes recherchés dans ces analyses sont : les coliformes totaux, les coliformes fécaux et les clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/ml.

Nous avons traité cette eau avec le Skid quatre fois en utilisant une pompe à eau à un débit de 10 l/mn. Les résultats obtenus des l'analyses microbiologiques sont portés au tableau 5.2, et ceux de l'analyse physico-chimique au tableau 5.3 (annexe A).

Les analyses microbiologiques de l'eau avant et après le traitement, présentées au tableau 5.2 montrent que l'eau est totalement désinfectée, ce qui prouve que l'utilisation de l'ozone pour le traitement des eaux de la rivière présente une solution écologique recommandable. Ces résultats montrent que l'ozone est parfaitement adapté au traitement des eaux de rivière, en tant qu'agent de désinfection le plus puissant utilisé dans le traitement de l'eau. Une efficacité élevée a été garantie pour cette eau de rivière.

Les analyses physico-chimiques de l'eau avant et après le traitement, présentés au tableau 5.3 montrent que cette eau est presque complètement traitée, en constatant une dégradation énorme de tous les paramètres. Soulignons toutefois que l'Hydrogénocarbonate, la silice et le phosphate qui ne sont pas assez dégradés (ne sont pas nocifs pour la santé humaine). Il faut signaler que l'efficacité pour éliminer un polluant peut être estimée en s'intéressant aux grandes valeurs de la vitesse de réaction avec l'ozone ce qui explique la dégradation totale de quelques polluants par rapport aux autres [56].

**Tableau 5.2 :** Résultats de l'analyse microbiologique de l'eau traitée par l'ozone

	<b>Avant traitement</b>	<b>Après traitement</b>	<b>Normes</b>
<b>Germes aérobies 37°</b>	9	3	20
<b>Germes aérobies 22°</b>	115	80	100
<b>Coliformes</b>	460	0	10
<b>Coliformes fécaux /100ml</b>	460	0	0
<b>Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/ml</b>	12	0	0
<b>Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/20ml</b>	100	0	0

**Tableau 5.3 : Résultats d'analyse physico-chimiques de l'eau traitée par l'ozone**

	Avant traitement	Après traitement	Normes
<b>PH</b>	8.38	8.07	[6.5, 9]
<b>TAC(°F)</b>	30	29	/
<b>Dureté total (F°)</b>	65	0	/
<b>Calcium (mg/l)</b>	167	0	200
<b>Magnesium (mg/l)</b>	58	0	50
<b>Conductivité</b>	1500	0	2800
<b>Sulfate (mg/l)</b>	151	144	400
<b>Sodium(mg/l)</b>	138	173	200
<b>potassium(mg/l)</b>	9	9	12
<b>ammonium(mg/l)</b>	0.01	0.05	0.5
<b>Chlorure (mg/l)</b>	381	343	500
<b>Hydrogenocarbonate (mg/l)</b>	362	351	/
<b>Nitrates (mg/l)</b>	23	31	50
<b>Nitrates NO2(mg/l)</b>	0	0	0.2
<b>Silice (mg/l)</b>	13.04	07.16	/
<b>Carbonate CO3(mg/l)</b>	0	0	/
<b>Phosphate</b>	2.1	1.54	/
<b>Turbidité en NTU</b>	16	0	5
<b>Minéralisation</b>	1139	0	/

#### 5.4.2. Traitement des eaux usées de la station d'épuration de SIDI-BEL-ABBES

Du moment que l'ozone est employé aussi pour le traitement des eaux usées domestiques ayant un seuil de pollution et d'odorat élevés, dans cette expérience nous allons montrer que le traitement de l'eau par l'ozone est applicable dans les stations d'épuration des eaux usées, en améliorant la qualité d'eau traitée.

Nous avons suivi la même procédure utilisée précédemment pour traiter un échantillon d'une eau usée de l'ONA (office national de l'assainissement). Les résultats d'analyse microbiologique et physico-chimique de traitement de cette eau avant et après le traitement sont représentés dans les tableaux 5.4 et 5.5 (voir annexe B). Les résultats d'analyse présentés montrent une grande dégradation au niveau des bactéries et au niveau de paramètres physico-chimique sans atteindre les normes pour quelques polluants. Et cela est du au niveau de contamination qui est plus élevé pour ce type d'eau. L'ozone réagit différemment avec différents composés organiques et ne réagit pas du tout avec certains



composés non-organiques [57]. C'est à dire l'ozone réagit d'abord avec les hydrocarbures aromatiques responsables de l'odeur et la couleur [57-59].

**Tableau 5.4 :** Résultat d'analyse microbiologique de l'eau usée de station d'épuration

	<b>Avant traitement</b>	<b>Après traitement</b>	<b>Normes</b>
<b>germes aérobies 37°</b>	105	33	20
<b>germes aérobies 22°</b>	60	25	100
<b>Coliformes</b>	1100	10	10
<b>Coliformes fécaux /100ml</b>	460	460	0
<b>strobotocoques D/50ml</b>	0	0	0
<b>clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/mL</b>	100	04	0
<b>clostridium sulfito-reducteurs à 46°C/20mL</b>	100	04	0

**Tableau 5.5 :** Résultat d'analyse physico-chimique de l'eau traité par l'ozone

	<b>Avant traitement</b>	<b>Après traitement</b>	<b>Normes</b>
<b>Magnesium (mg/l)</b>	52	30	50
<b>Sodium(mg/l)</b>	345	297	200
<b>Potassium(mg/l)</b>	44	37	12
<b>Ammonium(mg/l)</b>	78	0.02	0.5
<b>Minéralisation</b>	1302	1134	0
<b>Phosphate</b>	46.8	35	0

#### 5.4.3. Traitement d'eau potable contaminée

Pour montrer que le traitement par l'ozone est bien efficace pour les eaux potables notamment pour les eaux de bêche à eau, nous avons appliqué notre procédé pour traiter une eau de robinet qui a été intentionnellement infectée en la laissant à l'air libre pendant deux semaines. Nous avons utilisé la même procédure, en faisant une analyse bactériologique de l'eau avant et après traitement. Les résultats obtenus sont portés au tableau 5.6 (Annexe C).

