

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun - Tiaret



Faculté des Sciences de la Matière
Département de Physique

Mémoire

*Pour obtenir le diplôme de
Master II*

Filière Physique

Spécialité : Physique des Matériaux

Etudiant (e) : M^{elle} Yamina MEHDIA

Thème :

**Configuration de matériau d'électrodes en vue d'une production
d'ozone par une décharge électrique couronne**

Date de Soutenance : 07/08/2021.

Devant le jury :

Mr. Khelifa YANALLAH

Mr. Kouider HADJI

Mr. Mohammed BOUADI

Mr. Mohamed Ridha BOUAZZA

Pr

MCA

MCA

Docteur

Président

Examineur

Encadrant

Co encadrant

ANNEE UNIVERSITAIRE: 2020/2021

Remerciements

Je remercie Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour suivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Ce travail à été effectué au sein du **Laboratoire de Génie électrique et des plasmas (LGEP)** de l'Université Ibn KHALDOUN – TIARET, sous la direction de **Mr Mohammed BOUADI** et le docteur **Mr Mohamed Ridha BOUAZZA**. Je leur exprime ma profonde reconnaissance pour m'avoir accordé toute leur confiance, leur aide et les conseils qu'il n'ont cessé de m'apporter au cours de ce travail.*

*Je tiens particulièrement à remercier professeur **Mr Khelifa YANALLAH** professeur à l'Université Ibn KHALDOUN – TIARET, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire. Je tiens à remercier aussi l'autre membre du jury : le maître de conférence **Mr Kuider HADJI** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

Je voudrais également remercier tous les membres du Laboratoire.

SOMMAIRE

Liste des figures.....	1
Liste des tableaux.....	2
Introduction générale.....	3
CHAPITRE I : Généralités sur l’ozone	
I.1 Découverte de l’ozone.....	6
I.2 Génération d’ozone.....	6
I.3 Production de l’ozone par décharges électriques.....	7
I.4 Production naturelle.....	8
I.5 Etapes de formation de l’ozone par décharge électrique.....	9
I.6 Formation de l’ozone par rayonnements UV.....	10
I.7 Formation artificielle de l’ozone.....	10
I.8 Cycle de Chapman.....	11
I.9 Définition de l’ozone.....	12
I.10 Caractéristiques de l’ozone.....	12
I.11 Données physico-chimiques de l’ozone.....	13
I.12 Structure de l’ozone.....	14
I.13 L’ozone : bon ou mauvais.....	14
I.13.1 Bon ozone.....	14
I.13.2 Ozone troposphérique (mauvais ozone).....	14
I.14 Comment l’ozone agit-il ?.....	15
I.14.1 Réaction de l’ozone avec les substances oxydables.....	15
I.14.2 Principe.....	16
I.14.3 Puissant oxydant et excellent désinfectant.....	17
I.15 Avantages et inconvénients de l’ozone.....	18
I.15.1 Avantages.....	18
I.15.2 Inconvénients.....	18
I.16 Applications de l’ozone.....	19
I.16.1 Eaux résiduaires :.....	19
I.16.2 Industrie/Agriculture :.....	19
Références bibliographiques.....	22
CHAPITRE II : Définition de la décharge électrique couronne	
II. 1 Notions Générales.....	24
II. 2 Champ électrique.....	24
II. 3 Décharge couronne en polarités négative et positive.....	25
II.3. 1 Nature du courant de la décharge couronne.....	25
II.3. 2 Courant à haute fréquence.....	26
II. 4 Apparence lumineuse.....	26

II. 5 Décharge couronne en polarité positive	27
II.5. 1 Courant à haute fréquence	27
II.5. 2 Nature du courant.....	27
II. 6 Apparence lumineuse.....	28
II. 7 Effet couronne en tension alternative	28
II. 8 Dégagement d’ozone	29
II. 9 Applications utilisant la décharge couronne.....	29
II.9. 1 Parafoudre.....	29
II.9. 2 Neutralisation	29
II.9. 3 Filtre électrostatique	30
II.9. 4 Séparateur électrostatique	30
Références bibliographiques	31
CHAPITRE III : Modèles utilisés dans la simulation et leur couplage	
III. 1 Modèle physique	32
III.1. 1 Fonction de distribution.....	32
III.1. 2 Grandeurs moyennes.....	32
III.1. 3 Modèles numériques de décharge.....	32
III.1. 4 Modèles non auto- cohérents	33
III.1. 5 Modèles auto-cohérents.....	34
III. 2 Modèle microscopique (particulaire).....	34
III. 3 Modèle macroscopique (fluide)	35
III.3. 1 Approximation du champ local (ACL)	35
III.3. 2 Approximation de l’énergie locale (AEL).....	36
III. 4 Modèle hybride	36
III. 5 Equations utilisées dans le modèle fluide	37
III.5. 1 Equation de continuité	37
III.5. 2 Equation de transfert de la quantité de mouvement	37
III.5. 3 Equation d’énergie	38
III.5. 4 Equation de Poisson	38
III. 6 Modèle physique d’une décharge électrique couronne stationnaire.....	39
III.6. 1 Force Electro-Hydro-Dynamique (EHD).....	39
III.6. 2 Modèles du vent ionique proposés dans la littérature	39
Références bibliographiques	43
CHAPITRE IV : Résultats et discussion	
IV. Résultats et discussion.....	45
IV. 1 Vitesse du gaz.....	45

IV. 2 Variation de la vitesse induite par la force EHD le long de l'axe inter-électrodes.....	47
IV. 3 Distribution spatiale des radicaux atomiques	48
IV.3. 1 Distribution spatiale de l'oxygène atomique (O)	49
IV.3. 2 Distribution spatiale de l'ozone (O ₃)	50
IV. 4 Production de l'ozone en fonction de la haute tension.....	52
IV.4. 1 Production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz	54
IV. 5 Étude paramétrique	55
IV.5. 1 Production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz pour trois valeurs de la haute tension	55
IV.5. 2 Effet du rayon de fil (r)	57
IV.5.2. 1 Caractéristique 'courant-tension'	57
IV.5.2. 2 Variation de la vitesse du vent ionique en fonction de l'intensité du courant	58
IV.5.2. 3 Variation du champ électrique et de la densité électronique le long de l'axe oy.....	60
IV.5.2. 4 Variation de la production d'ozone en fonction de l'intensité du courant électrique pour les trois valeurs de r.....	63
IV.5. 3 Effet du déplacement des électrodes (L).....	65
IV.5.3. 1 Effet sur la caractéristique 'courant-tension'	65
IV.5.3. 2 Effet sur la variation de la vitesse du vent ionique en fonction de la haute tension.....	67
IV.5.3. 3 Effet sur la production de l'ozone en fonction du courant électrique.....	68
Références bibliographiques	70
Conclusion générale.....	71

Liste des abréviations

N_e	Densité des électrons
N_p	Densité des ions positifs
N_n	Densité des ions négatifs
N_j	Densité des particules neutres
ϵ_0	Permittivité du vide
e	Charge électrique
P	Pression
ϕ	Tension appliquée
ϕ_{onset}	Tension d'amorçage
r	Vecteur de position
v	Vecteur de vitesse
f	Fonction de distribution
γ	Accélération
E	Champ électrique
$\langle v \rangle$	Vitesse moyenne des particules
J_i	Flux des particules chargées i
μ_i	Mobilité des particules chargées i
D_i	Coefficient de diffusion de l'espèce chargée i
e_i	Charge de l'espèce chargée i
S_{ij}	Terme source pour les espèces neutres j
V	Vitesse d'écoulement du gaz
m_e	Masse électronique
m_i	Masse de l'espèce i
ν_i	Fréquence d'échange de la quantité de mouvement par collision avec les neutres
F_{EHD}	Force électro hydrodynamique (EHD)
j_i	Densité de courant de l'espèce
I	Intensité de courant de la décharge
ρ	Masse volumique de l'air
d	Distance inter-électrodes
r_0	Rayon du fil
w	Longueur du fil

η	Coefficient d'attachement
J_e	Flux des électrons
J_p	Flux d'ions positifs
J_n	Flux d'ions négatifs
$J(0)$	Densité de courant sur la surface du fil
λ	Viscosité dynamique de l'air
τ_R	Tenseur de Reynolds
E_C	Energie cinétique

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur l'ozone

Figure I. 1 : Configuration d'une cellule de décharge électrique	7
Figure I. 2 : Formation naturelle de l'ozone par décharge électrique	9
Figure I. 3 : Formation naturelle de l'ozone par les rayons UV	9
Figure I. 4 : Etapes de formation de l'ozone par décharge électrique	10
Figure I. 5 : Etapes de formation de l'ozone par UV	10
Figure I. 6 : Formation naturelle de l'ozone (cycle de Chapman)	11
Figure I. 7 : Destruction naturelle de l'ozone (cycle de Chapman)	11
Figure I. 8 : Structure de l'ozone	14
Figure I. 9 : Ozone troposphérique (mauvais ozone)	15
Figure I. 10 : Comment agit l'ozone ?	15
Figure I. 11 : Liens de la molécule d'ozone	16
Figure I. 12 : Réaction d'oxydation de l'ozone avec les substances oxydables	16

Chapitre II : Définition de la décharge électrique couronne

Figure II. 1 : conducteur HT	24
Figure II. 2 : Zone où se produit l'effet couronne	25
Figure II. 3 : Polarité négative	25
Figure II. 4 : Polarité positive	26
Figure II. 5 : Courant électrique lors d'une tension alternative	26
Figure II. 6 : polarité négative	27
Figure II. 7	27
Figure II. 8 : Polarité positive	27
Figure II. 9 : polarité positive	28
Figure II. 10 : Streamers sur une pointe stressée	28
Figure II. 11 : Streamers sur un fil stressé	28
Figure II. 12 : Les deux zones de la décharge couronne 'pointe-plan' (ici décharge positive)	29
Figure II. 13 : Parafoudre, Figure II. 14: Filtre et Figure II. 15: Séparateur électrostatique	30

Chapitre IV : Résultats et discussion

Figure IV. 1 : <i>Illustration schématique de la géométrie utilisée explicitant les paramètres géométriques (sans échelle)</i>	45
Figure IV. 2 : <i>Distribution spatiale à 2D de l'amplitude de la vitesse du gaz et lignes d'écoulement correspondant à : (a) une vitesse d'entrée du gaz de $V_0 = 1$ cm/s sans force EHD, (b) une vitesse d'entrée de $V_0 = 1$ cm/s avec force EHD, et (c) une limite d'entrée du gaz ouverte avec force EHD ; pour un rayon de fil</i>	46
Figure IV. 3 : <i>Vitesse du gaz le long de l'axe de symétrie ($x = 0$) dans les deux cas : (b) une vitesse d'entrée du gaz $V_0 = 1$ cm/s avec force EHD, et (c) limite d'entrée du gaz ouverte avec force EHD, pour un rayon de fil $r_0 = 100$ μm, une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm et une tension appliquée $\phi = 10$ kV.</i>	47

