

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique (GEE)

Filière : Electronique



MASTER INSTRUMENTATIONS

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté par : HALFAOUI Nassim & ROUIGUEB Wadie

Intitulé du Sujet

**MODELISATION ET OPTIMISATION DE DECHARGE A BARRIERE
DIELECTRIQUE VOLUMIQUE ALIMENTEE PAR DIFFERENTS SIGNAUX
POUR GENERATION D'OZONE**

Soutenu en 2018, devant le jury composé de :

M ^r	NEMMICHE Ahmed	MCB	Univ. Tlemcen	Président
M ^{me}	HEDARA Rachida	MCB	Univ. Tlemcen	Encadreur
M ^r	MASSOUM Nour-Eddine	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur

Année Universitaire 2017-2018

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَعَلَى اللَّهِ تَوَكَّلْ

وَكَانَ فَضْلُ اللَّهِ عَلَيْكَ عَظِيمًا

REMERCIEMENT

Mes remerciements vont au premier lieu au bon dieu pour la force, la patience et la volonté qu'il m'a donné durant ces années d'études.

Ce travail a été effectué au laboratoire de recherche génie électrique (APELEC), faculté de Technologie, université Sidi Bel-Abbes.

Je remercie infiniment ma directrice de mémoire Mme : **HEDARA RACHIDA**, Maitre de conférences B à l'université Aboubakr Balkaid, faculté de la technologie de Tlemcen pour ses précieux conseils, son soutien et son optimisme à toute épreuve. Mes remerciements lui sont surtout adressés pour son suivi continué tout le long de la préparation de ce mémoire.

Je tiens à remercier sincèrement Mr : **NAMMICHE SAID**, Professeur à l'université de Sidi Bel-Abbes pour avoir eu l'amabilité de m'avoir aidée à mener à terme notre travail de recherche grâce à ses conseils inestimables et à ses interventions pertinentes.

Je tiens également à remercier tous ceux qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de soutenance et d'évaluer la présente mémoire : le présidente Mr **NEMMICHE Ahmed**, Professeur à l'université de Tlemcen, et le jury Mr : **MASSOUM Boumediene**, Professeur à l'université Tlemcen.

Mes remerciements s'adressent également à tous nos amis d'études et collègues de travail pour leur soutien moral et leurs conseils précieux.

Je remercie en fin de parcours nos parents, nos frères, nos sœurs et toutes nos familles pour leur affection inégalable et leur soutien moral inconditionnel. Sans leurs encouragements, je n'aurais pu mener à bien ce travail.

Résumé

Actuellement, les décharges à barrière diélectrique ont de nombreuses applications, dont les plus courantes sont l'éclairage et certains écrans de télévision. Aussi, 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. de nos jours, 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.

Le but principal de notre travail est basé sur la modélisation expérimentale et l'optimisation d'une décharge à barrière diélectrique volumique alimentées par différents signaux alternatifs (Sinusoïdal, carré, triangulaire) afin de trouver les valeurs optimales des facteurs électriques (la tension d'alimentation de la DBD et la fréquence) pour avoir un rendement de la génération d'ozone élevé avec minimum de puissance électrique consommée.

Mots clés : décharge à barrière diélectrique, générateur d'ozone, plans d'expériences, décharge volumique

Abstract

At present, 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 our work is based about experimental modeling and optimization of a volumetric dielectric barrier discharge fed by various alternating signals (sinusoidal, square, triangular) in order to find the optimal values of the electrical factors (the supply voltage of the DBD volumetric and the frequency) to have a high ozone generation efficiency with minimum electrical power consumed.

Keywords: dielectric barrier discharge, ozone generator, experimental design, discharge volumetric.

المخلص

حاليا ، تصريف الحاجز العازلة لديها العديد من التطبيقات ، وأكثرها شيوعا هي الإضاءة وبعض شاشات التلفزيون. أيضا ، نجد أنه في العديد من المجالات الأخرى مثل التعقيم ، إزالة التلوث ، النقش ، القطع وتوليد الأوزون. تستخدم مولدات الأوزون بشكل متزايد في مجالات مختلفة من الصناعة لإزالة الفيروسات والبكتيريا والكائنات الدقيقة في الماء. في الوقت الحاضر ، أكثر الطرق فعالية لإنتاج الأوزون هي تصريف الحاجز العازل ، الذي يتطلب شدة التوثر بترتيب عدة KV وترددات بضع عشرات من .KHz

ويستند الهدف الرئيسي لعملنا على النمذجة التجريبية والتحسين من تصريف الحاجز العازلة الحجمي تغذيها بإشارات بديلة مختلفة (جيب ، مربع ، الثلاثي) من أجل العثور على القيم المثلى للعوامل الكهربائية (شدة التوثر وتكراره) للحصول على كفاءة عالية في توليد الأوزون مع استهلاك الطاقة الكهربائية الدنيا.

الكلمات المفتاحية: تصريف الحاجز العازل ، مولد الأوزون ، التصاميم التجريبية ، تفريغ الحجم

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur la décharge à barrière diélectrique(DBD)	
I.1 Introduction	3
I.2 Aspect historique	3
I.3 Définition d'une décharge électrique	4
I.4 Type des décharges	4
I.4.1 Décharges pointe-pointe	4
I.4.2 Décharges pointe-plan	5
I.4.3 Décharges plan-plan	5
I.5 Décharges électriques dans les gaz.....	6
I.5.1 Généralités sur les plasmas	6
I.5.2 Paramètres physiques des plasmas	7
I.5.3 Méthodes pour qu'un gaz se transforme en plasma	7
I.6 Décharges à barrières diélectriques	8
I.6.1 Définitions	8
I.6.2 Principe de fonctionnement d'une DBD	9
I.6.3 Classification typiques de DBD	10
I.6.3.1 Décharge à barrière diélectrique surfacique	10
I.6.3.2 Décharge à barrière diélectrique volumique	11
I.7 Alimentation électriques pour les DBD	13
I.7.1 Source de tension sinusoïdale	13
I.7.2 Alimentation impulsionnelles	13
I.8 Caractérisation électrique de la DBD	14
I.8.1 Etude de courant	14
I.8.2 Etude de la tension	14
I.8.3 Etude de la fréquence	14
I.9 Applications des DBDs	15
I.9.1 Production d'Ozone	15
I.9.2 Traitement des gaz	16
I.9.3 Traitement de surfaces	16

Chapitre III : Modélisation et optimisation expérimentale du générateur d'ozone à DBD

III.1	Introduction	35
III.2	Modélisation expérimentale du procédé de génération d'ozone	35
III.2.1	Rappels sur la méthode des plans d'expériences	36
III.2.1.1	Concepts fondamentaux : réponses, facteurs effets, interactions	36
III.2.1.2	Détermination de la réponse et des facteurs d'étude	37
III.2.1.3	Choix d'un modèle	37
III.2.2	Plans d'expériences appliqués à la DBD pour génération d'ozone	38
III.2.2.1	Détermination des facteurs contrôlables	38
III.2.2.2	Etude de l'influence de paramètres électriques sur les caractéristiques de DBD	39
III.2.2.2.1	L'influence de la tension et de la fréquence sur la concentration d'ozone	40
III.2.2.2.2	L'influence du débit d'oxygène sur la concentration d'ozone	46
III.2.3	Modélisation et optimisation	47
III.3	Conclusion	54
	Conclusion générale	56
	Références	58
	Annexe	62

Tables des figures

Figure I.1	Les différents types de décharges
Figure I.2	Diagramme des principaux changements d'état de la matière, d'après Chaussin et Hilly [7]
Figure I.3	Configuration classique d'une DBD
Figure I.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
Figure I.5	Schémas de décharge à barrière diélectrique surface (d à g). (a) DBD de surface à électrodes décalées, (b) DBD de surface à électrodes non décalées, (c) décharge rampante.
Figure I.6	Schématisation d'une DBD volumique.
Figure I.7	Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD)
Figure I.8	Courbes du courant et de la tension en fonction du temps pour $U = 30\text{Kv}$ et $f = 300\text{Hz}$
Figure I.9	Schéma de principe d'un ozoniseur
Figure I.10	Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique de plastiques
Figure II.1	Molécule d'ozone
Figure II.2	Mauvais ozone
Figure II.3	Formation naturelle de l'ozone par décharge électrique
Figure II.4	Principe de génération d'ozone par rayons UV
Figure II.5	Production d'ozone par décharge a barrière diélectrique
Figure II.6	Production d'ozone artificiellement par lampe UV
Figure II.7	Système portable de production d'eau ozonée
Figure II. 8	L'ozone dans la blanchisserie
Figure II.9	Représentation schématique d'un générateur d'ozone à DBD surfacique
Figure II.10	Photographie d'un générateur d'ozone développé
Figure II.11	Schéma synoptique du dispositif de mesure de tension, du courant et de la puissance dans le generateur d'ozone

- Figure II.12** Photographie du dispositif expérimental
- Figure III.1** Environnement du système
- Figure III.2** Test statistique pour valider un modèle mathématique de deux critères R^2 et Q^2
- Figure III. 3** Signaux électriques du courant et de la tension dans une DBD avec un signal sinusoïdal
- Figure III. 4** Signaux électriques du courant et de la tension dans une DBD avec un signal triangulaire
- Figure III. 5** Signaux électrique du courant et de la tension, dans une DBD avec un signal carré
- Figure III.6** Concentration d’ozone généré en fonction de la tension d’alimentation pour un signal sinusoïdal
- Figure III.7** Concentration d’ozone généré en fonction de la fréquence pour un signal sinusoïdal
- Figure III.8** Concentration d’ozone généré en fonction de la tension d’alimentation pour un signal carré
- Figure III.9** Concentration d’ozone généré en fonction de la fréquence pour un signal carré
- Figure III.10** Concentration d’ozone généré en fonction de la tension d’alimentation pour un signal triangulaire
- Figure III.11** Concentration d’ozone généré en fonction de la fréquence pour un signal triangulaire
- Figure III.12** Concentration d’ozone généré en fonction de débit d’oxygène pour les trois signaux
- Figure III.13** Diagramme du plan composite à deux facteurs
- Figure III.14** Histogramme montrant l’influence des différents facteurs pour le signal sinusoïdal
- Figure III.15** Histogramme montrant l’influence des différents facteurs pour le signal carré
- Figure III.16** Histogramme montrant l’influence des différents facteurs pour le signal triangulaire
- Figure III.17** Contours iso-réponses pour la concentration d'ozone ; (a) sinusoïdal, (b) carré, (c) triangulaire ; ($D_o=1.5$ l/mn)

Liste des tableaux

- Tableau II.1** Comparaison entre différentes méthodes de désinfection de l'eau
- Tableau III.1** Concentration d'ozone généré en fonction des variables d'entrées (F et V) pour un signal sinusoïdal
- Tableau III.2** Concentration d'ozone généré en fonction des variables d'entrées (F et V) pour un signal carré
- Tableau III.3** Concentration d'ozone généré en fonction des variables d'entrées (F et V) pour un signal triangulaire
- Tableau III.4** Concentration d'ozone généré en fonction du débit d'oxygène pour les trois signaux
- Tableau III.5** Détermination des intervalles d'études
- Tableau III.6** Résultats du plan composite à faces centrés à 17 expériences

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La communauté scientifique s'intéresse de plus en plus aux technologies basées sur les plasmas réactifs hors équilibre générés par des décharges électriques dans l'air à la pression atmosphérique. En effet, ces technologies présentent divers avantages comparés à d'autres procédés plasma à plus basse pression ou de type thermique. Elles sont également moins consommatrices d'énergie électrique en comparaison d'un réacteur à plasma thermique et par le design des électrodes (utilisation de l'effet de pointe et des effets de barrière diélectrique). Les plasmas hors équilibre à l'air ambiant peuvent être générés par des décharges couronne et/ou des décharges à barrière diélectrique (DBD). Ces décharges se présentent de manière naturelle sous une forme filamentaire arborescente ou non. Les décharges de type DBD plan-plan (dont les distances inter-électrode sont réduites à quelques millimètres au plus) sont efficaces.

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) sont utilisées depuis plus d'un siècle, principalement pour la production d'ozone. Les recherches réalisées ces vingt dernières années ont permis de mieux comprendre les principes physiques régissant ce procédé plasma ainsi que les différents régimes de décharges observables afin de bien les appliquer dans les différents domaines.

L'objectif principal de ce mémoire est de décrire quantitativement l'influence des paramètres électriques sur le rendement du générateur d'ozone, en analysant l'effet de la forme du signal de la tension appliquée sur la concentration d'ozone et l'efficacité énergétique. 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. Ce manuscrit comprend trois chapitres essentiels :

Le premier chapitre consiste à présenter des généralités sur décharge à barrière diélectrique (DBD), qui a lieu dans l'air et à pression atmosphérique, et fait partie des plasmas hors l'équilibre thermodynamique.

Le deuxième chapitre porte sur l'ozone O_3 et ses diverses applications dans tous les domaines en plus on a cité le générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique.

Le troisième chapitre sera consacré sur la modélisation et l'optimisation expérimentale de générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique volumique.

CHAPITRE

1



**GENERALITE SUR LA DECHARGE A
BARRIERE DIELECTRIQUE(DBD)**

I.1 Introduction

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) sont connues depuis plus d'un siècle. Dans ces décharges, les électrodes (au moins une des deux) sont recouvertes d'une couche diélectrique. Elles ont la propriété très intéressante pour les applications de permettre la génération d'un plasma froid hors-équilibre à des pressions élevées en évitant, par limitation capacitive du courant, la transition vers un régime d'arc. Ce type de décharge est utilisé depuis longtemps pour la génération d'ozone, plus récemment pour le traitement de surface, et depuis une dizaine d'années dans les écrans plats à plasma [1].

Nous présentons dans ce chapitre une revue bibliographique centrée sur les notions nécessaires à la compréhension des phénomènes physiques liés aux plasmas et décharges électriques, (claquage, arc électrique, l'étincelle...) en premier temps. En deuxième temps, nous présentons les concepts fondamentaux des décharges à barrière diélectriques, leurs différentes configurations physiques possibles et voir leurs diverses applications les plus courantes (actuelles et futures) dans le monde de l'industrie et dans la vie quotidienne.

I.2 Aspect historique

L'étude scientifique des décharges électriques a commencé au XVIIIème siècle par l'observation expérimentale d'étincelles produites par des générateurs électrostatiques et des éclairs d'orages. Ensuite l'invention de piles suffisamment puissantes a permis à V.V. Petrov de produire le premier arc électrique en 1803 dans l'air. Humphrey Davy en fit ensuite l'étude. Mais ce fut Michael Faraday qui, entre 1831 et 1835, découvrit et commença l'étude des décharges luminescentes en utilisant des tubes contenant des gaz à une pression de l'ordre de 100 Pa sous 1000 Volt. Par la suite, à la fin du XIXème siècle et au début du XXème siècle, la physique des décharges électriques dans les gaz a permis à la physique atomique de faire ses premiers progrès avec les travaux de William Crookes et de Thomson, avec en particulier la mise en évidence du rôle fondamental des électrons dans la décharge et la mesure du rapporte/m. Vers 1900, un élève de Thomson, Townsend, réalisa la première modélisation d'une décharge, correspondant au cas de la décharge luminescente en champ uniforme. Langmuir travailla aussi sur ces décharges et introduisit le concept du plasma.

Au cours du XXème siècle on passa à l'exploration des décharges électriques en fonction de la fréquence, tandis que la modélisation progressait en raison du développement d'applications de plus en plus nombreuses des décharges [2].

I.3 Définition d'une décharge électrique

Lorsqu'un milieu isolant est soumis à une tension électrique suffisante, un courant de particules chargées électriquement devient possible par l'ionisation partielle du milieu. On parle de décharge électrique. Ce phénomène est partiellement intéressant car bien que rencontré dans l'expérience commune et utilisé dans de nombreuses applications technologiques, il prend en effet une multiplicité de formes différentes et sa description fait appel à de nombreux champs de la physique.

Une décharge, c'est une conversion rapide de l'énergie électrique en énergie cinétique, puis en énergie d'excitation et d'ionisation des atomes et des molécules [3].

Le terme décharge électrique désigne des phénomènes variés :

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

✚ Si on établit une tension suffisante entre deux électrodes placées dans un gaz, il se produit une décharge électrique (passage d'un courant électrique). Les manifestations de cette décharge varient avec la pression du gaz (Loi de Paschen). L'étude de ce phénomène relève de la physique des plasmas.

I.4 Type des décharges

Les caractéristiques électriques des décharges dépendent fortement de la géométrie des électrodes. Elles sont classées en trois familles qui induisent des comportements électriques et des applications différentes [4].

I.4.1 Décharges pointe-pointe

L'utilisation de pointes métalliques pour l'étude des décharges est assez courante. Il permet d'obtenir localement un champ intense (au niveau des pointes), ce champ intense favorise le claquage électrique des gaz.

L'utilisation de pointes a l'avantage de stabiliser le lieu de la décharge puisqu'on est sûr de point de départ et du point d'arriver de celle-ci (mais rien n'impose que le trajet entre ces deux points soit une ligne droite). Ce sont souvent des décharges entre deux électrodes métalliques, on utilise rarement cette configuration avec des décharges à barrière diélectriques [4].

I.4.2 Décharges pointe-plan

Ce sont des arcs dont le chemin peut être instable ; c'est à dire que l'on connaît de manière certaine le point de départ de l'arc mais qu'on ne peut pas prédire quel sera le point d'arrivée sur le plan ni même le chemin parcouru. On peut distinguer trois types de décharge pointe plan : les arcs transférés, les arcs non transférés et les arcs glissants, qui ont des utilisations industrielles différentes. Les arcs transférés et non transférés sont utilisés tous les deux en sidérurgie pour obtenir le gaz à des très hautes températures, à l'aide de courants importants (plusieurs centaines d'Ampères) [5].

