

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 الدكتور الطاهر مولاي سعيدة
Université Saida Dr Tahar Moulay
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Par : BESSAFI Mohamed Abdelkrim

Sujet

Etude de réalisation d'un filtre catalyseur à plasma pour le traitement des fumées et des gaz toxiques.

Soutenu publiquement en **13/10/2024** devant le jury composé de :

Dr. Mekkaoui Mohamed	MCA	Univ. Saida	Président
Dr. RAOUTI Driss	MCA	Univ. Saida	Rapporteur
Dr. BOUANANE Abdelkrim	MCA	Univ. Saida	Rapporteur
Pr. NASSOUR kamel	Prof	Univ. sidi Belabbes	Rapporteur
Dr. Arzeg kaddour	MCA	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2023/2024



Remerciements

et la volonté tout au long de cette année à étudier, et nous a honoré de sa science pour la réalisation de ce travail de mémoire de fin d'études.

Je tiens au terme de ce travail à exprimer mon plus grand remerciement à monsieur : RAOUTI DRISS ET BOUANANE Abdelkrim qui ont suivi et dirigé mon travail avec patience et beaucoup d'intérêt, je lui exprime vivement mes grands respects.

Mon remerciement s'adresse également au membre de jury pour avoir accepté de critiquer mon travail, sans oublier les professeurs du département d'Electrotechnique et les professeurs du l'incubateur de l'université de Saida pour leurs efforts et leurs sincérités.

Je tiens à remercier tous les membres du jury ayant acceptés de juger ce travail ainsi nos enseignants du département d'électrotechnique et de l'incubateur d'université Saida pour leurs soutiens et leurs encouragements et leurs conseils durant l'année théorique.

Dédicace

À la cause de mon être dans la vie,

À la lumière qui éclaire mon chemin,

À ceux qui se sont fatigués pour mon confort et pour atteindre mes objectifs.

À mon cher père, MAAMAR,

Symbole d'amour, porteur du cœur le plus sincère.

À ceux qui ont travaillé sans relâche pour m'élever,

Qui ont porté tous mes sentiments et m'ont enseigné le sens de la vie.

À ma chère mère, KHADIDJA,

À ma sœur, dont le soutien et l'amour m'ont toujours encouragé,

Un pilier dans ma vie qui m'a aidé à surmonter les épreuves, Hadjer

Qui a été à mes côtés dans tous les mauvais moments,

Avant que ne viennent les instants de bonheur.

À ma femme et compagne, HIBA,

À toute ma famille BESSAFI,

Et à toute ma famille ABBES.

À tous ceux qui m'ont connu et sont restés fidèles.

Table des matières

Remerciement.....	
Dédicace.....	
Table des matières.....	
Liste des figures.....	

Introduction générale

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

Chapitre I : Généralités sur les Plasmas et les Décharges Electriques

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition d'un plasma.....	3
I.3 Création et formation d'un plasma électrique.....	4
I.4 Paramètres physiques des plasmas.....	4
I.5 Différents types de plasma.....	5
I.5.1 Les plasmas chauds	5
I.5.2 Les plasmas thermiques.....	6
I.5.3 Les plasmas froids	6
I.6 Type de décharge électrique selon sa nature de création.....	7
I.7 Type de décharge selon la Caractéristique courant-tension	7
I.8 Différentes types de décharge à plasma froid.....	8
I.8.1 Plasmas micro-ondes	8
I.8.2 Plasmas radio fréquence.....	9
I.8.3 Décharge électrique base fréquence.....	10
I.8.3.1 Décharge luminescente.....	10
I.8.3.2 Décharge couronne.....	10
I.8.3.3 Passage à l'arc	11
I.8.3.4 Décharge à barrière diélectrique.....	13
I.9 Mécanisme de création d'une décharge couronne	14
I.9.1 Émission d'électrons à la cathode.....	14
I.9.2 Ionisation par champ électrique (cas d'une pointe positive).....	15
I.9.3 Rayonnement cosmique ou radioactivité naturelle.....	15
I.10 Décharges couronnes pointe-plan.....	15
I.10.1 Régime "Onset streamer"	15

I.10.2 Régime "glow"	15
I.10.3 Régime "breakdown streamer"	15
I.11 Mécanisme de la décharge couronne selon le modèle de townsend et ses facteurs d'influence.....	16
I.12 Mécanisme streamer théorie de propagation.....	17
I.13 Réactivité de la décharge.....	19
I.13.1 Équations de réaction.....	19
I.13.2 Mécanismes de traitement.....	19
I.14 Configurations courantes de la décharge couronne.....	20
I.15 Quelques applications de la décharge couronne	20
I.16 Conclusion.....	21

Chapitre 2 : Traitement des fumées et des gaz toxique

II .1 Introduction.....	22
II .2 Pollution types et nature.....	22
II .2.1 Les polluiions gazeux	22
II .2.1.1 Les oxydes carboniques	23
II .2.1.2 Monoxyde de carbone et dioxyde de carbone (CO, CO ₂).	23
II .2.2 polluiions non carbonique.....	24
II .2.2.1 Oxydes d'azotes.....	24
II .2.2.2 Oxydes de soufre.....	25
II .2.3 Autres polluants gazeux.....	25
II .2.3.1 L'hexafluorure de soufre (SF ₆).....	26
II .3 Les pollutions particulaires	27
II .4 Effet et impact des différents polluiions gazeux	28
II .4.1 Impact des polluants sur la santé humaine.....	28
II .4.2 Impact des polluants sur l'environnement.....	29
II .5 Méthodes de traitement des polluants gazeux.....	29
II .6 Méthodes de traitement des particules volatiles.....	30
II .7 Filtres classiques.....	30
II .7.1 Filtre à membrane.....	30
II .7.2 Filtre catalyseur chimique.....	31
II .7.3 Filtre hybride à membrane et catalyseur chimique.....	32
II .8 Filtre à plasma pour le traitement des effluents gazeux.....	32
II .9 Conclusion	33

Chapitre 3 : étude de conception d'un filtre à plasma électrique multi pointes-plans

III.1 Introduction.....	35
III.2 Principe de base pratique du filtre a plasma proposé	35
III.3 Eléments constitutifs d'un filtre à plasma	36
III.4 Générateur plasma	36
III.5 Formation du Plasma.....	37
III.6 Mécanisme de fonctionnement de filtre.....	37
III.6.1 Capture acheminement et admission des polluants.....	37
III.6.2 Création de milieu plasma réactif	37
III.6.3 Décomposition et conversion des polluants.....	37
III.7 Implantation du filtre à plasma.....	37
III.8 Performances du filtre plasma proposé.....	38
III.9 Approvisionnement énergétique du filtre	38
III.10 Sources d'alimentation.....	38
III.11 Types d'alimentation	38
III.11.1 Utilisation de la tension continue	39
III.11.2 Utilisation de la source impulsionnell.....	39
III.11.3 Utilisation de l'espace d'arc	40
III.11.4 Utilisation d'une source variable impulsionnell.....	41
III.11.5 Utilisation d'une source alternative.....	42
III.11.6 Source à fréquence industrielle 50 Hz	42
III.11.7 Intégration de sources à énergie renouvelable	42
III.12 La chambre de traitement des fumées et des gaz toxique.....	43
III.13 Les électrodes.....	43
III.14 Station de récupération des sédiments.....	44
III.15 Problèmes pré-visionnés.....	44
III.16 Problème de corrosion.....	45
III.17 Passage à l'arc.....	45
III.18 Conclusion.....	45
Conclusion générale	
Conclusion générale.....	46

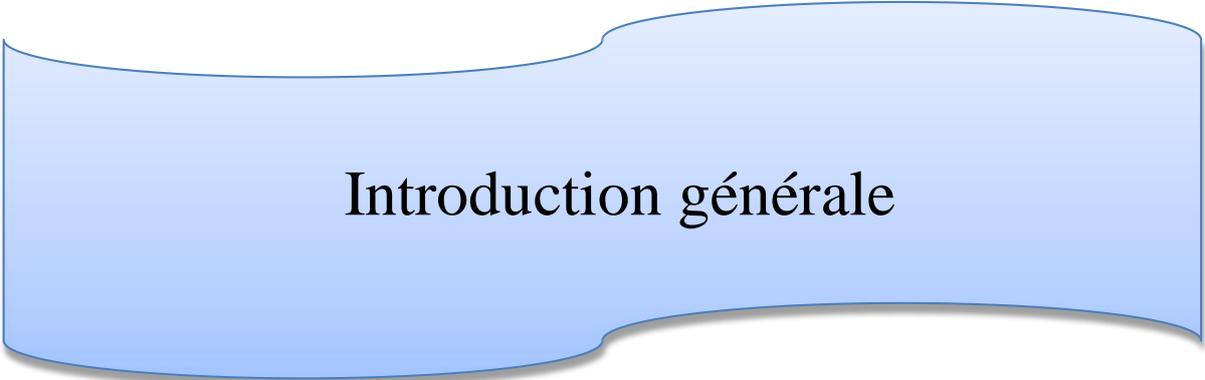
Liste des figures

Figure I.1	Exemples de plasmas dans l'environnement.....	03
Figure I.2	Les différents états et principaux changements d'état de la matière.....	04
Figure I.3	Types de plasmas électriques.....	06
Figure I.4	Caractéristique courant-tension des décharges électriques.....	08
Figure I.5	Schéma d'un dispositif utilisé pour la stérilisation de l'instrumentation médicale par post décharge micro-onde en flux (Ricard 2010).....	09
Figure I.6	décharge couronne crée sous une configuration pointe plans.....	11
Figure I.7	Evolution d'une décharge couronne vers l'arc électrique.....	12
Figure I.8	Configurations existantes de décharges à barrière diélectrique.....	13
Figure I.9	Géométrie de DBD générant de décharge de surface.....	14
Figure I.10	Différentes zones caractéristiques de la décharge couronne.....	16
Figure I.11	Représentation schématique des différentes étapes de formation et de développement d'un streamer.....	19
Figure I.12	Différents systèmes d'électrodes couramment utilisées pour générer les décharges couronnes	21

Figure II.1	Mécanisme simplifié de la formation de l’ozone dans l’atmosphère sous l’influence de la présence de NO _x et de COV.....	29
Figure II.2	Présente un modèle de filtre à membrane.....	33
Figure III.1	montre un schéma simplifié du filtre à plasma proposé.....	38
Figure III.2	Rotary Spark Gap (éclateur à gaz) - 250 Hz.....	42
Figure III.3	Schéma équivalent d’un générateur d’impulsions haute tension associant en série des thyristors.....	43
Figure III.4	panneau solaire (source énergie renouvelable).....	44
Figure III.5	filtre catalyseur.....	44
Figure III.6	électrodes multi pointes-plan.....	45

Liste des tableaux

Tableau I.1	Transitions radiatives de N ₂ susceptibles de photo-ioniser l’oxygène moléculaire.....	18
-------------	---	-----------



Introduction générale

Introduction générale

Depuis l'apparition de l'industrie, et en raison de son fort développement depuis environ deux siècles, l'humanité émet de plus en plus de polluants, notamment des polluants gazeux sous forme de gaz toxiques tels que les composés organiques volatils (COV) et les différents oxydes toxiques comme les NO_x, les SO_x, l'ozone, etc. En raison de leurs impacts écologiques et de leur toxicité, tels que les pluies acides, le réchauffement climatique, la destruction de la couche d'ozone, les effets mutagènes des COV, ainsi que les complications respiratoires et oculaires, ces gaz toxiques sont devenus un sujet majeur de préoccupation pour la recherche scientifique en termes de protection de la vie humaine et de préservation de l'environnement. La protection de l'environnement est ainsi devenue un enjeu majeur, tout comme l'idée d'une dégradation à la fois globale et locale de l'environnement. Depuis lors, la recherche scientifique n'a cessé de chercher des solutions réalistes équilibrant développement et préservation de l'environnement.

L'un des aspects de ces solutions est de s'appuyer sur des sources d'énergie propres et renouvelables. L'autre aspect est le traitement de ces polluants issus des sources d'énergie fossile en développant de nouvelles technologies efficaces pour dépolluer les rejets et les gaz d'échappement. Parmi ces technologies, on peut citer celles basées sur les plasmas électriques. Ces technologies se caractérisent par leur intégrabilité dans les processus industriels et par leur simplicité, car elles fournissent un milieu réactif capable de transformer les effluents gazeux toxiques en produits non toxiques, voire réutilisables. Les plasmas froids à pression atmosphérique sont les plus susceptibles d'être utilisés pour la dépollution des gaz. Ce type de plasma est généré par des décharges coronales avec ou sans barrière diélectrique. De nombreuses expériences et études ont été réalisées dans ce domaine. Dans ce travail on présente une contribution pratique qui concerne une invention d'un de filtration qui peut être utilisé dans tous les endroits et les installations émettant des effluents gazeux pollués. Un mémoire expliquant en détails l'aspect théorique est pratique de la conception brevetée est présenté en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous commençons dans un premier temps par quelques rappels et généralités sur les plasmas, nous rappellerons les différents types de plasma et les grandeurs caractéristiques, dans un second temps, nous allons présenter les décharges

électriques et les décharges électriques à la pression atmosphérique ainsi que les caractéristiques courant-Tension, nous présenterons enfin une décharge couronne et leurs différents types et les configurations géométriques courantes générant ce type de décharge. Nous donnons quelques exemples d'application de la décharge couronne et le mécanisme de la décharge couronne.

Le deuxième chapitre traite des principaux polluants issus de la combustion des combustibles fossiles, comme les oxydes d'azote (NO_x), les oxydes de soufre (SO_x), les particules fines et les composés organiques volatils (COV), et souligne leurs impacts environnementaux et sanitaires, tels que les pluies acides et les troubles respiratoires. Les technologies existantes de traitement des émissions montrent des limites, mais les plasmas froids (NTP) offrent une alternative prometteuse pour décomposer efficacement ces polluants. Le chapitre explore également les différentes techniques de plasma, comme les décharges couronnes et les faisceaux d'électrons, en mettant l'accent sur la nécessité de réduire les coûts énergétiques et d'améliorer la compréhension des processus pour rendre cette technologie plus accessible et efficace face aux défis réglementaires environnementaux.

Le troisième et dernier chapitre, présente notre filtre à plasma comme une solution efficace pour la dépollution des gaz industriels, grâce à un design innovant multi-pointes plans et à ses performances élevées en matière d'efficacité et de sélectivité. Adaptable aux petites et grandes installations, elle se distingue par sa capacité à intégrer des sources d'énergie renouvelable, réduisant ainsi l'empreinte carbone. Néanmoins, des défis tels que la corrosion et le risque d'arc électrique doivent être pris en compte pour garantir la durabilité du système.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et perspective d'avenir.



CHAPITRE I

*Généralités sur les Plasmas et les
Décharges Electriques*

I.1 Introduction

Dans notre environnement, les éléments qui nous entourent sont généralement présents sous forme solide, liquide ou gazeuse. Cependant, lorsque les températures atteignent des niveaux extrêmement élevés, un autre état de la matière se manifeste, connu sous le nom de "plasma électrique". Un milieu plasma peut être créé de manière naturelle ou manière artificiellement sous un phénomène physique connus sous le nom décharge électrique. Au milieu et ces produits peuvent être exploité dans différentes applications. Dans ce chapitre on va détailler les éléments nécessaires pour donner une bonne définition sur ce phénomène de plasma, sa création naturellement est en particulier sous l'action d'une décharge électrique artificiellement et finalement son exploitation dans différents domaines pour différentes applications.