Figure IV. 4: Distribution spatiale à 2D de l'oxygène atomique (O), dans les deux cas : (b) une vitesse d'entrée du gaz $V_0 = 1 \text{ cm/s}$, et (c) une limite d'entrée du gaz ouverte ; pour un rayon de fil de $r_0 = 100 \mu\text{m}$, une distance inter-électrodes de $d = 0,5 \text{ cm}$ et une tension appliquée de $\phi = 10 \text{ kV}$.	49
Figure IV. 5: Distribution spatiale à 2D de l' O_3 , dans les deux cas : (b) une vitesse d'entrée du gaz $V_0 = 1 \text{ cm/s}$, et (c) limite d'entrée du gaz ouverte ; pour un rayon de fil de $r_0 = 100 \mu\text{m}$, une distance inter-électrodes de $d = 0,5 \text{ cm}$ et une tension appliquée de $\phi = 10 \text{ kV}$.	50
Figure IV. 6: Production de l'ozone (O_3) en fonction de la haute tension appliquée au fil (de 6 à 10 kV) pour les deux cas : (b) vitesse d'entrée d'air $V_0 = 1 \text{ cm/s}$ et (c) entrée libre ; pour un rayon du fil $r = 100 \mu\text{m}$ et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.	52
Figure IV. 7: Production de l'ozone (O_3) en fonction de la vitesse d'entrée dans les cas : (b) vitesse d'entrée d'air de $V_0 = 1 \text{ cm/s}$ et (c) entrée libre ; pour un rayon du fil $r_0 = 100 \mu\text{m}$, une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$ et une tension de 10 kV .	54
Figure IV. 8 : Production d' O_3 , au niveau de la sortie du réacteur, en fonction de la vitesse d'entrée du gaz, en présence d'une force EHD, pour une tension variée ($\phi = 8, 9 \text{ et } 10 \text{ kV}$), un rayon de fil $r_0 = 100 \mu\text{m}$ et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.	55
Figure IV. 9: Variation de la durée vie de l'ozone dans le réacteur en fonction du temps de résidence du gaz dans le réacteur, pour une tension de 9 kV .	56
Figure IV. 10: Caractéristique 'courant-tension' pour les trois valeurs du rayon de fil.	57
Figure IV. 11: Variation de la vitesse du vent électrique en fonction du courant électrique pour les trois valeurs du rayon de fil, pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$) et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.	58
Figure IV. 12: Variation de la vitesse du vent électrique en fonction de la racine carrée du courant électrique pour trois valeurs du rayon de fil, pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$) et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.	59
Figure IV. 13: Distribution du champ électrique (E), au voisinage du fil, le long de l'axe inter-électrodes, pour les trois valeurs du rayon de fil (r), pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$) et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.	61
Figure IV. 14: Distribution de la densité électronique (N_e), au voisinage du fil, le long de l'axe inter-électrodes, pour les trois valeurs du rayon de fil (r), pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$) et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.	62
Figure IV. 15: Production de l' O_3 en fonction du courant électrique (I) pour trois valeurs du rayon de fil (r), une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$) et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.	64
Figure IV. 16: Caractéristique 'courant-tension' pour trois valeurs de $L = 2,5 ; 3,5 \text{ et } 4,5 \text{ cm}$.	66
Figure IV. 17: Variation de la vitesse du vent électrique (V_i) en fonction de la tension appliquée (V) pour $L = 2,5 ; 3,5 \text{ et } 4,5 \text{ cm}$. pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$), une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$ et rayon du fil $r_0 = 100 \mu\text{m}$.	68
Figure IV. 18: Variation de la production de l' O_3 en fonction du courant I pour $L = 2,5 ; 3,5 \text{ et } 4,5 \text{ cm}$. pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$), une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$ et rayon du fil $r_0 = 100 \mu\text{m}$.	69

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Principales constantes physiques de l'ozone	13
Tableau IV. 1: Paramètres utilisés dans la modélisation	45
Tableau IV. 2: Comparaison de la production d' O_3 , en fonction de la (HT), entre le cas (b) et le cas (c).	53
Tableau IV. 3: Comparaison de la production de l' O_3 en fonction de I, pour trois valeurs de r.	65

Introduction générale

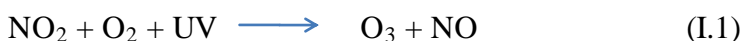
Introduction Générale

L'ozone est un composé naturel présent dans toute l'atmosphère à très faible concentration. Dans la stratosphère (après la première couche qui entoure le globe terrestre de l'atmosphère (troposphère), la stratosphère est la deuxième couche ; la troisième est la mésosphère), il joue le rôle d'un filtre protecteur en absorbant les radiations ultraviolettes de longueur d'onde comprise entre 200 et 300 nm, le maximum d'absorption se situant à 254 nm. Cette propriété est d'ailleurs utilisée pour la détermination de la concentration en ozone dans un gaz. A température ordinaire l'ozone est un gaz instable de couleur bleue lorsqu'il est observé sous une épaisseur suffisante, d'odeur caractéristique et pénétrante (décelable à des teneurs de l'ordre de 0,01 à 0,05 ppm). L'ozone est un polluant secondaire, c'est-à-dire qu'il n'est pas produit directement dans l'air ambiant par les activités humaines. Il est formé suite à des réactions chimiques dans l'atmosphère. Même si l'ozone n'est pas un polluant typiquement urbain, il apparaît en première place parmi les indicateurs de la qualité de l'air vu son impact sur la santé et l'environnement. Sa toxicité varie en fonction de sa concentration :

- Entre 180 et 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, on constate une diminution de la fonction respiratoire de l'ordre de 5% auprès de la population moyenne et de 10% chez les personnes sensibles.
- Entre 240 et 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cette diminution de la fonction respiratoire atteint 5 à 15% auprès de la population moyenne et de 10 à 30% chez les personnes sensibles, avec possibilités de maux de tête, d'irritations des yeux, du nez et de la gorge, au-delà de 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tous ces effets sont ressentis plus sérieusement et la diminution de la fonction respiratoire est supérieure à 15% auprès de la population moyenne, et de plus de 30% chez les personnes sensibles ; on constate également une diminution significative des performances physiques.

L'ozone a également un effet néfaste sur la végétation, tant au niveau des cellules visibles des feuilles que sur la croissance elle-même, dû à un épuisement des matières de réserve.

L'ozone se forme par photochimie, suite à l'irradiation de polluants primaires (dont le dioxyde d'azote NO_2) par la lumière ultraviolette (UV), et ceci en présence d'oxygène :



Un équilibre dynamique s'installe entre la formation (processus de plusieurs heures) et la destruction de l'ozone (processus d'une à quelques minutes). Cet équilibre est toutefois perturbé du fait que le NO est en grande partie oxydé en NO_2 dans une réaction avec des produits réactionnels des composés organiques volatils. Par conséquent, le NO n'est pas disponible pour la destruction

d'ozone et le NO₂ formé peut à nouveau être scindé sous l'influence des rayons UV et former de l'ozone.

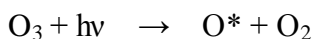
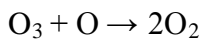
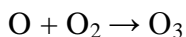
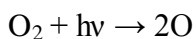
L'ozone peut être généré commercialement par trois méthodes essentielles:

- La décharge couronne.
- La méthode photochimique.
- La méthode électrochimique

L'ozone est tout à fait aisément disponible dans la nature (les éclairs qui se produisent pendant les orages). L'ozone se produit naturellement par le processus de dissociation des molécules

l'oxygène, en atomes qui se combinent avec d'autres molécules d'oxygène pour produire l'ozone et libèrent une quantité considérable de chaleur. La méthode de décharge électrique fonctionne suivant le même principe et la chaleur produite pendant ce processus est enlevée du générateur pour éviter la décomposition de l'ozone.

La création d'ozone par photodissociation de l'oxygène est le principal processus de formation de l'ozone stratosphérique, et donc de la très connue "couche d'ozone" (mécanisme de Chapman) :



Les atomes d'oxygène constitués par la photodissociation d'oxygène moléculaire par rayonnement UV de longueur d'onde courte inférieure à 256 nm réagissent avec les molécules d'oxygène pour former l'ozone. Les avantages principaux de production d'ozone par rayonnement UV sont :

- L'air ambiant peut être employé efficacement comme gaz d'alimentation sans le besoin de le sécher.
- Les coûts d'équipements sont beaucoup inférieurs à celles des générateurs de la décharge couronne

Les inconvénients de production d'ozone par rayonnement UV sont:

- Le taux maximum de production de l'ozone est de 2 g/h.
- La concentration la plus élevée de l'ozone qui peut être produite par des lampes ultraviolettes à 185 nm est de 0.2 % en poids, est approximativement 10 % de la concentration moyenne donnée par décharge couronne.
- Plus d'énergie électrique est nécessaire pour produire une quantité donnée de l'ozone par rayonnement UV comparant à la décharge couronne.

- Les lampes UV nécessitent aussi un remplacement périodique.

En résumé, le travail développé dans ce mémoire a été réparti en quatre chapitres et a pour objectif l'étude de la production d'ozone par décharge électrique couronne de configuration d'électrodes 'fil-grille'.

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique diversifiée sur les propriétés d'ozone et ses applications.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les décharges électriques couronnes.

Le troisième chapitre porte sur la méthode adoptée concernant l'utilisation des modèles de la simulation en utilisant un logiciel approprié.

Tandis que le quatrième chapitre nous présente les résultats concernant la production d'ozone par décharge électrique couronne tout en discutant, au fur et à mesure, quelques aspects de ces résultats.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et nous évoquons quelques perspectives d'avenir qui peuvent compléter cette étude pour mieux comprendre, encore, les différents processus de synthèse d'ozone, en se basant sur l'amélioration de production du vent ionique par décharge électrique couronne dans d'autres configurations et/ou d'autres conditions de décharge

CHAPITRE I

Généralités sur l'ozone

I.1 Découverte de l'ozone.....	6
I.2 Génération d'ozone.....	6
I.3 Production de l'ozone par décharges électriques	7
I.4 Production naturelle	8
I.5 Etapes de formation de l'ozone par décharge électrique.....	9
I.6 Formation de l'ozone par rayonnements UV.....	10
I.7 Formation artificielle de l'ozone	10
I.8 Cycle de Chapman.....	11
I.9 Définition de l'ozone	12
I.10 Caractéristiques de l'ozone	12
I.11 Données physico-chimiques de l'ozone	13
I.12 Structure de l'ozone	14
I.13 L'ozone : bon ou mauvais.....	14
I.13.1 Bon ozone	14
I.13.2 Ozone troposphérique (mauvais ozone)	14
I.14 Comment l'ozone agit-il ?	15
I.14.1 Réaction de l'ozone avec les substances oxydables.....	15
I.14.2 Principe	16
I.14.3 Puissant oxydant et excellent désinfectant.....	17
I.15 Avantages et inconvénients de l'ozone	18
I.15.1 Avantages.....	18
I.15.2 Inconvénients.....	18
I.16 Applications de l'ozone.....	19
I.16.1 Eaux résiduaires :.....	19
I.16.2 Industrie/Agriculture :.....	19
Références bibliographiques.....	22

I.1 Découverte de l'ozone

Cela fait déjà assez longtemps que l'ozone est le sujet de recherches. En 1840, le chimiste Christian Friedrich Schönbein [1] découvrit que ce gaz se formait pendant les décharges électriques, et le baptisa ozone (ce qui signifie sentir en grec). On découvrit rapidement que l'ozone était un composant de l'air. Schönbein lui-même développa les techniques de mesure de l'ozone, qui furent améliorées à l'observatoire Montsouris à Paris. Ces premières données de concentrations d'ozone, entre 1876 et 1910, sont aujourd'hui le témoin des teneurs en ozone de l'atmosphère avant la révolution industrielle

En 1879, on découvrit que seule une très faible partie des UV-B du soleil atteignait la surface terrestre. L'année suivante, les scientifiques montrèrent que l'ozone absorbait énormément ces rayons et qu'il pouvait être responsable de la filtration de ces UV-B. Cependant la quantité d'ozone présente dans la basse troposphère était trop faible pour jouer ce rôle, et on supposa avec raison que l'ozone devait se trouver essentiellement dans la haute atmosphère. Au début du 20^{ème} siècle, des travaux très importants ont été réalisés et un spectromètre a été développé pour mesurer l'ozone dans toute l'atmosphère. Ce spectromètre est utilisé de nos jours, même s'il est progressivement remplacé par des méthodes plus modernes

I.2 Génération d'ozone

A cause de sa relative courte durée de vie, l'ozone est toujours généré sur le site d'utilisation grâce à un générateur d'ozone. A l'échelle industrielle, l'ozone est produit en utilisant des radiations ultraviolettes de courtes longueurs d'ondes émises par une lampe à vapeur de mercure, ou par le procédé de décharge à froid ou décharge couronne qui utilise un champ électrique élevé [2 - 4]. La génération d'ozone par décharge couronne est plus courante de nos jours et a plus d'avantages [3 - 5].