- **L'arc transféré** : un arc transféré est un arc pointe-plan utilisé couramment pour la soudure. La pointe est l'électrode utilisée par le soudeur et le plan est la plaque de métal à souder. Il arrive qu'on utilise un gaz sous pression pour protéger la zone de soudage [4].
- **L'arc non transféré** : est soufflé par un flux de gaz (gaz plasmagène) ce qui crée un arc projeté c'est une torche à plasma, on se sert de ce type de dispositif pour réaliser des dépôts de métaux sur différents matériaux [4].

1.4.3 Décharges plan-plan

Les décharges plan-plan sont rarement des décharges entre électrodes métalliques. En effet, dans le cas d'une utilisation d'électrodes métalliques planes, on ne connaît ni le point de départ ni le point d'arrivée. Dans la plupart des cas, on utilise des électrodes qui sont recouvertes d'une couche de diélectrique côté décharge. Il est plus facile d'obtenir une décharge homogène sur tout le plan. Ce type de décharge met en jeu des tensions importantes (dizaines de KV) et des courants relativement faibles quelque centaines de mA [4].



Figure I.1 : Les différents types de décharges

I.5 Décharges électriques dans les gaz

I.5.1 Généralités sur les plasmas

Plasma nom masculin, du grec plasma, formation: état dilué de la matière, analogue à un gaz, mais constitué de particules chargées, électrons et ions, en proportions telles que le milieu soit globalement neutre [6].

Le terme « plasma » a été introduit en 1928 par le physicien américain I. Langmuir pour désigner un gaz ionisé, c'est-à-dire constitué de particules chargées (ions et électrons). Il aurait choisi ce terme par analogie avec le plasma sanguin, partie liquide du sang transportant cellules et hormones dans notre corps.

Le plasma est considéré comme le quatrième état de la matière faisant suite à l'état solide, liquide et gazeux. Dans un gaz, chaque atome présent est électriquement neutre, les charges positives (protons) du noyau sont compensées par le même nombre de charges négatives (électrons) qui gravitent autour de lui. Si on fournit à ce gaz un apport énergétique suffisant, une partie des électrons va être arrachée aux atomes entraînant la perte de leur neutralité: c'est le phénomène d'ionisation (Fig. I.2). Au commencement, l'état plasma désignait uniquement les gaz totalement ionisés et globalement neutres, par la suite cette définition a été étendue aux gaz dont une seule fraction aura été ionisée. L'apport énergétique nécessaire pour passer de l'état gazeux à l'état plasma peut provenir d'une source de chaleur, d'un champ électromagnétique très intense, d'un bombardement de particules ou encore d'un champ électrique de forte amplitude.

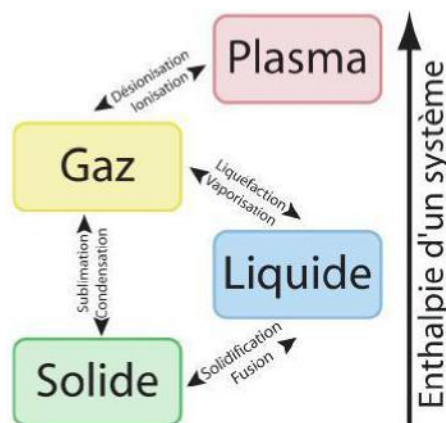


Figure I.2 : Diagramme des principaux changements d'état de la matière, d'après Chaussin et Hilly [7]

I.5.2 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 (cm^{-3}).

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

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

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

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

Libre parcours moyen : le libre parcours moyen l 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 [8].

I.5.3 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) élévation 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 [9].

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 [9].

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 créé 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 δ reste inférieur à 10^{-4} [10].

I.6 Décharges à barrières diélectriques**I.6.1 Définitions**

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 CO_2 , lampe écimer, écrans plasmas... et elles touchent de nombreux domaines industriels : traitement de l'eau, environnement, électronique, textile, emballage, automobile... [10].

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 I.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 contrepartie, cela impose l'utilisation d'une excitation électrique alternative.

Il agit donc comme un ballast qui, dans le cas idéal, ne consomme aucune énergie. Le diélectrique étant un isolant, sa constante diélectrique et son épaisseur, en combinaison avec

la dérivée dans le temps de la tension appliquée dV/dt , détermine le courant de déplacement qui peut passer à travers le diélectrique. Il ne laisse pas passer le courant continu (DC) et les décharges DBD sont nécessairement pulsées et requièrent donc l'utilisation de tension alternative pour fonctionner. Les matériaux couramment utilisés comme barrière diélectrique sont le verre, le quartz, l'alumine, des couches de polymères et certaines céramiques particulières. Puisque à haute fréquence, la limitation du courant par la barrière diélectrique devient de moins en moins efficace, la DBD est normalement utilisée entre des fréquences de 50Hz à 10MHz [11].

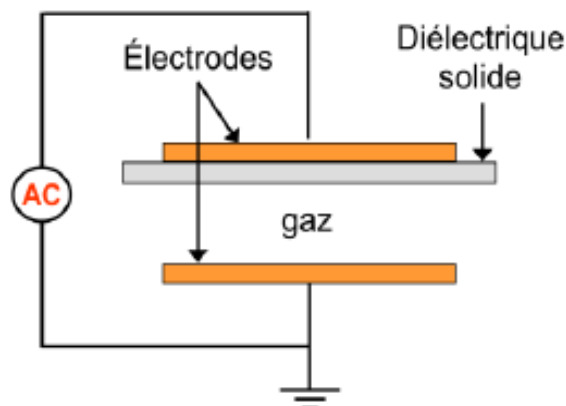


Figure I.3 : Configuration classique d'une DBD

I.6.2 Principe de fonctionnement d'une DBD

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 I.4-a). 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. 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 [12].

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 I.4-b).

Au changement de polarité (Figure I.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 [12].

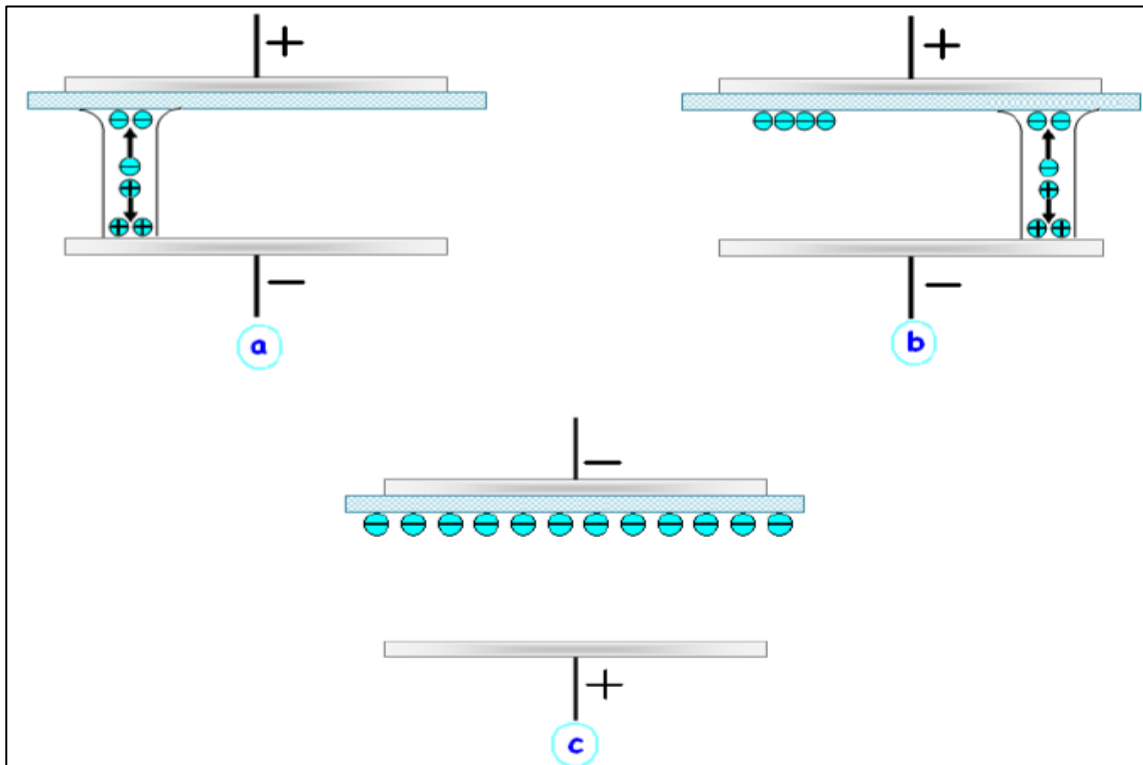


Figure 1.4: Principe de fonctionnement d'une DBD : (a) établissement d'une première micro décharge, (b) extinction de la première micro-décharge et amorçage d'une nouvelle, (c) changement de la polarité appliquée sur les électrodes

I.6.3 Classification typiques de DBD

I.6.3.1 Décharge à barrière diélectrique surfacique

Un matériau diélectrique est placé entre les deux électrodes, cependant, elles sont disposées asymétriquement de part et d'autre du diélectrique. Le gaz n'est donc plus présent entre les deux électrodes mais sur chacun des côtés (Figure I.5). De plus, la proximité des

électrodes permet d'abaisser considérablement la tension d'amorçage du plasma. C'est cette configuration qui confère à ce type de décharge un intérêt tout particulier pour le contrôle d'écoulement l'orientation du champ électrique va permettre aux particules chargées de se déplacer parallèlement à la surface du diélectrique. Grâce au mouvement de ces particules, un écoulement d'air de quelques $m.s^{-1}$ va être induit tangentiellement à la surface du diélectrique cet écoulement est appelé vent ionique [13].

Dans les années 90, Roth signe deux articles de référence [13] dans lesquels il évoque pour la première fois le potentiel des DBD surfaciques pour la modification d'écoulement. De nos jours, les DBD surfaciques suscitent un très grand intérêt et leurs applications au contrôle d'écoulements aérodynamiques sont maintenant étudiées partout dans le monde [11].

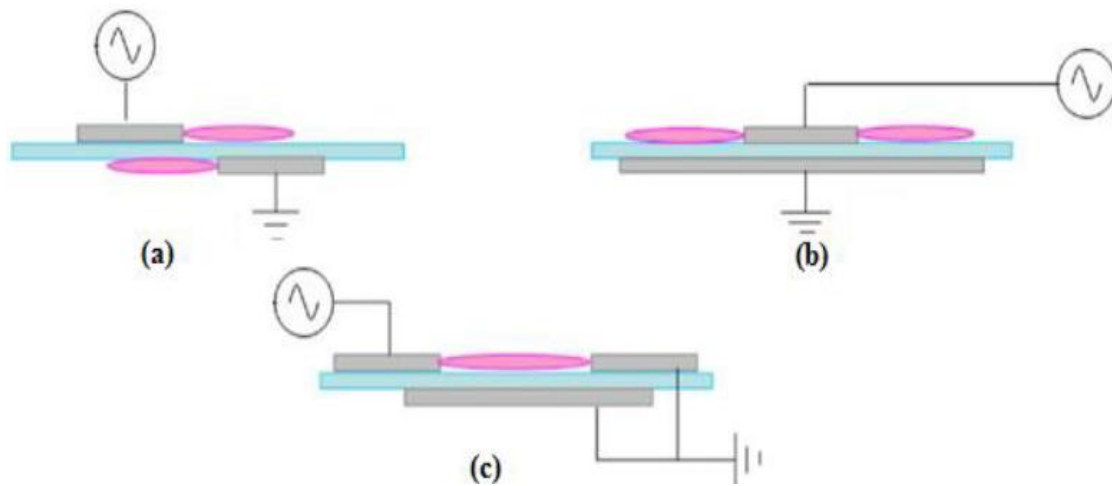


Figure I.5: Schémas de décharge à barrière diélectrique surface (d à g).
(a) DBD de surface à électrodes décalées, **(b)** DBD de surface à électrodes non décalées, **(c)** décharge rampante.

I.6.3.2 Décharge à barrière diélectrique volumique

Dans une décharge couronne, la création importante de charges d'espace peut conduire à la formation d'arcs électriques ce qui limite l'utilisation de ce type de décharge.

Afin d'éviter le passage à l'arc, on recouvre une des électrodes avec un matériau isolant ou diélectrique. On parle alors d'une décharge à barrière diélectrique ou DBD (Figure I.6).

L'utilisation d'une barrière diélectrique va offrir des possibilités d'utilisation beaucoup plus larges que pour une simple décharge couronne.

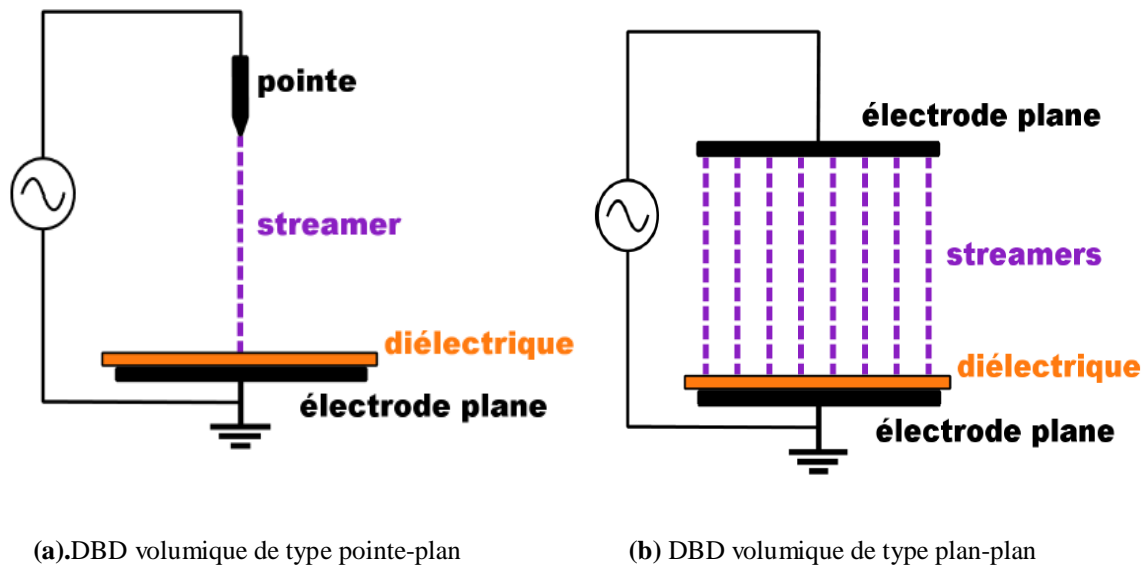


Figure I.6 : Schématisation d'une DBD

On utilise ce type de décharge le plus souvent en configuration plan-plan (Figure I.6(b)) de façon à augmenter le nombre de streamers dans l'espace inter-électrode et donc d'accroître le volume global du plasma. Par ailleurs, une tension alternative est souvent utilisée avec ce type de décharge de façon à annihiler, au début de chaque alternance, l'accumulation des charges présentes à la surface du diélectrique.

De manière générale, on qualifie la DBD volumique de décharge silencieuse car son niveau sonore est beaucoup plus faible que dans le cas où des arcs électriques sont produits. Le diélectrique se comporte comme un condensateur monté en série avec le plasma, entraînant ainsi la formation d'un grand nombre de micro-décharges. Chacune d'entre elles correspond à la propagation d'un streamer dans l'espace inter-électrode.

Chaque micro-décharge induit un pic de courant dans ce cas de figure, ce qui donne un caractère impulsionnel au courant de décharge. Quelques chercheurs mentionnent dans leur étude que les caractéristiques des décharges silencieuses dépendent de la nature et de la pression du gaz utilisé [14]. Dans certaines conditions, on qualifie la DBD volumique de décharge lumineuse homogène car les micro-décharges y sont très rares et les filaments de plasma ne sont plus visibles à l'œil nu.

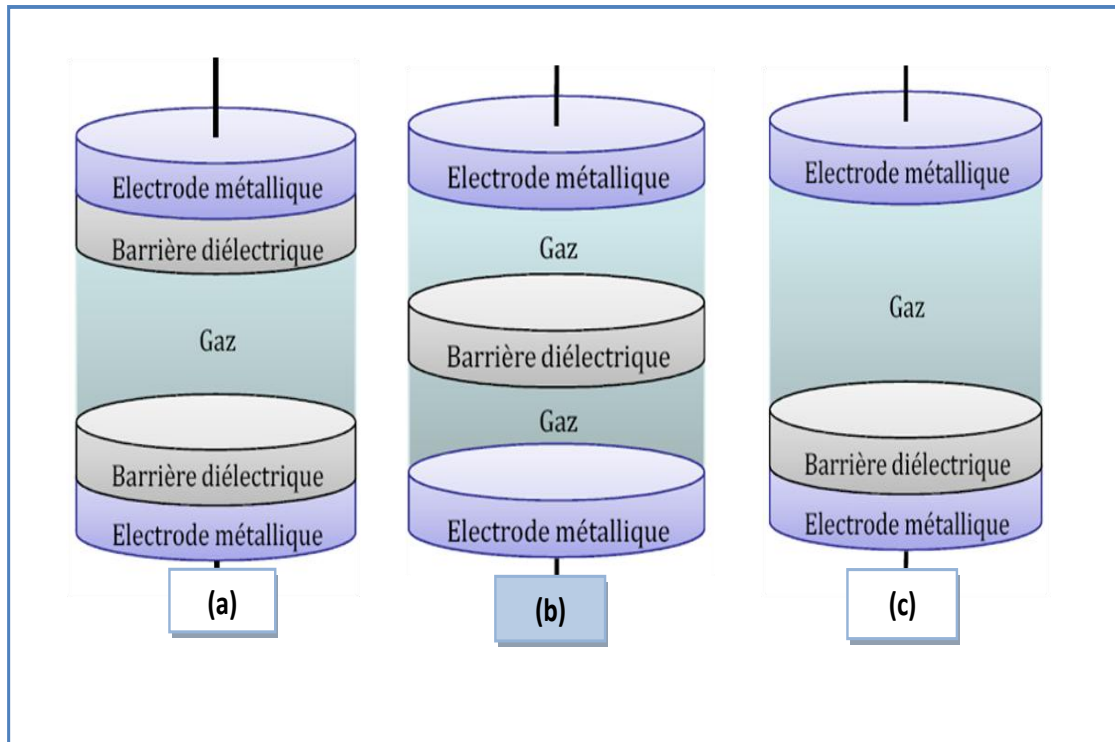


Figure I.7 : Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD)

I.7 Alimentation électriques pour les DBD

A présent, nous introduisons un ensemble d'alimentations destinées aux DBDs, toutes se caractérisent par des formes d'onde (tension et courant) alternatives, à cause du comportement capacitif inhérent à ce type de décharges.