I.2 Définition d'un plasma

Considéré comme quatrième état de la matière, état plasma ce produit naturellement ou d'une manière artificielle donc se distingue d'un état solide, liquide et gazeux physiquement et chimiquement à la fois. Ce plasma, est une forme exotique de la matière qui se produit lorsque les gaz deviennent partiellement ou totalement ionisés, contenant ainsi une proportion notable de charges libres globalement électriquement équilibrés [2]. Sa présence n'est pas limitée à des environnements spécifiques, mais dépend plutôt de la disponibilité d'une quantité d'énergie suffisante pour maintenir les particules chargées. En fait, le plasma constitue plus de 99% de la matière dans l'univers observable. Comme il est largement présent dans notre quotidien par exemple à travers les milliers de pixels des écrans de télévision modernes ou les tubes fluorescents [1].

La figure I.1, présente quelques formes de plasma et ces applications



Figure I.1 Exemples de plasmas dans l'environnement [4]

I.3 Création et formation d'un plasma électrique

Un milieu plasma électrique se forme lorsque des gaz sont soumis à une énergie intense, ce qui entraîne l'ionisation des atomes, produisant des ions positifs et négatifs ainsi que des électrons libres. L'application de cette énergie provoque ce qu'on appelle un phénomène de décharge ou se déroulent certains mécanismes qui ramènent ce milieu gazeux à son état plasma. Le mélange gazeux résultant d'atomes neutres, ions positifs et négatifs et électrons libres, doivent être en équilibre électrique et thermodynamique globale ou partiel.

La figure I.2, résume les différents principaux changements d'état de la matière arrivant à l'état plasma

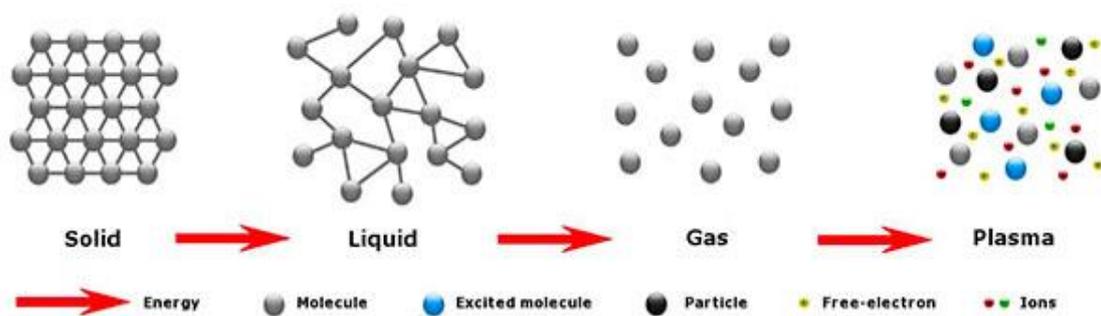


Figure I.2 Différents états et principaux changements d'état de la matière [4].

Dans un plasma, on trouve également des atomes ou des molécules dans des états excités. Dans ces états, les électrons restent liés au noyau mais sont portés à des niveaux d'énergies plus élevés. Lorsque ces atomes ou molécules excités se désexcitent, ils libèrent de l'énergie sous forme de lumière (photon). Ce processus sert soit à l'entretien de la décharge (mécanisme de streamer) et/ou à être une source lumineuse réactionnelle ou directement exploitable pour les applications de l'éclairage par exemple.

I.4 Paramètres physiques des plasmas

Les plasmas, en raison de leur variabilité, peuvent être classés selon divers paramètres spécifiques. Parmi ces paramètres essentiels, on trouve la densité électronique, le taux d'ionisation, la température électronique, le libre parcours moyen et la longueur de Debye.

Dans ce qui suit et par selon l'intérêt qui domine la caractérisation des plasmas électriques, on détaille ces paramètres.

- a) **Densité électronique** : La densité électronique désigne le nombre d'électrons libres présents par unité de volume, généralement exprimé en centimètres cubes (cm^{-3}).

b) Taux d'ionisation : Le taux d'ionisation est défini comme le rapport entre le nombre d'électrons libres (n_e) et le nombre total de particules ($n_e + N$), où N représente le nombre de particules neutres dans un volume donné.

Le taux d'ionisation peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$\tau_i = \frac{n_e}{n_e + N} \quad (\text{I.1})$$

C'est également le rapport $\frac{n_e}{N}$ qui permet de traduire l'importance des collisions entre particules chargées par rapport aux collisions entre particules chargées et neutres [2].

c) Température électronique : T_e est la température électronique, exprimée en Kelvin (K), représentant la température absolue des électrons. Parfois, on utilise également l'énergie électronique KT_e en électronvolt (eV), où k est la constante de Boltzmann. Il est à noter que KT_e est approximativement égal à $1,4 \times 10^4$ K [2].

d) Libre parcours moyen : Le libre parcours moyen, noté λ , représente la distance moyenne parcourue par une particule chargée entre deux collisions. Sa valeur dépend à la fois de la vitesse des particules et de la probabilité de collision.

e) Longueur de Debye : La longueur de Debye, symbolisée par λ_D , est une mesure qui définit la distance à partir de laquelle le champ électrique coulombien émanant d'une particule chargée est neutralisé par un ensemble de particules de signe opposé dans le volume environnant. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\lambda_D = \left(\frac{2\varepsilon_0 KT_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I-2})$$

Avec ε_0 représentant la permittivité du vide ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m) et e la charge élémentaire d'un électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C) [2].

I.5 Différents types de plasma

Les plasmas électriques peuvent être classés selon la température de leurs particules chargées (électrons/ions) en trois principales catégories :

I.5.1 Plasmas chauds

Ces plasmas se retrouvent dans des environnements tels que les étoiles ou les plasmas de fusion. Ils se caractérisent par une température des ions et des électrons supérieurs à 10 millions de degrés Kelvin. Dans ces conditions, le gaz est complètement ionisé, et les ions et électrons ont sensiblement la même énergie et température. Deux types de collisions sont observés : les collisions élastiques, responsables de la conduction et de la diffusion de la chaleur, et les collisions inélastiques, qui induisent des changements au niveau de l'énergie interne des molécules et des particules.

I.5.2 Plasmas thermiques

Ces plasmas, tels que ceux présents dans les arcs électriques naturelles (éclair) et artificielle (arc à soudure), sont des milieux gazeux partiellement ou fortement ionisés où toutes les particules (molécules, atomes, ions, électrons) ont à peu près la même énergie cinétique moyenne, ce qui établit un équilibre thermique. Bien que leur température puisse atteindre jusqu'à 20000 K dans les régions les plus chaudes, ces plasmas restent partiellement ionisés. Cependant, leur température élevée peut entraîner des dommages aux matériaux.

I.5.3 Plasmas froids

Dans ces plasmas, la température des électrons est supérieure à celle des ions ou des neutres, et se situe généralement entre 300 et 1500 K. Le gaz est faiblement ionisé, avec un taux d'ionisation compris entre 10^{-6} et 10^{-2} , et est en dehors de l'équilibre thermodynamique. Les différentes particules (électrons, ions, atomes, molécules) ont des énergies moyennes très différentes. Bien que la température du gaz reste proche de la température ambiante, les électrons ont une énergie moyenne élevée, ce qui rend ces plasmas efficaces pour produire des espèces chimiquement actives.

Lorsque la puissance dissipée par unité de volume dans le milieu dépasse un seuil critique pendant une période suffisamment longue, il peut se produire une transition soudaine et souvent incontrôlée d'un système hors équilibre thermodynamique à un système proche de l'équilibre thermodynamique. Dans le cas d'une décharge électrique dans un gaz, cela correspond au passage du régime luminescent ou diffus au régime d'arc [1].

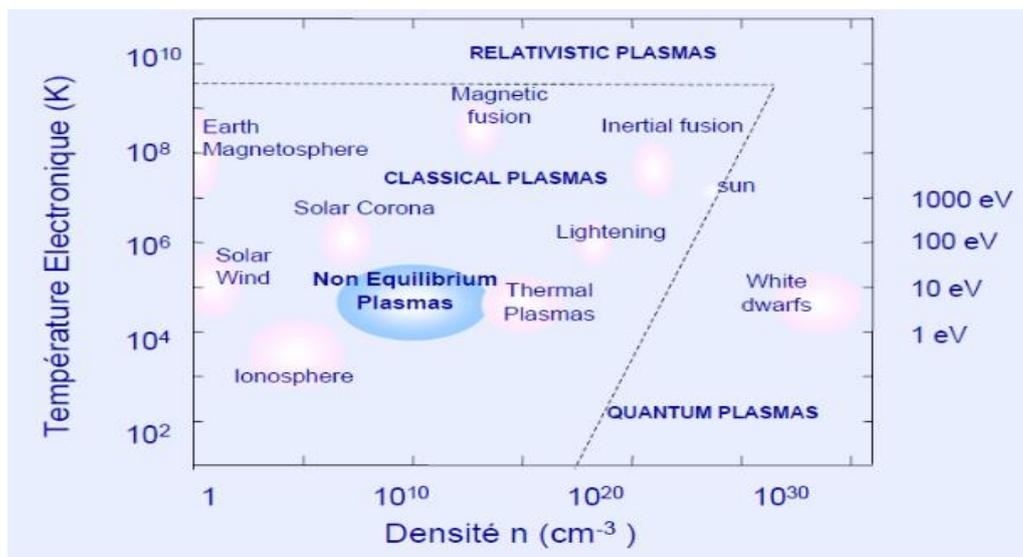


Figure I.3 Types de plasmas électriques [1]

I.6 Type de décharge électrique selon sa nature de création

Ce sont des phénomènes créés dans les gaz suite à une application d'une tension capable à rendre ce dernier conducteur. Selon le niveau de cette tension on obtient un courant traversant ce milieu gazeux, dont on peut caractériser cette décharge.

On peut parler de trois catégories de décharges électriques :

- 1. Naturelles :** si elles sont créées spontanément dans la nature telles que la foudre avec distance de rupture de quelques centaines de mètres.
- 2. Artificielles non contrôlées :** observées par exemple dans les postes de transformation sur les dispositifs de coupure, avec des distances de quelques mètres ou l'effet couronne sur les lignes de transport électrique HT.
- 3. Artificielles contrôlées** telles que les décharges lumineuses et les arcs à souder [3].

I.7 Type de décharge selon la caractéristique courant-tension

L'augmentation progressive d'une tension appliquée aux bornes des électrodes donne une variation du courant de valeur moyenne en fonction de l'évolution de la tension. Cette variation obtenue est appelée la caractéristique courant-tension de la décharge couronne. Le long de l'axe de variation de la tension dans cette caractéristique, la décharge électrique se comporte en plusieurs régimes.

On peut distinguer le premier régime, qui est caractérisé par une simple collection de charges (originaire de la radioactivité naturelle) sous une faible valeur de tension appliquée, zone (I).

Une deuxième zone (II), commence à partir d'une tension seuil V_0 . Dans cette zone, une forte augmentation de courant est observée pour une faible variation de tension. Ce courant est le résultat des avalanches déclenchées suite à la création des électrons germes assurée par une source externe, donc la décharge demeure non autonome.

Une augmentation supplémentaire de la tension appliquée ramène la décharge à la zone (III). La décharge devienne autonome en création des électrons germes, autrement dit la création de nouvelles avalanches qui entretiennent la décharge et qu'on appelle décharge couronne appelée aussi décharge streamer.

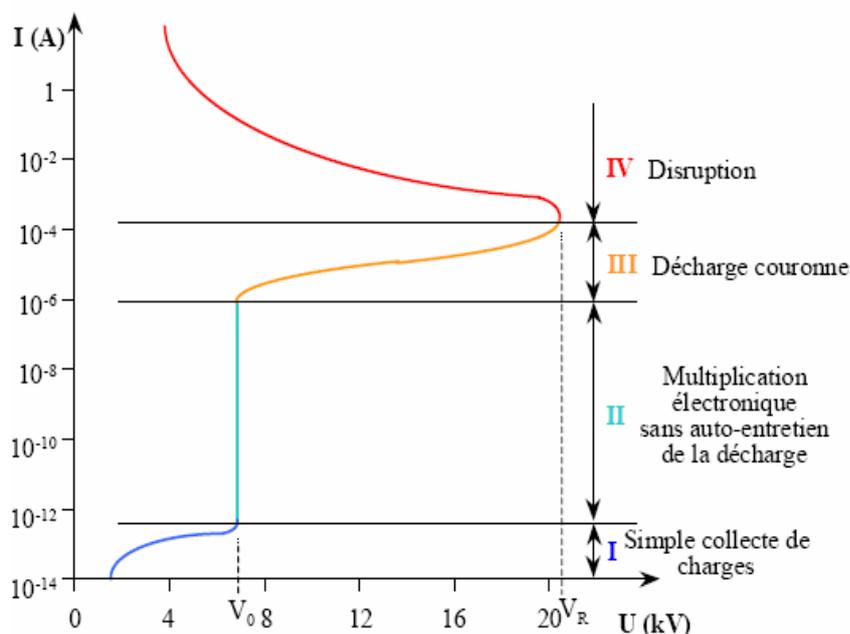


Figure I.4 Caractéristique courant-tension des décharges électriques

Au-delà d'une valeur de tension appliquée, le courant atteint des valeurs importantes accompagnées par des effets thermiques évidents et la décharge passe ainsi à un état d'équilibre thermodynamique ou ce qu'on appelle le régime d'arc (zone IV). La Figure I.4 présente cette caractéristique et les différentes phases appropriées [1].

I.8 Différents types de décharge à plasma froid

I.8.1 Plasmas micro-ondes

Dans ce type de plasma, le gaz est ionisé par l'application d'une énergie micro-onde, un rayonnement électromagnétique dont la fréquence varie typiquement entre 300 MHz et 10 GHz. Contrairement aux décharges électriques conventionnelles qui nécessitent des électrodes, ces plasmas sont générés à l'aide de systèmes tels que des cavités résonantes, des guides d'ondes ou des dispositifs à effet de surface. Ils sont alimentés par des générateurs comme des magnétrons ou des surfatrons [4].

Les plasmas micro-onde se distinguent par leur uniformité en volume ou en surface, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications à basse pression telles que le traitement de surface, le dépôt de couches minces et la gravure (Lin, 1988; Fünér, 1999). Plus récemment, ils ont également été utilisés pour la stérilisation de l'instrumentation médicale (Villeger, 2005; Ricard, 2005). À la pression atmosphérique, ces plasmas sont employés dans des domaines tels que l'analyse spectroscopique (Green, 2001) ainsi que dans le traitement de surfaces métalliques (Tendero, 2005) et de matériaux (Cardoso, 2007).

La figure I.5 présente un dispositif expérimental illustrant la génération de plasmas micro-onde utilisés pour la stérilisation de l'instrumentation médicale [4]

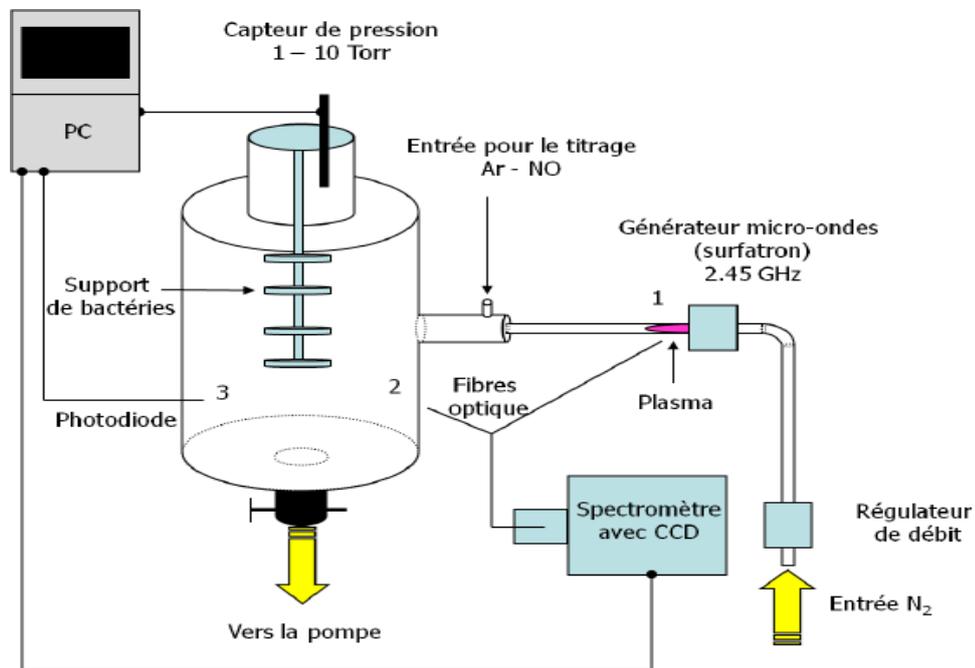


Figure I.5 Schéma d'un dispositif utilisé pour la stérilisation de l'instrumentation médicale par post décharge micro-onde en flux (Ricard 2010) [4].