Les analyses microbiologiques de l'eau avant et après le traitement montrent que l'eau est totalement désinfectée, ce qui prouve que l'utilisation de l'ozone pour le traitement des eaux présente une solution technique envisageable. Nous recommandons d'installer ce système pour la désinfection des baches à eau ; en effet, nous serons sûrs d'avoir une eau désinfectée et surcroît bien oxygénée.

**Tableau 5.6 :** Résultat d'analyse microbiologique de l'eau usée de station d'épuration

	Avant traitement	Après traitement	Normes
Germes aérobies 37°	09	00	20
Germes aérobies 22°	35	05	100
Coliformes totaux	452	04	10

## 5.6. Conclusion

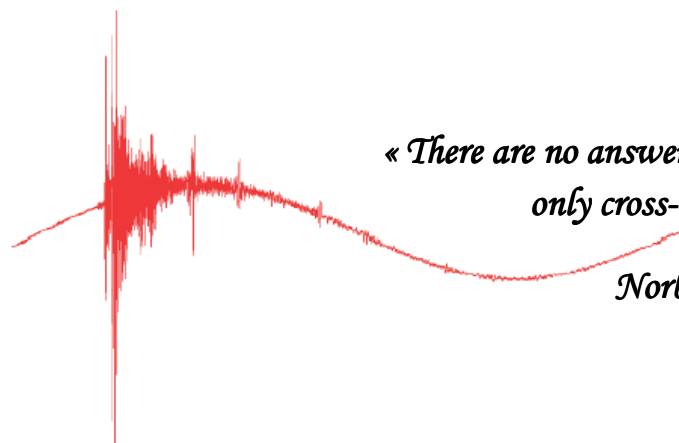
L'augmentation du nombre de générateurs d'ozone conduit à l'élévation de la production d'ozone. La façon avec laquelle on regroupe les générateurs d'ozone a une influence importante sur l'efficacité du procédé, en optimisant le nombre d'injecteur venturi pour assurer un transfert efficace de la masse d'ozone de l'état gazeux à l'état liquide.

Le regroupement de générateurs d'ozone en parallèle en utilisant deux injecteurs, montre un grand intérêt en matière de production d'ozone par rapport à celui en série, mais il présente l'inconvénient qu'il nécessite un débit d'oxygène relativement.

Les valeurs de concentration d'ozone dans l'eau que le dispositif a atteint, permettent de désinfecter pratiquement tous les types d'eau. Par contre, pour le traitement des eaux usées industrielles et l'élimination des métaux lourds, on aura besoin d'une concentration supérieure à 10 mg/l, ce qui nécessite l'amélioration de notre dispositif.

Nous avons encore du travail en perspective pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, en envisageant de réaliser un SKID à 20 générateurs d'ozone qui sont en cour de réalisation.

# CONCLUSION GENERALE



*« There are no answers.....  
only cross-references »*

*Norbert Wiener*

## *Conclusion Générale*

L'objectif principal de cette étude est de réaliser et étudier des générateurs d'ozone à décharge à barrière diélectrique, et évaluer la faisabilité d'un procédé de désinfection de l'eau par l'ozone, en utilisant une procédure expérimentale basée sur la méthodologie des plans d'expérience.

Une analyse expérimentale de l'influence de la forme du signal de la haute tension sur le rendement de génération d'ozone a été effectuée pour déterminer la forme adéquate du signal appliqué au générateur d'ozone pour mieux contrôler la production d'ozone en améliorant son efficacité énergétique. Les résultats obtenus montrent que la forme de signal alternatif de la haute tension, a une influence significative aussi bien sur la production d'ozone que l'efficacité énergétique. Ainsi, il a été montré que la meilleure façon de contrôler la puissance et la production d'ozone, est l'imposition d'une haute tension avec un signal alternatif triangulaire. Ce signal représente la forme adéquate pour maximiser la production d'ozone et minimiser la consommation de l'énergie.

La méthodologie des plans d'expériences est un outil puissant pour l'identification du point optimal d'un processus de traitement de l'eau par l'ozone. Grâce à la sélection appropriée des conditions de fonctionnement, le procédé peut être rendu moins sensible aux variations, en évitant ainsi les éventualités coûteuses de mauvais traitement. Comme l'efficacité de la génération d'ozone est liée aux dimensions géométriques du générateur, Une procédure expérimentale basée sur les techniques de surface de réponse a été proposée pour la détermination des dimensions optimales du générateur. Les résultats obtenus ont montré que l'intervalle de la décharge DBD doit être aussi petit que possible, tandis que la longueur des électrodes doit être optimisée pour un rendement optimal.

Par ailleurs, l'étude de l'influence de l'échauffement du générateur au cours de son fonctionnement a conduit à la réalisation d'un générateur d'ozone plus robuste comprenant un système de refroidissement à eau, afin d'assurer la continuité de fonctionnement pendant de longues durées.