I.7.1 Source de tension sinusoïdale

La façon la plus facilement réalisable et peut être la plus ancienne, d'alimenter une DBD est d'utiliser un générateur de tension sinusoïdale. Dans ce type de configuration, il est nécessaire de placer un transformateur élévateur en sortie du générateur, quand la tension du générateur n'est pas suffisante pour faire claquer le gaz ; les alimentations sinusoïdales permettent un réglage de la fréquence et de l'amplitude de la tension [15].

I.7.2 Alimentation impulsionnelle

Les alimentations impulsionnelles pour les DBD présentent généralement une tension carrée, avec une amplitude de l'ordre de 10KV, des temps de montée de l'ordre de la centaine de ns et une fréquence de fonctionnement de l'ordre de plusieurs dizaines de KHz [15].

I.8 Caractérisation électrique de la DBD

I.8.1 Etude de courant

La (figure I.8) représente un exemple typique de courbes de la tension et du courant de décharge en fonction du temps pour une tension $U=30\text{Kv}$ et $f=300\text{Hz}$. Le courant est constitué de séries d'impulsions apparaissant à chaque demi-période, s'initiant généralement à peu près au moment de l'inversion de polarité et s'éteignant après que la tension atteint sa valeur maximale.

Cette forme de courant est typiquement des séries de micro-décharges qui apparaissent dans une décharge à barrière diélectrique. Les pics de courant peuvent atteindre des valeurs de 20 mA mais pour des durées relativement courts (de l'ordre de la μs) [16].

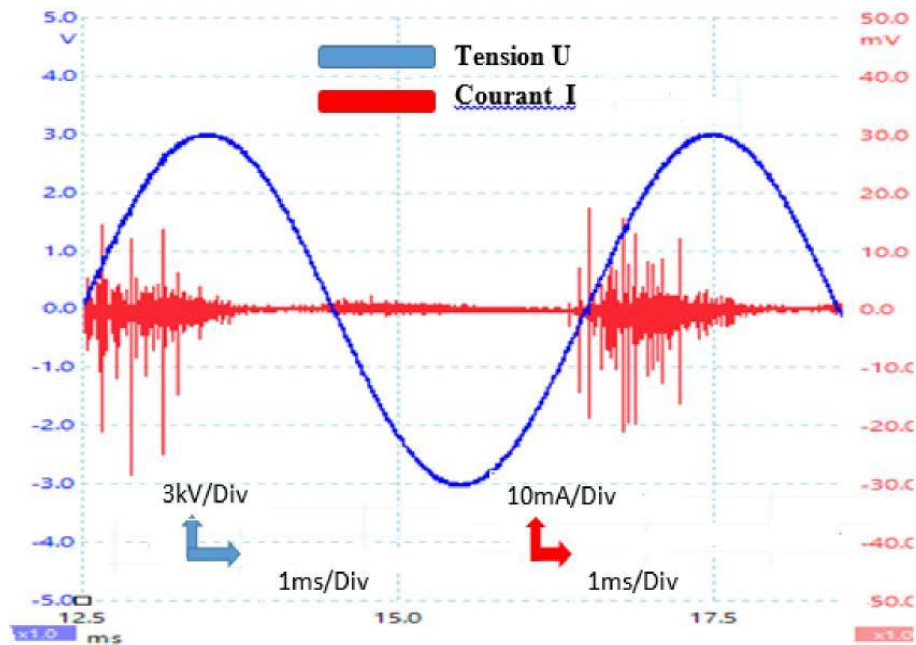


Figure I.8 : Courbes du courant et de la tension en fonction du temps pour $U= 30\text{Kv}$ et $f= 300\text{Hz}$

I.8.2 Etude de la tension

La tension régule le nombre de micro-décharges par cm^2 pendant une demi-alternance ; lorsque la tension augmente, le nombre de micro-décharges par demi-alternance augmente également.

I.8.3 Etude de la fréquence

Le nombre de décharges par unité de temps et le courant de décharge augmente avec la fréquence d'alimentation. Plus la fréquence est élevée et plus le temps entre la dernière

décharge d'une demi- alternance suivante est court. Les décharges ont moins de temps pour se neutraliser et renforcent le champ.

I.9 Applications des DBDs

Dans cette section nous allons évoquer quelques usages des DBD, en commençant par la plus ancienne : la production d'ozone. La grande diversité d'applications offertes par les DBD est un point motivant, qui ouvre le spectre des perspectives aux résultats obtenus dans cette mémoire.

I.9.1 Production d'Ozone

L'ozone est produit en soumettant cet air sec à une décharge électrique ou à une irradiation UV. Par ce dernier procédé, l'ozone est produit en concentration plus faible (inférieur à 0.1% en poids) que par décharge électrique (1 à 4.5% en poids). Lorsque le gaz de départ est de l'oxygène, cette concentration peut atteindre 14 à 18% en poids.

Une haute tension est appliquée entre deux électrodes disposées concentriquement. Les électrodes sont séparés l'une de l'autre par un diélectrique et par deux chambres de décharge traversées par le gaz. Certaines des molécules d'oxygène présentes dans le gaz injecté se fractionnent dans le champ électrique et se combinent immédiatement aux molécules d'oxygène libre, formant ainsi de l'ozone [17].

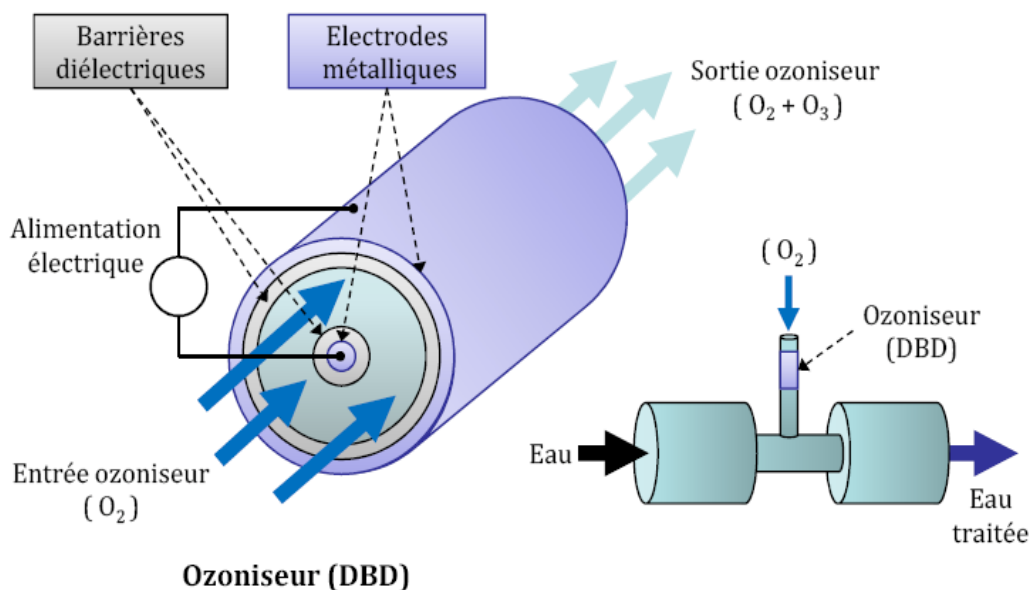


Figure I.9. Schéma de principe d'un ozoniseur

I.9.2 Traitement des gaz

La configuration de DBD mise au point pour la production d'ozone, est également appliquée à la décomposition des gaz toxiques (entrant dans « l'ozoniseur » au lieu de l'oxygène) comme le sulfure d'Hydrogène H₂S, par des collisions avec : des électrons, des radicaux, des ions ou des photons (rayonnement UV) [18].



Aujourd'hui, la DBD est objet d'étude dans la destruction des gaz d'échappement toxiques, comme le monoxyde de carbone CO, les oxydes d'azote NO_x et dans la réduction des émissions à effet de serre, comme le dioxyde de carbone CO₂, responsables du réchauffement de la planète .

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

I.9.3 Traitement de surfaces

Grace à la caractéristique « homogène » des DBDs, elles sont utilisées dans la modification de surfaces ; un exemple est le traitement des plastiques, pour leur permettre de coller facilement ou d'être réceptifs à l'encre d'impression. La DBD peut être facilement introduite dans le processus industriel de production de papier, en effectuant la décharge entre un rouleau qui fait tourner le papier et une électrode (parfois plusieurs) recouverte par un diélectrique, comme le montre la figure I.10.

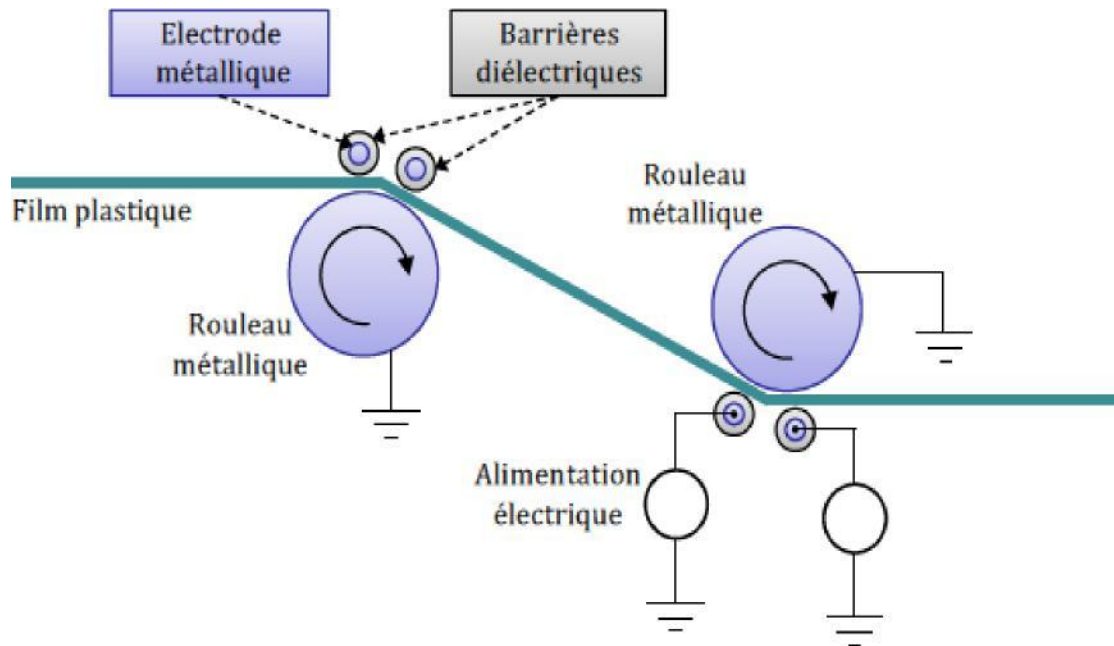


Figure I.10 : Utilisation d'une DBD dans le traitement surfacique de plastiques

I.9.4 Eclairage et Lampe à DBD

Le contact entre l'électrode et le gaz dans les lampes, est la principale source de contamination du gaz et d'érosion des électrodes ; la DBD est une bonne solution à ce problème, et permet d'augmenter la durée de vie des lampes de nouvelle génération .Elles permettent aussi l'élimination du mercure, qui est un élément dangereux pour la santé.

En ce qui concerne l'éclairage, les lampes à DBD, ont également l'avantage de pouvoir produire un rayonnement homogène à travers la surface des électrodes; cette propriété est exploitée pour les lampes d'éclairage de fond dans les écrans à plasma. [5].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit le concept de décharge à barrière diélectrique et les éléments physiques qui la caractérisent ainsi que leur configuration fréquemment utilisé. Les grandeurs électriques importantes ont été présentées, comme le courant de décharge et la puissance électrique consommées.

Le prochaine chapitre abordera une application pour la DBD en particulier celles qui sont utilisées pour le traitement d'eau par l'ozone.

CHAPITRE

2



**OZONE ET GENERATEUR D'OZONE A
DECHARGE A BARRIERE DIELECTRIQUE**

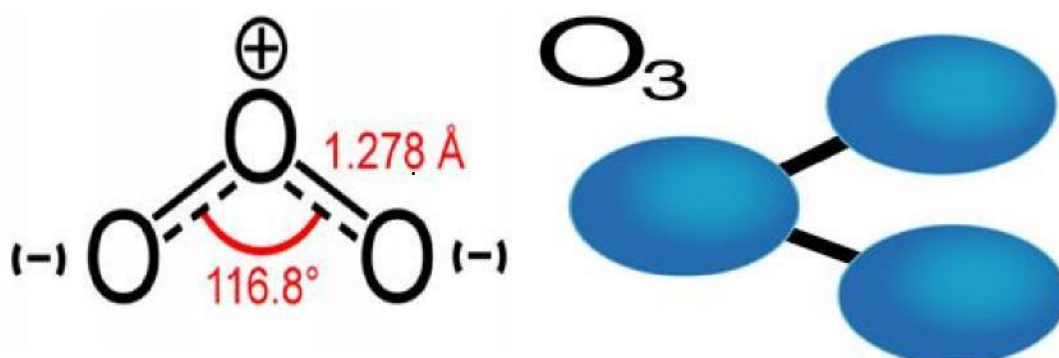
II.1 Introduction

Cela fait déjà assez longtemps que l'ozone est le sujet de recherches. En 1840, le chimiste Christian Friedrich Schönbein découvrit que ce gaz se formait pendant les décharges électriques, et le baptisa ozone (ce qui signifie "sentir" en grec). On découvrit rapidement que l'ozone était un composant de l'air. L'ozone est un produit industriel pour diverse applications, la principale étant l'utilisation de son pouvoir désinfectant. En effet, il oxyde rapidement la matière organique ce qui permet de tuer les micro-organismes.

L'ozone présente une solution écologique et même économique dans une plusieurs applications par rapport aux autres processus chimiques. La principale utilisation de l'ozone industriel est le traitement de l'eau, elle se développe fortement ces dernières années. Or il existe d'autres applications dans les domaines électroniques, biologiques et même hydroponiques.

II.2 L'ozone et ses applications

La forme d'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 pâle et instable qui, à la température ambiante, se caractérise par une odeur piquante (Figure II.1) [19].



II.2.1 Avantages et inconvénients de l'ozone

L'ozone se produit aussi bien dans la haute atmosphère et au niveau du sol. Il peut être bon ou mauvais, selon l'endroit où il se trouve.

❖ Avantages

L'ozone est en quelque sorte le grand frère de l'oxygène. Il se produit naturellement dans la haute atmosphère terrestre où il forme une couche protectrice qui nous protège des rayons ultraviolets nocifs. Les produits chimiques d'origine humaine sont connus pour détruire ce bénéfique ozone.

De nos jours, le bon ozone est généré avec des générateurs d'ozone. Bien que l'ozone soit un composé puissant, son cycle de vie est très court. Lorsque celui-ci entre en contact avec des bactéries, virus ou odeurs, ceux-ci sont oxydés par un des 3 atomes d'oxygène qu'il possède.

- ✚ 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 [20].

❖ Inconvénients

Dans la basse atmosphère terrestre, près du niveau du sol, l'ozone se forme lorsque les polluants émis par les voitures, des centrales électriques, des chaudières industrielles, des raffineries, des usines chimiques et d'autres sources réagissent chimiquement en présence de la lumière solaire. L'ozone au niveau du sol est un polluant atmosphérique nocif.

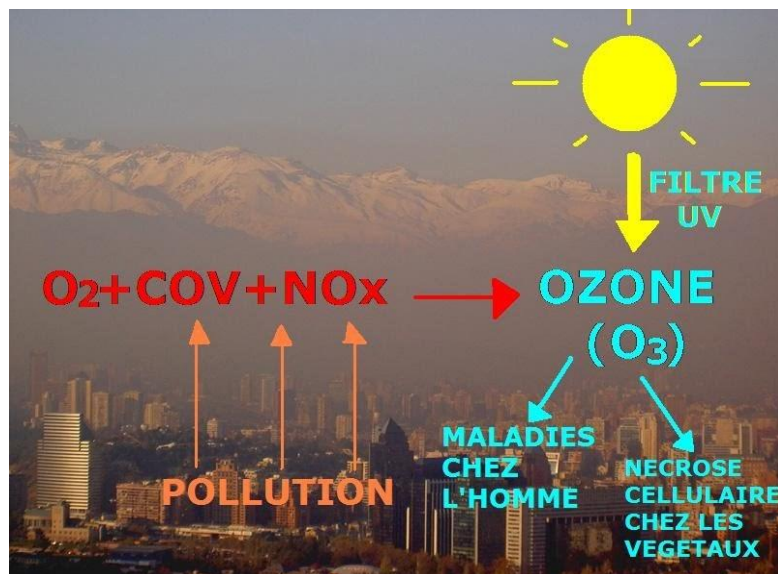


Figure II.2 : Mauvais ozone

II.2.2 Efficacité de l'ozone

Du point de vue chimique en comparaison, l'efficacité de la désinfection de l'ozone est 2500 fois plus efficace que l'hypochlorite (CHL) et 5000 fois plus que les Chloramines (NH₂CL), il détruit les bactéries, les virus, et les moisissures.

L'ozone ne laisse pas de résidus chimiques ni d'odeurs dans l'eau, il ne brûle pas les yeux, ne les rougit pas comme les autres produits chimiques ont tendance à le faire. L'ozone n'irrite pas la peau et ne la dessèche pas, il est sécurisant car il ne peut exploser et n'est pas combustible, son utilisation limite au maximum l'achat des produits chimiques oxydants [21].

II.2.3 Production d'ozone

L'ozone peut se produire naturellement par la foudre et les rayons ultraviolets du soleil et artificiellement par la décharge électrique et les lampes UV.