I.8.2 Plasmas radio fréquence

Les systèmes dits radio fréquence fonctionnent en utilisant une alimentation électrique sinusoïdale à une fréquence de 13,56 MHz ou l'une de ses harmoniques (27,12 MHz et 40,68 MHz). Ces configurations comprennent généralement un générateur, un appareil d'adaptation d'impédance et un réacteur. Les générateurs utilisés sont souvent des amplificateurs, synchronisés par une horloge à quartz pour assurer une haute précision et stabilité de la fréquence.

La géométrie du réacteur est adaptée en fonction du processus de traitement spécifique envisagé. Le couplage entre le réacteur et l'alimentation électrique peut être réalisé de manière capacitive, où le gaz à ioniser se trouve entre deux électrodes planes ou cylindriques, ou de manière inductive, où le réacteur est positionné le long de l'axe d'un solénoïde.

L'adaptation d'impédance joue un rôle crucial en optimisant le transfert d'énergie vers le milieu ionisé en équilibrant les impédances de sortie du générateur et d'entrée du réacteur. Cette adaptation dépend de paramètres tels que la pression du gaz, le type de gaz excité et le type de couplage utilisé entre le générateur et le réacteur [4].

I.8.3 Décharge électrique base fréquence

Dans ce type de décharge, l'énergie est introduite sous une fréquence relativement moins élevée ou inférieure par rapport à la fréquence industrielle (50 Hz), ou même nulle telle que celles créées sous une tension continue. Elles sont en général des décharges créées à la pression atmosphérique.

Selon les niveaux de la tension appliquée, on obtient du moins élevée au plus élevée les types suivants

I.8.3.1 Décharge luminescente

La décharge luminescente est un phénomène électrique qui se produit lorsqu'un gaz sous faible pression est soumis à une différence de potentiel élevée entre deux électrodes, créant un plasma visible sous forme d'impulsions lumineuses.

Le mécanisme de base en ce type de décharge est le mécanisme de Tawson. Ce processus commence par l'ionisation des molécules du gaz par des électrons accélérés par le champ électrique. Les électrons, en se déplaçant à grande vitesse, entrent en collision avec les atomes ou molécules du gaz, provoquant leurs excitations. Lorsque ces derniers retournent à leurs états d'énergies initiales, ils émettent de la lumière, créant ainsi la lueur caractéristique de la décharge luminescente. Cette décharge non auto-entretenue caractérise par l'existence de plusieurs régions distinctes, telles que la zone sombre près de la cathode, la colonne positive et la lueur de la cathode. Les couleurs émises dépendent de niveau de l'énergie admise, de la pression du gaz et du type et de la nature du gaz utilisé. Ce phénomène est à la base de nombreuses applications pratiques, comme les tubes fluorescents et les plasmas industriels luminescents à pression atmosphérique [30].

I.8.3.2 Décharge couronne

La décharge couronne est une décharge auto-entretenue. En effet, le caractère autonome de ce type de décharge est à l'origine de leur intérêt. Pour mieux comprendre la spécificité de la décharge couronne, il est indispensable de connaître les différentes étapes et les différents facteurs qui rentrent en jeu durant la formation de cette dernière.

Il s'agit des étapes de développement d'un streamer qui est le mécanisme de base dans ce type de décharge et qui suit le premier mécanisme celui de Tawson qui seront détaillé par la suite.

Pour les différents facteurs, le premier facteur c'est la géométrie dissymétrique qui procure une distribution de champ électrique fortement non uniforme avec un gradient important au niveau de l'électrode de faible rayon de courbure [34].

Le deuxième facteur c'est le champ local de la charge d'espace qui devient de même ordre de grandeur du champ électrique appliqué et qui avance d'avantage la tête de streamer vers la cathode avec une grande vitesse, environ 10^6 m/s.

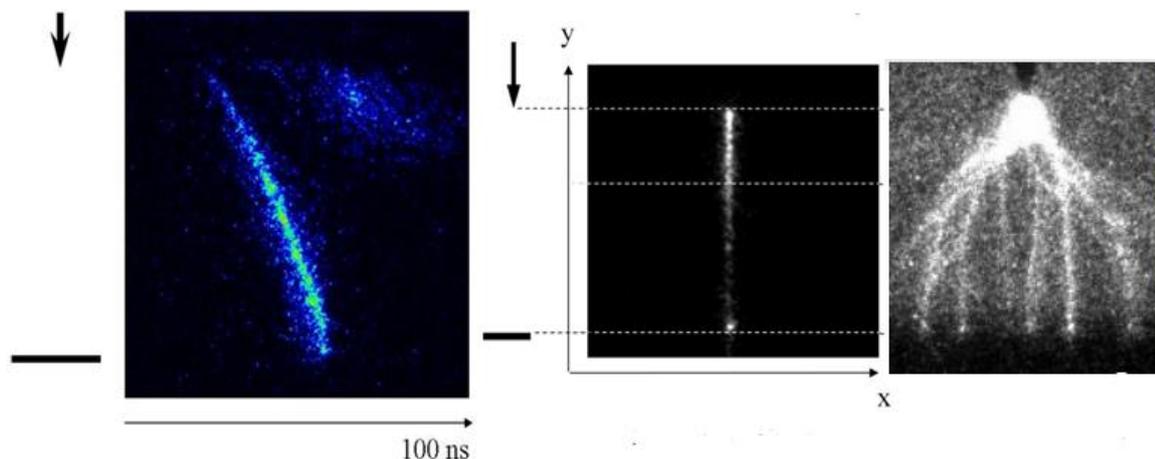


Figure I.6 Décharge couronne créée sous une configuration pointe plans [1]

La figure (I.6), présente une décharge couronne créée sous une configuration pointe plan alimenté en continue et en impulsionnel. Pour notre application de filtre vu la simplicité de mise en œuvre, son efficacité et surtout son faible coût énergétique, on s'intéresse à la décharge couronne générée à la pression atmosphérique sous une configuration multi-pointes/plan. On détaille en ce qui suit le principe de base et les différentes caractéristiques de cette décharge.

I.8.3.3 Passage à l'arc

Pratiquement, ce régime transporte la décharge couronne de son caractère d'un plasma froid hors équilibre thermodynamique à un plasma thermique en équilibre thermodynamique. Il est à noter qu'il constitue un passage très non souhaitable en domaine d'exploitation. Et ceci à cause des séquelles indésirables engendrées qui affectent à la fois les éléments de réacteur générant décharge couronne et les éléments traités par cette décharge. Les dégâts probables sont causés par une forte intensité de courant et un effet thermique important accompagnant [29].

Physiquement d'après Marod, la transition à l'arc ne pas être produite arbitrairement quand la tension inter-électrodes augmente mais toujours elle se produit rapidement après que la plus grande impulsion de courant de décharge i_m , dépasse une valeur critique i_c la figure I.7,

montre une imagerie d'une transition à l'arc en comparaison avec l'évolution du courant de la décharge dans une situation de transition à l'arc. Sur cette figure, l'impulsion de courant de streamer dépasse une valeur critique notée " α ", par ailleurs l'impulsion de transition à l'arc notée " β " est illimitée en amplitude. Marode en référence, donne une expression qui peut estimer le temps Δt nécessaire de cette transition en fonction de i_m et i_c tel que:

$$(i_m - i_c) = A/\Delta t^v \quad (\text{I.3})$$

v , A égales respectivement 1.62 et $8 \cdot 10^3$; Δt , est exprimé en nanoseconde.

D'autre part, la figure I-6, montre aussi que le premier streamer semble comme étant un évènement instantané alors que le second streamer s'étend dans l'espace inter-électrodes et se fini par la transition à l'arc [1].

Lorsque le streamer primaire atteint la cathode, un canal conducteur relie les deux électrodes. Bien que, le processus d'attachement s'imposera sur le processus d'ionisation dans ce canal, la densité des neutres augmente également. Dans ces conditions, les valeurs du champ réduit diminue et tend vers 0, et le courant de décharges annule (voir figure I.7).

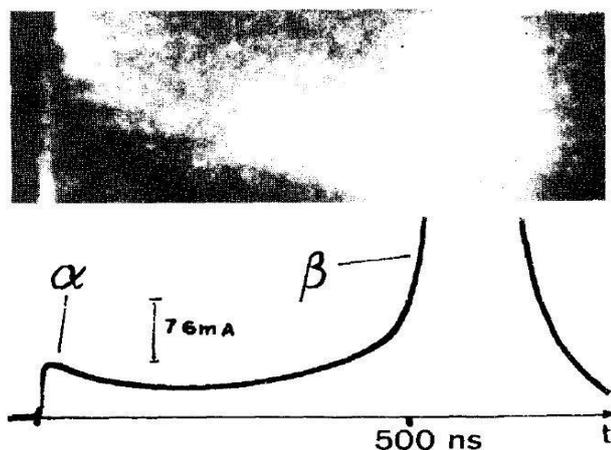


Figure I.7 Evolution d'une décharge couronne vers l'arc électrique [1].

Néanmoins, une augmentation supplémentaire de la tension provoquera une accélération des électrons qui n'ont pas encore disparus du canal. Ceci reproduit de nouveau le processus d'ionisation des neutres dans le canal qui augmente la densité électronique et pareillement par conséquent le courant de la décharge. En plus, un changement de la pression remarquable est causé par l'échauffement des espèces lourdes entraînant une diminution de la densité des neutres et une augmentation de la valeur du champ réduit (E/N). Dès que le champ réduit dépasse sa valeur critique du claquage suite à une tendance du balance en faveur de l'ionisation par rapport à l'attachement, une forte ionisation aura lieu. Le milieu passe ainsi à l'équilibre thermodynamique et la densité électronique dépasse 10^{17} cm^{-3} , avec une température qui peut atteindre 10^4 K [1].

I.8.3.4 Décharge à barrière diélectrique

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) se distinguent par la présence d'au moins une couche de matériau isolant en contact avec la décharge, comme illustré dans la figure I.8, ce qui nécessite l'utilisation d'une alimentation alternative ou pulsée. Dans ce type de décharge, le passage à l'arc électrique est empêché par l'isolant placé entre les électrodes.

Lors de l'apparition des filaments de décharge sur le diélectrique, les particules chargées s'accumulent à la surface de ce dernier, générant un champ électrique opposé au champ externe créé par la tension appliquée entre les électrodes. À mesure que les charges s'accumulent sur le diélectrique, le champ électrique perçu par le gaz diminue, ce qui provoque l'extinction de la décharge avant que le gaz dans le canal de décharge ne subisse un processus de thermalisation.

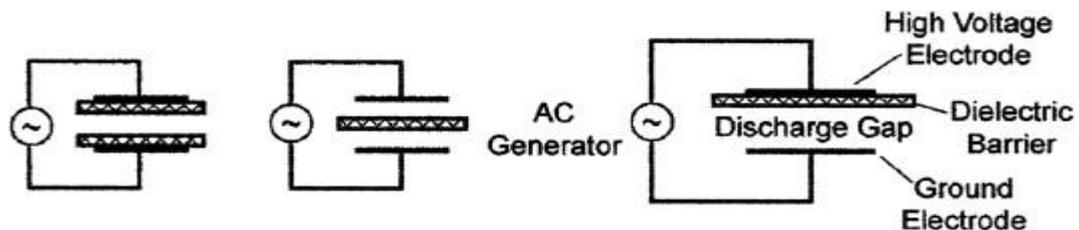


Figure I.8 Configurations existantes de décharges à barrière diélectrique.

Dans l'air à pression atmosphérique avec une distance inter-électrodes de quelques millimètres, le plasma est constitué d'une succession de filaments très fins ($\sim 100 \mu\text{m}$) qui traverse l'espace gazeux sur des temps très courts ($\sim 10\text{ns}$).

On utilise généralement une tension alternative avec une fréquence de répétition de quelques kHz pour générer un plasma réactif assez riche en espèces actives. Mais pour une source d'espèces actives encore plus efficace, on peut aussi utiliser des sources pulsées en particulier mono-polaires (tension uniquement positive par exemple) où l'inversion des charges se produit non pas lorsqu'on passe de l'alternance positive à l'alternance négative comme dans les DBD classiques mais lors qu'on passe de la partie montante à la partie descendante de l'impulsion de tension de plus dans le cas des configurations d'électrodes classique, la décharge se développe principalement dans le volume gazeux. Il existe d'autres géométries d'électrodes où on peut être en présence d'une DBD de surface lorsque les deux électrodes sont en contact avec la même barrière diélectrique car le plasma se développe le long de la surface isolante. Ce type de géométrie peut être notamment utilisé pour les actionneurs plasmas [5].

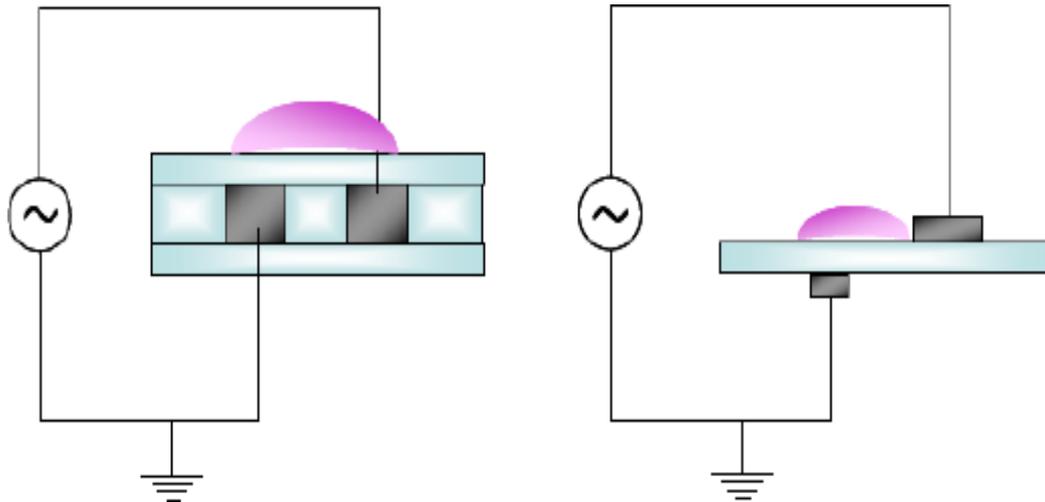


Figure I.9 Géométrie de DBD générant de décharge de surface [5]

I.9 Mécanisme de création d'une décharge couronne

Pour qu'une décharge couronne se déclenche, il est nécessaire de disposer d'un nombre suffisant d'électrons libres, appelés électrons germes. Ceux-ci se trouvent près de la cathode dans le cas d'une décharge positive, ou près de l'anode dans le cas d'une décharge négative. La question essentielle est donc : d'où proviennent ces électrons ?

En réponse, les électrons initiateurs de la décharge couronne proviennent généralement de diverses sources.

I.9.1 Émission d'électrons à la cathode

L'émission d'électrons à partir de la cathode peut se produire de deux manières principales :

- ✚ **Effet thermoélectronique** : Les électrons surmontent une barrière de potentiel créée à l'interface métal-diélectrique.