En tirant profit de nos résultats, un dispositif semi-industriel comprenant six générateurs d'ozone à DBD munis d'un système de refroidissement à eau a été réalisé et étudié pour identifier la configuration optimale, en termes de production d'ozone.

Ce SKID mobile a été utilisé pour traiter l'eau de la rivière El-mekerra, d'une eau infectée ainsi que les eaux usées de la station d'épuration de la wilaya de Sidi-Bel-Abbès, en effectuant des analyses bactériologiques et physico-chimiques des eaux avant et après traitement.

Les analyses microbiologiques et physico-chimiques de l'eau de la rivière El-mekerra, avant et après le traitement, ont montré que l'eau a été totalement désinfectée, en constatant une dégradation considérable de tous les paramètres. L'utilisation de l'ozone pour le traitement des eaux de la rivière présente une solution écologique recommandable parfaitement adaptée au traitement de ce type d'eaux.

Par ailleurs, les résultats d'analyse microbiologique et physico-chimique de traitement de l'eau usée de la station d'épuration montrent une grande dégradation au niveau des bactéries et des paramètres physico-chimiques sans toutefois atteindre les normes pour quelques polluants. Cela est dû au niveau de contamination qui est plus élevé pour ce type d'eau, qui nécessite un taux d'ozonation supérieur pour être totalement traité.

Les analyses microbiologiques de l'eau infectée avant et après le traitement montrent qu'elle a été totalement désinfectée, montrant que l'utilisation de l'ozone pour le traitement des eaux est une solution technique envisageable. Nous recommandons d'installer ce système pour la désinfection des bâches à eau ; en effet, nous serons sûrs d'avoir une eau désinfectée et surcroît bien oxygénée.


Les valeurs de la concentration d'ozone dans l'eau que le dispositif a atteint, permettent de désinfecter pratiquement plusieurs types d'eau. Par contre, pour le traitement des eaux usées, qui ont un niveau de contamination élevé, on aura besoin d'une concentration supérieure à 10 mg/l, ce qui nécessite l'amélioration de notre dispositif.

Nous avons encore du travail en perspective pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, en envisageant de réaliser un SKID comprenant 20 générateurs d'ozone qui est en cours de réalisation.

*ANNEXE*

# Annexe A

## A. Résultats d'analyses Microbiologie de l'eau de la rivière El-mekerra



**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

↓ Agro Alimentaire.  
↓ Produits d'entretien.  
↓ Produits Cosmétiques

Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005

Bulletin d'Analyse Microbiologie N°248/2013


<p>Echantillon : Eau avant traitement</p> <p>Etat physique : Liquide</p> <p>N° de lot :</p> <p>Date de prélèvement : 20/08/2013</p> <p>Date de réception : 20/08/2013</p> <p>Observation :</p>	<p><b>Réf. Client :</b>  <b>LABORATOIRE Interaction</b>  <b>réseaux électriques</b>  <b>Convertisseurs machines</b>  <b>IRECOM</b>  <b>Dans le cadre de PNR</b>  <b>« réalisation des générateurs</b>  <b>électriques d'ozone et</b>  <b>application pour le traitement</b>  <b>des eaux usées »</b></p>
--	--

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. méthode
Germes aérobies à 37°C	09	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	115	<10 <sup>2</sup>	ISO.6222
Coliformes	460	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	460	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	00	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/ml	12	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/20ml	100	Abs	ISO.6461/1

**Conclusion:** Eau analysée est de qualité microbiologique **non satisfaisante**

**N.B:** Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.



Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
Sidi Bel Abbés

Tél/Fax : 00.213.048.54.08.83  
Mobile : 0771.59.76.98


**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

↓ Agro Alimentaire.  
 ↓ Produits d'entretien.  
 ↓ Produits Cosmétiques  
 Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005

**Bulletin d'Analyse Microbiologie N°252/2013**

<b>Echantillon</b> : Eau 4 <sup>ème</sup> traitement	<b>Réf. Client :</b> LABORATOIRE Interaction réseaux électriques Convertisseurs machines IRECOM Dans le cadre de PNR « réalisation des générateurs électriques d'ozone et application pour le traitement des eaux usées »
<b>Etat physique</b> : Liquide	
<b>N° de lot</b> :	
<b>Date de prélèvement</b> : 20/08/2013	
<b>Date de réception</b> : 20/08/2013	
<b>Observation</b> :	

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. méthode
Germes aérobies à 37°C	03	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	80	<10 <sup>2</sup>	ISO.6222
Coliformes	00	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	00	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	00	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/ml	00	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/20ml	00	Abs	ISO.6461/1
<b>Conclusion :</b> Eau analysée est de qualité microbiologique <b>satisfaisante</b>			
<b>N.B:</b> Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.			

Le Laboratoire  
 07220

Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
 Sidi Bel Abbés

Tél/Fax : 00.213.048.54.08.83  
 Mobile : 0771.59.76.98



## B. Résultats d'analyses Physico-Chimie de l'eau de la rivière El-mekerra

**ISOLAB**

**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

↓ Agro Alimentaire.  
 ↓ Produits d'entretien.  
 ↓ Produits Cosmétiques  
 Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005

**Bulletin d'Analyse Physico - Chimie N° 208/2013**

Echantillon : Eau avant traitement Etat physique : Liquide N° de lot : Date de prélèvement : 20/08/2013 Date de réception : 20/08/2013 Observation :	<b>Réf. Client :</b> LABORATOIRE Interaction réseaux électriques Convertisseurs machines IRECOM Dans le cadre de PNR  <i>« Réalisation des générateurs électriques d'ozone et application pour le traitement des eaux usées »</i>
---	--