II.2.3.1 Production naturelle

A. Foudre

Le coup de foudre est une décharge électrique se produisant dans un grand intervalle dont les « électrodes » sont d'une part un nuage orageux chargé et d'autre part la terre. Cette décharge électrique résulte une production d'ozone grâce à la présence des molécules d'oxygène près de la terre (Figure II.3).

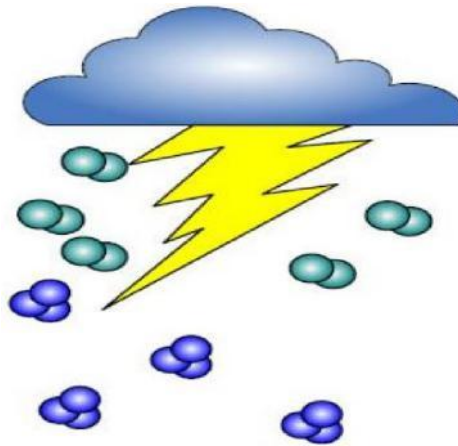


Figure II.3 : Formation naturelle de l'ozone par décharge électrique

Une très grande quantité d'ozone peut être créée avec l'éclairage de chaque foudre. L'ozone est responsable de "l'air frais" que nous respirons après un tonnerre d'orage.

B. Rayons de soleil (UV) énergie lumineuse

L'Ozone est un gaz que l'on trouve dans la nature dans les hautes couches de l'atmosphère, qui est produit par réaction chimique aux rayons ultraviolets avec une longueur d'onde comprise entre 180 et 220 Nanomètre (nm) (Figure II.4).

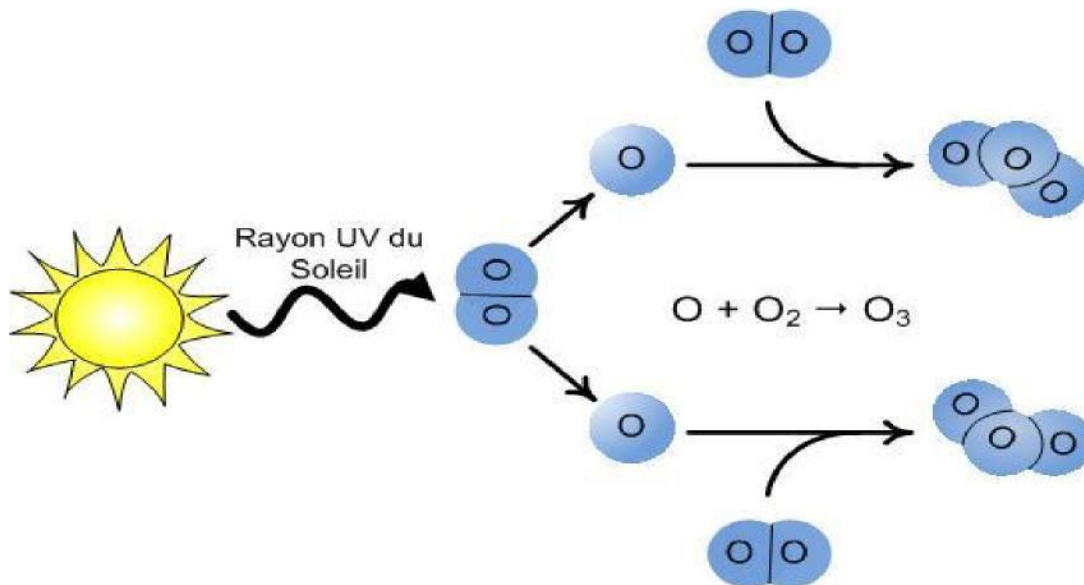


Figure II.4 : Principe de génération d'ozone par rayons UV

II.2. 3.2 Production artificiellement

L'ozone peut se produire artificiellement par deux méthodes la première est décharge à barrière diélectrique et la deuxième par les lampes UV [22].

A. Ozonateurs à DBD

La décharge est constituée 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 de la couche d’air 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 II.5) [16].

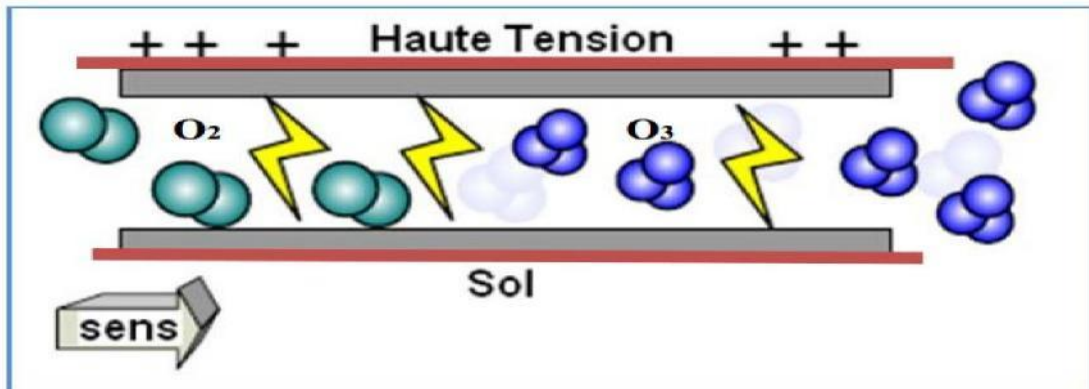


Figure II.5 : Production d’ozone par décharge a barrière diélectrique

B. Ozonateurs à UV

Une lampe UV spéciale émet une fréquence spécifique (radiations ultraviolettes de courtes longueurs d’ondes émises par une lampe à vapeurs de mercure) en convertissant instantanément les molécules d’oxygène (O2) en ozone (photon-ionisation) à l’intérieur de l’ozonateur (même principe que la production d’ozone par les rayons UV du soleil) (Figure II.6) [16].

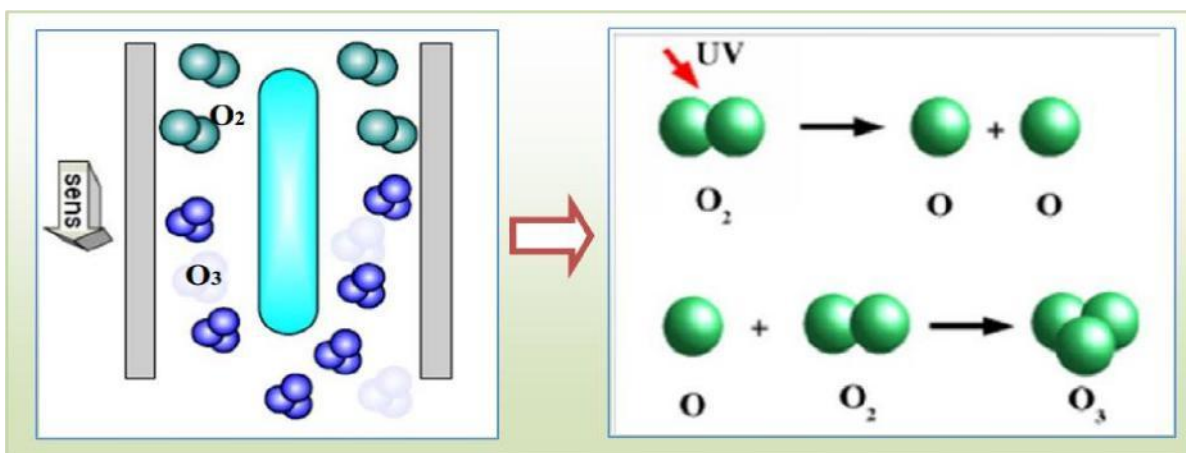


Figure II.6 : Production d’ozone artificiellement par lampe UV

II.2.4 Applications de l'ozone

II.2.4.1. Traitement des eaux

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 [23].

II.2.4.1.1. Motifs et principe

L'utilisation des motifs de la désinfection par l'ozone apparaissent lorsqu'on le compare avec les autres méthodes de désinfection.

L'ozone 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 II.1 montre la comparaison technique et économique entre les différentes méthodes de désinfections de l'eau.

CRITÈRES	OZONE	CHLORE	U.V	μ FILTRA-TION
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

Tableau II.1. Comparaison entre différentes méthodes de désinfection de l'eau

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 public [23].

II.2.4.2 Désinfection des eaux

II.2.4.2.1 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.
- ✚ 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 [24].

II.2.4.2.2 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.

II.2.4.3 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 [24].

II.2.4.3.1 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 [25].

II.2.4.3.2 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 II.7). Cette technique augmente la vie utile des sardines de 15 jours pour celles traitées avec de la glace liquide ozonisée [23].



Figure II.7 : Système portable de production d'eau ozonée

II.2.4.4. Domaine industriels

L'ozone peut être utilisé pour les blanchisseries et les micro-électroniques avec des performances élevées et une grande efficacité de désinfection

II.2.4.4.1 Blanchisseries industrielles

L'ozone est utilisé pour les blanchisseries avec des performances élevées et une grande efficacité de nettoyage. L'ozone est plus efficace énergétiquement et plus sûr pour l'environnement que les méthodes de blanchissement conventionnelles. Les générateurs d'ozone de sont progressivement de plus en plus utilisés pour les applications dans les blanchisseries (Figure II.8) [26].

- ✚ Economise la consommation en eau chaude.
- ✚ Réduction de l'utilisation de produits chimiques.
- ✚ Désinfectant puissant.
- ✚ Haute performance et moins de dommage sur les vêtements :



Figure II. 8 : L'ozone dans la blanchisserie

II.2.4.5 Traitement de l'air par l'ozone

Les concentrations de l'ozone typiques utilisées pour le traitement par l'air ambiant, dépendants de domaine d'application. La période de traitement pour des niveaux d'une réduction importante de germes pathogènes varie de quelques heures à quelques jours. Les virus et les bactéries sont les germes pathogènes les plus faciles à contrôler. Les champignons et moisissures exigent des concentrations d'ozone plus élevées pour des périodes de temps plus longues [26]. L'ozone est employé dans le traitement de l'air dans plusieurs domaines.

- ✚ Désodorisation d'air industriel
- ✚ Conservation d'aliments et de produits agricoles
- ✚ Désinfection de l'air dans des locaux tels que:

Chambres d'hôtel, >Salles de réunion, salles d'attente >Hôpitaux, cabinets médicaux, cliniques vétérinaires >Locaux endommagés par un incendie >Toilettes publiques >Casinos >Restaurants >Maisons et appartements privés >Bateaux de plaisance >Voitures ayant été utilisées par un fumeur

II.3 Générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique

L'utilisation d'une décharge à barrière diélectrique 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.

II.3.1 Présentation du générateur d'ozone à DBD volumique développé

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 adhésif en 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 et une électrode en grille métallique $L= 50$ mm collée au tube en acier car l'amplificateur de puissance (TREK) est conçu pour fonctionner avec une capacité plus faible. (Figure II.9 et II.10).

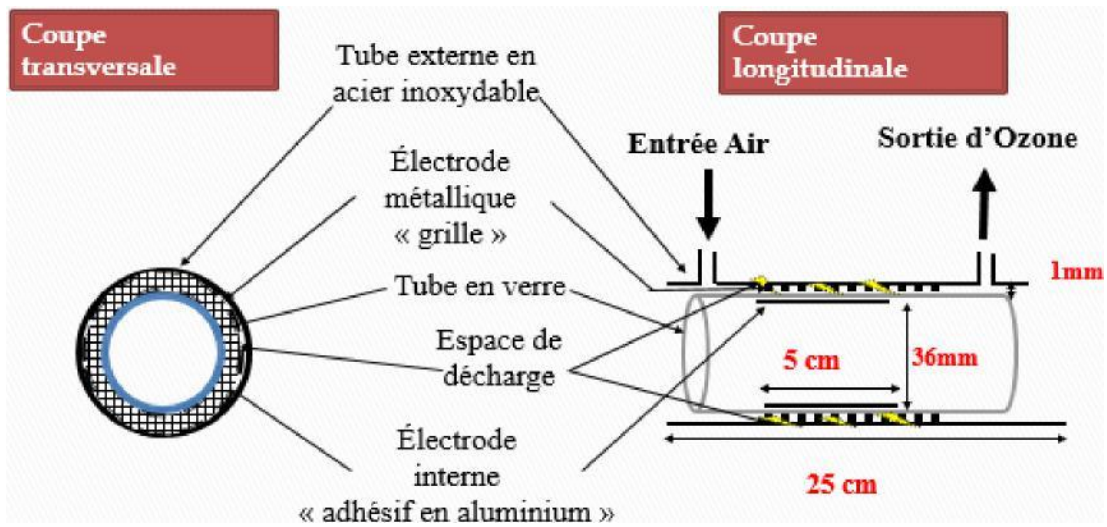


Figure II.9 : Représentation schématique d'un générateur d'ozone à DBD surfacique

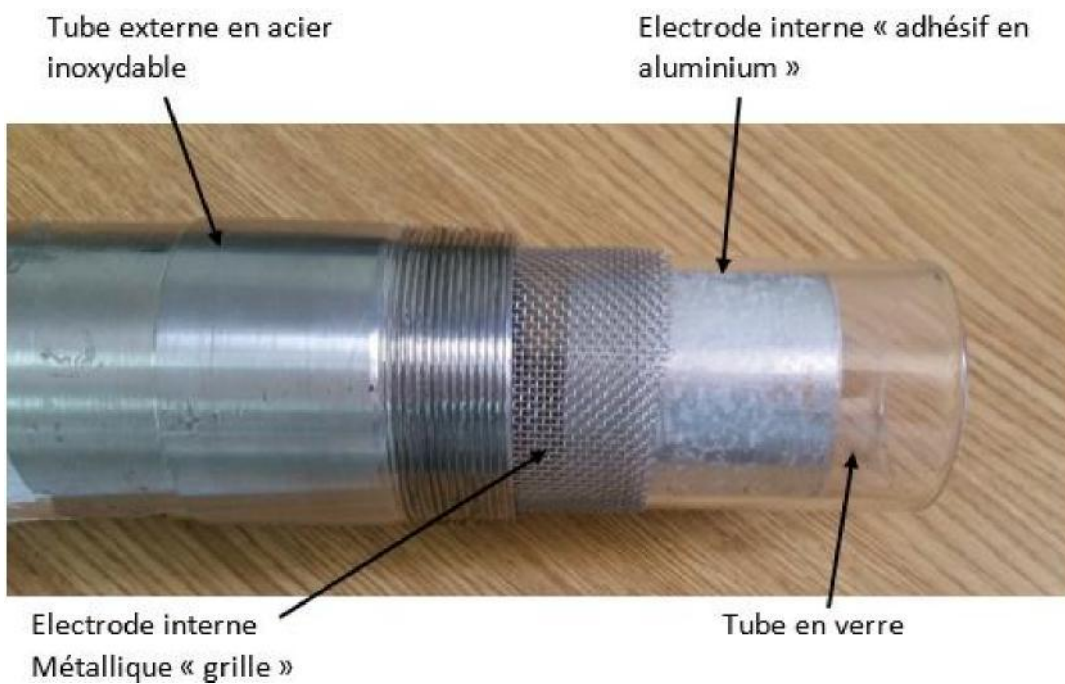


Figure II.10 : Photographie d'un générateur d'ozone développé

II.3.2. Matériels et méthodes

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 l'efficacité énergétique. Les signaux utilisés sont : sinusoïdal, triangulaire et rectangulaire.

Le matériel utilisé dans cette étude est présenté comme suivant :

Amplificateur de puissance:

TREK (30/20A) : est l'élément principal de l'alimentation électrique. Les caractéristiques de l'amplificateur de puissance sont les suivantes :

Tension de sortie : 0 à ± 30 kV CC ou CA crête

Courant de sortie : 0 à ± 20 mA DC ou AC crête

Rapport de multiplication : 3000 V



Générateur de fonctions :

Générateur de fonctions DDS de haute performance de type Aim-TTi TG2511 qui comprend des fonctionnalités complètes de générateur d'impulsions et de générateur arbitraire de 25 MHz



Concentrateur d'oxygène

Le Nuvo lite est un concentrateur d'oxygène compact et léger qui utilise la technologie PSA pour approvisionner en oxygène. Le Nuvo lite possède un capteur d'oxygène pour contrôler le niveau d'oxygène et une alarme d'absence de débit pour alerter le patient du non fonctionnement de l'appareil.



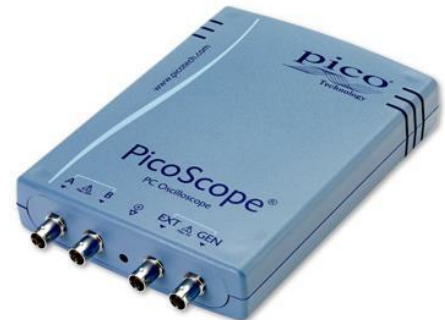
Analyseur ozone O3 portable

C'est un analyseur portable permet une mesure précise et fiable de la concentration d'ozone dans l'air ambiant sur une large gamme de quelques ppb jusqu'à 100.000 ppb (0-100 ppm). Il est basé sur la technique reconnue d'absorption à une longueur d'onde 254 nm.



Pico Scope

Le Pico Scope 3204B permet de mesurer et visualiser des signaux qui peuvent produire jusqu'à 60 Mhz pour compensation oscilloscope sondes, et examine rapidement la bande passante de filtres et amplificateurs.



Capteur de courant

C'est un Capteur à boucle ouverte du fait de leur bande passante limitée à 25kHz (Les capteurs à boucle ouverte exploitent l'effet Hall) (Pearson electronic). Il sert à mesurer et visualiser le courant.



II.3.3 Description du dispositif expérimental

Les figures (II.11 et II.12) 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 (Toellenertoe 7301) qui délivre des signaux alternatifs avec une gamme de fréquence réglable de 0 à 5.5 kHz, pour alimenter le générateur d'ozone.

Le générateur d'ozone a été alimenté par un concentrateur d'oxygène (NIDEK médical Nuvo Lite Mark), avec un débit constant de 1 l/min.

La tension V délivrée par l'amplificateur de puissance appliquée au générateur d'ozone est mesurée à l'aide d'un PICOSCOPE numérique, tandis que le courant I a été mesuré en utilisant un capteur du courant à effet hall (Pearson electronic).