- ✚ **Effet tunnel** : Les électrons traversent cette barrière par effet tunnel.

Dans le cas d'une polarité positive, les électrons provenant de la cathode représentent une faible contribution au nombre total des électrons germes. Cette faible contribution est due aux faibles valeurs du champ électrique au niveau de la cathode, qui se trouve relativement éloignée. Ce phénomène est particulièrement notable dans une configuration pointe positive-plan négatif [26].

La cathode est donc considérée comme une source peu efficace d'électrons germes, car elle est soumise à un champ électrique faible et située à une distance importante de la zone de décharge.

I.9.2 Ionisation par champ électrique (cas d'une pointe positive)

Ce mécanisme implique l'ionisation par champ électrique des molécules ou des atomes, ce qui génère des électrons germes. La probabilité de création de ces électrons est liée à la présence d'ions négatifs (O_2^-) ou à la présence d'impuretés comme (O_2^-) ou (H_2O), qui donnent naissance aux ions négatifs (O_2^-) - (H_2O_n) et (H_2O^-) - (H_2O)_n.

I.9.3 Rayonnement cosmique ou radioactivité naturelle

Les électrons germes peuvent également être produits par l'irradiation due aux rayonnements cosmiques ou par des particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes du gaz présents dans l'espace entre les électrodes, par des processus de radioactivité naturelle. Il est notable que dans l'air à la pression atmosphérique, entre 7 à 20 électrons par cm^3/sec sont produits.

I.10 Décharges couronnes pointe-plan

Lorsque l'on applique une tension continue positive à un système d'électrodes pointe-plan, trois régimes de fonctionnement peuvent être observés en fonction de la valeur de la tension :

I.10.1 Régime "Onset streamer"

À faible tension, la décharge reste localisée autour de la pointe. Ce régime est caractérisé par une auto-stabilisation de la décharge et la formation d'un courant impulsionnel de faible amplitude.

I.10.2 Régime "Glow"

À une tension légèrement plus élevée, la décharge crée une zone lumineuse autour de la pointe, avec trois sous-zones distinctes :

- Zone d'ionisation : Où le champ électrique est le plus intense et l'ionisation est prédominante.
- Zone de dérive ionique : Où les ions produits se déplacent, et les processus de recombinaison dominent.
- Zone critique : La frontière entre les zones d'ionisation et de dérive ionique, visible comme une couronne lumineuse autour de la pointe.

I.10.3 Régime "Breakdown streamer"

Lorsque la tension dépasse un certain seuil, les avalanches électriques se propagent jusqu'à la cathode, ajoutant des impulsions de courant significatives au courant continu observé dans le régime "Glow". Ces impulsions sont caractérisées par une fréquence plus stable et des amplitudes plus élevées.

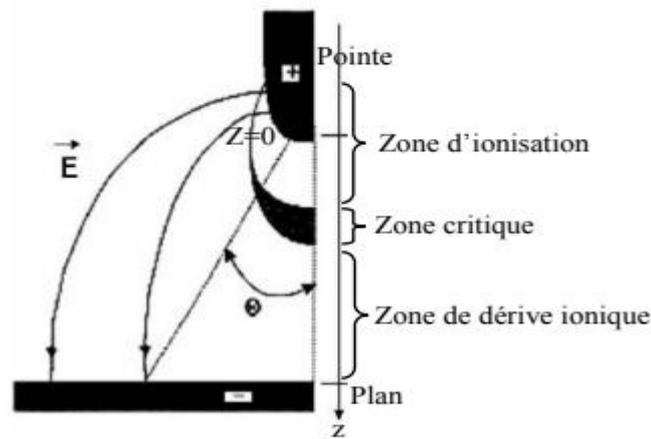


Figure I.10 Différentes zones caractéristiques de la décharge couronne

I.11 Mécanisme de la décharge couronne selon le modèle de Townsend et ses facteurs d'influence

La décharge couronne est un type de décharge électrique autonome dont le développement dépend de plusieurs facteurs. L'un des principaux est la géométrie dissymétrique des électrodes, qui crée un champ électrique fortement non uniforme. Ce champ présente un gradient important près des électrodes ayant un faible rayon de courbure. Ce gradient provoque la formation de **streamers**, des structures filamenteuses qui se déplacent rapidement vers la cathode sous l'effet du champ de charges d'espace. Ce dernier devient de même ordre de grandeur que le champ appliqué, propulsant la tête du streamer à une vitesse pouvant atteindre 10^6 m/s.

Le processus commence par des avalanches électroniques, un phénomène où des électrons sont accélérés par le champ électrique, acquérant ainsi une énergie cinétique suffisante pour ioniser les molécules du gaz. Lors de ces collisions, de nouveaux électrons sont créés, entraînant une multiplication rapide des électrons. Ce processus est décrit par le premier coefficient de Townsend (α), qui dépend de la densité du gaz et du champ réduit. Il exprime le nombre moyen d'ions produits par un électron par unité de distance parcourue [15].

Les avalanches électroniques se propagent dans le champ électrique et créent une vague d'électrons qui forme un pôle fictif négatif, tandis que les ions positifs forment un pôle fictif positif. Cette séparation des charges génère un champ local opposé au champ appliqué.

Lorsque les deux champs s'équilibrent, l'avalanche s'arrête, car les électrons n'ont plus assez d'énergie pour continuer à ioniser le gaz.

Un autre facteur clé est l'émission d'électrons secondaires, qui peut être déclenchée par des impacts d'ions positifs ou de photons sur la cathode. Ce mécanisme est décrit par le second coefficient de Townsend, et il est essentiel pour le maintien de la décharge. Ce phénomène d'émission secondaire complète le mécanisme d'ionisation proposé par Townsend, permettant à la décharge de se maintenir.

Cependant, malgré son importance, la théorie de Townsend ne peut pas expliquer la vitesse de propagation élevée de la décharge couronne. Pour cela, des scientifiques comme Loeb et Meek ont cherché des explications alternatives, en introduisant des concepts supplémentaires pour compléter le modèle initial de Townsend.

I.12 Mécanisme streamer théorie de propagation

Afin d'expliquer la continuation des avalanches sans arrêt avec une vitesse importante et non affectée par le champ local résultant, il était indispensable de chercher un autre mécanisme qui assure cette combinaison. Ce mécanisme clé est traduit par le fait que, la superposition du champ, appliqué et celui de la charge d'espace a pour effet la création de plus d'électrons germes par photo-ionisation en amont de la charge d'espace. En effet la désexcitation des espaces excités se trouvant dans la charge d'espace, émettra des photons qui vont exciter les neutres devant elle. Donc la création de nouveaux électrons est fortement possible et favorisée préalablement par l'existence des espèces excitées dans la charge d'espace [1].

Pour mettre en évidence cette réalité, le tableau I.1, montre les transitions radiatives des molécules d'azote N_2 excitées susceptible d'ioniser l'oxygène moléculaire O_2 par photo-ionisation dans l'air sec.

Système	Longueur d'onde (nm)	Energie (eV)
$C_4\Sigma^+_e - X^1\Sigma^+_g$	96-86	12.91-14.41
$b' \ ^1\Sigma^+_u - X^1\Sigma^+_g$	129-82	9.6-15.1
$b \ ^1\Pi_u - X^1\Sigma^+_g$	111-85	11.16-14.58
$o \ ^1\Pi_u - X^1\Sigma^+_g$	95-88	13.05-14.09

Tableau I.1 Transitions radiatives de N_2 susceptibles de photo-ioniser

l'oxygène moléculaire [1].

Ces nouveaux électrons sont en suite accélérés par un champ électrique imposé par la charge d'espace créée suite à la coalition des têtes des avalanches interférées. De cette façon. Ces avalanches continuent à gagner avec le temps plus de force et plus d'espace inter-électrodes.

A certain moment, la tête de cette onde ionisante atteindra la cathode et ainsi l'intervalle inter-électrodes est court-circuité par un canal conducteur quasi-équilibré électriquement. Ce canal est rompu après l'évacuation de la charge électronique, la cesse des ionisations et la redistribution du champ électrique qui devient faible par rapport à celui qui a causé initialement cette succession de processus. La propagation de cette onde ionisante est appelée un streamer.

La Figure I.11, donnera une image schématique des différentes étapes de propagation d'un streamer.

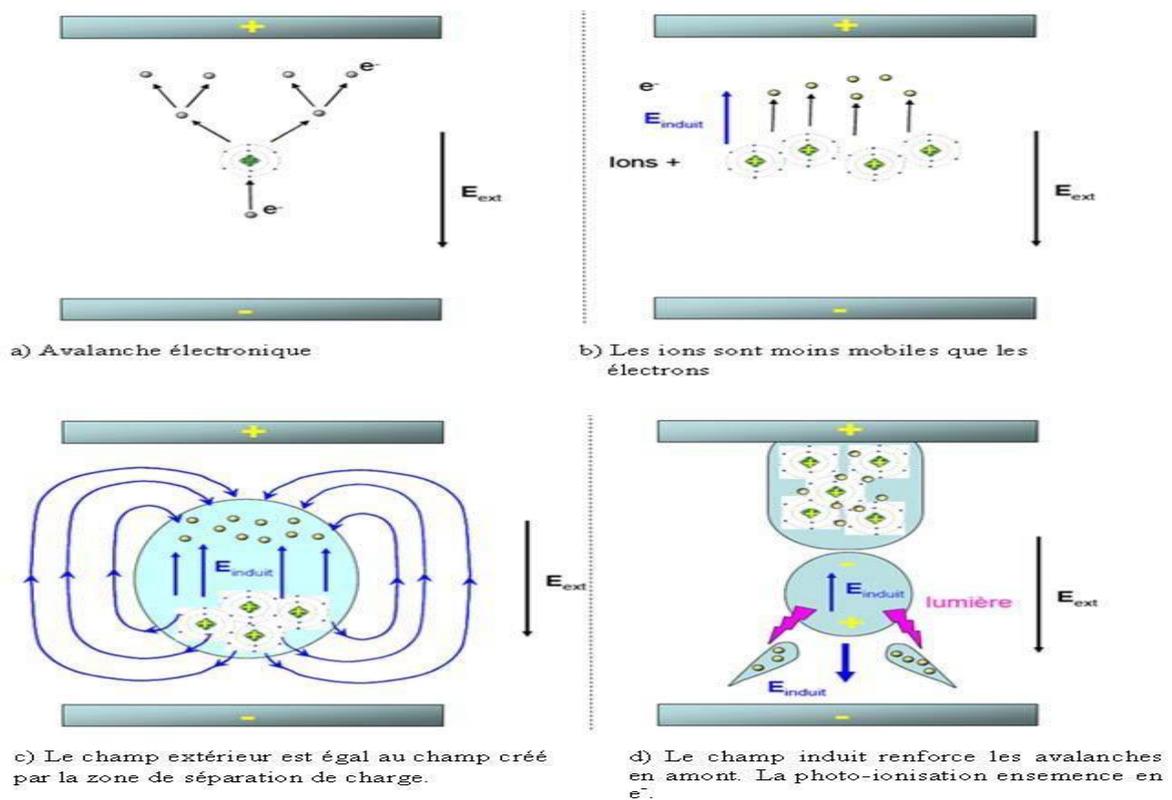


Figure I.11 Représentation schématique des différentes étapes de formation et de développement d'un streamer [1]

Cependant, il est probable qu'une deuxième onde ionisante moins vite et moins forte que la première commence à se développer juste après l'impact de sa précédente. Cette

deuxième qui commence elle aussi à partir de l'anode est appelée un streamer secondaire.

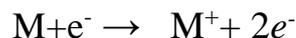
I.13 Réactivité de la décharge

La réactivité de la décharge dépend de la composition du gaz, de la pression et de la température, de la tension appliquée, et de la géométrie des électrodes, ce qui influence directement la formation et le développement des avalanches et des streamers. La décharge corona est une méthode efficace pour le traitement des gaz toxiques, notamment en raison de sa capacité à décomposer les polluants en produits moins nocifs.

La réaction plasma pour le traitement des gaz toxiques implique des équations chimiques complexes qui décrivent les interactions entre les espèces ionisées et les polluants. Voici un aperçu des principales équations et mécanismes impliqués dans ce processus.

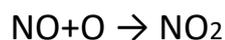
I.13.1 Équations de réaction

1. Ionisation et excitation : Lorsqu'un gaz est soumis à une décharge électrique, il se produit une ionisation qui peut être décrite par l'équation :



Où M : représente une molécule neutre et e^- : un électron

2. Réactions de décomposition : Les molécules de gaz toxiques, comme les oxydes d'azote (NO_x), peuvent être décomposées par des réactions avec des radicaux libres générés dans le plasma. Par exemple, la décomposition du monoxyde d'azote (NO) peut être représentée par :

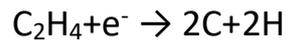


3. Recombinaison : Les espèces ionisées peuvent également se recombiner pour former des molécules neutres, ce qui est crucial pour réduire la concentration de polluants :



I.13.2 Mécanismes de traitement

- ✚ Oxydation : Les espèces réactives générées dans le plasma, telles que les radicaux hydroxyles ($\bullet OH$), jouent un rôle clé dans l'oxydation des polluants organiques volatils (COV) et d'autres composés toxiques.
- ✚ Dissociation : Les molécules complexes peuvent être dissociées en radicaux plus simples, permettant une dégradation plus efficace. Par exemple, la dissociation de l'éthylène (C₂H₄) peut être représentée par :



I.14 Configurations courantes de la décharge couronne

Les jeux d'électrodes que l'on retrouve couramment dans les décharges couronnes sont de type : (Fil – Cylindre), (Pointe – Plan), (Fil – Plan), (Multi-pointes- Plan) (Figure I-12).

- ✚ Le système d'électrodes « fil – cylindre » est très utilisé pour la dépollution en volume.
- ✚ Le système mono pointe – plan à l'avantage de pouvoir isoler une décharge d'une part.
- ✚ Le système « multi pointes – plan » à l'avantage de pouvoir contrôler la répartition des

Décharges le long de l'écoulement

Plusieurs géométries de répartition d'électrodes sont aussi possibles : En forme de hérisson, en alignement de dents de scie, en brosse sur une surface, etc. De plus, des paramètres de réglage supplémentaires apparaissent, par exemple la densité des pointes, leur positionnement le long de l'écoulement ou leur rayon de courbure [1].

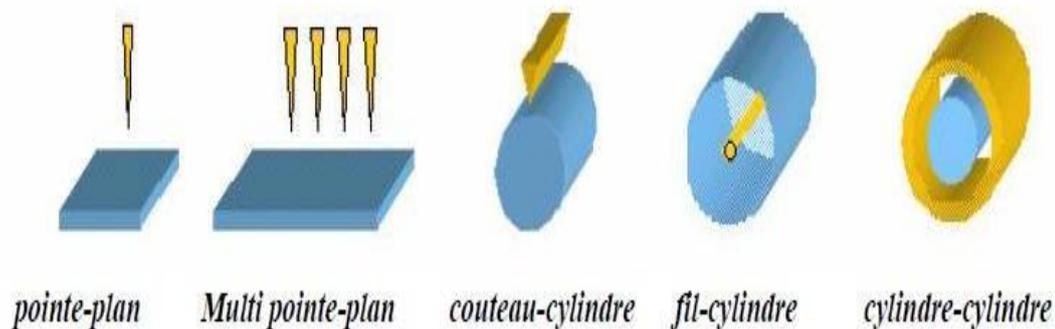


Figure I-12 Différents systèmes d'électrodes couramment utilisées pour générer les décharges couronnes [1].