DETERMINATION	RESULTATS	Normes
*PH	8.35	≥6.5 et ≤9
*Dureté total (F°)	65	200
*TA(°F)	00	/
*TAC (F°)	30	/
*Calcium (mg/l)	167	200
*Magnésium (mg/l)	58	50
*conductivité	1500	2800
*Sulfate (mg/l)	151	400
*Sodium(mg/l)	138	200
*Potassium(mg/l)	09	12
*Ammonium(mg/l)	0.01	0.5
*Chlorure(mg/l)	381	500
*Hydrogenocarbonate(mg/l)	362	/
*Nitrates(mg/l)	23	50
*NitritesNO2(mg/l)	00	0.2
*Silice(mg/l)	13.4	/
*CarbonateCO3(mg/l)	00	/
* Phosphate	2.1	/
*Turbidité en NTU	16	5
*Minéralisation	1139	/
Odeur	Sans	
Couleur	Incolore	

**Interprétation :**  
 Eau bicarbonatée calcique, de qualité chimique passable, impropre à la consommation par son taux élevé en phosphate et sa turbidité.

**La directrice du Laboratoire**  
 ن. س. ل. ل.  
 شارع النور محمد عثمان - حي بني بلعاص  
 س. ت. رقم 127220

Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
 Sidi Bel Abbés

Tél/Fax : 00.213.048.54.08.83  
 Mobile : 0771.59.76.98


**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

- ✚ Agro Alimentaire.
- ✚ Produits d'entretien.
- ✚ Produits Cosmétiques

Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005

**Bulletin d'Analyse Physico - Chimie N° 222/2013**

Echantillon	: Eau après traitement	<b>Ref. Client :</b> <b>LABORATOIRE Interaction réseaux électriques</b> <b>Convertisseurs machines IRECOM</b> <b>Dans le cadre de PNR</b>  <i>« Réalisation des générateurs électriques d'ozone et application pour le traitement des eaux usées »</i>
Etat physique	: Liquide	
N° de lot	:	
Date de prélèvement	: 20/08/2013	
Date de réception	: 20/08/2013	
Observation	:	

DETERMINATION	RESULTATS	Normes
*PH	8.07	≥6.5 et ≤9
*Dureté total (F°)	/	200
*TA(°F)	00	/
*TAC (F°)	29	/
*Calcium (mg/l)	/	200
*Magnésium (mg/l)	/	50
*conductivité	/	2800
*Sulfate (mg/l)	144	400
*Sodium(mg/l)	173	200
*Potassium(mg/l)	09	12
*Ammonium(mg/l)	0.05	0.5
*Chlorure(mg/l)	343	500
*Hydrogenocarbonate(mg/l)	351	/
*Nitrates(mg/l)	31	50
*NitritesNO2(mg/l)	/	0.2
*Silice(mg/l)	07.16	/
*CarbonateCO3(mg/l)	00	/
* Phosphate	1.54	/
*Turbidité en NTU	/	5
*Minéralisation	/	/
Odeur	Sans	
Couleur	Incolore	

**La directrice du Laboratoire**




 Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
 Sidi Bel Abbés

 Tél/Fax : +00.213.048.54.08.83  
 Mobile : 0771.59.76.98

# Annexe B

## A. Résultats des analyses Microbiologies de l'eau usée de la station d'épuration ONA



**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

† Agro Alimentaire.  
 † Produits d'entretien.  
 † Produits Cosmétiques

Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005

Bulletin d'Analyse Microbiologie N°258/2013

<p>Echantillon : Eau avant traitement</p> <p>Etat physique : Liquide</p> <p>N° de lot :</p> <p>Date de prélèvement : 01/09/2013</p> <p>Date de réception : 01/09/2013</p> <p>Observation :</p>	<p><b>Réf. Client :</b></p> <p><b>LABORATOIRE Interaction</b> réseaux électriques Convertisseurs machines <b>IRECOM</b> Dans le cadre de PNR « réalisation des générateurs électriques d'ozone et application pour le traitement des eaux usées »</p>
--	---

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. méthode
Germes aérobies à 37°C	105	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	60	<10 <sup>2</sup>	ISO.6222
Coliformes	1100	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	460	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	00	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/ml	100	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/20ml	100	Abs	ISO.6461/1

**Conclusion :** Eau analysée est de qualité microbiologique **non satisfaisante**

*N.B: Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.*

**Le Laboratoire**

مختبر تحليل النوعية  
12 شارع العقيد محمد يحيى بالعباس  
12702

Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
Sidi Bel Abbès

Tél/Fax : 00.213.048.54.08.83  
Mobile : 0771.59.76.98


**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

↓ Agro Alimentaire.  
 ↓ Produits d'entretien.  
 ↓ Produits Cosmétiques  
 Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005

**Bulletin d'Analyse Microbiologie N°262/2013**

Echantillon	: Eau 4 <sup>ème</sup> traitement	<b>Réf. Client :</b> LABORATOIRE Interaction réseaux électriques Convertisseurs machines IRECOM Dans le cadre de PNR « réalisation des générateurs électriques d'ozone et application pour le traitement des eaux usées »
Etat physique	: Liquide	
N° de lot	:	
Date de prélèvement	: 01/09/2013	
Date de réception	: 01/09/2013	
Observation	:	

DETERMINATION	Ech. 1	Normes	réf. Méthode
Germes aérobies à 37°C	33	20	ISO.6222
Germes aérobies à 22°C	25	<10 <sup>2</sup>	ISO.6222
Coliformes	1100	10	ISO.9308
Coliformes fécaux /100ml	460	Abs	ISO.9308
Streptocoques D/50ml	00	Abs	ISO.7899/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/ml	04	Abs	ISO.6461/1
Clostridium sulfito-réducteurs à 46°C/20ml	04	Abs	ISO.6461/1
<b>Conclusion:</b> Eau analysée est de qualité microbiologique <b>non satisfaisante</b>			
<b>N.B:</b> Cette analyse ne concerne que l'échantillon reçu.			