Les signaux (courant et tension) sont stockés et transférés à un ordinateur pour calculer la puissance consommée dans le réacteur, en calculant la valeur moyenne du produit $V * I$ sur 1,5 million points de mesure enregistrés.

La concentration d'ozone produit par le réacteur est mesurée à l'aide du moniteur d'ozone (Ozone-solution-106H).

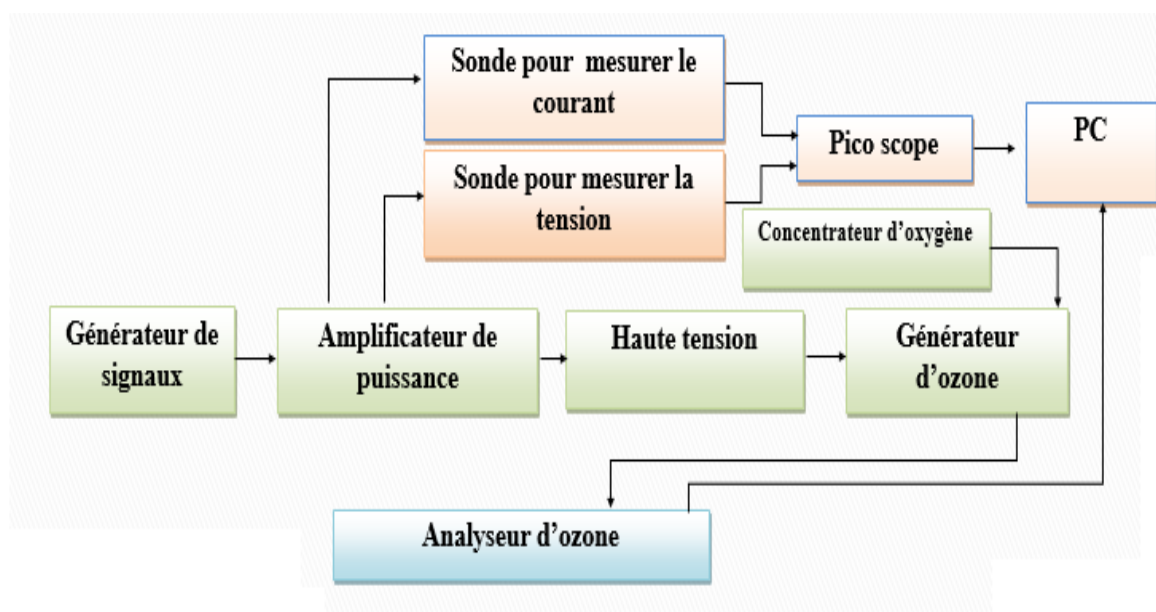


Figure II.11: Schéma synoptique du dispositif de mesure de tension, du courant et de la puissance dans le générateur d'ozone

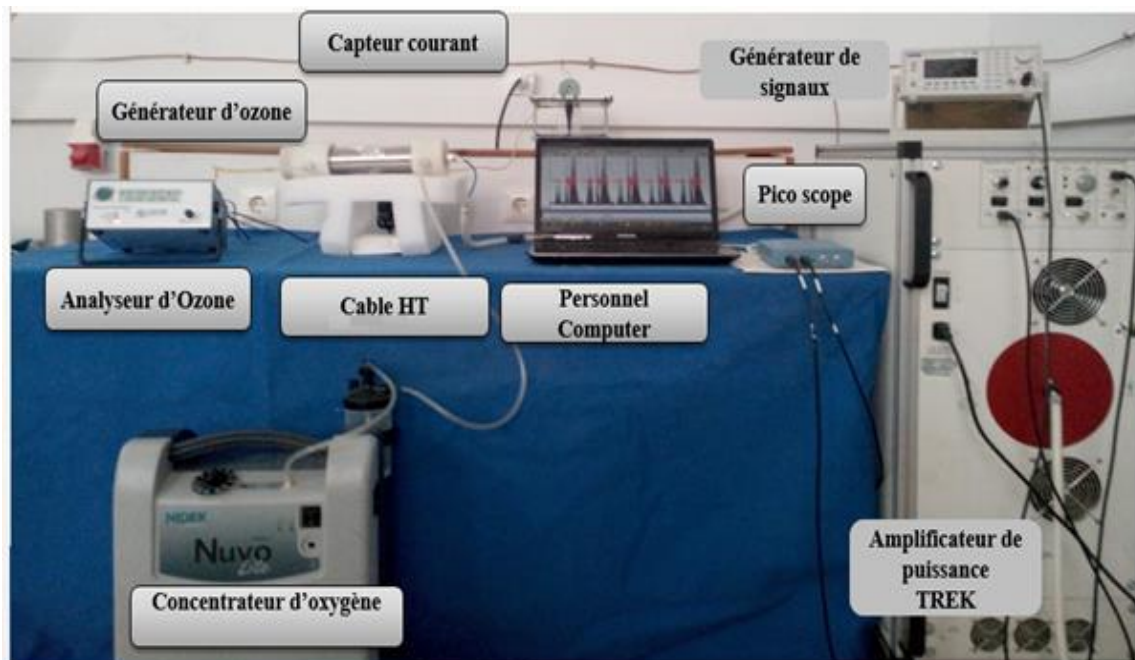


Figure II.12: Photographie du dispositif expérimental

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, 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 cèle...). 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

3



**MODELISATION ET OPTIMISATION
EXPERIMENTALE DU GENERATEUR
D'OZONE A DBD**

III.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons traiter l'étude de la décharge à barrière diélectrique volumique, en utilisant différents signaux alternatifs et continue pour les trois formes (sinusoïdale, triangulaire et rectangulaire), dont le but 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.

III.2 Modélisation expérimentale du procédé de génération d'ozone

L'objectif principal de ces études est de trouver les valeurs optimales électriques de la décharge à barrière diélectrique volumique qui donnent un taux de génération d'ozone maximal avec une puissance consommée minimale et cela pour différents signaux d'alimentation. Il n'est pas simple de réaliser de telle relation entre la réponse et les facteurs considérés et surtout, si on sait qu'il existe bel et bien interactions entre ces derniers. A partir de ces considérations, la méthodologie des plans d'expériences s'est avérée être très adaptée pour les études expérimentales car elle sert à optimiser l'organisation des essais. Cette organisation nous a permis non seulement d'obtenir le maximum de renseignements mais aussi d'arriver à une meilleure précision possible sur la modélisation des résultats et par la suite l'optimisation de l'efficacité de générateur d'ozone.

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. Ce programme nous a permis d'effectuer les tâches suivantes :

- Calcul des effets et les interactions entre les facteurs
- Analyses statistiques des modèles :
 - Test de signification des coefficients
 - Analyses statistique du modèle
 - Qualité du modèle

Le logiciel MODDE n'a été utilisé que pour tracer les graphiques et courbes et donc vérifier nos calculs.

III.2.1 Rappels sur la méthode des plans d'expériences

III.2.1.1 Concepts fondamentaux : réponses, facteurs effets, interactions:

Les scientifiques sont souvent amenés à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et essaye ensuite d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs Figure III.1 [27] , [28].

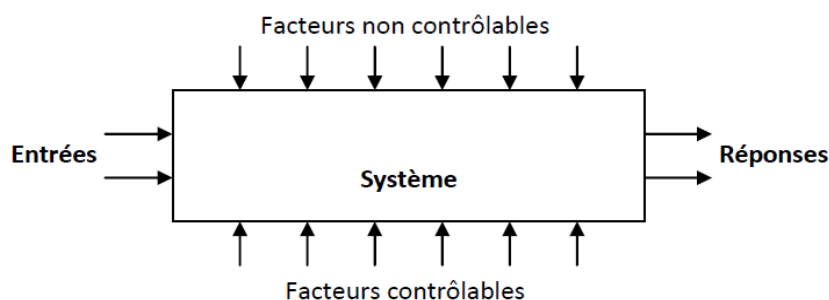


Figure III.1 : Environnement du système

Parmi les facteurs on distinguera:

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

Un **facteur** est une grandeur le plus souvent mesurable, la **réponse** est la grandeur mesurée à chaque essai; le plan vise à déterminer quels facteurs l'influencent ou quelle est son évolution en fonction de ceux-ci. Une notion importante est celle d'**interaction** entre deux facteurs d'entrée. On parle d'interaction entre deux facteurs A et B quand l'effet du facteur A sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur B.

Les phénomènes étudiés sont mis sous la forme mathématique suivante :

$$Y = f(U_{ij}) \quad (\text{III.1})$$

Où

Y : la réponse à laquelle s'intéresse l'expérimentateur,

U_{ij} : les facteurs qui influencent un phénomène.

f : est une fonction mathématique qui prédit les variations de la réponse selon les différentes valeurs données aux U_{ij} : en principe il s'agit d'un polynôme du premier ou deuxième degré dans le cas des plans d'expériences.

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

III.2.1.2 Détermination de la réponse et des facteurs d'étude

L'étude doit avant tout avoir un but précis: minimiser un coût de fabrication, chercher les paramètres influents :

- Choix de la réponse la plus judicieuse
- Moyens de mesure adaptés
- Facteurs potentiellement influents
- Choix du domaine d'étude de ces facteurs
- Eventuelles interactions à rechercher

III.2.1.3 Choix d'un modèle

Les plans d'expériences dits factoriels utilisent tous le modèle mathématique suivant qui relie la réponse y aux facteurs x . Ce modèle théorique est postulé a priori. Il s'agit d'un modèle polynomial.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{III.2})$$

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} : 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" [27].

En outre, le programme calcule deux critères statistiques importants 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 1 , 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 $0,3$.

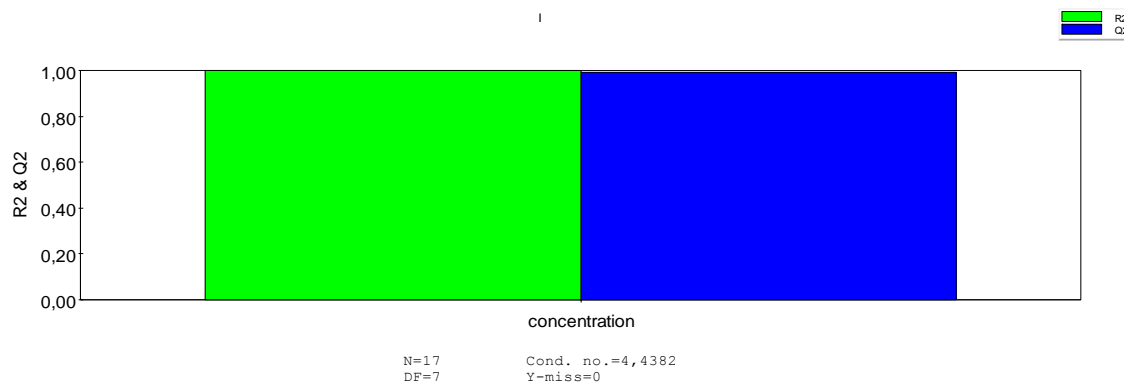


Figure III.2 : Test statistique pour valider un modèle mathématique de deux critères R^2 et Q^2

III.2.2 Plans d'expériences appliqués à la DBD pour génération d'ozone

III.2.2.1 Détermination des facteurs contrôlables

Dans le contexte de cette étude, des expériences de criblage ont été réalisées, afin de vérifier si les facteurs qui dans notre cas sont électriques. C'est à dire la tension d'alimentation de la DBD et la fréquence de signal, ont une influence sur la réponse et ainsi identifier leurs intervalles de variation appropriés pour chaque signal d'alimentation à savoir : sinusoïdal, carré et triangulaire à fin de faciliter aux utilisateurs de déterminer le point optimal pour le fonctionnement de generateur d'ozone et avoir un rendement élevé durant ce fonctionnement. Ces expériences nous ont servi à déterminer leur domaine de variation qui pouvait être définies au cours de la phase de fonctionnement de la DBD comme generateur d'ozone.

Pour notre étude, nous avons considéré trois facteurs géométriques qui pouvaient avoir dont on a déduit qu'ils ont un effet significatif sur les résultats du processus de filtration.

- Tension d'alimentation de generateur d'ozone (DBD) (V 'Kv')
- Fréquence de signal choisi (F 'Hz')
- Débit d'oxygène (Do 'l/mn')

Tous les essais ont été effectués dans les mêmes conditions climatiques. La température et l'humidité étaient prisent par un hygromètre et qui étaient respectivement comprises entre 28 et 35 C⁰ et entre 40% et 60%.

III.2.2.2 Etude de l'influence de paramètres électriques sur les caractéristiques de DBD

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.

On provoque des différentes allures de courant selon l'application de divers types de signaux de tension sur le generateur d'ozone. Les figures (III. 3, III.4, III.5) qui représentent les oscillogrammes de courant et de la tension enregistrés par l'oscilloscope, ceux_ ci présentent que les micro-décharges sont intenses dans la phase active de l'alternance positive sinusoïdale et triangulaire par contre le signal carré a des micros décharges dans les deux alternances.

On peut voir que le courant est formé d'impulsions très brèves. En effet à chaque étincelle, celle-ci est stoppée par la barrière diélectrique et une nouvelle étincelle se produit. Pour cette raison le courant de la DBD est impulsionnel.

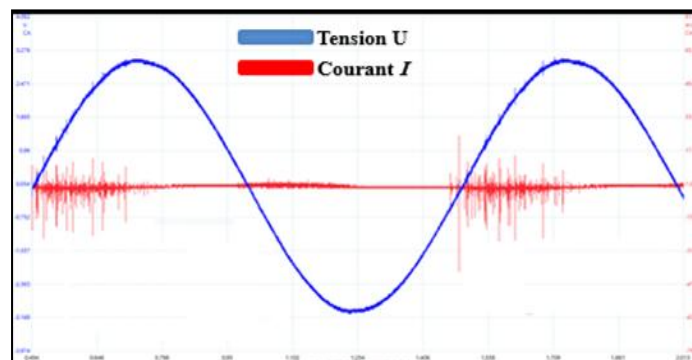


Figure III. 3 : Signaux électriques du courant et de la tension dans une DBD avec un signal sinusoïdal

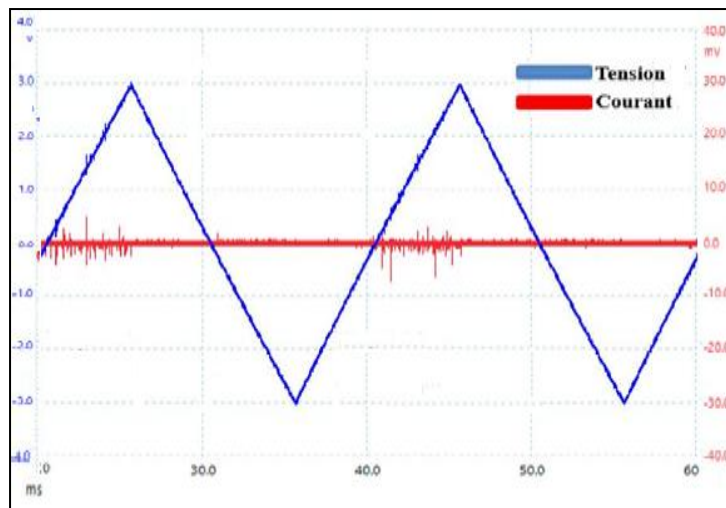


Figure III. 4: Signaux électriques du courant et de la tension dans une DBD avec un signal triangulaire

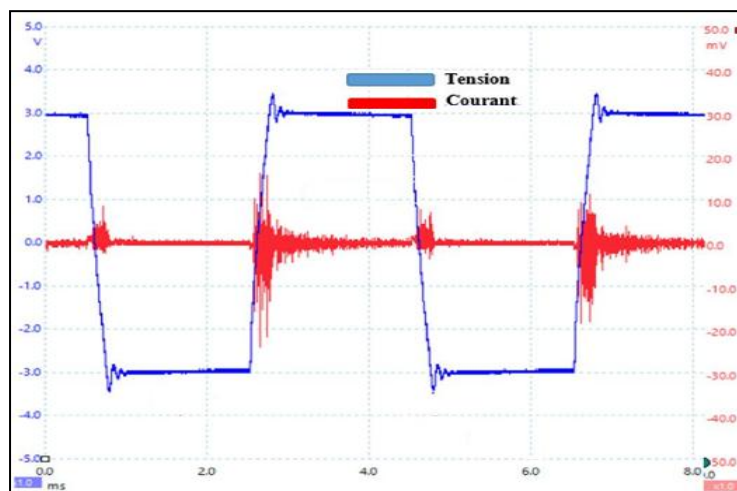


Figure III. 5: Signaux électrique du courant et de la tension, dans une DBD avec un signal carré

III.2.2.2.1 L'influence de la tension et de la fréquence sur la concentration d'ozone

La sélection des intervalles de variation des variables d'entrée a été dicté par des expériences préliminaires, appelées expériences « un facteur à la fois ».

Les tableaux (III.1, III.2, III.3) représentent la concentration d'ozone généré par DBD pour toutes les valeurs de tension appliquées de $V= 5.6$ à 11.8 Kv, pour une valeur déterminée de la fréquence F et débit d'oxygène Do . De même, la concentration d'ozone généré par DBD pour toutes les valeurs de fréquence appliquées de $F= 50$ à 1000 Hz, pour une valeur déterminée de la tension V et débit d'oxygène Do .