I.15 Quelques applications de la décharge Couronne

La décharge couronne, un phénomène électrique, est devenue une technique largement utilisée dans une multitude d'applications, en particulier dans le domaine de la physico-chimie. Ses applications diverses incluent :

- Le traitement des surfaces, où elle est employée pour nettoyer et modifier la chimie des surfaces, améliorant ainsi leur adhérence et leur réactivité.
- La dépollution des gaz, un processus crucial pour éliminer les effluents toxiques présents en faible concentration dans des volumes considérables de milieux gazeux, comme les gaz d'échappement des véhicules ou les fumées industrielles.
- La fabrication d'ozone, réalisée à partir d'une production intense d'oxygène ou d'air sec, un processus essentiel dans de nombreuses applications industrielles et environnementales.
- La production de plasma, une forme d'énergie ionisée utilisée dans diverses technologies émergentes, ainsi que dans des applications médicales et industrielles telles que la stérilisation et le revêtement de surface.
- La séparation électrostatique des matériaux, un procédé important dans le recyclage et la purification, permettant de trier les matériaux conducteurs des matériaux non conducteurs en fonction de leurs propriétés électriques.

Ces différentes applications témoignent de l'importance croissante de la décharge couronne dans divers domaines scientifiques et industriels, offrant des solutions innovantes pour des défis complexes de notre époque [6].

I.16 Conclusion

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les plasmas électriques, en termes de définition et de grandeurs caractéristiques les plus importantes, les différents types de plasma, y compris le plasma froid, et en particulier la décharge de couronne. Nous avons exposé quelques applications de la décharge couronne et le mécanisme de décharge couronne.



CHAPITRE II

Traitement des fumées et des gaz toxique

II .1 Introduction

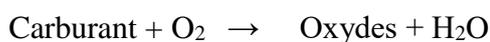
Les émissions provenant de la combustion des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel,...), comprennent des oxydes gazeux (les oxydes d'azote (NOx) et de soufre (SOx),...), des gaz carboniques (COx), ainsi que d'autres composants volatils (COV). Ces substances résultent de différents processus industriels et constituent les polluants les plus nocifs qui nous entourent dans notre environnement proche. Elles causent d'énormes problèmes écologiques, environnementaux et sanitaires graves, tels que les pluies acides, l'effet de serre, ainsi que plusieurs problèmes de santé comme les cancers, les maladies cardio-respiratoires et les irritations respiratoires. Il est donc indispensable de chercher des solutions radicales pour éliminer définitivement ces polluants ou les traiter afin de minimiser leurs impacts. Plusieurs solutions et remèdes ont été proposés, dont beaucoup sont relativement efficaces. Cela passe par l'amélioration des méthodes déjà existantes, telles que les différents catalyseurs chimiques et à membrane, et surtout par la proposition de nouvelles techniques innovantes, telles que les précipitant électrostatiques et le traitement par des filtres à plasma électrique. Dans ce chapitre, nous détaillons ce problème de pollution, ses effets et ses impacts, ainsi que les différentes méthodes de traitement classiques et innovantes.

II .2 Pollution, types et nature

Les activités industrielles, notamment celles qui utilisent des procédés de traitement réactionnel, chimique, thermique et d'incinération, rejettent différentes sortes de polluants nocifs et toxiques affectant à la fois l'environnement et la santé humaine. Nous présentons dans ce qui suit ces différents polluants selon leur type, leur source et leur nature [11].

II .2.1 Les pollutions gazeux

Les polluants de nature gazeuse proviennent dans la plupart des cas des processus d'incinération (usines, automobiles, incinérateurs de déchets, etc.) et en particulier de la combustion des carburants tels que le charbon, le pétrole et le gaz. Une réaction chimique d'incinération se déroule en présence d'oxygène, menant à la formation d'oxydes (tels que les oxydes d'azote, de soufre, de carbone) et de l'eau, selon l'équation réactionnelle suivante :



L'oxyde résultant dépend de la composition de la matière première réactive (minérale, organique, ou d'autres). Pour les polluants gazeux issus des incinérations, on distingue généralement les oxydes carboniques (COx) et les oxydes minéraux (NOx, SOx, ...).

II .2.1.1 Les oxydes carboniques

Dans la plupart des cas, ces oxydes carboniques proviennent de la combustion d'hydrocarbures. La combustion est un processus où un carburant, comme les hydrocarbures, réagit avec l'oxygène pour produire de la chaleur. Lorsque la combustion est complète, elle génère du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau (H₂O). Cependant, il peut y avoir une combustion incomplète, [12].ce qui entraîne la formation de suie. Au départ, les produits de combustion incluent le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), l'hydrogène (H₂) et l'eau (H₂O), ainsi que des composés plus complexes. Avant que les particules de suie ne se forment, des chaînes d'hydrocarbures complexes peuvent apparaître [15]. Les systèmes d'injection modernes améliorent le mélange de l'air et du carburant pour réduire les irrégularités dans la chambre de combustion. Malgré cela, des zones avec du carburant non brûlé et de l'oxygène peuvent encore exister. Il est difficile d'obtenir une combustion complètement propre des hydrocarbures. Bien que les avancées des 30 dernières années aient réduit les émissions de CO₂ et amélioré l'efficacité des incinérateurs, certains polluants sont encore trop élevés.

II .2.1.2 Monoxyde de carbone et dioxyde de carbone (CO, CO₂)

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore et inodore, ce qui le rend difficile à détecter sans équipement spécialisé. Il est couramment émis par les véhicules, les poêles à gaz naturel, et d'autres sources.



Une combustion incomplète, peu importe le type de combustible, génère du CO en grandes quantités. Lorsque le CO est exposé à l'oxygène (O₂), il s'oxyde pour former du dioxyde de carbone (CO₂), qui est un gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique.



Les émissions de CO sont réduites lorsque la combustion se fait dans un environnement riche en oxygène, ce qui favorise la conversion complète du CO en CO₂. Les catalyseurs d'oxydation, conçus pour transformer le CO en CO₂, sont efficaces, mais leur performance diminue à basse température.



En conséquence, environ 80 % des émissions de CO et d'hydrocarbures se produisent avant que le catalyseur atteigne sa température de fonctionnement optimale.

II .2.2 pollutions non-carboniques

On peut citer comme oxydes gazeux non carboniques les NO_x, le SO₂, le monoxyde de chlore (ClO) et les oxydes de phosphore. Les NO_x (comme le NO et le NO₂) proviennent principalement de la combustion des combustibles fossiles dans les moteurs de véhicules, les centrales électriques et les industries lourdes. Le dioxyde de soufre (SO₂) est généré principalement par la combustion du charbon et du pétrole, ainsi que par les raffineries. Le monoxyde de chlore (ClO) résulte de réactions atmosphériques impliquant des chlorofluorocarbures (CFC), tandis que les oxydes de phosphore proviennent de processus industriels comme la fabrication d'engrais.

Ces oxydes sont de puissants oxydants et peuvent être toxiques même à faibles concentrations. Dans ce qui suit, nous détaillons les deux oxydes les plus dangereux, en particulier pour la santé humaine : l'oxyde d'azote et l'oxyde de soufre [13].

II .2.2.1 Oxydes d'azotes

Les oxydes d'azote sont des composés chimiques contenant de l'azote et de l'oxygène, et ils se présentent sous plusieurs formes. Parmi ces formes :

1. Monoxyde d'azote (NO) : C'est la forme la plus simple d'oxyde d'azote, incolore et inodore.
2. Dioxyde d'azote (NO₂) : Ce composé a une couleur brun rougeâtre et une odeur perceptible.
3. Trioxyde de diazote (N₂O₃)
4. Tétraoxyde de diazote (N₂O₄): Ce dernier est un dimère du dioxyde d'azote (NO₂) et est diamagnétique. Le NO₂, quant à lui, est paramagnétique.
5. Pentoxyde de diazote (N₂O₅) : C'est la forme la plus oxydée de l'azote.

Protoxyde d'azote (N₂O) : C'est le quatrième gaz à effet de serre en importance après la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). Il a une capacité de rétention thermique environ 300 fois supérieure à celle du CO₂.

Les oxydes d'azote (NO et NO₂) sont des gaz irritants pouvant pénétrer profondément dans les voies respiratoires, se lier à l'hémoglobine, et causer des problèmes respiratoires, voire une asphyxie interne.

Ces oxydes sont de puissants oxydants et peuvent être toxiques même à faibles concentrations. Ils contribuent également à la formation de l'ozone, aux pluies acides, au smog et à l'aggravation de l'effet de serre. Le monoxyde d'azote (NO) se forme principalement lors des combustions à haute température, telles que celles dans les moteurs à explosion, les fours de cimenterie, ou l'incinération des déchets. Sa formation est maximale à des températures de flamme élevées.

Environ 90% des NO_x émis par les moteurs sont sous forme de NO, qui s'oxyde ensuite en NO₂ au contact de l'air. Cette réaction est relativement lente et dépend des conditions atmosphériques telles que le rayonnement, l'humidité et la température [14][16].

II .2.2.2 Oxydes de soufre

Le SO₂ est un gaz irritant pour les muqueuses respiratoires. À des concentrations élevées, il peut provoquer des problèmes respiratoires, des bronchites, et des troubles cardiaques. Lorsque le SO₂ se combine avec l'humidité de l'air, il se transforme en acide sulfurique, contribuant ainsi aux pluies acides. Les pluies acides peuvent avoir des effets néfastes sur les sols, les plans d'eau, et les écosystèmes en général, et sont souvent exacerbées par les oxydes d'azote (NO_x). Lors de la combustion des combustibles fossiles, les impuretés soufrées se combinent avec l'oxygène pour produire du SO₂.

Depuis 2005, des réglementations et des taxes ont poussé les producteurs de carburants à réduire la teneur en soufre des combustibles, comme le diesel à faible teneur en soufre. En conséquence, les émissions de SO₂ respectent généralement les normes établies à l'échelle internationale. Malgré ces réglementations, des problèmes subsistent, notamment lorsque le SO₂ réagit avec l'eau contenue dans les gaz d'échappement. Cette réaction est accentuée par les catalyseurs d'oxydation modernes, ce qui peut produire des sous-produits nuisibles qui contaminent ou détériorent les filtres et les catalyseurs, réduisant ainsi leur efficacité [17].

II .2.3 Autres polluants gazeux

Il existe d'autres polluants gazeux non carboniques tels que l'ozone (O₃), l'hydrogène, l'azote (N₂) et d'autres, qui présentent des degrés variés de nocivité. Nous parlerons exclusivement de l'ozone, qui est un gaz triatomique considéré à la fois comme un élément actif à très faibles concentrations et comme un polluant très actif à des concentrations relativement élevées.

L'ozone, représenté par la formule O_3 , est un gaz toxique de couleur bleutée avec une odeur distincte. Dans la stratosphère, à une altitude variant de 19 à 30 kilomètres au-dessus de la Terre, il forme la couche d'ozone. Ce gaz joue un rôle crucial en filtrant les rayons ultraviolets (UV) qui pénètrent dans l'atmosphère grâce à un processus naturel. En revanche, lorsque l'ozone se trouve dans les couches inférieures de l'atmosphère, appelées troposphère, il peut devenir nuisible.

À des concentrations élevées, il peut causer des lésions graves aux tissus respiratoires et pulmonaires. La Figure II.1 montre les mécanismes de production d'ozone à partir de la photodissociation du NO_2 [6].

II.2.3.1 L'hexafluorure de soufre (SF_6)

L'hexafluorure de soufre (SF_6) est un gaz synthétique largement utilisé dans le domaine de l'électrotechnique, principalement en tant qu'isolant électrique dans les équipements haute tension. Sa structure chimique, avec six atomes de fluor entourant un atome de soufre, lui confère une stabilité remarquable, ce qui en fait un excellent choix pour prévenir la formation d'arcs électriques.

En raison de ses propriétés isolantes exceptionnelles, le SF_6 est employé dans des dispositifs tels que les disjoncteurs et les transformateurs de puissance. Cependant, il est important de noter que ce gaz a un potentiel de réchauffement climatique 23900 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO_2), ce qui soulève des préoccupations environnementales majeures.

Pour cette raison, son utilisation est strictement réglementée par des lois visant à limiter les émissions dans l'atmosphère. Des formations spécifiques sont requises pour les professionnels manipulant ce gaz afin d'assurer une gestion sécurisée et durable. Malgré ces défis, des recherches sont en cours pour valoriser le SF_6 et développer des méthodes permettant de le transformer en composés utiles, réduisant ainsi son impact environnemental. En résumé, bien que le SF_6 soit un outil essentiel dans l'industrie électrique, sa gestion responsable est cruciale pour minimiser ses effets néfastes sur le climat [8].

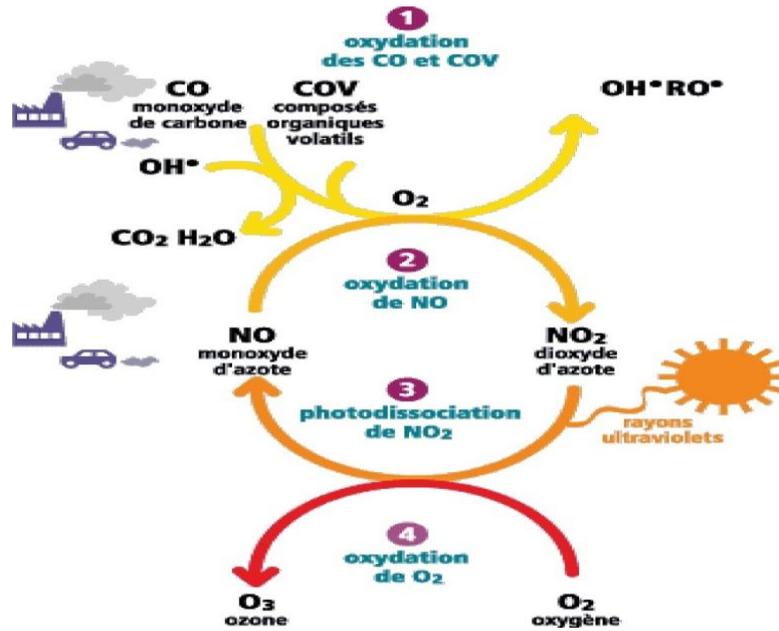


Figure II.1 Mécanisme simplifié de la formation de l'ozone dans l'atmosphère sous l'influence de la présence de NOx et de COV [6]

II.3 Les pollutions particulaires

Classification des Particules:

Les particules polluantes sont classifiées selon leur taille :

- ✚ PM10: Particules ayant un diamètre inférieur à 10 micromètres (μm).
- ✚ PM2.5 : Particules ayant un diamètre inférieur à 2,5 μm .
- ✚ PM1 : Particules ayant un diamètre inférieur à 1 μm .

Plus les particules sont petites, plus elles ont la capacité de pénétrer profondément dans les voies respiratoires et d'atteindre les alvéoles pulmonaires. Les particules plus grandes sont généralement filtrées par les voies respiratoires supérieures et expulsées plus facilement.

Les particules fines (PM2.5 et PM1) sont particulièrement préoccupantes car elles peuvent atteindre les parties les plus profondes des poumons et être absorbées par l'organisme, ce qui peut entraîner divers problèmes de santé. Les particules plus grosses sont généralement moins dangereuses car elles sont capturées par les voies respiratoires supérieures.

Les moteurs diesel sont une source majeure de particules, mais les moteurs à essence modernes, en particulier ceux avec injection directe, peuvent également produire ces particules. Pour réduire les émissions, les véhicules sont souvent équipés de filtres à

particules. La combustion avec un excès d'air est couramment utilisée pour réduire les émissions de CO₂, mais elle peut augmenter les émissions de NO_x (oxydes d'azote) et la production de particules. Ce type de combustion crée des zones pauvres en oxygène, favorisant la formation de suie. Les filtres à particules, bien que très utiles, peuvent voir leur efficacité diminuée lorsqu'ils sont combinés avec des catalyseurs d'oxydation en raison de réactions chimiques secondaires.