  
**Le Laboratoire**

Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
 Sidi Bel Abbés

Tél/Fax : 00.213.048.54.08.83  
 Mobile : 0771.59.76.98

## B. Résultats d'analyses Physico-Chimie de l'eau de la rivière El-mekerra

**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

**ISOLAB**

↓ Agro Alimentaire.  
 ↓ Produits d'entretien.  
 ↓ Produits Cosmétiques  
 Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005


**Bulletin d'Analyse Physico - Chimie N° 223/2013**

Echantillon : Eau avant traitement Etat physique : Liquide N° de lot : Date de prélèvement : 01/09/2013 Date de réception : 01/09/2013 Observation :	<b>Réf. Client :</b> <b>LABORATOIRE Interaction réseaux électriques</b> <b>Convertisseurs machines IRECOM</b> <b>Dans le cadre de PNR</b>  <i>« Réalisation des générateurs électriques d'ozone et application pour le traitement des eaux usées »</i>
---	---

DETERMINATION	RESULTATS	Normes
*PH	7.28	≥6.5 et ≤9
*Dureté total (F°)	33	200
*TA(°F)	00	/
*TAC (F°)	52	/
*Calcium (mg/l)	46	200
*Magnésium (mg/l)	52	50
*conductivité	1716	2800
*Sulfate (mg/l)	71	400
*Sodium(mg/l)	345	200
*Potassium(mg/l)	44	12
*Ammonium(mg/l)	78	0.5
*Chlorure(mg/l)	318	500
*Hydrogenocarbonate(mg/l)	631	/
*Nitrates(mg/l)	02	50
*NitritesNO2(mg/l)	4.5	0.2
*Silice(mg/l)	35.8	/
*CarbonateCO3(mg/l)	00	/
* Phosphate	46.8	/
*Turbidité en NTU	/	5
*Minéralisation	1302	/
Odeur	Désagréable	
Couleur	Marron	

**Interprétation :**  
 Eau bicarbonatée sodique, de qualité chimique passable a médiocre, impropre à la consommation pour ses taux élevé en nitrite, ammonium, phosphate et sodium (eau polluée).

**La directrice du Laboratoire**

  
 12 شارع العقيد سيدي بلمصباح  
 13223 - 04

Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
 Sidi Bel Abbés

Tél/Fax : 00.213.048.54.08.83  
 Mobile : 0771.59.76.98


**LABORATOIRE D'ANALYSE DE LA QUALITE**

- ✦ Agro Alimentaire.
- ✦ Produits d'entretien.
- ✦ Produits Cosmétiques

Autorisation Ministérielle n° 025 du 05/10/2005

**Bulletin d'Analyse Physico - Chimie N° 222/2013**

Echantillon : Eau après traitement Etat physique : Liquide N° de lot : Date de prélèvement : 20/08/2013 Date de réception : 20/08/2013  Observation :	<b>Ref. Client :</b> <b>LABORATOIRE Interaction réseaux électriques</b> <b>Convertisseurs machines IRECOM</b> <b>Dans le cadre de PNR</b>  <i>« Réalisation des générateurs électriques d'ozone et application pour le traitement des eaux usées »</i>
---	---

DETERMINATION	RESULTATS	Normes
*PH	8.07	≥6.5 et ≤9
*Dureté total (F°)	/	200
*TA(°F)	00	/
*TAC (F°)	29	/
*Calcium (mg/l)	/	200
*Magnésium (mg/l)	/	50
*conductivité	/	2800
*Sulfate (mg/l)	144	400
*Sodium(mg/l)	173	200
*Potassium(mg/l)	09	12
*Ammonium(mg/l)	0.05	0.5
*Chlorure(mg/l)	343	500
*Hydrogenocarbonate(mg/l)	351	/
*Nitrates(mg/l)	31	50
*NitritesNO2(mg/l)	/	0.2
*Silice(mg/l)	07.16	/
*CarbonateCO3(mg/l)	00	/
* Phosphate	1.54	/
*Turbidité en NTU	/	5
*Minéralisation	/	/
Odeur	Sans	
Couleur	Incolore	