Les avantages de la méthode de décharge couronne sont : une plus grande durabilité de l'unité de production, une meilleure production d'ozone et un meilleur rapport coût-efficacité.

L'ozone bénéfique peut être produit artificiellement à travers l'emploi deux types de générateurs :

- Générateur à rayons ultraviolets qui réplique le soleil : le générateur à rayons ultraviolets produit l'ozone à travers l'exposition d'un flux d'air à la lumière engendrée par les lampes à UV ultraviolets.
- Générateur avec décharge couronne à oxygène (CDOX) qui réplique les phénomènes électriques orageux : Ce générateur produit l'ozone à travers le passage d'oxygène déshumidifié et propre par

l'intermédiaire d'un champ électrique très intense. Le point de rosée doit se situer à - 60 degrés Celsius pour éviter tout problème de corrosion à l'intérieur de l'ozoneur.

Lorsqu'une augmentation des quantités de vapeur d'eau est présente, de plus grandes quantités d'oxyde d'azote sont formées lorsque les décharges se produisent. L'oxyde d'azote peut former l'acide nitrique (provoque la corrosion).

De plus, les radicaux hydroxydes sont formés et se combinent avec les radicaux d'oxygène et avec l'ozone. L'oxygène pur est fourni par un générateur d'oxygène ou parfois par des bouteilles d'oxygène. Les ozoneurs produisent de très grandes quantités d'ozone, mais ils nécessitent toujours et seulement de l'oxygène à l'état sec. L'ozone est produit à partir de l'oxygène en tant que résultat direct de la décharge électrique.

La décharge couronne (corona discharge) rompt la molécule stable d'oxygène et forme deux radicaux d'oxygène. Ces radicaux peuvent se combiner avec les molécules d'oxygène pour former l'ozone. L'emploi de l'oxygène seulement n'engendre pas de sous-produits dangereux. Pour éliminer l'ozone restant après utilisation, des destructeurs d'ozone sont utilisés.

I.3 Production de l'ozone par décharges électriques

L'ozone est disponible dans la nature, le plus souvent en raison des éclairs qui se produisent pendant les orages. L'ozone se produit naturellement par le processus de dissociation des molécules d'oxygène en atomes qui se recombinaient avec d'autres molécules d'oxygène pour produire l'ozone en libérant une quantité considérable de chaleur.

La méthode de décharge électrique fonctionne suivant le même principe et la chaleur produite pendant ce processus est évacuée du générateur pour éviter la décomposition de l'ozone [6]. Les éléments principaux d'un générateur à décharge électrique sont : la source d'énergie, l'espace de décharge que le flux gazeux traverse, le matériel diélectrique pour empêcher le court-circuit et le mécanisme d'élimination de chaleur dissipée comme sous produit de la réaction exothermique.

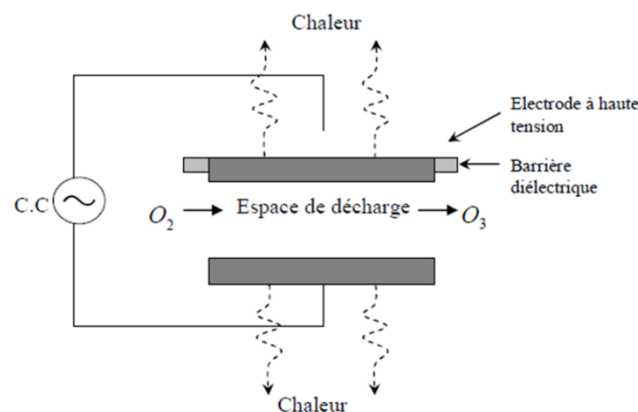


Figure I. 1 : Configuration d'une cellule de décharge électrique

Cette technique est une méthode commerciale nommée décharge silencieuse [7 – 8] (figure I.1). Dans ces générateurs d'ozone, le gaz d'alimentation (air sec, oxygène, ou mélanges), passe entre deux électrodes étroitement espacées (dont l'une est couverte par un matériel diélectrique) et soumis à une tension appliquée de l'ordre du potentiel électrique de *claquage*. Une décharge silencieuse (décharge à barrière diélectrique : DBD) se produit quand le gaz devient partiellement ionisé, ayant pour résultat une lueur violette caractéristique dans le cas de l'air comme gaz d'alimentation (pour l'oxygène très pur, la coloration violette est rarement observée).

Il est bien connu que dans une décharge électrique l'ozone est produit en deux étapes

1. Les atomes d'oxygène sont produits par la dissociation directe d'oxygène moléculaire :



2. L'ozone est produit via un processus à trois corps :



($M = O_3$ ou $M = N_2$ ou $M = O_2$ etc.)

L'efficacité de la production d'ozone par décharge électrique dépend, surtout, de l'intensité des micros décharges (qui est influencée par un certain nombre de facteurs tels que la largeur d'espace ; la pression du gaz ; le type des électrodes " métal et diélectrique", l'énergie d'alimentation et l'humidité). Une grande portion d'énergie électrique utilisée dans une décharge électrique est dissipée principalement sous forme de chaleur et une faible portion sous forme de lumière. Les générateurs produisent l'ozone à des concentrations de 1-5% du poids d'air et jusqu'à 14% du poids d'oxygène pur. Si l'air compressé est employé comme gaz d'alimentation, il doit être bien sec et exempt des traces de pétrole et de graisses (oxydés par l'ozone).

I.4 Production naturelle

L'ozone, composé dérivé de l'oxygène, se trouve dans l'atmosphère en petites proportions. Sa formation naturelle est due à l'action des décharges électriques (figure I.2) se produisant dans l'atmosphère, ainsi que du fait des rayons ultra-violets provenant du soleil (figure I.3), au détriment de l'oxygène existant dans l'atmosphère [2 - 9].

Ces phénomènes atmosphériques sont chargés d'apporter de l'énergie nécessaire à la formation de l'ozone, d'après la réaction endothermique

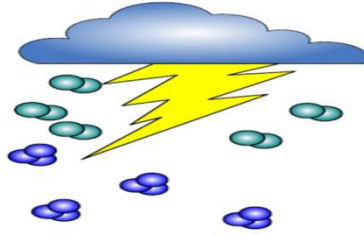
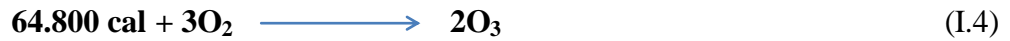


Figure I. 2: Formation naturelle de l'ozone par décharge électrique

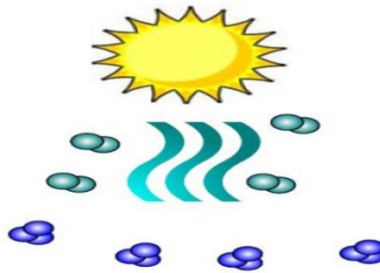


Figure I. 3: Formation naturelle de l'ozone par les rayons UV

L'ozone se trouve dans la nature en plus ou moins grande quantité, ceci dépend du degré de purification de l'environnement. C'est ainsi que nous pouvons sentir son odeur pénétrante dans les espaces libres, s'accroissant surtout après les orages violents. Dans l'atmosphère qui entoure les villes surtout dans les environnements confinés, l'absence d'ozone est presque totale. Ceci dit, l'ozone est un constituant vital de la haute atmosphère, où une couche d'ozone appelée « OZONOSPHERE » agit comme un véritable filtre afin que les radiations ultra-violettes émises par le soleil atteignent la terre avec seulement le millionième de leur action, car dans le cas contraire ça serait fatal pour les êtres vivants sur la terre.

I.5 Etapes de formation de l'ozone par décharge électrique

La formation de l'ozone par décharge électrique [10 - 11] passe par deux étapes (figure I.4) :

- **1ère étape** : Les molécules d'oxygène (O_2) sont scindées par une forte tension électrique résultant en deux individuels atomes d'oxygène (O).
- **2ème étape** : Les deux atomes d'oxygène (O) s'unissent avec d'autres molécules d'oxygène (O_2) pour produire l'ozone (O_3). Ainsi :



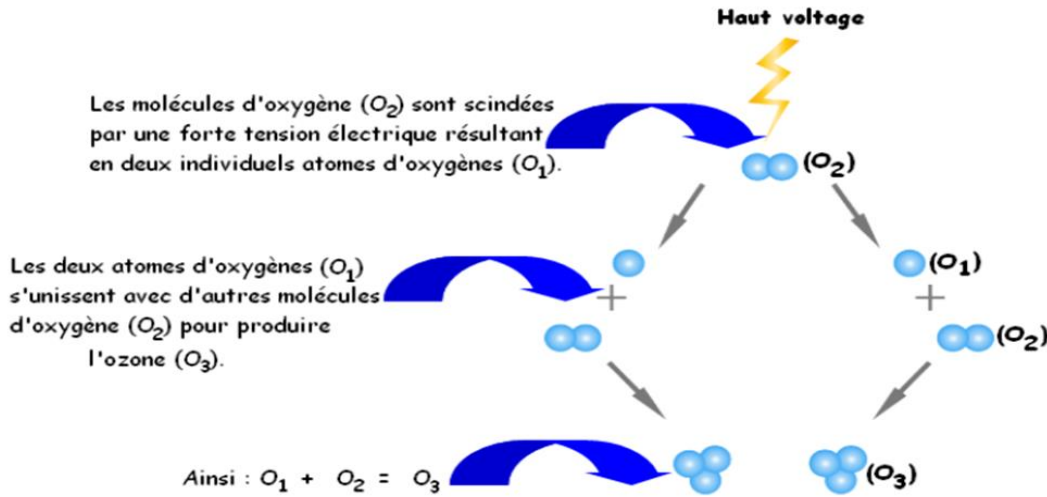


Figure I. 4: Etapes de formation de l'ozone par décharge électrique

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

I.6 Formation de l'ozone par rayonnements UV

La formation de l'ozone par les rayons UV passe par quatre étapes (figure I.5):

- 1ère étape : Une radiation UV de haute énergie atteint une molécule O_2 .
- 2ème étape : Deux atomes d'oxygène sont alors libérés.
- 3^{ème} étape : Ces radicaux oxygènes entrent en collision avec des molécules de dioxygène.
- 4ème étape : formant ainsi une molécule d'ozone.