1. Pour un signal sinusoïdal

Fréquence de signal choisi (Hz)	Tension d'alimentation de la DBD (Kv)							
	5.6	6.2	7	7.8	8.6	9.4	10.8	11.8
50	0	0.5	1.4	2.5	3.2	4.1	5.6	6.4
100	0.2	1.3	2.9	4.4	5.9	7.4	10.3	11.8
200	0.7	2.5	5.3	7.7	11	14.2	18.5	21.8
400	1	4.7	8.6	14	20	25.9	32.2	37.3
600	2.1	5.2	13.7	19.5	27.9	33.7	43.3	48.1
800	2.4	5.4	14.2	26.3	32.3	39.5	48.3	55.3
1000	2.5	5.9	16.9	26.7	38.2	43.8	57.3	62.8

Tableau III.1 : Concentration d'ozone généré en fonction des variables d'entrées (F et V) pour un signal sinusoïdal

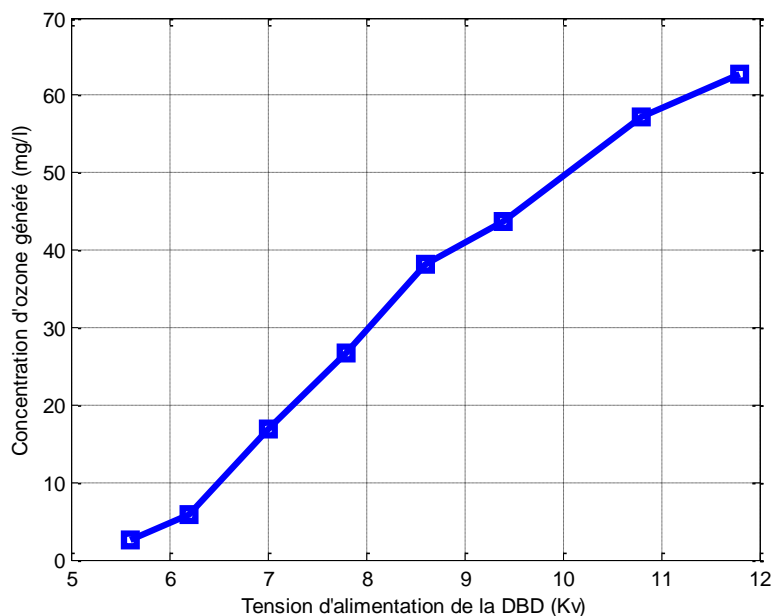


Figure III.6 : Concentration d'ozone générée en fonction de la tension d'alimentation pour un signal sinusoïdal

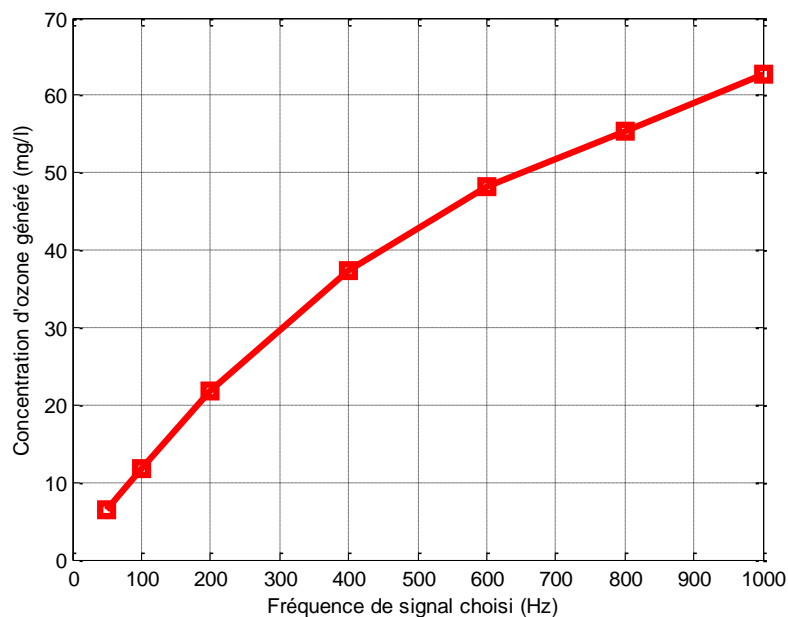


Figure III.7: Concentration d’ozone générée en fonction de la fréquence pour un signal sinusoïdal

2. Pour un signal carré

Fréquence de signal choisie (Hz)	Tension d’alimentation de la DBD (Kv)							
	5.6	6.2	7	7.8	8.6	9.4	10.8	11.8
50	0	0.1	0.8	1.8	2.9	3.8	5.2	6.5
100	0	0.4	1.8	3.7	6	7.6	10.3	12
200	0.3	1.4	3.7	7.2	11.3	13.9	18.5	21.7
400	0.5	2.5	8.7	13.7	20.3	26.0	32.2	37.1
600	1.9	5.5	13.2	21.0	37.6	34.1	42.6	48.2
800	1.7	6.5	16.6	24.9	33.8	41.3	50.8	55.9
1000	4	9.2	20.8	31.5	40.7	47.5	56.5	61.3

Tableau III.2 : Concentration d’ozone générée en fonction des variables d’entrées (F et V) pour un signal carré

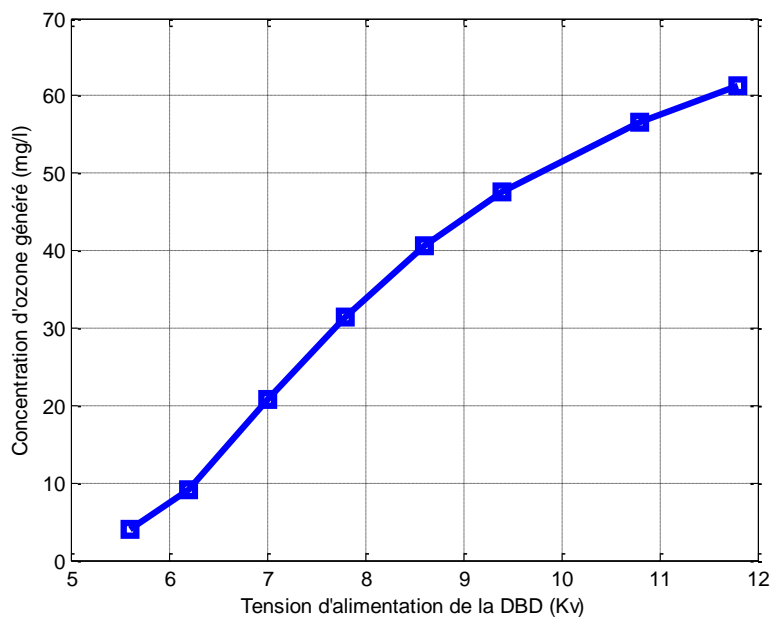


Figure III.8: Concentration d'ozone généré en fonction de la tension d'alimentation pour un signal carré

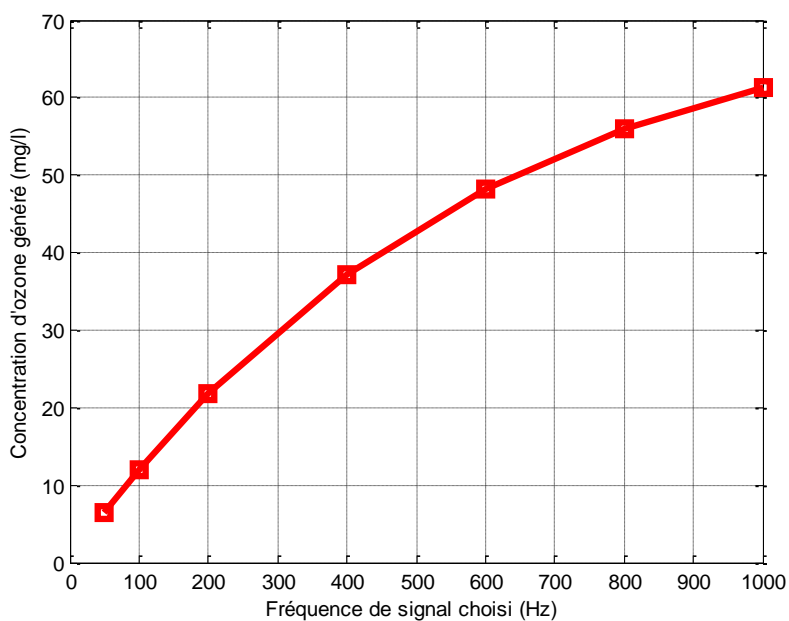


Figure III.9 : Concentration d'ozone généré en fonction de la fréquence pour un signal carré

3. Pour un signal triangulaire

Fréquence de signal choisi (Hz)	Tension d'alimentation de la DBD (Kv)							
	5.6	6.2	7	7.8	8.6	9.4	10.8	11.8
50	0	0.6	1.5	2.2	3.1	3.9	5.3	6.1
100	0.2	1.2	2.9	4.1	5.6	7.3	10	11.8
200	0.5	2.2	4.7	7.8	10.5	13.3	18.4	20.8
400	1.2	4.3	8.9	14.6	19.7	23.9	31.4	35.9
600	1.9	5.9	12.9	20.8	27.3	32.1	41.1	46.5
800	2.2	6.6	17.1	26.4	34	39.9	49.3	53.6
1000	2.5	8.2	20.8	31.4	38.5	44.7	55.6	60.3

Tableau III.3 : Concentration d'ozone généré en fonction des variables d'entrées (F et V) pour un signal triangulaire

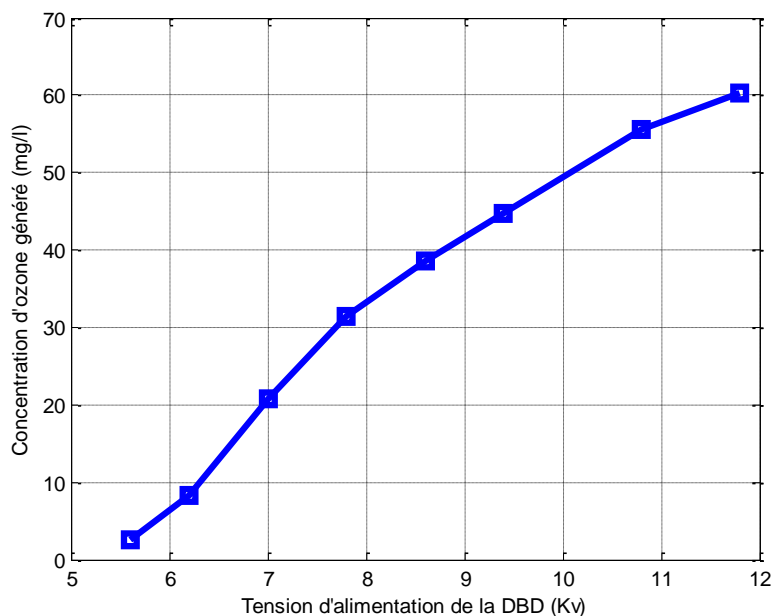


Figure III.10 : Concentration d'ozone générée en fonction de la tension d'alimentation pour un signal triangulaire

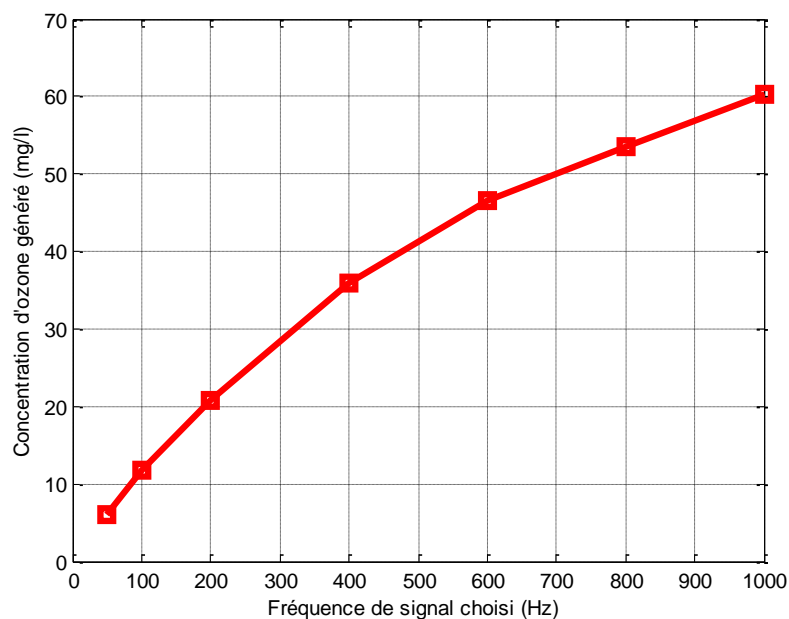


Figure III.11 : Concentration d'ozone générée en fonction de la fréquence pour un signal triangulaire

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 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 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 maximales à une fréquence de $f=1000$ Hz. 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.

D'autre part, toute augmentation de la tension engendre une diminution de concentration d'ozone à cause d'une élévation de la température lors de l'application des tensions élevées suivie par dissociation des molécules d'ozone après leurs formations. De même l'augmentation

de la fréquence provoque la diminution le rendement de génération d'ozone, cela peut être s'expliquer que la haut tension n'a pas le temps suffisant pour casser la molécule d'oxygène pour la transformer en ozone.

D'après les résultats obtenus, il semble que la DBD alimentée par le signal carré génère plus d'ozone comparativement aux autres DBDs alimenté par les signaux sinusoïdal et triangulaire respectivement.

III.2.2.2.2 L'influence du débit d'oxygène sur la concentration d'ozone

La variation de la concentration d'ozone générée en fonction du débit d'oxygène est illustrée dans le tableau III.4.

Le signal choisi	Débit d'oxygène (l/mn)				
	0.5	1	1.5	1.8	2
Sinusoïdal	58	45	36.8	32	29.4
Carré	67.7	43.6	37.5	35.4	30.1
Triangulaire	65.5	43.5	35.7	33.1	30.7

Tableau III.4: Concentration d'ozone générée en fonction du débit d'oxygène pour les trois signaux

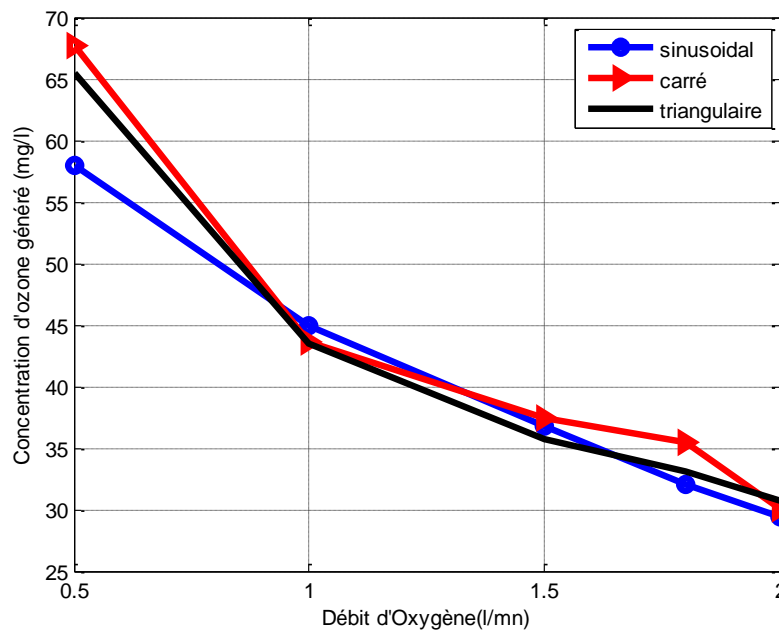


Figure III.12 : Concentration d'ozone générée en fonction de débit d'oxygène pour les trois signaux

Les résultats de la figure (III.12) montrent que l'augmentation du débit d'oxygène au delà de 2 L/min à pour conséquence de créer une surcharge de molécules d'oxygène dans les zones de décharge, non soumises aux micros-décharge, cela provoque une diminution de la concentration d'ozone (augmentation de plus en plus de molécules d'oxygène par rapport aux molécules d'ozone). Les résultats obtenus nous montrent encore la supériorité des réacteurs volumiques alimentés par un signal carré.

On constate que pour un débit de 0.5 L/min par exemple, La concentration d'ozoné généré est seulement de 58% et 65% pour un DBD alimenté par un signal sinusoïdal et triangulaire tandis qu'il atteint 68% pour DBD alimenté par un signal carré.

III.2.3 Modélisation et optimisation

Dans cette partie nous allons modéliser ce DBD en fonction de paramètres de commande électrique, Afin d'explorer un nombre important de facteur et éventuellement évaluer les effets de différents facteurs sur la réponse ou d'identifier leurs intervalles de variation appropriés, en se basant sur les résultats de criblage qui ont été obtenus. Nous avons opté pour un plan d'expériences composite (2 à face centré (17 expériences)).

La figure (III .13) montre les expériences d'un plan simple composite à faces centrées (CCF) avec 3 facteurs. Il se compose de 8 expériences situées au sommet du carrée (points carrés A, B, C), 6 expériences situées dans les centres de quatre segments (E, F, G, H) et 3 expériences identiques situés dans le point de central M. Ainsi, un plan d'expériences CCF avec 3 facteurs comprend (17) expériences.

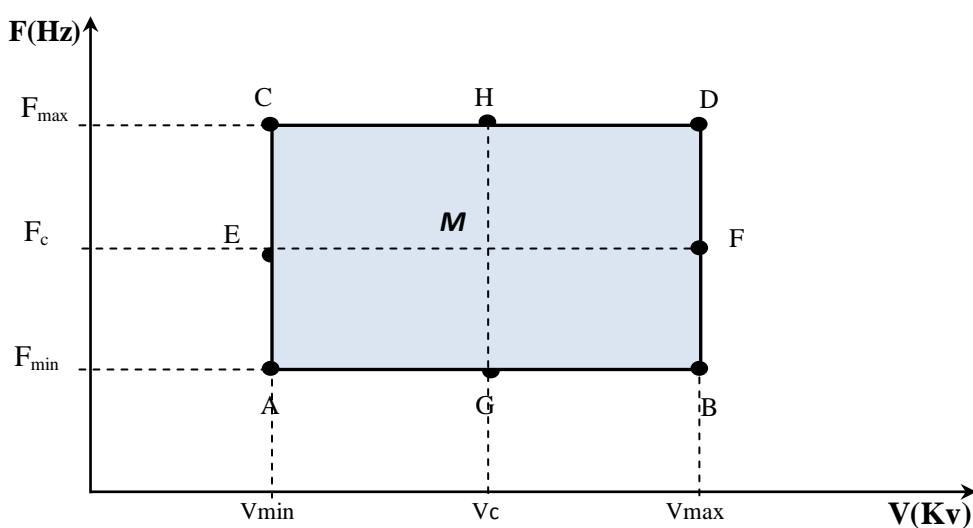


Figure III.13 : Diagramme du plan composite à deux facteurs

Les limites des intervalles d'études des différents facteurs qui ont été choisis suivant la réponse obtenue à partir des expériences préliminaires sont regroupées dans le tableau III.5.