**La directrice du Laboratoire**



 Adresse ; 02, Rue Colonel OTHMANE (Route de l'hôpital)  
 Sidi Bel Abbés

 Tél/Fax : +00.213.048.54.08.83  
 Mobile : 0771.59.76.98

**Référence Bibliographique**

- [1] : **Fridman, G., Peddinghaus, M., Balasubramanian, A., Gutsol, A., and Brooks, A.** “Blood coagulation and living tissue sterilization by floating-electrode dielectric barrier discharge in air”. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 26(4), 425-442(2006).
- [2] : **U. Kogelschatz, E. Killer and B. Eliasson.**  
« Decomposition of Hydrogen Sulfide in a Dielectric-Barrier Discharge ». American Physical Society, Gaseous Electronics Conference October 5-8, 1999 Norfolk, VA
- [3] : **A.M. POINTU, J. PERRIN, J. JOLLY.**  
« Plasmas froids de décharge : Propriétés électriques ». Les techniques de l'ingénieur Dossier D 2 830 (02/2007)
- [4] : **Wang, C., and He, X.** “Effect of atmospheric pressure dielectric barrier discharge air plasma on electrode surface.” *Applied Surface Science*, 253(2), 926-929(2006).
- [5] : **Kornev, J., Yavorovsky, N., Preis, M., Isaev, U., and Chen, B. N.**  
“Generation of active oxidant species by pulsed dielectric barrier discharge in water-air mixtures.” *Ozone: Science and Engineering*, 28(4), 207-215(2006).
- [6] : **Laroussi, M., Alexeff, I., Richardson, J. P., & Dyer, F. F.**  
« The resistive barrier discharge. » *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 30(1), 158-159(2002).
- [7] : **Cédric Larricq-Fourcade Dit Leride**  
« Etude de la pulvérisation assistée en air d'une nappe liquide et influence d'un vent ionique sur les instabilités hydrodynamiques »  
Thèse de doctorat, L'école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, Décembre 2006.
- [8] : **Claire Tendero**  
« Torche plasma micro-onde à la pression atmosphérique : application au traitement de surfaces métalliques »  
Thèse de doctorat, Université de Limoges, Octobre 2005.
- [9] : **U. KOGELSCHATZ**  
« Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications »  
*Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23, No. 1, March 2003.
- [10] : **Axel Vincent**  
« Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope »  
Thèse de doctorat, Université Paris VI, 2002.

- [11] **Valentin I. Gibalov & Gerhard J. Pietsch**  
« On the Performance of Ozone Generators Working with dielectric Barrier discharges »  
Journal: *Ozone: Science & Engineering*, Volume 28, Issue 2, May 2006, pages 119-124
- [12] : **Eliasson, B., Hirth, M., & Kogelschatz, U.**  
“Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges.” *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20(11), 1421(1987).
- [13] : **Rafael Diez Medina**  
« Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement »,  
Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Le 16 octobre 2008.
- [14] : **Alban SUBLET**  
« Caractérisation de décharges à barrières diélectriques atmosphériques et sub-atmosphériques et application à la déposition de Couches d'oxyde de silicium »  
Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, juin 2007
- [15] : **Nicolas Naude,**  
« Etude de décharge de la physique d'une décharge de Townsend a la pression atmosphérique et de son interaction avec un générateur : modèle et expérience »  
Thèse de doctorat, Université de Toulouse, octobre 2005.
- [16] : **Thomas UNFER**  
« Méthode asynchrone pour la modélisation d'actuateurs plasma destinés au contrôle d'écoulement »  
Thèse de doctorat, Université de Toulouse, novembre 2008.
- [17] : **Wang, C., and He, X. (2006).**  
“Effect of atmospheric pressure dielectric barrier discharge air plasma on electrode surface.” *Applied Surface Science*, 253(2), 926-929.
- [18] : **Fridman, G., Shereshevsky, A., Jost, M. M., Brooks, A., ... & Friedman, G.**  
“Floating electrode dielectric barrier discharge plasma in air promoting apoptotic behavior in melanoma skin cancer cell lines.”  
*Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 27(2), 163-176(2007).
- [19] : **U. KOGELSCHATZ**  
« Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications ».  
*Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 23, No. 1, March 2003
- [20] : **Gibalov, V. I.**  
“Synthesis of ozone in a barrier discharge.”  
*Russian journal of physical chemistry*, 68(6), 1029-1033 (1994).



- [21] : **Graham, D. M.**  
“Use of ozone for food processing.” *Food Technology*,51(6), 72-75(1997).
- [22] : **MELANIE Nicolas**  
« Ozone Et Qualité De L’air Intérieur : Interactions avec les produits de construction et de décoration »  
Thèse De Doctorat, Université Paris 7, Octobre 2006
- [23] : **Enrico Riboni, RIBONI E.**  
« Eaux de process: Quand la désinfection est nécessaire. »  
Environnement & technique, (2002). (220), 30-33.
- [24] : **Joanna Drews, Yukihiro Kusano, Frank Leipold, Alexander and Bardenshtein**  
“Ozone production in a dielectric barrier discharge with ultrasonic irradiation »  
Science & Engineering Volume 33, Issue 6, November 2011, pages 483-488
- [25] : **Hoigné, J., et Bader, H.**  
« Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water—I: non-dissociating organic compounds.” *Water Research*, 17(2), (1983). 173-183.
- [26] : **Renate Viebahn-Hänsler, Olga Sonia León Fernández et Ziad Fahmy**  
“Ozone in Medicine: The Low-Dose Ozone Concept—Guidelines and Treatment Strategies »  
Ozone: Science Engineering, Volume 34, Issue 6, November 2012, pages 408-424
- [27] : **Tony MERLE**  
« Couplage des procédés d’adsorption et d’ozonation pour l’élimination de molécules bio-récalcitrantes »  
Thèse de doctorat, Université de Toulouse. novembre 2009.
- [28] : **Houët, M.**  
« Spectroradiométrie du rayonnement Solaire UV au sol: Améliorations apportée sa l’instrumentation et au traitement des mesures. Analyse pour l’évaluation du contenu atmosphérique en ozone et en aérosols »  
Doctoral dissertation, Ph. D. Dissertation, Université des Sciences et Technologies de Lille, France(2003).
- [29] : **Yacine Belebna, Saïd Nemnich, Nacera Hammadi et Amar Tilmatine**  
« Production d’ozone par décharge à barrière dielectrique pour traitement de l’air » International conference on energy and sustainable development (CESD’2013).
- [30] **A. Tilmatine, N. Hammadi, S. M. Remaoun, K. Medles, S. Nemnich & L. Dascalescu**  
« Processes for sustainable development using high-intensity electric fields »