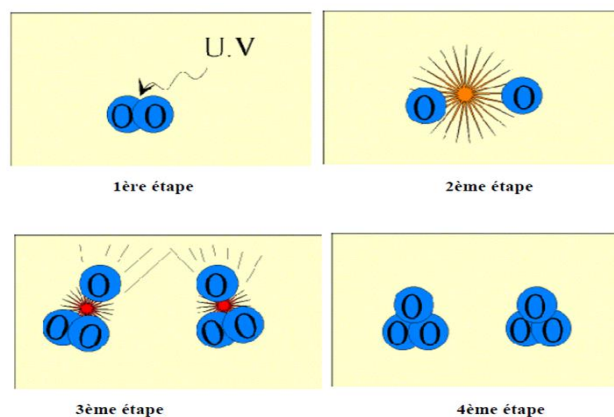


Figure I. 5: Etapes de formation de l'ozone par UV

I.7 Formation artificielle de l'ozone

Comme indiqué l'obtention de l'ozone peut être réalisée par des procédés physico-chimiques, à savoir :

-Par des lampes ultra-violettes. Ce système est utilisé pour les applications qui demandent une basse concentration d’ozone.

-Par décharges électriques silencieuses (décharge à barrière diélectrique : DBD). Ce système est utilisé pour obtenir de fortes concentrations d’ozone.

I.8 Cycle de Chapman

En 1930, le britannique Sydney Chapman [2] exposa ses théories sur la formation et la destruction chimique de l’ozone. Ces hypothèses, qui se révélèrent correctes, sont appelées le cycle de Chapman ou les réactions de Chapman. L’atome d’oxygène et l’ozone se transforment alternativement l’un en l’autre. Les liaisons qui unissent les atomes au sein des molécules sont cassées à cause des rayons solaires. Pour briser la molécule d’O₂ il faut plus d’énergie solaire que pour briser la molécule d’ozone (dans le premier cas, il faut une longueur d’onde de 240 nm contre 320 nm dans le second cas). La formation (figure I.6) et la destruction (figure I.7) de l’ozone sont en équilibre et la réaction dont le bilan est nul est la suivante :



La quantité d’ozone résulte donc d’un équilibre entre formation et destruction naturelles

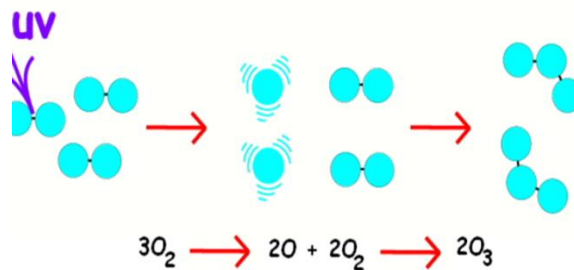


Figure I. 6: Formation naturelle de l’ozone (cycle de Chapman)

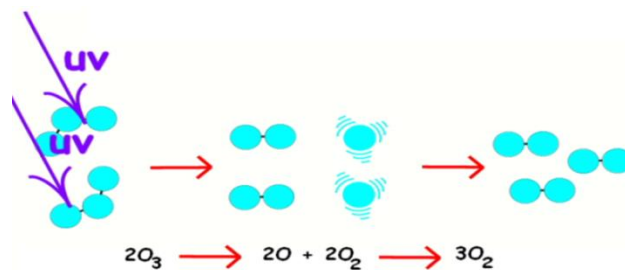


Figure I. 7: Destruction naturelle de l’ozone (cycle de Chapman)

I.9 Définition de l'ozone

L'ozone est un gaz de couleur bleue pâle voisin de l'oxygène qui peut avoir sur les êtres vivants des conséquences bénéfiques ou dangereuses. Il est naturellement détruit et régénéré dans l'atmosphère suivant un processus faisant intervenir le rayonnement solaire ultraviolet et l'oxygène. Il est présent dans la haute atmosphère (stratosphère) sous la forme d'une couche d'une quarantaine de kilomètres d'épaisseur surmontant la troposphère. Cette couche, connue sous le nom de « couche d'ozone », fait l'objet d'une surveillance constante. Elle constitue en effet un écran aux rayonnements ultraviolets émis par le soleil, rayonnements dont les effets nocifs affectent non seulement l'être humain (cancers, cataractes, ulcères, maladies du sang, etc.) mais également d'autres êtres vivants.

Mais l'ozone est également présent dans la basse atmosphère grâce aux courants atmosphériques descendants en provenance de la couche d'ozone. Lorsqu'il est inhalé, il provoque des irritations du nez et de la gorge. C'est donc un gaz toxique. L'accroissement de sa concentration dans l'air que nous respirons, notamment lors de situations météorologiques empêchant sa dispersion, représente un danger pour notre santé. Dans la basse atmosphère, l'ozone peut, entre autres, résulter de l'action sur l'air de décharges électriques (orages). Mais il provient surtout de la pollution urbaine émanant de certaines activités humaines. Il est essentiellement produit dans les régions tropicales et est transporté vers les hautes latitudes au cours de l'hiver par les grands courants aériens.

I.10 Caractéristiques de l'ozone

L'ozone (O_3) est une forme très instable et réactive de l'oxygène. C'est un gaz bleuté et odorant, qui se forme naturellement dans la stratosphère sous l'action du rayonnement ultraviolet, émis par le soleil, sur les molécules d'oxygène. Il est généré artificiellement par décharge électrique dans de l'air, de l'oxygène, ou un mélange des deux.

L'ozone est un oxydant très puissant utilisé notamment dans le traitement de l'eau. On parle alors d'ozonation. Celle-ci résulte de deux types d'oxydation bien distincts qu'il convient de définir. L'oxydation dite moléculaire est reliée directement à la molécule d'ozone O_3 . L'autre forme d'oxydation, dite radicalaire, est à relier à une forme non commune de l'ozone, où la molécule a perdu un électron apparié (normalement, les électrons sont présents par paires, mais dans le cycle de réactions en chaîne de l'ozone, des dissociations de paires d'électrons peuvent avoir lieu), conduisant à la formation du radical hydroxyle $OH\cdot$. L'ozone moléculaire est responsable des

réactions dites directes, à actions spécifiques ; les radicaux, quant à eux, sont responsables des réactions dites indirectes, beaucoup plus rapides, mais nettement moins

ciblées que les premières ; les radicaux oxydent un grand nombre de molécules. Il est à noter que certains composés tendent à stabiliser l'ozone dans l'eau, et donc à limiter la formation de ces radicaux. C'est notamment le cas des ions carbonates et bicarbonates.

L'ozone est peu soluble dans l'eau. Sa solubilité augmente avec la température de l'eau et avec sa concentration dans la phase gazeuse. Inflammable et explosif, l'ozone est aussi plus lourd que l'air (densité par rapport à l'air : 1,657) ; il peut donc s'accumuler près du sol. L'odeur piquante de l'ozone est détectée à un seuil de perception d'environ 0,01 ppm, et l'on considère qu'un taux de 0,25 ppm est préjudiciable à la santé. L'ozone étant un gaz instable, il est produit sur le lieu de son utilisation par décharge électrique dans un gaz contenant de l'oxygène. Il est généralement utilisé de l'air, qui doit être propre (pour éviter des problèmes de répartition de courant) et sec : son point de rosée devant se situer à -60°C , afin d'éviter tout problème de corrosion à l'intérieur du générateur d'ozone.

I.11 Données physico-chimiques de l'ozone

À température ambiante, l'ozone prend l'apparence d'un gaz incolore ou bleu pâle. Il se liquéfie à $-111,9^{\circ}\text{C}$ en prenant l'aspect d'un liquide bleu foncé et il se solidifie à $-192,5^{\circ}\text{C}$ en un solide de couleur pourpre. L'ozone est soluble dans l'eau à partir de 0°C et devient très oxydant. Combiné avec l'eau, il arrive à oxyder tous les métaux jusqu'à un degré maximum.

Les principales constantes physiques, thermodynamiques et toxicologiques de l'ozone sont reprises dans le Tableau I.1

Tableau I. 1: Principales constantes physiques de l'ozone

Masse molaire	47,9982 g/mol
Point de fusion	$-192,7^{\circ}\text{C}$
Point d'ébullition	$-111,9^{\circ}\text{C}$ (1 atm.)
Masse volumique (gaz) 0°C, 1 atm.	2,15 g/l
Enthalpie de formation	142,12 KJ/mol
Énergie de dissociation	-144,8 KJ/mol
Potentiel d'oxydation à 25°C	+2,076 V
Angle de liaison	116°

I.12 Structure de l'ozone

L'ozone se présente sous la forme d'un triangle isocèle d'un angle au sommet égal à $116^{\circ}45'$ et de deux liaisons interatomiques de $1,278 \cdot 10^{-10}$ m et de $1,48 \cdot 10^{-10}$ m. La structure de l'ozone est comme suit (figure I.8) :

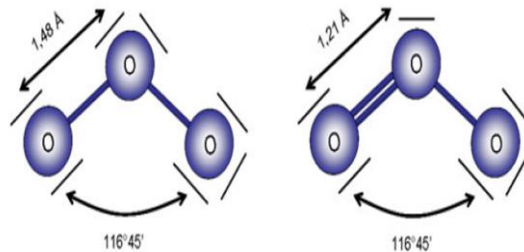


Figure I. 8: Structure de l'ozone

I.13 L'ozone : bon ou mauvais

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

I.13.1 Bon ozone

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

De nos jours, le bon ozone est généré in-situ avec des générateurs d'ozone. Bien que l'ozone soit un composé puissant, son cycle de vie est très court. Lorsque celui-ci entre en contact avec des bactéries, virus ou odeurs, ceux-ci sont oxydés par un des 3 atomes d'oxygène qu'il possède [12]. Le seul produit résultant de cette oxydation est le dioxygène.

Outre cette efficacité redoutable, nous savons également que l'ozone est sain à utiliser. Mais son odeur d'air 'sale' est, relativement, déplaisante. C'est cette odeur déplaisante qui permet de concevoir des moyens de productions sûrs [13 - 14].

I.13.2 Ozone troposphérique (mauvais ozone)

Dans la basse atmosphère terrestre, près du niveau du sol, l'ozone se forme lorsque les polluants émis par des voitures, des centrales électriques, des chaudières industrielles, des

raffineries, des usines chimiques et d’autres sources, réagissent chimiquement en présence de la lumière solaire (figure I.9). L’ozone au niveau du sol est un polluant atmosphérique nocif.

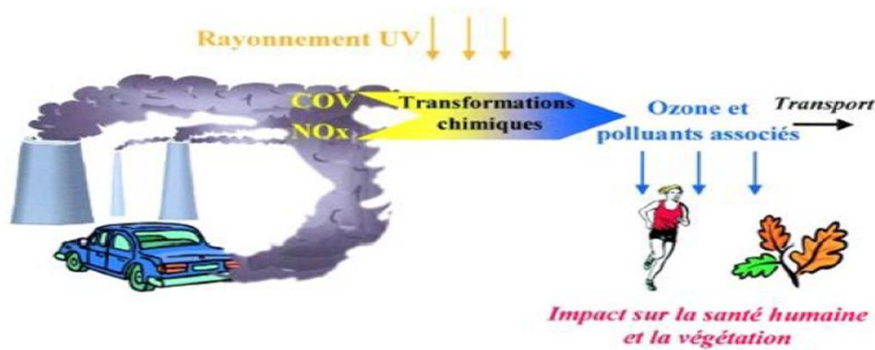


Figure I. 9: Ozone troposphérique (mauvais ozone)

I.14 Comment l’ozone agit-il ?