Type de signal	Facteur	Tension d'alimentation appliquée (Kv)	Fréquence de signal (Hz)
Sinusoïdal	Vmin	7.8	400
	Vmax	11.8	1000
Carré	Vmin	7.8	400
	Vmax	11.8	1000
Triangulaire	Vmin	8.6	600
	Vmax	11.8	1000

Tableau III.5 : Détermination des intervalles d'études

L'identification des valeurs optimales de la tension appliquées et la fréquence du signal choisis 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 (D). Le point central (Nc et Dc) étant calculé pour les signaux comme suit:

1. Signal sinusoïdal :

$$V_c = (V_{min} + V_{max})/2 = (7.8 + 11.8) / 2 = 9.8 \text{ Kv} \quad (\text{III.3})$$

$$F_c = (F_{min} + F_{max})/2 = (600 + 1000) / 2 = 800 \text{ Hz} \quad (\text{III.4})$$

2. Signal carré :

$$V_c = (V_{min} + V_{max})/2 = (7.8 + 11.8) / 2 = 9.8 \text{ Kv} \quad (\text{III.5})$$

$$F_c = (F_{min} + F_{max})/2 = (400 + 1000) / 2 = 700 \text{ Hz} \quad (\text{III.6})$$

3. Signal triangulaire :

$$V_c = (V_{min} + V_{max})/2 = (8.6 + 11.8) / 2 = 10.2 \text{ Kv} \quad (\text{III.7})$$

$$F_c = (F_{min} + F_{max})/2 = (600 + 1000) / 2 = 800 \text{ Hz} \quad (\text{III.8})$$

Les résultats des expériences de la concentration d'ozone C (mg/l) sont donnés dans les tableaux III.6.

Exp No	Tension appliquée (Kv)	Fréquence du signal (Hz)	Débit d'oxygène(l/mn)	Sinusoidal	Carré	Triangulaire
				Concentration d'ozone (mg/l)	Concentration d'ozone (mg/l)	Concentration d'ozone (mg/l)
1	7.8	400	1	13,1	14	13,6
2	11.8	400	1	31,7	32,2	29,7
3	7.8	1000	1	27	29,8	27,4
4	11.8	1000	1	54	54,4	50,7
5	7.8	400	2	8,5	8,9	8,9
6	11.8	400	2	20,7	21,1	19,9
7	7.8	1000	2	17,7	20,1	18,5
8	11.8	1000	2	40	40	38,1
9	7.8	700	1.5	16,6	18,6	16,3
10	11.8	700	1.5	35,9	37,7	34,4
11	9.8	400	1.5	18,6	19,5	17,5
12	9.8	1000	1.5	34,5	37,4	33,8
13	9.8	700	1	34,3	35,6	34,5
14	9.8	700	2	23,5	24,4	23,4
15	9.8	700	1.5	27,1	28,8	26
16	9.8	700	1.5	27,1	28,8	26
17	9.8	700	1.5	27,1	28,8	26

Tableau III.6 : Résultats du plan composite à faces centrés à 17 expériences

Les modèles mathématiques de la concentration C (mg/l) générée par une DBD volumique ont été obtenus avec MODDE 5.0 pour les trois signaux sinusoïdal, carré et triangulaire respectivement représentés aux figures (III.14, III.15, III.16), où les effets non significatifs ont été négligés.

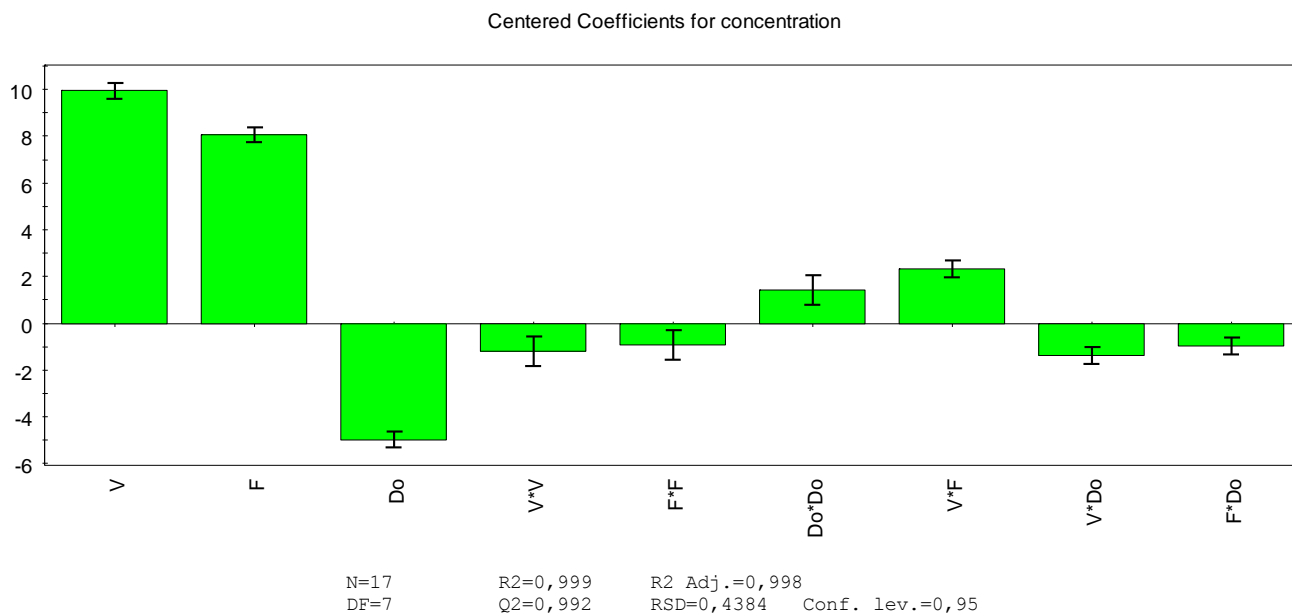


Figure III.14 : Histogramme montrant l'influence des différents facteurs pour le signal sinusoïdal

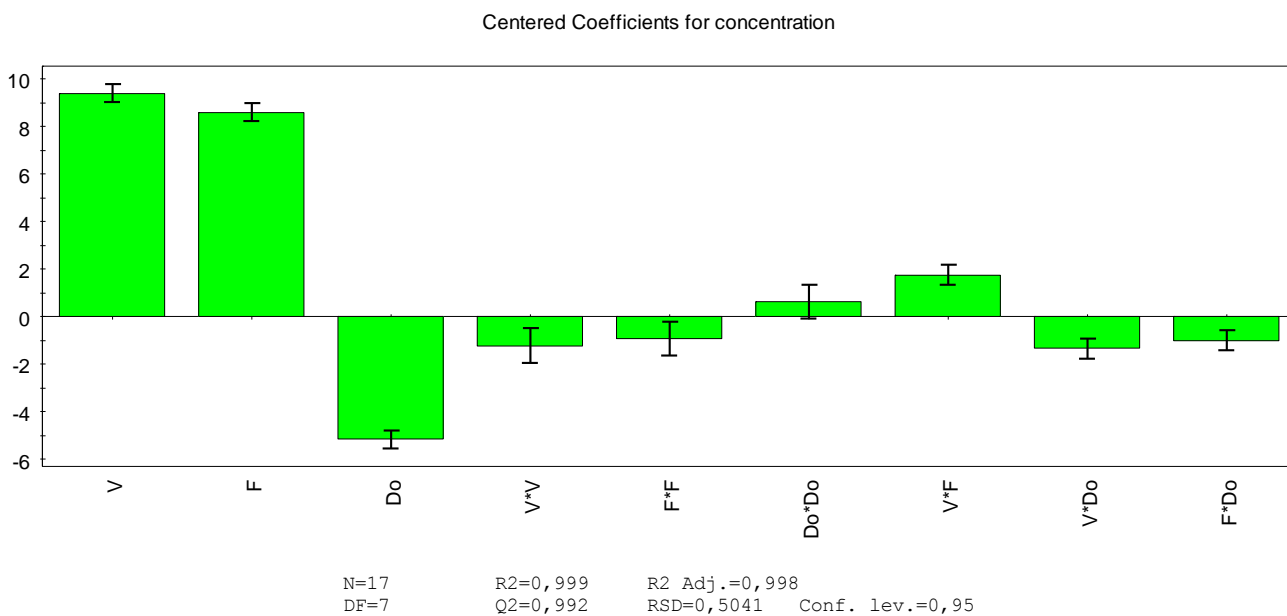


Figure III.15 : Histogramme montrant l'influence des différents facteurs pour le signal carré

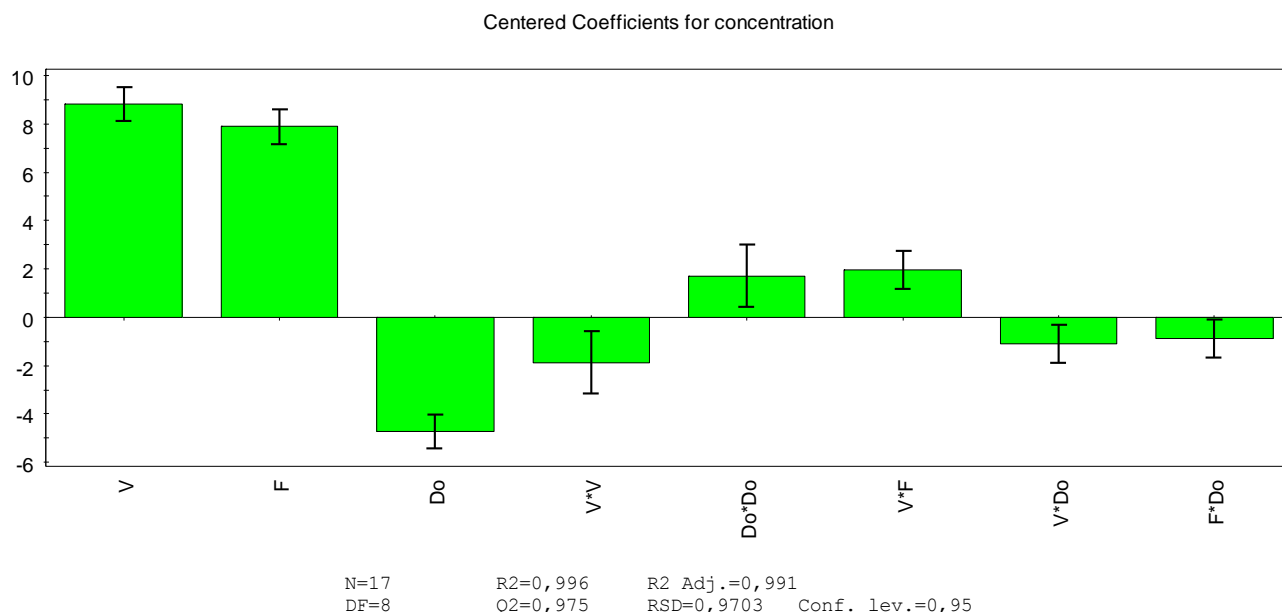


Figure III.16 : Histogramme montrant l'influence des différents facteurs pour le signal triangulaire

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

La qualité prédictive du modèle est satisfaisante puisque la valeur de coefficient Q^2 est proche de 100% pour les trois signaux, conduisent à un modèle mathématique validé.

Les valeurs des coefficients associées aux facteurs dans le modèle mathématique montrent le degré d'influence de chaque facteur. Ce modèle de tracé proposé par logiciel MODDE 5.0 montre clairement que la tension et la fréquence appliquées sont les facteurs les plus influents sur le rendement de génération d'ozone par la DBD volumique pour les trois signaux. En effet, on peut conclure que la génération d'ozone dépend directement de la valeur de la tension et la fréquence appliquées à la DBD, plus ces facteurs sont importants plus l'ozone généré est élevé. On constate que le débit d'oxygène reste un facteur le moins affectant négativement sur le rendement de génération d'ozone pour les trois signaux. En effet, pour avoir un rendement d'ozone élevé par la DBD volumique il fallait augmenter la tension et la fréquence. Ceci est expliqué que la DBD volumique a grand espace inter électrodes.

Les modèles mathématiques proposés par MODDE 5.0 sont montrés par les équations suivantes pour les trois signaux : sinusoïdal, carré et triangulaire respectivement.

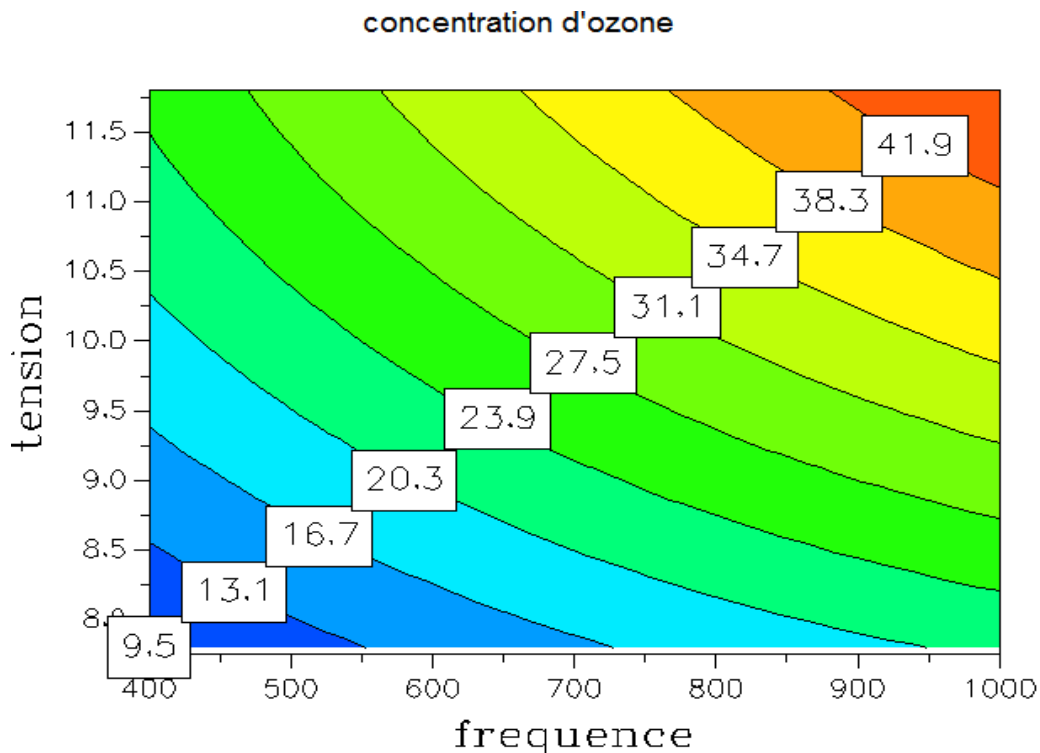
$$\mathbf{T_s} = 27,3056 + 9,94 V + 8,06 F - 4,97 D_o - 1,20986 V*V - 0,909863 F*F + 1,44014 D_o*D_o + 2,3125 V*F - 1,3875 V*D_o - 0,9625 F*D_o \quad (\text{III.9})$$

$$\mathbf{T_c} = 29,1239 + 9,4 V + 8,6 F - 5,15 D_o - 1,2169 V*V - 0,916906 F*F + 0,6331 D_o*D_o + 1,7625 V*F - 1,3375 V*D_o - 0,9875 F*D_o \quad (\text{III.10})$$

$$\mathbf{T_t} = 26,2509 + 8,81 V + 7,89 F - 4,71 D_o - 1,8783 V*V + 1,7217 D_o*D_o + 1,975 V*F - 1,1 V*D_o - 0,874998 F*D_o \quad (\text{III.11})$$

La figure III.17 représente les tracés de contours iso-réponse obtenus avec MODDE 5.0 pour les différents modèles mathématiques de trois signaux ; ce logiciel offre par ailleurs la possibilité d'identifier les valeurs optimales des facteurs (tension, fréquence, débit d'oxygène) pour un rendement d'ozone maximale (les zones optimales en oranges) et aussi capable de traiter plusieurs réponses simultanément, affectés par différents coefficients de pondération.

En effet, le MODDE 5.0 c'est un outil indispensable d'optimisation qui provoque les valeurs optimales des facteurs pour améliorer le rendement d'ozone par DBD.