- International Journal of Sustainable Engineering Volume 6, Issue 2, June 2013, pages 177-185
- [31] **A.Tilmatine, F.Miloua, S.Nemmich. A.Benabboune, L.Dascalescu**  
“High Voltage Processes For Sustainable Development.” 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING. May 07-09 2012, Algiers Algeria, pp 344-349, ISBN: 9947-34-010-3. [http://www.usthb.dz/ICEE\\_12](http://www.usthb.dz/ICEE_12)
- [32] : **How Ming Lee, Moo Been Chang and Ta Chin Wei**  
Kinetic Modeling of ozone Generation via Dielectric Barrier Discharges  
Journal: Ozone: Science and Engineering, Volume 26, Issue 6, December 2004, pages 551-562.
- [33] : **SALANNE Jean-Philippe**  
« Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l’intermédiaire de leur alimentation. »  
Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, novembre 2005.
- [34] : **Benitez, F. J., Acero, J. L., & Real, F. J.**  
“Degradation of carbofuran by using ozone, UV radiation and advanced oxidation processes.”  
*Journal of hazardous materials*, 89(1), 51-65. (2002).
- [35] : **Bocci, V., Borrelli, E., Travagli, V., & Zanardi, I.**  
“The ozone paradox: ozone Is a strong oxidant aswell as a medical drug.”  
*Medicinal research reviews*, (2009). 29(4), 646-682.
- [36] : **Silva, L. M. D., & Jardim, W. F.**  
“Trends and strategies of ozone application in environmental problems.”  
*Química Nova*, 29(2), 310-317(2006).
- [37] : **Rip G. Rice, Marc DeBrum, Jacqueline Hook, Dick Cardis & Cameron Tapp**  
« Economic and Environmental Benefits of Ozone in Ozone Laundering Systems »  
Ozone: Science and Engineering Volume 31, Issue 5, September 2009, pages 348-356
- [38] : **JA. Pyle, M.P. Chipperfield & M. Guirlet**  
« Modeling The Ozone Layer: A Perspective On The Northern Hemisphere »  
Journal: Ozone: Science and Engineering, Volume 23, Issue 6, January 2001, pages 455-459
- [39] : **Sophie Vandermeersch**  
« Etude comparative de l'efficacité des traitements d'épuration des eaux usées pour l'élimination des micro-organismes pathogènes »  
Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 2006
- [40] : **Rice, R. G., DeBrum, M., Cardis, D., and Tapp, C.**  
“The ozone laundry handbook: a comprehensive guide for the proper application of ozone in the commercial laundry industry”.  
*Ozone: Science & Engineering*, (2009). 31(5), 339-347.

- [41] : **Graham Dee**  
“Use of Ozone for Food processing,”  
Publisher, Institute of Food Technologists, Chicago, IL, Etats-Unis, 1997, pp. 72-75.
- [42] : **Rice, Rip G.**  
“Ozone Preservation of Foods and Foodstuffs: Literature Review and Current Regulatory Status,” Proceedings, 1997 International Ozone Association Pan-American Conference, Lake Tahoe, Nev., pp. 249-259, August 1997.
- [43] : **Saïd Nemnich**, Yacine Belebna, Nacera Hammadi , Amar Tilmatine  
« Réalisation d’un générateur d’ozone à décharge à barrière diélectrique et application le traitement de l’eau » deuxième conférence international sur la maintenance, la gestion, la logistique et l’électrotechnique CIMGLE’2011.
- [44] **K. Teranishi, S. Suzuki and H. Ito,**  
“A Novel Generation Method of Dielectric Barrier Discharge and Ozone Production Using a Piezoelectric Transformer”  
Jpn. J. Appl. Ohys., Vol. 43, No. 9B, pp. 6733-6739, 2004.
- [45] : **J. Kitajima and M. Kuzumoto.**  
“Analysis of ozone generation from air in silent discharge”,  
J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 32, pp. 3032-3040, 1999.
- [46] : **S. Nemnich**, Y.Belebna, N. Hammadi et A. Tilmatine  
”Étude expérimentale de l’influence des paramètres sur l’efficacité du procédé de génération d’ozone par décharge à barrière diélectrique. » CNHT’13 du 9 au 11 avril 2013 Laghouat Algerian Journal Of Technology Série B Numéro spécial avril 2013 ISSN 1111-357X
- [47] : M.N.Brahami , S. Hadjeri, **S. Nemnich**, M. Brahami & A. Tilmatine  
Experimental investigation of a PV solar generator for supplying water treatment process  
International Journal of Environmental Studies, Volume 72, Issue 1, January 2015, pages 207-221
- [48] MODDE 5.0, "User guide and tutorial", Umetrics, 1999.
- [49] **Pavic, A., Miskovic, Z., & Reynolds, P.**  
“Modal testing and finite-element model updating of a lively open-plan composite building floor.”  
*Journal of structural engineering*, (2007)133(4), 550-558.
- [50] **J. Goupy,**  
« Plans d’expériences pour surfaces de réponse »,  
Dunod, Paris, 1999.