I.14.1 Réaction de l’ozone avec les substances oxydables

L’ozone réagit rapidement avec les micro-organismes et parvient en règle générale à diminuer la toxicité des composés dans l’eau et à augmenter leur biodégradabilité. En conséquence, l’ozonation principale est quasi-systématiquement couplée à une filtration biologique sur charbon actif en grains afin d’achever l’élimination des micropolluants tout en limitant la dose d’ozone appliquée. Celle-ci est en général de l’ordre de 0,5 à 1 g par g de carbone organique.

L’ozone agit de la manière suivante (figure I.10) :

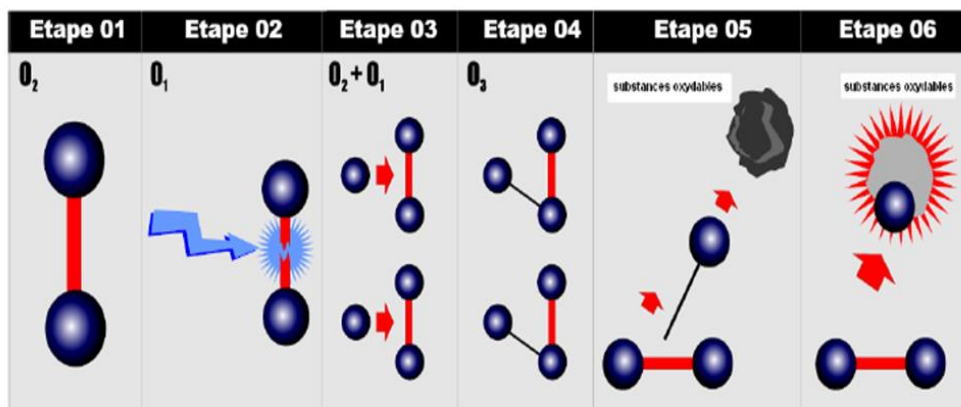


Figure I. 10: Comment agit l’ozone ?

Le faible lien de l’ozone tenu du troisième atome d’oxygène fait que la molécule soit instable et donc, très efficace comme le montre la figure I.11. C’est le troisième atome d’oxygène de l’ozone qui est extrêmement réactif. Cet atome se fixe facilement à d’autres molécules.

La réaction d’oxydation se produit sur une collision entre la molécule d’ozone et la molécule d’une substance oxydable (c’est-à-dire bactéries, champignons, virus, fer, manganèse...). Au cours de cette réaction d’oxydation, les molécules organiques sont transformées et dissoutes[8] (figure I.12).

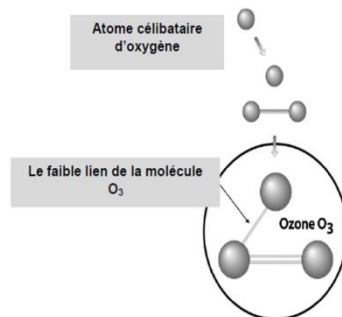


Figure I. 11: Liens de la molécule d’ozone

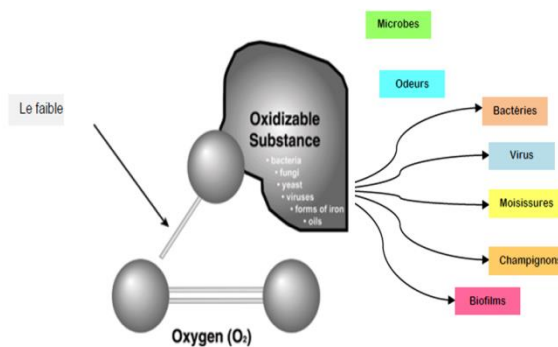


Figure I. 12: Réaction d’oxydation de l’ozone avec les substances oxydables

I.14.2 Principe

L’ozone réalise son action destructrice de trois manières :

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

I.14.3 Puissant oxydant et excellent désinfectant

L'ozone est un composé naturel qui a des propriétés d'oxydation très puissantes. Il oxyde et inactive toutes les substances organiques, les pesticides et les organismes pathogènes (virus, bactéries, protozoaires, etc.). De même, il va oxyder des éléments physico-chimiques désagréables qui laissent des traces tels que le fer, le manganèse, le soufre (odeur d'œuf pourri), les arrière goûts qui peuvent être causés par des algues, champignons et moisissures et certains types de tannins qui donnent une couleur ressemblant à celle du thé.

Contrairement aux autres désinfectants, tel le chlore, l'ozone disparaît sans laisser de trace après son utilisation. En effet, l'ozone est composé d'oxygène pur qui se recompose en dioxygène quelques temps après sa fabrication.

Dans le domaine de l'eau potable, la purification de l'eau par l'ozone est un procédé qui représente un avantage, en particulier, dans le contexte environnemental actuel qui soutient le développement et fait la promotion de technologies non-polluantes ; il permet d'abaisser et même d'éliminer complètement les « trihalométhanes ». Il s'agit d'un sous-produit de la chloration de l'eau. En effet, lorsque le chlore est ajouté à l'eau brute pour éliminer les bactéries, il arrive qu'il y ait réaction avec les micro-organismes présents dans l'eau pour produire différents sous-produits, dont les THM « trihalométhanes ».

Et que dire dans le domaine des piscines qui sont fréquentées par de nombreuses personnes à travers le monde, pour y nager ou pour s'y délasser ?!.. Cependant, l'atmosphère chlorée des piscines pourrait être responsable de problèmes de santé. En effet, la majorité des piscines sont désinfectées par des produits à base de chlore menant à la formation de dérivés potentiellement toxiques. Des études ont récemment attiré l'attention sur les risques pour la santé liés à la fréquentation des piscines. Il a entre autres été suggéré que l'exposition croissante et plus précoce des enfants aux produits de chloration des piscines pourrait, en association avec d'autres facteurs, être impliquée dans l'incidence croissante de l'asthme et des allergies. La croyance que l'environnement d'une piscine ne présente pas de risques pour la santé de ceux qui la fréquentent est profondément ancrée dans les esprits et le manque de considération à l'égard du problème potentiel de toxicité de ces produits issus de la chloration de l'eau est reflétée par les règlements de la plupart des pays, axés sur la qualité micro biologique de l'eau des piscines, ignorant en grande partie la qualité de l'air.

I.15 Avantages et inconvénients de l'ozone

L'ozone est un produit chimique utile en raison de sa capacité d'oxyder et de stériliser. Il a, cependant, des caractéristiques qui le rendent inapproprié pour certaines applications. Voici une liste des avantages et des inconvénients de l'ozone.

I.15.1 Avantages

Ces désavantages sont compensés par une série d'avantages qui rendent l'ozone très intéressant dans nombreuses d'applications industrielles :

- En comparaison, l'efficacité de la désinfection de l'ozone est 2500 fois plus efficace que l'hypochlorite (HCl) et 5000 fois plus que les Chloramines (NH_2Cl), il détruit les bactéries, les virus, et les moisissures.
- L'ozone ne laisse pas de résidus chimiques ni d'odeurs dans l'eau.
- L'ozone ne brûle pas les yeux, ne les rougit pas comme les autres produits chimiques ont tendance à le faire.
- L'ozone n'irrite pas la peau et ne la dessèche pas.
- L'ozone est sécurisant car il ne peut exploser et n'est pas combustible.
- L'utilisation de l'ozone limite au maximum l'achat des produits chimiques oxydants.
- Quand le système est installé, il fait un apport constant d'ozone dans l'eau.
- Parce que l'ozone réagit très vite, il est possible que certaines substances persistent.
- L'utilisation de chlore ou de brome avec l'ozonateur réduit cette possibilité.
- Pas de dérivés dangereux, contrairement au chlore.
- Ne reste pas dans l'eau, redevient de l'oxygène : il est donc utilisable par exemple pour le traitement d'eau ultra-pure, ce qui n'est pas le cas du chlore.
- Pas de stockage de produits dangereux.
- Oxydation très complète.
- Se décompose ou s'enlève facilement.

I.15.2 Inconvénients

- Investissement plus élevé : l'expression usine à gaz est certainement appropriée dans le cas de l'ozonisation, puisque ce gaz est produit sur place : il en résulte que le coût d'exploitation

est réduit par rapport à des systèmes où l'on doit acheter le désinfectant, par contre l'installation est inévitablement plus coûteuse.

- Système plus complexe : l'ozone doit être produit, puis dissous dans l'eau, le gaz résiduel doit être extrait de l'eau, etc. le système résultant est inévitablement plus complexe à installer et à utiliser qu'une pompe à injection de chlore, par exemple.
- Il n'y a pas de membranes résistantes à l'ozone : cela pose un problème à certaines industries particulières, comme l'agro-alimentaire, qui veulent en général désinfecter l'ensemble de la chaîne de traitement : si un osmoseur est prévu, cela est possible avec le chlore en choisissant une membrane en acétate de cellulose par exemple, alors que c'est effectivement impossible avec l'ozone.
- Consommation en énergie plus élevée, puisque l'ozone est produit par décharge électrique

I.16 Applications de l'ozone

Grâce à ses excellentes qualités de désinfection et d'oxydation, l'ozone est énormément utilisé pour le traitement de l'eau potable [15 - 16 - 17]. L'ozone peut être utilisé pour différents objectifs dans les systèmes de traitement, tels que pour une pré-oxydation, une oxydation intermédiaire ou une désinfection finale. Généralement, il est recommandé d'utiliser l'ozone pour la pré-oxydation, avant un filtre à sable ou un filtre à charbon actif. Après l'ozonisation, ces filtres peuvent éliminer la matière organique restante (important pour une désinfection finale).