Il existe souvent un compromis entre la réduction des émissions de NO_x et celle des particules. Selon les réglages du moteur, une diminution des NO_x peut entraîner une augmentation des particules, et vice versa. Les moteurs modernes tentent de réduire les hydrocarbures non brûlés et les émissions de CO/CO₂, tout en cherchant à améliorer leur efficacité, mais cela peut aussi conduire à une augmentation des particules fines et des NO_x. Plusieurs méthodes de traitement des gaz d'échappement existent. Certaines sont déjà installées sur la majorité des véhicules, d'autres sont encore en développement, tandis que quelques-unes, bien qu'efficaces, ne sont pas adaptées à une utilisation sur les véhicules [7].

II .4 Effet et impact des différents polluions gazeux

Depuis l'essor de l'industrie, les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ont considérablement augmenté, entraînant des conséquences environnementales et sanitaires graves. Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) provenant des véhicules sont directement liées à leur consommation de carburant. Bien que des technologies comme les catalyseurs et les filtres aient été développées pour réduire ces émissions, leur efficacité reste insuffisante. Ainsi, la première étape pour atténuer ce problème consiste à diminuer la consommation de carburant et à améliorer l'efficacité des moteurs. Cependant, cette approche a également mis en lumière d'autres polluants, moins fréquents mais beaucoup plus nocifs que le CO₂, suscitant des inquiétudes écologiques croissantes [9].

II .4.1 Impact des polluants sur la santé humaine

Les oxydes d'azote (NO_x), les oxydes de soufre (SO_x), les hydrocarbures, l'ozone et les particules fines ont un impact direct sur la santé humaine. Ces substances sont reconnues pour réduire l'espérance de vie des personnes exposées. Les particules, principalement émises par les moteurs diesel, augmentent le risque d'infarctus cardiovasculaires, provoquent des affections respiratoires et détériorent les fonctions pulmonaires. En effet, les polluants

automobiles sont souvent cancérogènes, rendant essentielle la limitation de leurs émissions à la source.

Le monoxyde de carbone (CO) est particulièrement préoccupant car il se lie à l'hémoglobine dans le sang, remplaçant l'oxygène et empêchant son transport vers les tissus corporels, ce qui peut entraîner une intoxication grave. De plus, l'exposition à ces polluants peut provoquer des maladies chroniques telles que des cancers, des pathologies cardiovasculaires et respiratoires [10].

II .4.2 Impact des polluants sur l'environnement

La pollution de l'air ne se limite pas à la santé humaine; elle a également un impact majeur sur l'environnement. Les gaz polluants contribuent à la formation de pluies acides, qui modifient la composition chimique des sols et des eaux douces, affectant ainsi les écosystèmes [1-2]. L'accumulation de ces gaz dans l'atmosphère entraîne également des phénomènes tels que le réchauffement climatique et la diminution de la couche d'ozone. La pollution atmosphérique est responsable d'une baisse significative des rendements agricoles, avec jusqu'à 10 % de pertes estimées dans certaines cultures en raison de l'ozone. Les épisodes de pollution sont particulièrement fréquents durant les périodes chaudes et ensoleillées, exacerbant ainsi les problèmes de santé publique.

En somme, il est crucial d'adopter des mesures efficaces pour réduire les émissions de polluants atmosphériques afin de protéger à la fois la santé humaine et l'environnement. Cela inclut le développement et l'implémentation de technologies plus propres ainsi que des politiques publiques visant à limiter la pollution à sa source [18].

II .5 Méthodes de traitement des polluants gazeux

1. Oxydation thermique : Cette technique consiste à brûler les polluants organiques à haute température (entre 870 et 1200 °C) pour les convertir en gaz carbonique et vapeur d'eau. Elle est efficace pour détruire une large gamme de composés organiques volatils (COV) mais nécessite une gestion appropriée des cendres et des résidus.

2. Oxydation avancée : Utilisée pour traiter les COV, cette méthode implique plusieurs étapes, dont l'absorption dans l'eau suivie d'une oxydation par ozone et irradiation UV, permettant de décomposer efficacement les polluants en produits moins nocifs.

3. Scrubbers humides : Ces dispositifs utilisent des solutions liquides pour absorber les gaz polluants, comme le dioxyde de soufre (SO₂). Ils sont conçus pour transférer les contaminants de la phase gazeuse à la phase liquide, facilitant ainsi leur élimination.

II .6 Méthodes de traitement des particules volatiles

- 1. Filtration :** L'utilisation de filtres à haute efficacité (HEPA) ou d'électro-filtres permet de capturer les particules solides en suspension dans l'air. Ces systèmes sont cruciaux dans les installations industrielles pour réduire les émissions de particules fines.
- 2. Adsorption au charbon actif :** Cette méthode est efficace pour piéger divers polluants, y compris certains COV et particules inorganiques, grâce à la surface absorbante du charbon actif.
- 3. Neutralisation chimique :** Pour les particules acides ou basiques, des agents neutralisants comme le bicarbonate de sodium ou la chaux sont utilisés pour réduire la toxicité avant leur élimination.

II .7 Filtres classiques

Le filtre classique des effluents gazeux est un dispositif crucial pour éliminer les polluants des émissions industrielles avant leur rejet dans l'atmosphère. Il fonctionne principalement par adsorption, utilisant souvent du charbon actif pour capturer les particules nocives. Ces filtres peuvent être adaptés à différents débits et types de gaz, selon les besoins spécifiques de chaque industrie. En plus de l'adsorption, des méthodes comme la filtration par bio-filtre peuvent également être employées pour traiter les composés organiques volatils. L'efficacité du filtre dépend de la nature des polluants et de la conception du système de filtration.

On peut diviser ces filtres en deux principaux types, à membrane et chimique catalyseur [19].

II .7.1 Filtre à membrane

Le filtre à membrane est un dispositif de séparation physique utilisé principalement pour purifier, fractionner ou concentrer des liquides. Composé de pores micro-dimensionnés,

il permet de retenir les particules plus grandes qu'une certaine taille tout en laissant passer les liquides ou les gaz. Il existe plusieurs types de filtration membranaire, tels que la microfiltration, l'ultrafiltration et l'osmose inverse, chacun ayant des applications spécifiques dans des domaines variés comme l'alimentation, la biotechnologie et la pharmacie. Les membranes peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux, comme le poly-sulfone et le polyéther sulfone, et leur efficacité dépend de la taille des pores et des conditions d'utilisation. Ce procédé est particulièrement utile dans des situations où la stérilisation par chaleur n'est pas possible, garantissant ainsi une purification efficace des fluides.

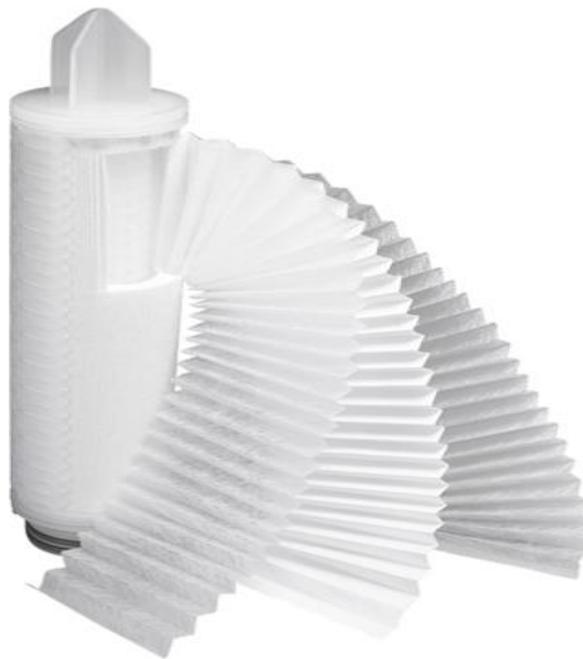


Figure II.2 Présente un modèle de filtre à membrane

II .7.2 Filtre catalyseur chimique

Le filtre catalyseur chimique pour traiter les effluents gazeux est un dispositif clé dans le contrôle des émissions polluantes des installations industrielles. Ce type de filtre utilise des catalyseurs pour favoriser des réactions chimiques qui transforment les polluants en substances moins nocives, souvent par oxydation. Par exemple, des catalyseurs spécifiques peuvent être utilisés pour convertir l'hydrogène sulfuré en anhydride sulfureux, réduisant ainsi les émissions de composés soufrés dans l'atmosphère [2]. Les filtres à catalyseur sont souvent intégrés dans des systèmes de traitement plus larges, comprenant également des étapes de filtration et de lavage, afin d'optimiser l'élimination des particules solides et des gaz acides [1]. Grâce à leur efficacité et à leur capacité à fonctionner à des températures élevées, ces filtres jouent un rôle essentiel dans la réduction de l'impact environnemental des activités industrielles.

II .7.3 Filtre hybride à membrane et catalyseur chimique

Le filtre hybride à membrane et catalyseur chimique combine les technologies de filtration membranaire et de catalyse pour traiter efficacement les effluents gazeux. Ce système utilise une membrane pour séparer les particules et les polluants, tandis que le catalyseur favorise des réactions chimiques qui transforment les contaminants en substances moins nocives. Cette approche permet d'atteindre des niveaux élevés de purification tout en réduisant les coûts énergétiques et en minimisant l'impact environnemental [19]. Les membranes peuvent être conçues pour différentes tailles de pores, optimisant ainsi la sélectivité du traitement selon la nature des polluants. En intégrant ces deux technologies, le filtre hybride offre une solution innovante et efficace pour le contrôle des émissions industrielles.

II .8 Filtre à Plasma pour le traitement des effluents gazeux

Le filtre à plasma est une technologie innovante utilisée pour purifier l'air en désactivant les polluants et en éliminant les odeurs. Contrairement aux filtres traditionnels qui se contentent de capturer les particules, le filtre à plasma fonctionne par ionisation, décomposant les molécules nuisibles à l'échelle moléculaire. Cette méthode permet de traiter efficacement les différents oxydes toxiques tels que les oxydes nitriques NO_x , les oxydes de soufre SO_x , ainsi que les composés organiques volatils (COV) et d'autres contaminants présents dans l'air intérieur, comme le formaldéhyde et le toluène, en les transformant en substances moins nocives telles que le dioxyde de carbone et l'eau. Le plasma est généré grâce à un apport d'énergie, souvent sous forme d'une décharge couronne filamenteuse ou diffuse dans un milieu gazeux, ce qui active le processus de purification. Ce type de filtre est généralement installé après la source d'échappement, d'une hotte d'aspiration ou dans des systèmes de ventilation, nécessitant une alimentation électrique pour son fonctionnement [3].

Les applications du filtre à plasma vont au-delà de la simple purification de l'air. Dans le secteur automobile, Ces systèmes utilisent un flux de plasma créé par des électrodes pour traiter les gaz d'échappement, contribuant ainsi à améliorer le bilan carbone des véhicules. De plus, la technologie de catalyse plasma permet également de valoriser le dioxyde de carbone en méthane propre, offrant une solution potentielle pour la gestion des émissions de CO_2 . L'efficacité du filtre à plasma est remarquable : il peut traiter jusqu'à 100 % des fumées en quelques minutes, rendant cette technologie particulièrement adaptée aux environnements où la qualité de l'air est cruciale.

Les avantages du filtre catalyseur à plasma incluent non seulement son efficacité dans la purification de l'air, mais aussi sa capacité à fonctionner sans nécessiter de prétraitement complexe des impuretés. Cela réduit les coûts opérationnels par rapport aux technologies traditionnelles [3].

II .9 Conclusion

Pour conclure ce chapitre sur la pollution et son traitement, il est crucial de reconnaître l'ampleur des défis environnementaux auxquels nous faisons face aujourd'hui. Les émissions provenant de la combustion de combustibles fossiles, notamment les oxydes d'azote (NO_x), de soufre (SO_x) et le dioxyde de carbone (CO₂), ainsi que l'ensemble des COV, constituent une menace sérieuse pour la santé humaine et les différents écosystèmes. Ces polluants sont responsables d'énormément problèmes tels que les pluies acides, le réchauffement climatique et diverses maladies respiratoires.

Il est impératif d'explorer des solutions innovantes et efficaces pour réduire ces émissions. Les méthodes traditionnelles, bien qu'efficaces, doivent être complétées par des technologies émergentes telles que les filtres à plasma électrique. En adoptant une approche multidimensionnelle qui combine réglementation stricte, innovation technologique et sensibilisation du public, nous pouvons espérer atténuer l'impact de la pollution sur notre environnement.

Dans le troisième chapitre qui va suivre on présentera notre contribution à travers une nouvelle conception d'un filtre à plasma conçu et destiné pour le traitement des différent effluents gazeux toxiques.

CHAPITRE III

Étude de conception d'un filtre
à plasma électrique multi
pointes-plans

III.1 Introduction

La technologie des filtres plasma est l'une des solutions modernes pour traiter les polluants gazeux dans l'air. La pollution industrielle, résultant de gaz toxiques tels que les oxydes d'azote (NOx) et les composés organiques volatils (COV), représente un défi environnemental et sanitaire majeur. Pour faire face à ce problème, plusieurs solutions ont été proposées et mises en œuvre au fil du temps.

Les méthodes dites classiques, telles que les filtres chimiques ou mécaniques à membranes, ont été utilisées au début, mais elles présentent des problèmes sérieux liés aux coûts et à l'efficacité. Il est donc nécessaire de développer des solutions avec des technologies innovantes, plus efficaces et moins coûteuses, pour traiter ces pollutions et se conformer aux normes et législations environnementales imposées. La technologie des filtres à plasma est l'une des contributions pratiques décrites dans ce chapitre. Elle présente une conception d'un filtre à plasma électrique généré par une décharge couronne sous une configuration géométrique multi pointes-plan, très facile à mettre en œuvre. Le filtre à plasma avec ce design offre une grande flexibilité et intégrabilité en exploitation, allant des petits processus à de plus grandes chaînes industrielles.

Ce chapitre présentera d'abord le principe de base du fonctionnement pratique de notre filtre, puis il analysera différents aspects de la conception du filtre à plasma multipointes-plan, y compris les aspects techniques, la faisabilité économique et les tests de performance dans des environnements industriels.

III.2 Principe de base pratique du filtre a plasma proposé

Les filtres à plasma électrique que nous avons proposés sont basés sur l'exploitation de la réactivité chimique d'une décharge couronne générée sous une configuration géométrique pointes plan, en interaction avec les molécules toxiques de différents types d'effluents gazeux, selon l'équation simplifiée de la réaction suivante :

Radical de décharge + molécule gazeuse polluante = molécules saines.

La conception pratique repose sur un réacteur qui regroupe une matrice de points métalliques face à une plaque métallique, avec ou sans barrière diélectrique, le tout placé dans une enceinte hermétique. Ce dispositif comprend une entrée pour l'admission du gaz polluant et un système pour le gaz traité [19].

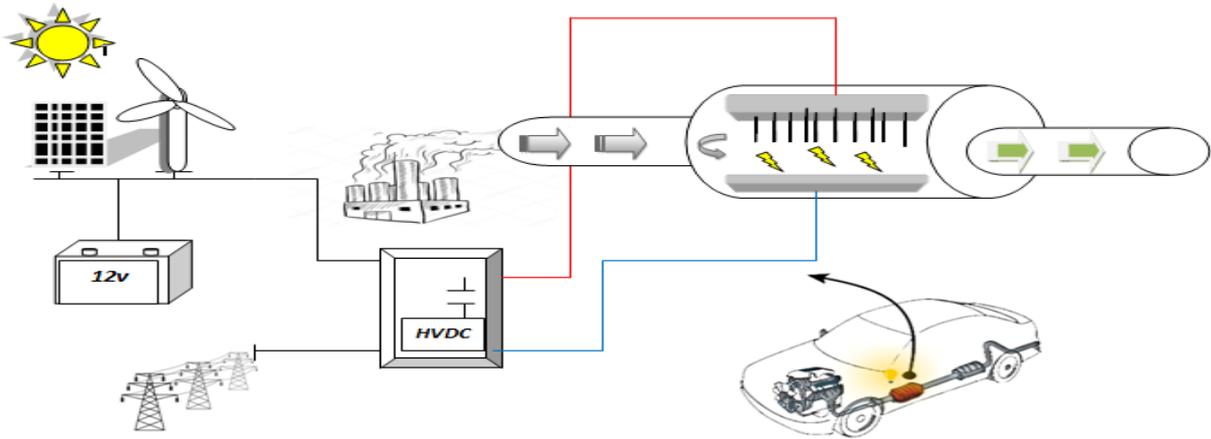


Figure III.1 Schéma simplifié du filtre à plasma proposé.