(a)

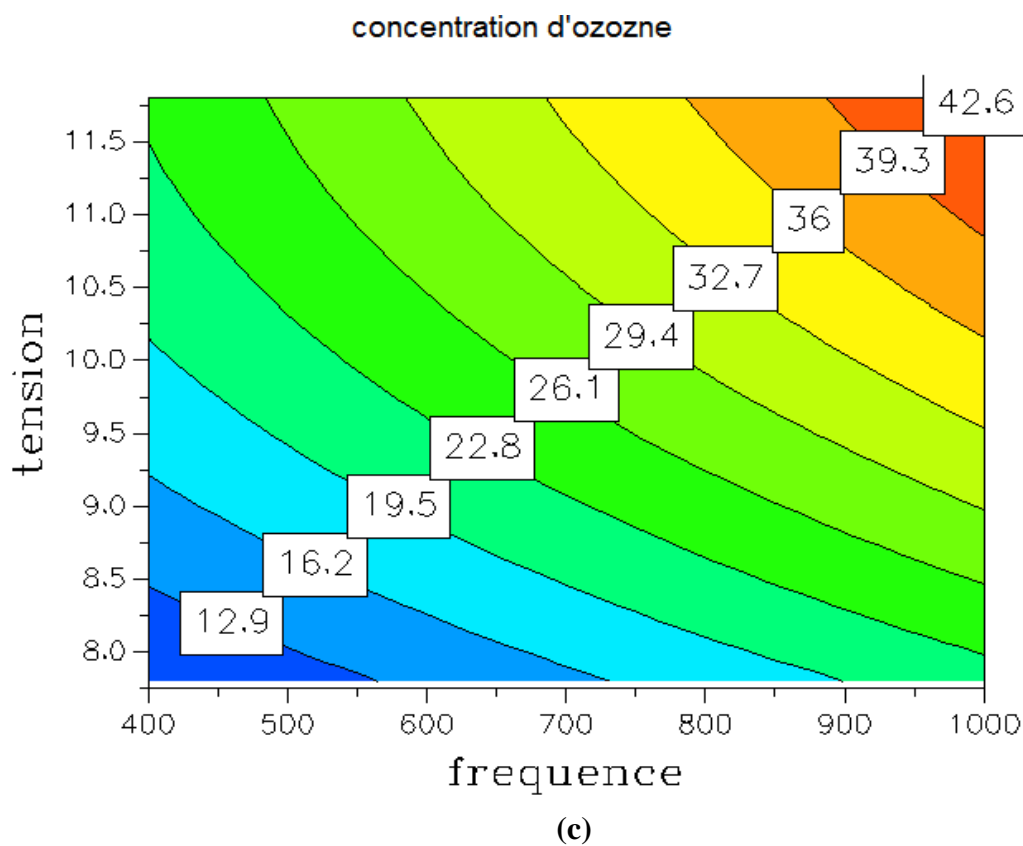
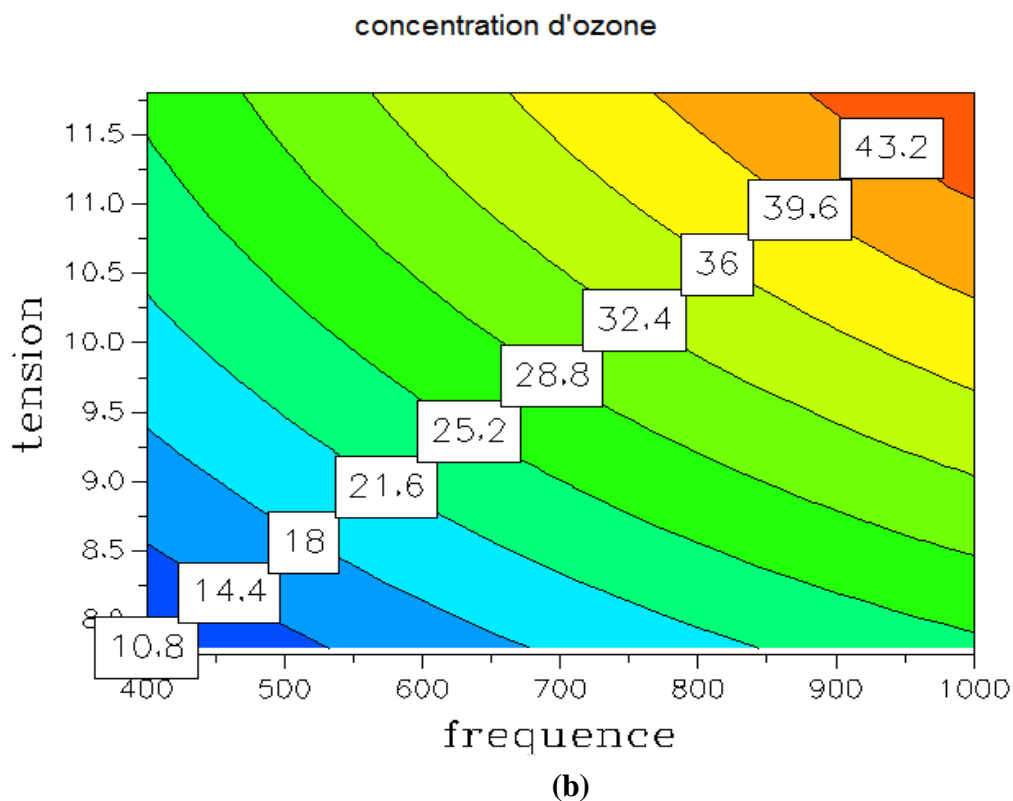


Figure III.17 : Contours iso-réponses pour la concentration d'ozone ;
 (a) sinusoïdal, (b) carré, (c) triangulaire ; ($D_o=1.5$ l/mm)

Sur la figure III.17 , on peut remarquer que pour la DBD qui est alimentée par :

- ❖ Signal sinusoïdal : la zone optimale de la concentration d'ozone maximale, est obtenue pour un intervalle de tension de 11.2 à 11.8 kV, une fréquence de 880 à 1000 Hz et un débit d'oxygène de 1 .5 l/mn.
- ❖ Signal carré : la zone optimale de la concentration d'ozone maximale, est obtenue pour un intervalle de tension de 11.1 à 11.8 kV, une fréquence de 880 à 1000 Hz et un débit d'oxygène de 1 .5 l/mn.
- ❖ Signal triangulaire : la zone optimale de la concentration d'ozone maximale, est obtenue pour un intervalle de tension de 10.8 à 11.8 kV, une fréquence de 890 à 1000 Hz et un débit d'oxygène de 1 .5 l/mn

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la méthode de plan d'expérience qui permet de modéliser et optimiser les propriétés liées à l'alimentation d'une décharge à barrière diélectrique de type volumique dans le procédé de la génération d'ozone et par le choix approprié des conditions de fonctionnement de l'installation. Cette procédure nous a permis de limiter les intervalles de variation des facteurs contrôlables et ensuite modéliser le rendement d'ozone en proposant des modèles mathématique validés en vérifiant des critères bien définis. Les modèles obtenus ont été utilisés pour déterminer les valeurs optimales des différents et ainsi prédire une alimentation efficace de la DBD pour obtenir un rendement énorme d'ozone.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail avait pour objectif de développer l'influence des paramètres électriques nécessaires à la conception de la décharge à barrière diélectrique pour la génération d'ozone. Nous nous sommes intéressées aux diverses caractéristiques de base qui complètent la gamme des facteurs indispensables au bon fonctionnement de la DBD.

Nous avons effectué une analyse expérimentale de l'influence de la forme du signal de la haute tension liée à des facteurs contrôlables (tension d'alimentation, fréquence, débit d'oxygène) sur le rendement de génération d'ozone pour déterminer la forme appropriée du signal appliqué au générateur d'ozone pour mieux contrôler la production d'ozone . Les résultats obtenus montrent que la forme de signal alternatif de la haute tension, a une influence significative aussi sur la production d'ozone. Ainsi, il a été montré que la meilleure façon de contrôler la production d'ozone, est l'imposition d'une haute tension avec un signal alternatif carré. Ce signal représente la forme adéquate pour maximiser la production d'ozone et minimiser la consommation de l'énergie.

D'un autre côté, les résultats obtenus indiquent que le rendement d'ozone par la DBD est très influencé par les facteurs de tension appliquée et la fréquence plus que le débit d'oxygène pour les trois signaux alternatifs (sinusoïdal, carré, triangulaire).

En effet, La méthodologie des plans d'expériences est un outil puissant pour l'identification du point optimal d'un processus de la génération d'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 paramètres électriques appliqués au générateur d'ozone, une procédure expérimentale basée sur les techniques de surface de réponse a été proposée pour la détermination des paramètres électriques optimaux du générateur.

REFERENCE

Références

- [1] B. Bernecker « Formation de structures et phénomènes d'auto-organisation dans les Décharges à Barrière Diélectrique ».Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier 2010.
- [2] Khodja . Khadidja « Modélisation unidimensionnelle d'une décharge à barrière diélectriques pour lampe à exmètre » mémoire e magister, université de la science et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 04 juillet 2010.
- [3] R.L. Rechtschaffner « Satured fractions of 2n and 3 factorial designs » Tehnometrics, vol.9.(1967).569-575.
- [4] S.Jean Philippe « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation » thèse de doctorat, université de Toulouse, 18 novembre 2005.
- [5] F. Tounsi «Etude expérimentale d'une décharge à barrière diélectrique pour la production d'ozone » université de Sidi Bel Abbes, 14 juillet 2010.
- [6] J. L. Delcroix and A. Bers. « Physique des Plasmas », Vol. 1 et 2. CNRS Edition, Paris, 1994.
- [7] C. Chaussin et G. Hilly. « Chaleur et Thermodynamique ». Dunod, 1962.
- [8] S. Nemnich «Réalisation d'un Système de Désinfection de L'eau Par L'ozone Généré Par Une DBD ». Mémoire Magister, Université Djillali Liabes Sidi-Bel-Abbès 2011.
- [9] C. Wang and X. He « L'effet de décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique aère le plasma sur la surface d'électrode » Applied Surface Science, 253(2), 926-929(2006).
- [10] J.Kornev, N.Yavorovsky, M.Preis, U.Isaev, , and B. N. Chen « La génération d'espèce oxydante active par la barrière diélectrique pulsée se décharge dans des mélanges d'eau-aériens » Ozone: Science and Engineering, 28(4), 207-215(2006).
- [11] M. A. Djibrillah « Éléments de conception d'un générateur électrique pour l'alimentation d'un dispositif à décharge à barrière diélectrique » Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT 2011.
- [12] J. Kornev, N. Yavorovsky, M. Preis, U. Isaev, and B. N. Chen « La génération d'espèce oxydante active par la barrière diélectrique pulsée se décharge dans des mélanges d'eau-aériens » Ozone: Science and Engineering, 28(4), 207-215(2006).

-
- [13] E. Moreau. « Aérez le contrôle d'ow par des déclencheurs plasma non thermiques ». *Journal of Physics D : Applied Physics*, 40(3) :605{636, 2007.
- [14] J. R. Roth, D. M. Sherman, and S. P. Wilkinsonf. Boundary « La couche ow contrôle avec une décharge de rougeoiement d'uniforme d'atmosphère fait surface le plasma ». In *Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA-1998-328*, 36th, Reno, NV, Jan. 12-15, 1998.
- [15] R. D. Medina «Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement». Thèse de doctorat de l'université Toulouse, octobre 2008.
- [16] A. Laberrgue « Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas, Application au contrôle de décollements » Thèse de doctorat, université de Poitiers, 25 novembre 2005.
- [17] C. Juery « définition des caractéristiques techniques de fonctionnement et domaine d'emploi des appareils de désinfection » Ecole supérieure d'ingénieurs de Poitier.
- [18] Z. Falkenstein, J.J. Coogan « Photo résistez à graver avec des décharges à barrière diélectriques dans l'oxygène » *J. Appl. Phys.* 82, 6273 (1997).
- [19] N. Melanie « Ozone Et Qualité De L'air Intérieur : Interactions avec les produits de construction et de décoration »Thèse De Doctorat, Université Paris 7, Octobre 2006.
- [20] Thibault et Janine « L'air au quotidien: approche théorique et expérimentale » Odile Jacob, 2003.
- [21] L. Schwartzbrod, M. L.Dincher, R. Deloince et Al. « Détermination de la qualité du milieu sur l'inactivation des virus en mer » 1992.
- [22] N. Balcon « La pression atmosphérique la Fréquence radio décharge, la modélisation diagnostique et numérique » Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul abatier, 2007.
- [23] B.V. Holding « Water treatment solutions ozone » 2009.
- [24] D. Canadas «Evaluation du procédé Oxygène pour son potentiel de décontamination en ochratoxine A du blé. Les effets toxiques liés à une exposition sub-chronique à l'ochratoxine A.
- [25] A. Berchtikou « Décharge à barrière diélectrique dans l'hélium et le néon à la pression atmosphérique » Maîtrise de Sciences Appliquées de l'Université de Montréal, 2010.

- [26] S. 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.
- [27] K. Medles « Modélisation expérimentale des installations de séparation électrostatique de particules » .thèse de doctorat, université de Sidi Bel Abbes 2008.
- [28] MODDE 5.0 « User guide and tutorial », Umetrics, 1999.

ANNEXES

L'optimum du processus utiliser par le MODDE 5.0 qui donne les valeurs optimales des facteurs obtenir un rendement maximum d'ozone pour les trois signaux : triangulaire, sinusoïdal, carré respectivement.

A. Pour un signal triangulaire

Modde 5 - triangle

File Edit View Design Worksheet Analysis Prediction Show Window Help

Factors: 3 (uncontrolled: 0) Responses: 2 Runs: 17 Objective: RSM CCF design, quadratic model Fitted with MLR

Optimizer

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
tension	Free		7,8	11,8
frequency	Free		400	1000
debit	Free		1	2

Iteration: 28 Iteration slider: []

	1	2	3	4	5	6	7
tension	frequency	debit	concentration	taux	iter	log(D)	
1	11,7999	999,711	1	51,3004	3,1492	26	-0,6027
2	11,7986	999,901	1	51,4461	3,1588	21	-0,6636
3	11,7771	999,231	1	51,3336	3,1521	26	-0,6163
4	11,78	999,624	1	51,3594	3,1537	24	-0,6271
5	11,7743	994,769	1,0002	51,1592	3,141	26	-0,5472
6	11,7961	998,286	1,0039	51,3104	3,1589	26	-0,6068
7	11,78	999,624	1	51,3594	3,1537	24	-0,6271
8	11,7809	999,526	1,0067	51,224	3,1628	28	-0,5723

Worksheet

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	tension	frequency	debit	concentration	taux	
1	1 N1	13	Incl	7,8	400	1	13,6	0,816	
2	2 N2	2	Incl	11,8	400	1	29,7	1,752	
3	3 N3	10	Incl	7,8	1000	1	27,4	1,644	
4	4 N4	3	Incl	11,8	1000	1	50,7	3,042	
5	5 N5	1	Incl	7,8	400	2	8,9	1,068	
6	6 N6	12	Incl	11,8	400	2	19,9	2,388	
7	7 N7	8	Incl	7,8	1000	2	18,5	2,22	
8	8 N8	4	Incl	11,8	1000	2	38,1	4,572	
9	9 N9	5	Incl	7,8	700	1,5	16,3	1,467	
10	10 N10	16	Incl	11,8	700	1,5	34,4	3,096	

Ready

B. Pour un signal sinusoïdal

Modde 5 - SINUSOIDAL

File Edit View Design Worksheet Analysis Prediction Show Window Help

Factors: 3 (uncontrolled: 0) Responses: 2 Runs: 17 Objective: RSM CCF design, quadratic model Fitted with MLR

Optimizer

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
tension	Free		7,8	11,8
frequency	Free		400	1000
Débit	Free		1	2

Iteration: [] Iteration slider: []

	1	2	3	4	5	6	7
tension	frequency	Débit	concentration	eff ene	iter	log(D)	
1	11,792	996,651	1,0003				
2	11,799	993,482	1,0008				
3	11,797	996,941	1,0023				
4	11,796	999,226	1,0059				
5	11,8	991,76	1				
6	11,8	1000	1				
7	11,796	999,226	1,0059				
8	11,794	1000	1				

Worksheet

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	tension	frequency	Débit	concentration	eff ene	
1	1 N1	13	Incl	7,8	400	1	13,1		
2	2 N2	2	Incl	11,8	400	1	31,7		
3	3 N3	10	Incl	7,8	1000	1	27		
4	4 N4	3	Incl	11,8	1000	1	54		
5	5 N5	1	Incl	7,8	400	2	8,5		
6	6 N6	12	Incl	11,8	400	2	20,7		
7	7 N7	8	Incl	7,8	1000	2	17,7		
8	8 N8	4	Incl	11,8	1000	2	40		
9	9 N9	5	Incl	7,8	700	1,5	16,6		
10	10 N10	16	Incl	11,8	700	1,5	35,9		
11	11 N11	9	Incl	9,8	400	1,5	18,6		
12	12 N12	6	Incl	9,8	1000	1,5	34,5		
13	13 N13	15	Incl	9,8	700	1,5	34,3		
14	14 N14	14	Incl	9,8	700	2	23,5		
15	15 N15	11	Incl	9,8	700	1,5	27,1		
16	16 N16	17	Incl	9,8	700	1,5	27,1		
17	17 N17	7	Incl	9,8	700	1,5	27,1		

Ready

C. Pour un signal carré

Modde 5 - carré

File Edit View Design Worksheet Analysis Prediction Show Window Help

concentration

Factors: 3 (uncontrolled: 0) Responses: 3 Runs: 17 Objective: RSM DCF design, quadratic model Fitted with MLR

Optimizer

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
tension	Free		7,8	11,8
frequence	Free		400	1000
debit	Free		1	2

Iteration: 270 Iteration slider: _____

	1	2	3	4	5	6	7	8
tension	11,8	frequence	debit	concentration	eff	taux	iter	log(D)
1	11,8	698,557	1,0009	44,3586	--	--	270	0,8844
2	11,8	999,998	1,0062	54,7518	--	--	176	-0,5621
3	11,8	803,08	1	48,2189	--	--	186	0,5731
4	11,652	999,998	1	54,1086	--	--	182	-0,3577
5	11,791	999,997	1	54,8151	--	--	206	-0,5851
6	11,8	1000	1	54,8607	--	--	25	-0,6021
7	11,652	999,998	1	54,1086	--	--	182	-0,3577
8	11,7999	998,998	1	54,8094	--	--	181	-0,583

Worksheet

	1	2	3	4	5	6	7	8
Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	tension	frequence	debit	concentration	
1	1 N1	13	Incl	7,8	400	1		14
2	2 N2	2	Incl	11,8	400	1		32,2
3	3 N3	10	Incl	7,8	1000	1		29,8
4	4 N4	3	Incl	11,8	1000	1		54,4
5	5 N5	1	Incl	7,8	400	2		8,9
6	6 N6	12	Incl	11,8	400	2		21,1
7	7 N7	8	Incl	7,8	1000	2		20,1
8	8 N8	4	Incl	11,8	1000	2		40
9	9 N9	5	Incl	7,8	700	1,5		18,6
10	10 N10	16	Incl	11,8	700	1,5		37,7
11	11 N11	9	Incl	9,8	400	1,5		19,5
12	12 N12	6	Incl	9,8	1000	1,5		37,4
13	13 N13	15	Incl	9,8	700	1		35,6
14	14 N14	14	Incl	9,8	700	2		24,4
15	15 N15	11	Incl	9,8	700	1,5		28,8
16	16 N16	17	Incl	9,8	700	1,5		28,8

Ready x = 0,675, R2 & Q2 = 1,12