Les applications de l'ozone sont multiples, citons

I.16.1 Eaux résiduaires :

- Domestiques/Municipales
- Pâte et papier
- Mines
- Pharmaceutique
- Cuir
- Pétrole/pétrochimique
- Électro-plaquage
- Précipitation des métaux lourds

I.16.2 Industrie/Agriculture :

- Tours de refroidissement
- Eau d'échange de chaleur
- Eau de refroidissement
- Eau potable
- Désinfection de grange (air, eau)
- Hydroponique
- Effluents d'animaux
- Traitement "water dripping"

- Recyclage des liquides de découpage

I.16.3 Industrie agro-alimentaire :

- Tours de stockage de grains
- Eau embouteillée
- Entrepôts de fruits et légumes
- Entreposage de viandes
- Désinfection des abattoirs
- Hydroponique
- Lavage de fruits et légumes
- Lavage d'œufs

I.16.4 Autres:

- Odeurs [18]
- Semi-conducteurs
- Buanderies
- Aquaculture
- Blanchissement
- Recyclage de caoutchouc
- Désulfuration
- Stérilisation médicale
- Stérilisation d'hôpitaux
- Traitement thérapeutique

Références bibliographiques

- [1] C. F. Shobein, *Hebd. Scanees Acad. Sci.*, vol. 10, p.706-710, 1840.
- [2] S. Chapman, « A theory of upper-atmospheric ozone », *Memoirs of the royal meteorological society*, Edward Stanford, 1930.
- [3] U. Kogelschatz, « Ozone Generation », *Handbook of atmospheric plasma*, vol.1 et 2, section 9.3, 003.
- [4] M. Abdel-salam, A. Mizuno et K. Shimizu, « Ozone generation as influenced by gas flow in corona reactors », *J.Phys.D:Appl.Phys.*, vol. 30, p. 864-870, 1997.
- [5] W. Gujer, U. Von Gunten, « Unmodel stochastique d'un réacteur à ozonation », *Water Res.*, 2003.
- [6] G.S. Peter-Castle, Ion I. Inculet, et K. Irwin Burgess, « Ozone generation in positive corona electrostatic precipitators », *IEEE Transactions on industry and general applications*, Vol. IG. 5, n°4, 1969.
- [7] U. VonGunten, « Cinétiques d'oxydation et formation de produit », *Ozonation de l'eau potable.Part I.*, *Water Res*, 2003.
- [8] M. M. Kuraica, « Application of coaxial dielectric barrier discharge for potable and waste Water », <http://www.center.bg.ac.yu/plasma>
- [9] Xu Lei, « Sterilization of E. coli bacterium with an atmospheric pressure surface barrier discharge », *Chinese Physics and IOP Publishing Ltd.*, Vol . 13, n° 6, 2004.
- [10] R.G. Rice, « Ozone reference guide. Electric power research institute », St. Louis, MO, 1996.
- [11] Kurt H. Backer, « The use of non thermal plasmas in environmental applications », Springer-Verlag Berlin Herdelberg, 2010.
- [12] S.Hadj-Ziane, B. Held, P. Pignolet, R. Peyrous, et C. Coste, « Ozone generation in anoxygen-fedwire-to-cylinder ozonizer at atmospheric pressure », *J.D.App.Phys.*, vol.25, p. 677-685,1992.
- [13] U. VonGunten, « Désinfection et formation de sous-produit en présence de bromure, d'iode et de chlore », *Ozonation de l'eau potable. Part II.*, *Water Res.*, 2003.
- [14] RomppsChemie-Lexicon et Nummular, « Stabilization and storage of ozone », *Ozone Academic Press*, London, Ed.1985, chapter 4, p. 232-238,1974.
- [15] J. Hoigné, in S. STUCKI (Ed.), « The chemistry of ozone in water, process technologies for water treatment », *Plenum Press*, New York, 1988.
- [16] B. Langlais, D.A. Reckhow, et D.R. Brink, « Ozone in drinking water treatment: application and engineering », *Awwarf and Lewis Publishers*, Boca Raton, FL, 1991.

[17] J.Drimal, et J.Janca, « Biological purification of water by an ozoniser with a discharge tube electrode », J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 23, p.7-11, printed in the UK, 1990.

[18] S. MASUDA, « The performance of an integrated air purifier for control of aerosol, microbial and odor », IEEE Transactions on industry application, vol. 29, n°4, 1993.

CHAPITRE II

Définition de la décharge électrique couronne

II. 1 Notions Générales	24
II. 2 Champ électrique.....	24
II. 3 Décharge couronne en polarités négative et positive.....	25
II.3. 1 Nature du courant de la décharge couronne	25
II.3. 2 Courant à haute fréquence	26
II. 4 Apparence lumineuse.....	26
II. 5 Décharge couronne en polarité positive	27
II.5. 1 Courant à haute fréquence	27
II.5. 2 Nature du courant.....	27
II. 6 Apparence lumineuse.....	28
II. 7 Effet couronne en tension alternative	28
II. 8 Dégagement d’ozone	29
II. 9 Applications utilisant la décharge couronne	29
II.9. 1 Parafoudre.....	29
II.9. 2 Neutralisation	29
II.9. 3 Filtre électrostatique	30
II.9. 4 Séparateur électrostatique	30
Références bibliographiques	31

II.1 Notions Générales

Les concepts de la physique de base de la décharge électrique couronne ont été définis depuis plusieurs décennies [1]. Et depuis de nombreuses études expérimentales et de simulations sont consacrées à l'étude du phénomène 'couronne' et à ses conséquences [2- 3].

L'effet 'couronne' se produit, également, sur tous les conducteurs et lignes soumis à une haute tension. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air, $\approx 30 \text{ kV/cm}$), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse (figure II.1).

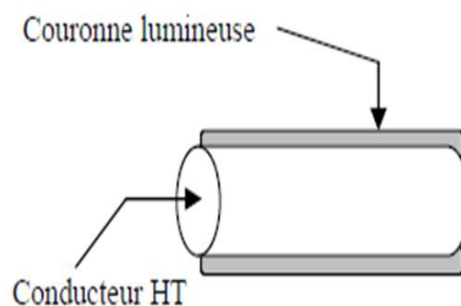


Figure II. 1: conducteur HT

La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($U \geq 400\text{kV}$), lorsqu'il fait sombre.

Inconvénients : pertes couronnes, interférence avec les ondes radio, bruit et vibrations des conducteurs.

Avantages : plusieurs applications industrielles (filtres électrostatiques, séparateurs électrostatiques, photocopie...)

L'effet couronne devient très gênant pour les réseaux à partir de 345 kV. Le bruit et le champ électrique superficiel représentent actuellement les paramètres d'environnement les plus importants à prendre en considération lors de la construction de nouvelles lignes ($U \geq 750 \text{ kV}$). L'effet couronne se produit principalement sur les conducteurs de ligne, mais aussi sur les parties métalliques aiguës reliées à la haute tension, telles que sur l'isolateur, surtout par temps humide.

II. 2 Champ électrique

Le champ électrique produit par le conducteur diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du conducteur, il s'agit donc d'un champ non uniforme.

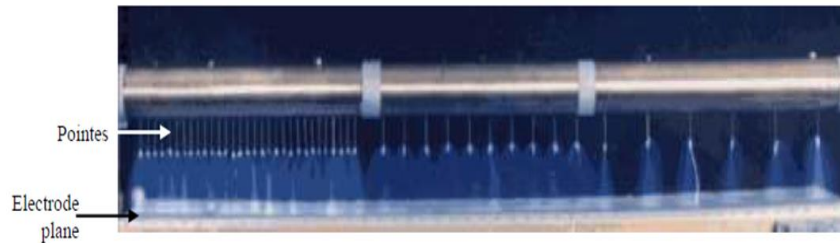
Important : L'effet couronne a lieu dans un champ non uniforme.

Soit un système d'électrodes pointe-plan par exemple. Que se produit-il dans l'air si

Le champ près de la pointe est supérieur à 30 kV/cm ?

Réponse : Décharge couronne

Le champ étant non uniforme, l'ionisation se produit uniquement près de la pointe et ne se produit pas, dans le cas d'une configuration 'pointe-plan', près de l'électrode plane (figure II.2).



Décharge couronne lumineuse produite entre des pointes et une électrode plane reliée à la terre

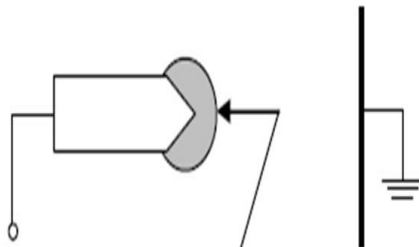


Figure II. 2: Zone où se produit l'effet couronne

II. 3 Décharge couronne en polarités négative et positive

En polarité négative, la pointe est portée à un potentiel HT négatif et l'électrode plane est reliée à la terre (figure II.3), et l'inverse pour la polarité positive (figure II.4).

II.3. 1 Nature du courant de la décharge couronne

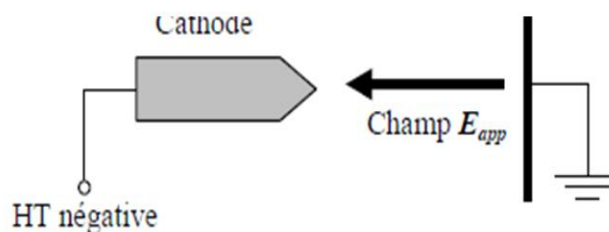


Figure II. 3: Polarité négative

Seuls les électrons traversent tout l'espace inter-électrodes (courant électronique).

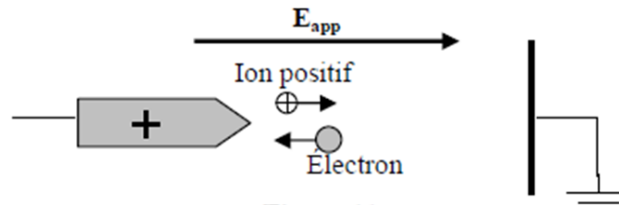


Figure II. 4: Polarité positive

Remarques :

- Dans les gaz électronégatifs (air, SF₆...), les électrons s'attachent aux atomes pour former des ions négatifs ⇒ le courant électronique devient courant ionique.
- Le courant de la décharge couronne est très faible : de quelques μA à quelques mA.

II.3. 2 Courant à haute fréquence

Il se produit des avalanches électroniques, à une fréquence de 1 MHz, pendant des durées de vie Δt (déroulement des avalanches) alternées avec des durées d'arrêts Δt_0 (arrêt des avalanches) (figure II.5). La fréquence des impulsions augmente avec la pression, car la charge d'espace qui s'oppose au champ appliqué est rapidement formée.

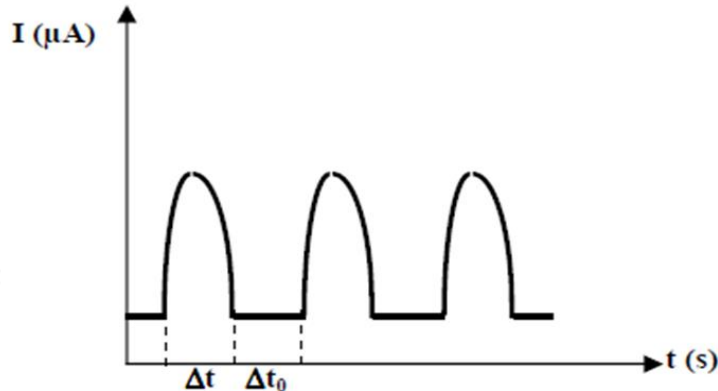


Figure II. 5: Courant électrique lors d'une tension alternative

II. 4 Apparence lumineuse

Comme le champ de la charge d'espace est opposé au champ appliqué en polarité négative, on dit que l'effet couronne se déroule dans un « champ décroissant » (figure II.6). L'aspect lumineux est limité dans l'espace.

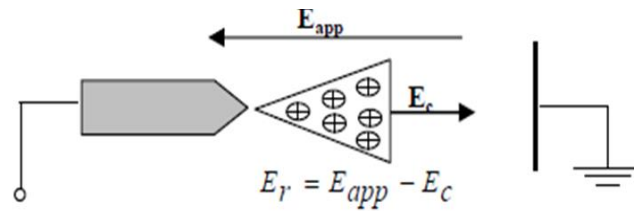


Figure II. 6: polarité négative

- Sur la pointe apparaît un point lumineux dans la configuration pointe-plan.
- Sur la ligne HT, il y a:
 - a) Apparition de points lumineux sur les aspérités (figure II.7a).
 - b) Pour une ligne THT, une couronne lumineuse peut couvrir tout le conducteur (figure II.7b).