III.3 Éléments constitutifs d'un filtre à plasma

La conception proposée comprend plusieurs parties différentes. Elle comporte donc comme éléments principaux : le réacteur de traitement, la source d'alimentation électrique, le générateur de plasma, l'espace de traitement, et une unité complémentaire probable pour la valorisation des produits traités. Ces éléments seront présentés en détail pour comprendre leur constitution, leur rôle et leur principe de fonctionnement.

III.4 Générateur plasma

On vise par ce terme la configuration géométrique dans laquelle la décharge électrique de type couronne se produit. Cette configuration se compose de deux électrodes de différents rayons de courbure, séparées par un espace inter électrode où se propage une impulsion de décharge lorsque cette dernière est mise sous tension, capable de la provoquer sous certaines conditions. Ces conditions sont généralement un niveau de tension appliqué et une distance inter-électrodes appropriée.

III.5 Formation du Plasma

Le plasma est généré à l'intérieur du filtre à l'aide d'une décharge électrique. Cette décharge crée un environnement riche en espèces réactives telles que les radicaux, les ions et les électrons, essentiels pour les processus de décomposition des polluants.

Le principe général de la création de la décharge est déjà exposé au premier chapitre.

III.6 Mécanisme de fonctionnement du filtre

III.6.1 Capture, acheminement et admission des polluants

Les effluents gazeux sont capturés dès leur création à partir du processus industriels aspirés généralement à l'aide des turbines puis s'acheminent à travers des conduits où ils sont admis au sein des filtres pour être traités

III.6.2 Création de milieu plasma réactif

À l'intérieur du filtre une décharge couronne sera générée à travers le réacteur multi pointes plan pour l'établissement d'un milieu plasma réactif riche par les différents radicaux actifs qui vont réagir avec les molécules du polluant les gaz sont ionisés par la décharge électrique, formant un plasma. Les espèces réactives telles que les radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$) et les ions oxygène (O^-) réagissent avec les polluants.

III.6.3 Décomposition et conversion des polluants

Les polluants sont convertis à des substances seins après quels soient décomposés et passé en une série de réaction primaires intermédiaire avant de se convertissent à une forme non polluante et non toxique généralement des acides qui peuvent être valorisés même, suite à des réactions secondaires avec des substances basiques pour produire des sels minéraux exploitables par exemple en agriculture comme des fertilisants.

Le produit résultant devra être moins nocifs ou inertes dont par exemple, les composés organiques volatils (COV) peuvent être oxydés en dioxyde de carbone (CO_2) et en eau (H_2O), tandis que les oxydes d'azote (NO_x) peuvent être réduits en diazote (N_2) et en oxygène (O_2).

III.7 Implantation du filtre à plasma

Les filtres à plasma conçus peuvent être utilisés dans diverses applications industrielles telles que la dépollution des gaz d'échappement des centrales électriques, des

usines chimiques et des installations d'incinération et de traitement des déchets. Ils sont également exploités pour leur potentiel d'élimination des molécules gazeux toxiques dans la purification de l'air intérieur des espaces fermés.

III.8 Performances du filtre plasma proposé

- ❖ Efficacité de Dépollution : Les filtres à plasma offrent une efficacité élevée dans l'élimination des polluants, y compris ceux à faible concentration.
- ❖ Flexibilité et Sélectivité : Ils peuvent être adaptés pour cibler spécifiquement certains polluants en ajustant les paramètres de décharge.
- ❖ Réduction des Déchets : Les produits de décomposition peuvent souvent être réutilisés ou retraités et valorisés.
- ❖ Maniabilité et intégrabilité dans les différents endroits et installations dynamiques et statiques

III.9 Approvisionnement énergétique du filtre

Le coût énergétique de n'importe quel système électrique est un facteur important pour valoriser ce dernier. Pour notre filtre nous suggérons une large gamme de sources d'alimentation centralisées ou autonomes, renouvelables ou non renouvelables et même hybrides. Le paramètre essentiel est le moindre coût énergétique et une grande flexibilité et autonomie en approvisionnement.

III.10 Sources d'alimentation

On peut alimenter notre filtre par une source centralisée à partir du réseau public ou autonome à partir d'une source renouvelable telle que l'énergie solaire photovoltaïque, non renouvelable telle que les groupes électrogènes et même hybride qui regroupe plusieurs sources de celles précitées.

III.11 Types d'alimentation

Le type d'alimentation dépend strictement de la décharge couronne générée au sein du réacteur de traitement à plasma. Comme est déjà cité au premier chapitre une décharge couronne peut être générée sous une tension continue, impulsionnelle, alternative, ou même variable en général. Pour l'alimentation variable sa forme est définie et contrôlée par un générateur de fonction à base de circuit électronique.

III.11.1 Utilisation de la tension continue

La tension continue est moins utilisée pour le traitement des gaz, pour plusieurs raisons :

- Une partie de l'énergie est utilisée pour déplacer des particules, ce qui n'est pas idéal pour le traitement.
- À pression normale, les tensions nécessaires pour déclencher les effets de couronne et l'arc sont similaires qui peut endommager les électrodes.
- Les systèmes à tension continue ne peuvent pas bien utiliser les barrières diélectriques, ce qui est important pour contrôler le champ électrique.

Lorsque des décharges apparaissent, la tension chute, et les générateurs peuvent ne pas réagir assez rapidement pour maintenir le plasma.

Les générateurs de tension sont simples et incluent des étapes pour transformer et stocker l'énergie. Il est important d'utiliser des dispositifs pour protéger contre les courts-circuits. Les plasmas générés par tension continue ont un faible courant, et les décharges peuvent se concentrer trop près des électrodes, ce qui limite l'efficacité. Si la tension augmente trop, cela peut créer des courts-circuits, entraînant des dommages et rendant le traitement des gaz inefficace [6].

III.11.2 Utilisation de la source impulsionnelle

Les sources de tension impulsionnelles ont été développées pour générer des décharges électriques rapidement, permettant de court-circuiter un espace de 1 cm en environ 100 nanosecondes, ce qui entraîne des décharges avec des énergies beaucoup plus élevées que celles des couronnes continues. Une alimentation haute tension peut être conçue pour produire des impulsions très courtes, mais la répétabilité de ces impulsions à des fréquences adaptées est plus délicate. Ces sources permettent de créer des décharges homogènes à pression atmosphérique ; plus le champ électrique est fort, plus l'énergie des électrons est élevée, ce qui favorise des modifications moléculaires. Cependant, des niveaux d'énergie très élevés ne sont pas toujours souhaitables, notamment pour le traitement des NOx, car une énergie excessive peut entraîner la production de NO par des réactions indésirables, rendant essentiel que la décharge reste non-thermique. Des temps de montée et de descente très courts améliorent les performances, bien que produire des signaux carrés parfaits soit technologiquement difficile.

Une amplitude de tension d'au moins 8 kV est nécessaire. Le courant pendant une impulsion peut atteindre jusqu'à 8,85 A, ce qui nécessite des systèmes de stockage et de commutation pour éviter les dommages. Enfin, lors d'impulsions très courtes, les ions et les neutres restent presque immobiles par rapport aux électrons, ce qui signifie que ces derniers possèdent une énergie beaucoup plus élevée, un facteur important pour générer des radicaux libres, rendant les impulsions bénéfiques pour le traitement des NOx, malgré la complexité des dispositifs requis [15].

III.11.3 Utilisation de l'espace d'arc

Les éclateurs à gaz fonctionnent comme des interrupteurs, utilisant un arc électrique pour établir une connexion entre deux électrodes lorsque la tension atteindra un certain seuil. Ce processus est influencé par la distance entre les électrodes et le type de gaz utilisé. Par exemple, un modèle de rotary spark gap (RSG) a été développé, composé d'un cylindre en PVC et d'électrodes métalliques qui génèrent des impulsions de 10 à 100 kV. À une vitesse de rotation de 6000 tr/min, la fréquence des impulsions peut atteindre théoriquement 400 Hz. Cependant, en pratique, la fréquence est souvent plus basse. Le réacteur se comporte comme un condensateur, et la tension reste élevée sans retour à zéro, nécessitant des ajustements pour produire des impulsions efficaces. Un autre générateur a été conçu avec une configuration similaire mais permet de modifier la pression de l'enceinte des éclateurs, ce qui influence les caractéristiques des impulsions. Malgré ces avancées, le RSG ne peut pas encore être utilisé avec des réacteurs à barrière diélectrique, car cela entraîne des défis de retour à zéro de la tension et de propagation des décharges [6]

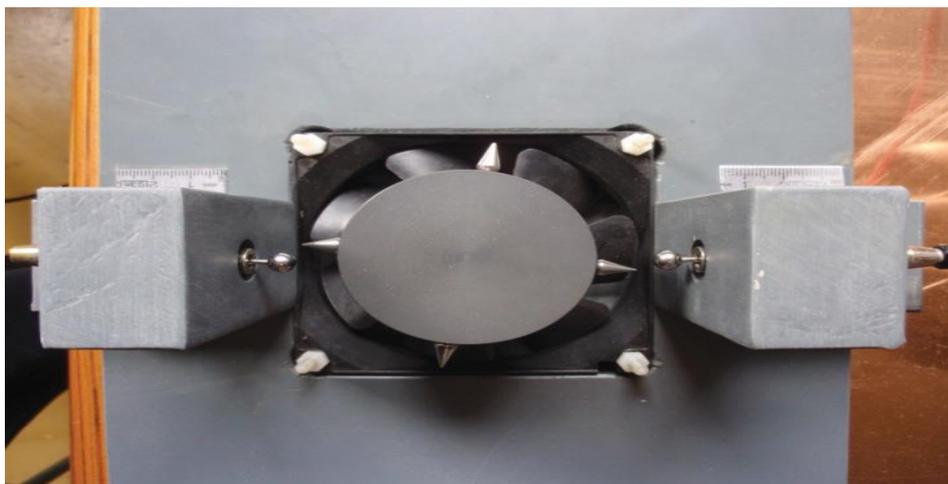


FIGURE III.2 éclateur à gaz - 250 Hz [6]

III.11.4 Utilisation d'une source variable impulsionnelle

Les caractéristiques des sources de tension impulsionnelles basées sur des semi-conducteurs de puissance dépendent principalement des technologies utilisées. Il ya beaucoup types de semi-conducteurs, notamment les diodes dans des ponts redresseurs, qui peuvent générer des impulsions, bien que leur claquage inverse soit incontrôlable. Les thyristors sont souvent utilisés pour leur robustesse, mais d'autres semi-conducteurs comme les MOSFET et les IGBT offrent des avantages en rapidité et en capacité de courant. Pour générer des impulsions en haute tension, des solutions comme l'association en série de thyristors basse tension sont envisagées, mais nécessitent un déclenchement simultané pour éviter des risques de claquage. Un système développé utilise des thyristors en série pour créer des impulsions de 9 à 20 kV, mais des défis tels que des décharges parasites et des temps de réamorçage trop longs limitent la répétabilité des impulsions. Des techniques comme l'immersion dans un milieu diélectrique peuvent aider à contrôler les décharges. De plus, de nouveaux matériaux comme le carbure de silicium pourraient améliorer la performance des semi-conducteurs, réduisant la complexité des systèmes et ouvrant la voie à des designs innovants pour des générateurs d'impulsions de tension efficaces[7].

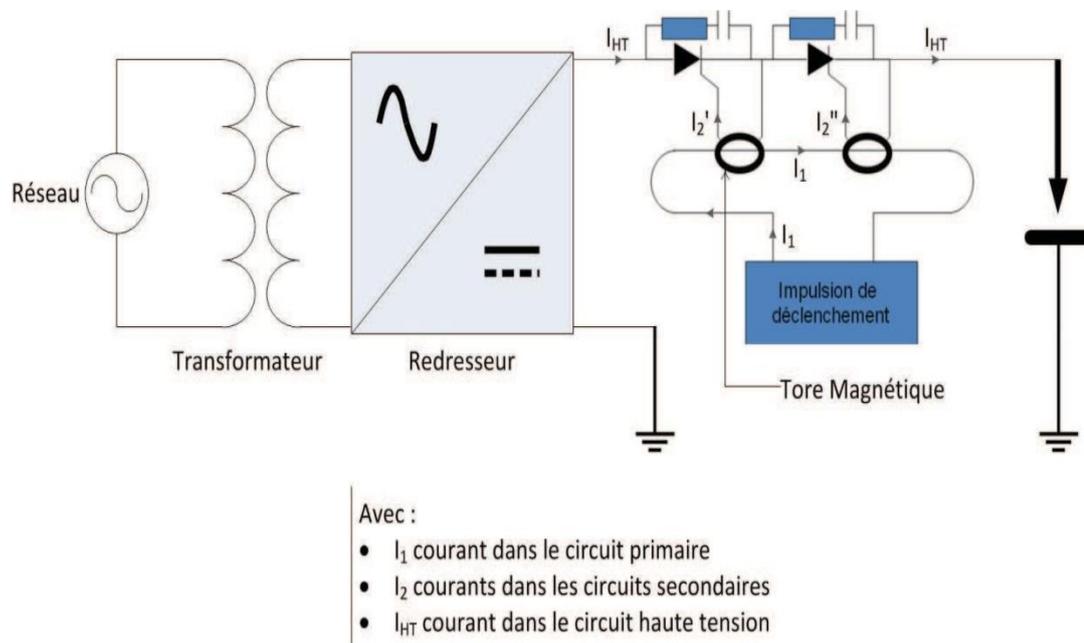


FIGURE III.3 Schéma équivalent d'un générateur d'impulsions haute tension associant en série des thyristors [6]

III.11.5 Utilisation d'une source alternative

L'utilisation d'une source alternative de tension permet une application tant à une géométrie ne comportant pas de diélectrique, qu'à une géométrie comportant un diélectrique capable de protéger du passage à l'arc de la décharge. La variation de la fréquence permet par ailleurs un réglage de la période d'apparition des décharges et de la puissance associée au traitement. Enfin, il n'y a pas de problème dans le choix de la polarité en tension alternative.

III.11.6 Source à fréquence industrielle 50 Hz

La source 50 Hz s'est révélée très utile pour identifier les points chauds des réacteurs dus à des imperfections dans la géométrie et pour déterminer si cela entravait le bon fonctionnement du réacteur. L'avantage d'un tel système est l'absence de redresseur ou d'étage intermédiaire. La tension est déjà sous la forme souhaitée, il faut intégrer Un système de protection pour éviter des densités de courant trop importantes.

III.11.7 Intégration de sources à énergie renouvelable

L'intégration de sources à énergie renouvelable, comme les panneaux solaires, dans l'alimentation des filtres plasma représente une avancée significative vers des solutions de traitement des gaz plus durables. En utilisant l'énergie solaire, on peut alimenter les systèmes de plasma sans dépendre des sources d'énergie conventionnelles, réduisant ainsi l'empreinte carbone du processus.