- [51] **Delamézière, A., Naceur, H., Batoz, J. L., & Villon, P.**  
« Faisabilité en emboutissage: optimisation du matériau par surface de réponse. »  
*Mécanique & industries*, (2002).3(2), 93-98.
- [52] **Linsheng, W., Zhaoji, H., Yafang, Z., & Qinfen, W.**  
“Experimental study on ozone generation and ozone oxidation to removal multi-pollutant of flue gas.” In *Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- [53] **Masuda S, Akutsu K, Kuroda M, Awatsu Y and Shibuya Y**  
“A ceramic-based ozonizer using high-frequency discharge”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*24223–31(1988).
- [54] **Y. Nomoto, T. Ohkubo, S. Kanazawa, T. Adachi,**  
“Improvement of ozone yield by a silent-surface hybrid discharge ozonizer”,  
*IEEE. Trans. IA* 31 (6) 1458–1462 (1995).
- [55] **Said Nemmich , Amar Tilmatine, Zouaoui Dey, Nacera Hammadi, Kamel Nassour & Sara Messal**  
« Optimal Sizing of a DBD Ozone Generator Using Response Surface Modeling »  
Ozone: Science & Engineering Volume 37, Issue 1, January 2015, pages 3-8
- [56] **Said Nemmich, Amar Tilmatine , Zouaoui Deyb, Nacera Hammadia**  
« Dimensionnement géométrique optimal d'un générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique » 9eme conférence de la société française d'électrostatique 27-29 out 2014.
- [57] **Benattouche, Z.,** « *Isolement et caractérisation des microorganismes auto épurateur isolés d'oued Mekerra de Sidi Bel Abbes* » Thèse de doctorat (2015).
- [58] **Dore, M., & Legube, B.**  
« Mécanisme d'action de l'ozone sur les composés aromatiques simples ». *Journal français d'hydrologie*, (1983). 14(1), 11-30.
- [59] **Al-Hayek, N., Legube, B., & Doré, M.**  
“Ozonation catalytique (Fe III/A12O3) Du phénol et de ses produits d'ozonation. » *Environmental Technology*, 10(4), (1989). 415-426.

# RESUME

## « Modélisation expérimentale et optimisation du procédé de génération d'ozone par décharge à barrière diélectrique pour traitement de l'eau ».

Dans notre vie quotidienne, les décharges à barrière diélectrique ont de nombreuses applications, dont les plus courantes sont l'éclairage et certains écrans de télévision. Mais, nous le retrouvons dans de nombreux autres domaines tels que la stérilisation, la dépollution, la gravure, la découpe et la génération d'ozone. Les générateurs d'ozone sont de plus en plus utilisés dans différents domaines de l'industrie pour l'élimination des virus, bactéries et microorganismes dans l'eau. Actuellement, le moyen le plus efficace de production de l'ozone est la décharge à barrière diélectrique, qui nécessite des tensions de l'ordre de plusieurs KV et des fréquences de quelques dizaines de KHz.

L'objectif principal de cette étude est de réaliser et étudier des générateurs d'ozone à décharge à barrière diélectrique, et évaluer la faisabilité d'un procédé de désinfection de l'eau par l'ozone, modélisé et optimiser le rendement en termes de taux de production d'ozone et de rendement énergétique, d'un autre côté l'objectif sera d'introduire ce procédé dans les différents secteurs de l'industrie, pour le traitement de tout type d'eau.

Mots-clés : décharge à barrière diélectrique, générateur d'ozone, plans d'expériences, traitement de l'eau.

### ABSTRACT

#### "Experimental modeling and optimization of ozone generation process by dielectric barrier discharge for water treatment."

In our daily life, the dielectric barrier discharges have many applications, the most common of which are light and some television screens (plasma display panels). But we find it in many other areas such as sterilization, decontamination, engraving, cutting and ozone generation.

Ozone generators are increasingly used in various fields of industry for the removal of viruses, bacteria and microorganisms in water. Currently, the most efficient means of generating ozone is the dielectric barrier discharge, which requires voltages of the order of several kV and frequencies of several tens of KHz.

The main objective of this study is to achieve and study ozone generators to dielectric barrier discharge, and assess the feasibility of a water disinfection process by ozone, modeled and optimize performance in terms of rate of ozone production and energy efficiency, on the other hand the objective is to introduce this process in the various sectors of industry, for the treatment of any type of water.

Keywords: dielectric barrier discharge, ozone generator, experimental design, water treatment.

### المخلص

#### "وضع النماذج التجريبية لتحسين عملية توليد الأوزون من خلال التفريغ حاجز عازل لمعالجة المياه"

التفريغ الكهربائي مع حاجز عازل لها تطبيقات كثيرة، وأكثرها شيوعاً هي الإضاءة وبعض شاشات التلفزيون، والتعقيم والتطهير والحفر والقطع وتوليد الأوزون. قدمنا في هذه الورقة دراسة التفريغ الكهربائي مع العازل وتطبيقاتها لتوليد الأوزون والتطبيقات المختلفة لتوليد للأوزون (معالجة المياه ، ومعالجة الهواء) الهدف الرئيسي الذي ركزنا عليه في هذه المذكرة هو الوصول إلى تركيب نموذج تجريبي لمعالجة المياه بالأوزون و الجزء الأهم في هذا العمل تمحور حول تقييم إمكانية عملية تعقيم المياه بالأوزون وتحسين الأداء من حيث معدل إنتاج الأوزون وكفاءة الطاقة، من ناحية أخرى كان الهدف هو إدخال هذه العملية في مختلف قطاعات الصناعة، لعلاج أي نوع من الماء. وقد نجحنا في إنشاء هذا النموذج و النتائج المتحصل عليها باستعمال ماء ملوث كانت جد مرضية.

كلمات البحث: التفريغ الكهربائي مع حاجز عازل ، مولد الأوزون، وتصميم التجارب ومعالجة المياه