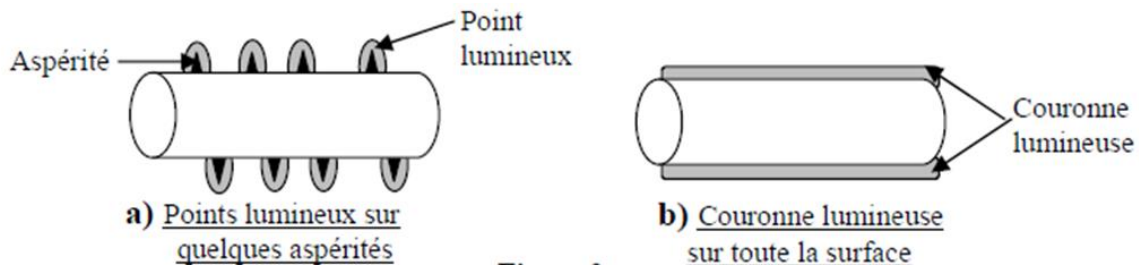


Figure II. 7

II. 5 Décharge couronne en polarité positive

- Pointe portée à un potentiel HT positif ;
- Electrode plane reliée à la terre.

II.5.1 Courant à haute fréquence

Mêmes impulsions qu'en polarité négative mais de fréquence plus petite, car les avalanches qui se déroulent dans un champ croissant ne s'arrêtent pas aussi rapidement qu'en polarité négative.

II.5.2 Nature du courant

Seuls les ions positifs traversent complètement l'espace inter-électrodes courant ionique (figure II.8).

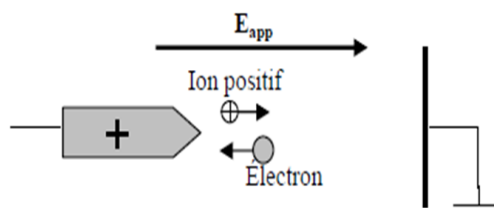


Figure II. 8: Polarité positive

II. 6 Apparence lumineuse

Le champ de la charge d'espace a le même sens que le champ appliqué (figure II.9). Donc, en polarité positive l'effet couronne se déroule dans un « champ croissant ». L'aspect lumineux s'étend dans l'espace.

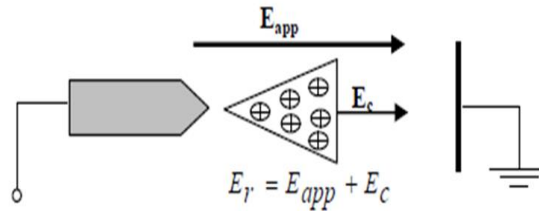


Figure II. 9: polarité positive

- Pointe-plan : Il apparaît, sur la pointe, de longs filaments lumineux appelés « streamers » (figure II.10).



Figure II. 10: Streamers sur une pointe stressée

- Ligne HT : la même apparence se révèle ; cette apparence est dénommée décharge-brosse ou bien décharge-plume (figure II.11).

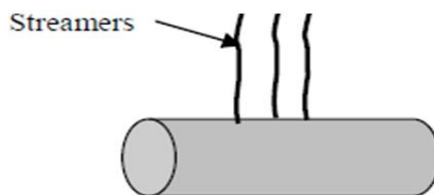


Figure II. 11: Streamers sur un fil stressé

II. 7 Effet couronne en tension alternative

L'effet de couronne en tension alternative est la synthèse des deux polarités. Néanmoins, c'est l'apparence lumineuse de l'alternance positive (streamers) qui prédomine.

Résumé : L'application d'une tension de valeur suffisante pour créer un seuil de décharge couronne, entraîne une répartition de l'espace inter-électrodes en deux régions (figure II.12) :

- La première région, très étroite et voisine de l'électrode à faible rayon de courbure, où le champ électrique est très intense, est le siège d'ionisation du gaz : c'est la zone active ou zone d'ionisation.

Les électrons libres sont accélérés par le champ électrique provoquant ainsi des collisions avec des atomes neutres ou des molécules; il y a alors multiplication électronique par avalanche.

- Le reste de l'espace inter-électrodes constitue la deuxième région où le champ électrique est tellement faible qu'il ne s'y produit pas d'ionisation, c'est la zone de dérive. Dans cette zone, les électrons ne peuvent pas se multiplier et les ions créés par collisions 'électrons-neutres' dérivent vers l'électrode plane (ou celle ayant un plus grand rayon de courbure) sous l'effet du faible champ en constituant ainsi une charge spatiale mono polaire.

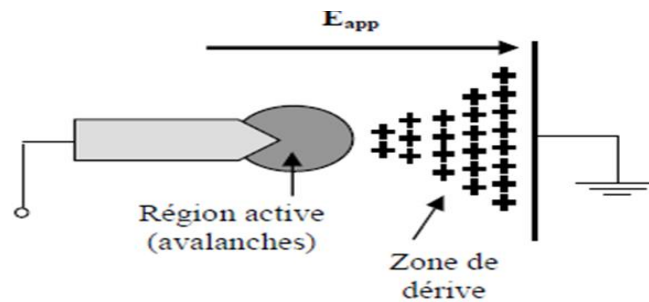


Figure II. 12: Les deux zones de la décharge couronne 'pointe-plan' (ici décharge positive)

II. 8 Dégagement d'ozone

La décharge couronne, se produisant essentiellement dans l'air, est aussi accompagnée, entre autres, d'une formation d'ozone [4 - 5].

Par ailleurs, en présence de l'humidité, de l'acide nitrique est produit ; ce qui cause la corrosion du conducteur.

II. 9 Applications utilisant la décharge couronne

II.9. 1 Parafoudre

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe (l'électrode la plus courbée) ; le canal de la foudre, qui opte pour le chemin le moins résistant, est capté par le paratonnerre (figure II.13).

II.9. 2 Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées, par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion, éliminent par neutralisation les charges surfaciques.

II.9.3 Filtre électrostatique

Le fil central, dans une configuration fil-cylindre, produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir [6 - 7]. Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre (figure II.14).

II.9.4 Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquiert des charges électriques créées par effet couronne, grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative. Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents (figure II.15).

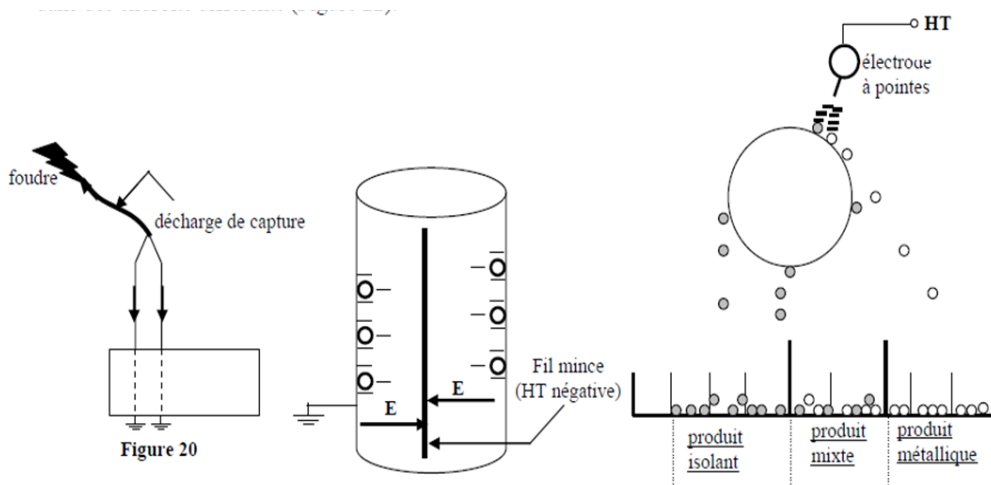


Figure II. 13: Parafoudre, Figure II. 14: Filtre et Figure II. 15: Séparateur électrostatique

Références bibliographiques

- [1] L.B. Loeb, « Electrical corona, their basic physical mechanisms », Berkeley, University of Californiapress, 1965.
- [2] M. Rezzouga, A. Timaltine, R. Gouri, K. Medles, L. Dascalescu, « Experimental modeling of high-voltage corona discharge using design of experiments », Front. electr. electron. eng, vol. 2, n°2, p. 139-143, China, 2007.
- [3] K. Yanallah, « Etude expérimentale et par modélisation à 1D et 2D de la production de l'ozone dans une décharge électrique couronne négative et son absorption par les parois », Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [4] R.S. Sigmond, et M. Goldman, « Corona discharge physics and applications, electrical breakdown and discharges in gases », Part B, NATO ASI series B89-B, 1989.
- [5] Y.P. Raizer, « Gas discharge physics », Springer, New York 1997.
- [6] H.J. White, « Industrial electrostatic precipitation », Addison-wesley publishing company, Inc, 1963.
- [7] A. Abahazem, « Etudes expérimentale des décharges couronnes pour la dépollution des gaz », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.

CHAPITRE III

Modèles utilisés dans la
simulation et leur
couplage

III. 1 Modèle physique	32
III.1. 1 Fonction de distribution.....	32
III.1. 2 Grandeurs moyennes.....	32
III.1. 3 Modèles numériques de décharge.....	32
III.1. 4 Modèles non auto- cohérents	33
III.1. 5 Modèles auto-cohérents.....	34
III. 2 Modèle microscopique (particulaire).....	34
III. 3 Modèle macroscopique (fluide)	35
III.3. 1 Approximation du champ local (ACL)	35
III.3. 2 Approximation de l'énergie locale (AEL).....	36
III. 4 Modèle hybride	36
III. 5 Equations utilisées dans le modèle fluide	37
III.5. 1 Equation de continuité	37
III.5. 2 Equation de transfert de la quantité de mouvement	37
III.5. 3 Equation d'énergie	38
III.5. 4 Equation de Poisson	38
III. 6 Modèle physique d'une décharge électrique couronne stationnaire.....	39
III.6. 1 Force Electro-Hydro-Dynamique (EHD).....	39
III.6. 2 Modèles du vent ionique proposés dans la littérature	39
Références bibliographiques.....	43

III. 1 Modèle physique

Dans cette partie, et après avoir décrit l'équation de Boltzmann, nous allons détailler les équations qui caractérisent l'évolution du plasma dans une décharge électrique, puis nous exposons les différentes approximations qui ont été faites.

III.1.1 Fonction de distribution

Chaque particule du gaz est définie par un vecteur position (\vec{r}) et par un vecteur vitesse (\vec{v}). A un instant t , le nombre probable de particules (N) se trouvant dans l'élément de volume de l'espace des phases $d^3r d^3v$ est défini par :

$$dN(\vec{r}, \vec{v}, t) = d^3r d^3v f(\vec{r}, \vec{v}, t), \quad (\text{III. 1})$$

Où $f(\vec{r}, \vec{v}, t)$ est la fonction de distribution des vitesses de particules dans l'espace de phases de la densité des particules, et $d^3r d^3v$ est l'élément de volume dans cet espace.

III.1.2 Grandeurs moyennes

On déduit la densité des particules N en un point donné du plasma de coordonnées r à un instant donné t par :

$$N(\vec{r}, t) = \int f(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3v, (\text{III. 2})$$

Le nombre de particules étudiées étant important, nous utiliserons des grandeurs moyennes basées sur les fonctions de distribution.

On peut définir, pour toute grandeur x , sa valeur moyenne par :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N(\vec{r}, t)} \int x f(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3v, (\text{III. 3})$$

III.1. 3 Modèles numériques de décharge

Il existe de nombreux modèles mathématiques adaptés aux différents types de plasmas. Ils font tous appel à un couplage entre les équations d'évolution des particules et du champ électrique. Le grand nombre d'équations et de degrés de liberté (3 d'espace, 3 de vitesse, plus le temps) classe les problèmes de la physique des plasmas parmi les plus difficiles à résoudre numériquement.