Les panneaux solaires convertissent la lumière du soleil en électricité, qui peut être stockée dans des batteries ou utilisée directement pour générer les impulsions nécessaires au fonctionnement du filtre plasma. Cette synergie permet non seulement de diminuer les coûts opérationnels sur le long terme, mais aussi d'améliorer l'efficacité énergétique globale du système. De plus, en couplant les panneaux solaires avec des technologies de stockage d'énergie, il est possible d'assurer un fonctionnement continu du filtre, même en l'absence de soleil, garantissant ainsi une performance fiable et constante dans le traitement des polluants.



Figure III.4 panneau solaire (source énergie renouvelable)

III.12 Chambre de traitement des fumées et des gaz toxique

Le premier schéma de réacteur réalisé (figure III.5) adapté au traitement des gaz par décharge couronne multipointes-plans

Il est constitué d'une enceinte en inox dans laquelle est installé un système d'électrodes. La cellule dispose de deux ouvertures permettant le passage de la l'injection de gaz, l'évacuation du gaz

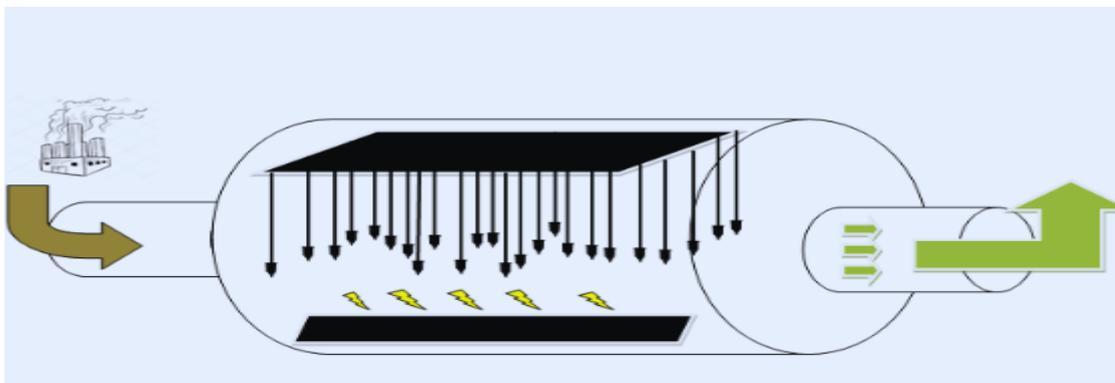


Figure III.5 filtre catalyseur

III.13 Electrodes

Elles se composent d'une anode multi-pointes et d'une cathode sous forme de plaque:

- La partie active, ou l'anode, est une matrice de pointes en tungstène sous forme de cylindre de 1 mm de diamètre et de 5 mm de longueur, avec un rayon de courbure de 25, 50 ou 100 μm . Elle est fixée sur le support d'électrode et portée à haute tension via un passage haute tension fortement isolé.

- La partie cathode est une plaque rectangulaire en cuivre dont on garde la même surface de deux électrodes en opposition. la cathode est isolée électriquement par un diélectrique et portée à la masse.

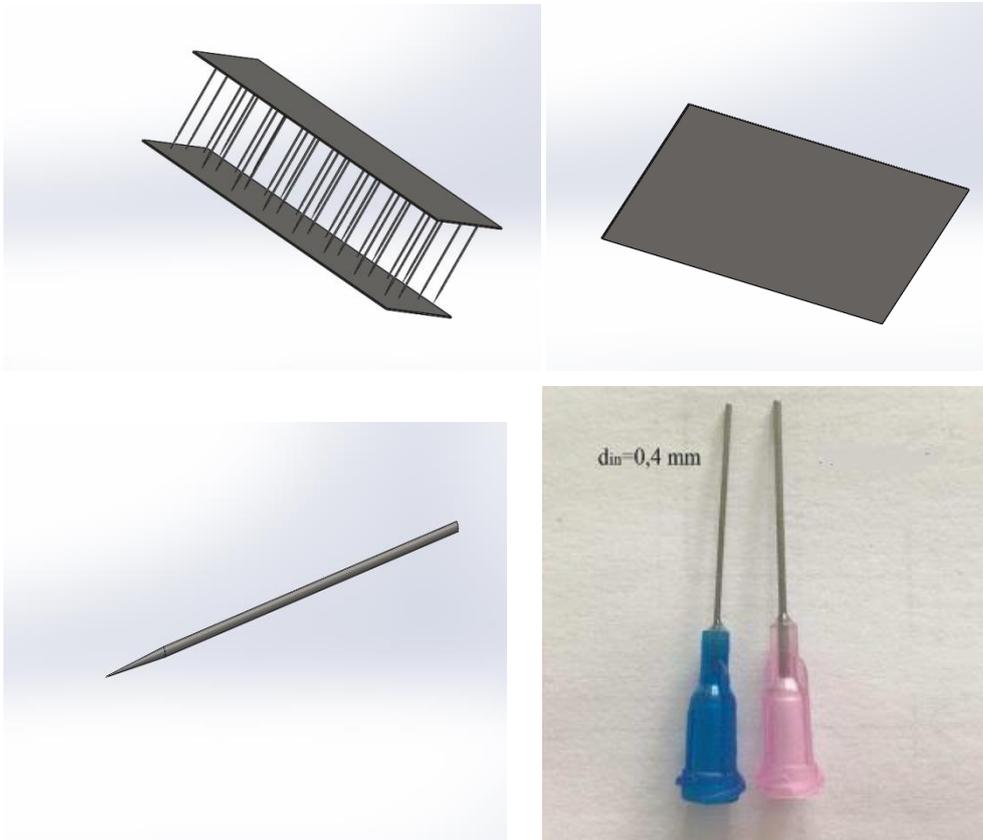


Figure III.6 Formes d'électrodes pointes et plane

III.14 Station de récupération des sédiments

Cette partie est en amant, et c'est elle qui représente l'endroit où nous récupérons les sédiments du processus de purification de l'air, constitués d'agrumes. Pour mieux valoriser ces produits nous ajoutons des liquides basiques pour produire des sels minéraux et les utilisons comme engrais.

III.15 Problèmes pré-visionnés

On peut pré-visionner quelques problèmes avant d'être rencontrés. Il s'agit par exemple de problèmes liés à l'humidité et surtout du risque de passage à l'arc électrique. Il est donc indispensable de les prévenir et de les résoudre afin d'assurer une prolongation de la durée de vie du filtre.

III.16 Problème de corrosion

Pour résoudre le problème de corrosion dans des environnements potentiellement agressifs, l'utilisation de matériaux résistants à l'oxydation, comme l'acier inoxydable, l'aluminium, ou certains alliages spécifiques, est une solution efficace. L'acier inoxydable, par exemple, contient du chrome, qui forme une couche protectrice d'oxyde de chrome en surface, empêchant ainsi la corrosion. L'aluminium, quant à lui, développe une fine couche d'oxyde naturel qui agit également comme barrière contre l'oxydation. Enfin, des alliages tels que le titane ou des alliages à base de nickel sont souvent choisis pour leur résistance accrue à la corrosion dans des conditions extrêmes, comme les environnements industriels ou marins. Ces matériaux sont essentiels pour assurer la longévité et la performance des systèmes exposés à des conditions corrosives.

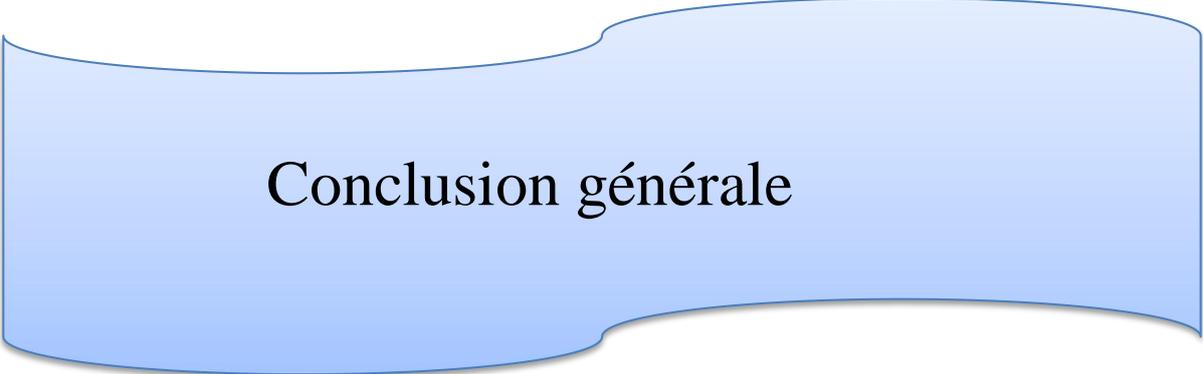
III.17 Passage à l'arc

Ce problème est déjà évoqué au premier chapitre pour les décharge couronne lors de l'augmentation de la tension d'alimentation ou delà d'un seuil donné.

Afin d'éviter ce problème au filtre nous dotons nos filtres par des couches de diélectrique empêchent ainsi le passage de la décharge vers l'arc électrique, évitant les problèmes d'impact thermiques associe a cet arc et augmentons donc l'efficacité énergétique et le rendement réactionnel de l'arc.

III.18 Conclusion

La technologie des filtres à plasma offre une solution prometteuse pour la dépollution des gaz industriels, combinant efficacité, durabilité et flexibilité. Son design innovant, basé sur une décharge couronne multi-pointes plan, permet une application et une intégrabilité à diverses échelles industrielles. Avec une grande efficacité de dépollution et une réduction optimale des déchets, cette technologie répond aux exigences environnementales croissantes. L'intégration d'énergies renouvelables et la prise en compte des défis tels que la corrosion renforcent son potentiel, ouvrant la voie à de nouvelles recherches pour améliorer ses performances et élargir son utilisation industrielle.



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié la réalisation d'un filtre à plasma créé par décharge couronne à pointes-plan pour le traitement des fumées et des gaz toxiques. Le but de cette recherche était de développer une solution efficace et durable pour réduire les émissions polluantes, tout en explorant les propriétés du plasma et les techniques de filtration avancées. À partir de ce travail, nous avons structuré nos recherches en trois principaux chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les bases théoriques du plasma, en particulier les propriétés physiques de cet état de la matière et les différents types de décharges électriques, notamment la décharge couronne. L'analyse des paramètres essentiels, tels que la densité électronique et la température des électrons, a permis de mieux comprendre le rôle du plasma dans la dépollution des gaz.

Dans le deuxième chapitre, nous avons analysé les principaux polluants industriels, tels que les oxydes d'azote (NO_x), de soufre (SO_x), et les composés organiques volatils (COV), ainsi que leurs effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Ce chapitre a également examiné les méthodes classiques de traitement, tout en mettant en évidence les avantages des filtres à plasma pour traiter ces polluants de manière plus efficace et respectueuse de l'environnement.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons développé la conception et le fonctionnement d'un filtre à plasma basé sur une décharge couronne à points-plans. Cette technologie a montré une efficacité significative dans la décomposition des polluants en substances non toxiques qui peuvent être valorisables même, avec la possibilité d'intégrer des sources d'énergie renouvelables pour renforcer la durabilité de la solution.

En conclusion, ce travail a permis de démontrer le potentiel des filtres à plasma pour le traitement des gaz toxiques et des fumées via notre conception innovante proposée. Ces filtres offrent une solution flexible pour les industries cherchant à respecter les normes environnementales. En perspectives des futures études pourraient encore optimiser cette nouvelle conception et élargir ses applications à d'autres secteurs industriels.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] RAOUTI, Driss. Contribution à l'étude de la dépollution des gaz toxiques par décharges électriques. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf, Faculté de Génie Électrique, soutenue en 2015.
- [2] DUBOIS, Diane. Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, soutenue le 20 septembre 2006.
- [3] SAIDI, Oum El Djillali. Modélisation électrique d'une décharge couronne pointe-plan impulsioneille . Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, soutenu le 09 septembre 2018.
- [4] MRAIHI, Abderrahmane. Réalisation, caractérisation et bilan énergétique de réacteurs corona mono et multi-pointes dans l'air à la pression atmosphérique pour application à la décontamination. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2012.
- [5] MEKKIOUI, Djaoued. Étude de l'évolution des espèces présentes dans un gaz pur O₂ par décharge couronne. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Faculté des Sciences, soutenu oralement le 24 juin 2018.
- [6] Yoann, Nicolas Jaffré. Optimisation de réacteurs à plasmas non-thermiques pour le traitement des oxydes d'azote, Thèse de doctorat, L'école centrale de Lyon, Octobre 2010
- [7] Dupont, Pierre. Plasma et ses applications industrielles. Paris : Éditions Scientifiques, 2020.
- [8] Martin, Claire. Définition et caractéristiques du plasma. Dans : Les états de la matière. Lyon : Éditions Universitaires, 2019.
- [9] Bernard, Julien. Formation du plasma électrique par décharge. Dans : Physique des plasmas. Marseille : Presses Universitaires, 2021.
- [10] Leroy, Sophie. Applications du plasma dans l'industrie. Toulouse : Éditions Techniques, 2022.
- [11] Garnier, Antoine. Effets des plasmas dans la dépollution. Journal de la science appliquée, 2023.
- [12] Chevalier, Alice. Polluants gazeux : Origines et impacts. Revue de l'environnement, 2021.
- [13] Lemaire, Émilie. Techniques de traitement des gaz toxiques. Technologies écologiques, 2020.
- [14] Fontaine, Marc. Innovations en filtration de l'air. Nice : Éditions Modernes, 2022.
- [15] Rousseau, Thomas. Décharges couronnes et plasma. Dans : Applications des plasmas à basse température. Bordeaux : Éditions Académiques, 2021.
- [16] Noël, Claire. Analyse des systèmes de filtration à plasma. Journal de technologie des

- plasmas, 2022.
- [17] Leroux, Sophie. Impact des gaz polluants sur la santé. Santé publique et environnement, 2020.
- [18] Delacroix, Marc. Sources d'énergie renouvelables pour le traitement des gaz. Énergies renouvelables et environnement, 2021.
- [19] Barbier, Luc. Évaluation des performances des filtres à plasma. Revue de la qualité de l'air, 2023.
- [20] Martin, François. "Caractérisation des plasmas pour le traitement des effluents. Techniques de filtration avancées, 2022.
- [21] Bernard, Camille. Développement durable et traitement des polluants. Dans : Environnement et technologie. Lille Éditions Vertes, 2021.
- [22] Renaud, Victor. Plasmas froids et leurs applications. Revue internationale de physique, 2023.
- [23] Gagnon, Julie. Méthodes d'analyse des gaz toxiques. Journal d'analyse environnementale, 2022.
- [24] Petit, André. Technologies de filtration et respect des normes. Économie et environnement, 2020.
- [25] Moreau, Alice. Perspectives sur les technologies plasma. Dans : Innovations et défis environnementaux. Nantes : Éditions Futuristes, 2022.
- [26] Guilbert, Émilie. Filtration de l'air : État des lieux. Revue de santé et environnement, 2023.
- [27] Lefèvre, Louis. "Décharge couronne : principes et applications." Technologie des plasmas, 2022, vol. 18, no 5, p. 100-110.
- [28] Carpentier, Elise. Les impacts des émissions industrielles. Études sur l'impact environnemental, 2021.
- [29] Jourdain, Camille. Recherche sur les polluants organiques volatils. Journal de chimie et environnement, 2023, vol. 5, no 3, p. 50-60.
- [30] Bourgeois, Édouard. Nouvelles technologies pour la dépollution de l'air. Revues scientifiques sur l'environnement, 2022.
- [31] Lemoine, Thierry. Intégration de solutions renouvelables dans le traitement des polluants. Environnement et technologies durables. 2020.
- [32] Nicolle, Michel. Évaluation de l'efficacité des filtres à plasma. Technologies de filtration modernes, 2021.
- [33] Benoit, Patricia. Gestion des risques environnementaux liés aux gaz toxiques. Revue de gestion environnementale, 2023, vol. 15, no 1, p. 20-30.
- [34] Collet, Fabien. Réglementations sur les émissions de polluants. Droit et environnement, 2022.