De façon générale, ils permettent la détermination:

- Des paramètres électriques de la décharge, c'est-à-dire les variations spatio-temporelles du champ électrique et du potentiel.
- Des profils de densités des espèces chargées ou des neutres et les distributions spatiotemporelles des énergies et des fonctions de distribution.
- La position et la vitesse des particules.

Le mouvement des particules est décrit, dans le cas général, par l'équation de Boltzmann [1 - 2] :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial r} + \gamma \frac{\partial f}{\partial v} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll}, \quad (\text{III. 4})$$

Où :

v : Champ de vitesses des particules.

r : Position.

γ : Champ des accélérations des particules (forces extérieures).

$f(r, v, t)$: fonction de distribution des vitesses des particules.

$\frac{\partial f}{\partial t}$: représente la variation temporelle de f au point (r, v) .

$v \frac{\partial f}{\partial r}$: représente la variation spatiale de f , suite à la diffusion des ions ou des électrons.

$\gamma \frac{\partial f}{\partial v}$: représente la variation de f sous l'action des forces extérieures, avec γ l'accélération de ces forces extérieures, dues à l'effet du champ électrique dans notre cas.

$\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll}$: représente la variation temporelle de f suite aux collisions.

III.1. 4 Modèles non auto-cohérents

Les modèles non auto-cohérents dans lesquels on estime, indépendamment (modèle ou mesure expérimentale), les variations spatio-temporelles du champ électrique, sont bien entendu beaucoup moins rigoureux, mais sont plus simples et donc plus rapides.

III.1. 5 Modèles auto-cohérents

Dans le cas de modèles dits « auto-cohérents », l'équation de Poisson, qui détermine le champ électrique, doit être couplée à l'équation de Boltzmann. En effet, les différentes fonctions de distribution des espèces chargées dépendent de la valeur du champ électrique qui dépend lui-même des densités et de l'énergie des espèces chargées.

Dans la pratique, la résolution de l'équation de Boltzmann est extrêmement délicate et son couplage avec l'équation de Poisson ne fait que compliquer le problème. Pour cette raison, plusieurs types de modèles auto-cohérents, correspondant à différents niveaux d'approximation, ont été développés. Selon l'approche utilisée pour simuler les plasmas de décharges, on peut distinguer trois catégories de modèles [3 - 5]:

- Modèle microscopique (Particulaire).
- Modèle macroscopique(Fluide).
- Modèle hybride.

III. 2 Modèle microscopique (particulaire)

Dans un modèle microscopique (particulaire), on résout simultanément, et sans faire d'hypothèses simplificatrices, l'équation de Boltzmann pour déterminer la fonction de distribution des particules chargées, et l'équation de Poisson pour le champ électrique. L'équation de Boltzmann sous sa forme spatio-temporelle (III. 4) peut être résolue de façon pratique en faisant appel à une approche cinétique de type Monté Carlo [6] pour une description plus détaillée de la décharge électrique. Le calcul rigoureux des coefficients de transport est complexe et fait intervenir les sections efficaces des collisions élastiques et inélastiques qui caractérisent la probabilité de l'interaction entre deux particules chargées ou non, qui peuvent être des électrons, des ions, des atomes ou des molécules.

Le modèle particulaire est basé sur le traitement d'un échantillon représentatif de chaque type de particules jouant un rôle dans la formation du plasma (par exemple, des électrons et des ions) et suit leurs mouvements dans l'espace des phases en traitant les collisions de façon statique et en intégrant les équations classiques du mouvement entre deux collisions. Cette approche est idéale du point de vue physique.

Le domaine de calcul est divisé, spatialement, en cellules élémentaires. Les densités des particules chargées sont calculées au centre de chaque cellule. Le champ électrique est calculé dans ces cellules par la résolution de l'équation de Poisson. Puis, on calcule les nouvelles forces exercées

sur chaque particule, compte tenu de la charge d'espace accumulée. Le libre parcours ou le temps de vol libre de chaque particule est déterminé à l'aide de tirage d'un nombre aléatoire. Le type de collision est ensuite obtenu en comparant le rapport des fréquences ou des sections efficaces à un autre nombre aléatoire.

III. 3 Modèle macroscopique (fluide)

C'est un modèle de décharge où le transport de particules chargées est décrit à l'aide des valeurs moyennes, pour certains paramètres de plasma, et qui est appelé un modèle fluide. En principe, la cinétique des électrons et des ions dans un gaz faiblement ionisé peut être décrite en utilisant les équations de Boltzmann correspondantes. L'équation de Boltzmann est une équation de continuité dans l'espace de phase (r, v) , qui détermine la fonction de distribution des particules $f(r, v, t)$, à chaque position (r, v) et à chaque instant (t) , sous l'effet de forces externes et les processus de collision avec les molécules de gaz. Mais, on peut aussi caractériser le plasma de décharge, directement, à partir des grandeurs moyennes: densité, vitesse moyenne, énergie moyenne, etc. Dans ce cas l'équation de Boltzmann est remplacée par ses moments qui correspondent à une série, en théorie illimitée, d'équations hydrodynamiques [6]. La base des modèles fluides nécessite deux hypothèses principales pour limiter le nombre d'équations et fermer le système d'équations obtenues. La première hypothèse concerne l'ordre physique pour limiter le nombre d'équations hydrodynamiques générées par l'équation de Boltzmann. On peut aller par exemple jusqu'au deuxième moment de l'équation de Boltzmann (ordre 1) ou jusqu'au troisième moment (ordre 2). A l'ordre 1, on considère l'équation de conservation de la quantité du mouvement et de la densité ; tandis qu'à l'ordre 2, on ajoute l'équation de conservation de la densité d'énergie. Comme le système d'équations ainsi obtenues est ouvert, c'est-à-dire avec plus d'inconnues que d'équations, la seconde hypothèse concerne la condition de fermeture du système ce qui exige des hypothèses supplémentaires. A l'ordre 1, le système est fermé en adoptant l'hypothèse du champ local où les paramètres de transport et de réaction sont supposés dépendre directement du champ électrique régnant localement à un instant donné dans la décharge électrique. A l'ordre 2, le système est fermé en utilisant l'hypothèse de l'énergie locale où les paramètres de transport et de réaction sont supposés dépendre directement de l'énergie moyenne des particules chargées.

III.3. 1 Approximation du champ local (ACL)

Dans l'approximation du champ local (ACL), les coefficients de transport des électrons et les taux des réactions sont à la fois fonctions du champ réduit $E(r, t)/p$; où $E(r, t)$ est le champ

électrique au point r et à l'instant t , et p est la pression du gaz. Autrement dit; la fonction de distribution de l'énergie des électrons (FDE) au point (r, t) est considérée la même que pour un champ réduit uniforme. Cette hypothèse de

l'équilibre au champ local signifie que l'énergie gagnée par les électrons en présence du champ électrique au point (r, t) est localement compensée par la perte d'énergie due aux collisions.

III.3. 2 Approximation de l'énergie locale (AEL)

Dans l'approximation de l'énergie locale (AEL), les coefficients de transport des électrons et les taux des réactions sont fonction de l'énergie moyenne des électrons calculée par l'équation de continuité de l'énergie dans le modèle fluide.

Suite à l'évolution dans le domaine de modélisation des plasmas, un accord général a fait que les modèles fluides comprennent l'équation de continuité, l'équation de transport d'énergie moyenne des électrons et l'équation de Poisson. Ce qui a été fait pour une résolution du problème à une dimension 1D ou à deux dimensions 2D.

Souvent, les équations de transport dans les modèles fluides sont, en plus, simplifiées en adoptant l'approximation de drift diffusion (ADD), qui décrit les flux de particules chargées comme étant la somme d'une dérive plus un terme de diffusion, en ignorant tous les autres termes (3).

Cependant, les modèles fluides ne peuvent pas prendre en considération les fonctions de distribution des espèces chargées (par exemple, la distribution d'énergie des ions), mais seulement des moyennes sur les distributions. Cet inconvénient est souvent compensé par des codes hybrides.

III. 4 Modèle hybride

Le terme « hybride » est utilisé pour désigner soit des simulations qui tiennent compte de deux groupes d'électrons [4], ou des codes complexes pour la modélisation des décharges plasmas.

Le modèle hybride est utilisé, dans notre travail, pour désigner une simulation en considérant deux ensembles d'électrons. Ces deux groupes de populations électroniques sont relativement indépendants. Le premier inclut la majorité des électrons à faible énergie.

Le deuxième groupe est composé par les électrons énergiques accélérés en présence du champ électrique. Afin d'optimiser le temps de calcul, les électrons du premier groupe, à faible énergie, sont traités à l'aide du modèle fluide. Par contre, les électrons rapides sont traités en adoptant une méthode de type Monté Carlo (MC).

Le but du modèle hybride est de combiner les avantages des modèles microscopique et fluide en traitant par exemple certaines régions de la décharge (chute cathodique) par un modèle particulaire, et d'autres régions (leur négative où il y a beaucoup plus de collisions) par un modèle fluide. Les modèles hybrides les plus répandus sont ceux où l'on associe un code Monté Carlo à un modèle de type fluide [5].

Il est également possible de développer des codes numériques hybrides en combinant différents modèles de calcul décrivant les différents processus survenus dans la phase gazeuse ou des interactions gaz-surface [6].

III. 5 Equations utilisées dans le modèle fluide

Dans ce cas, pour définir l'état du système, on passe aux valeurs moyennes qui sont des paramètres macroscopiques définis en chaque point et à chaque instant, et reliés par des équations dites "les moments de l'équation de Boltzmann". On obtient les moments de l'équation de Boltzmann, en intégrant l'équation de Boltzmann dans l'espace des vitesses après multiplication par une fonction $x(v)$ (III. 5) et en tenant compte de la dépendance des grandeurs considérées par rapport à l'espace et au temps :

$$\frac{\partial}{\partial t} (N \langle x(v) \rangle) + \frac{\partial}{\partial r} (N \langle x(v)v \rangle) - \gamma N \left\langle \frac{\partial}{\partial v} x(v) \right\rangle = \int \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{coll} x(v) d^3v \quad \text{(III. 5)}$$

III.5. 1 Equation de continuité

Cette équation, permettant d'obtenir un modèle d'ordre zéro, est donc obtenue en remplaçant $x(v)$ par la densité des particules N dans l'équation (III.5). On y trouve donc :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N \langle v \rangle}{\partial r} = \left(\frac{\partial N}{\partial t} \right)_{coll}, \quad \text{avec } N \text{ qui est la densité des particules, } N \langle v \rangle = N \int v f(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3v \text{ est}$$

le flux de particules, $\langle v \rangle$ est la vitesse moyenne des particules et $\left(\frac{\partial N}{\partial t} \right)_{coll}$ est le terme source lié aux processus de création et de disparition des particules considérées.

III.5. 2 Equation de transfert de la quantité de mouvement

Cette équation est obtenue en remplaçant $x(v)$ par la quantité de mouvement (mv) dans l'équation (III.5). Ce qui donne:

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle v \rangle + \langle v \rangle \frac{\partial}{\partial r} \langle v \rangle + \frac{1}{N} \frac{\partial P}{\partial r} - \gamma = \left(\frac{\partial}{\partial t} \langle v \rangle \right)_{coll}, \quad (\text{III. 6})$$

Où P est le tenseur de pression cinétique qui est défini comme suit :

$$P = m \int (v - \langle v \rangle) \otimes (v - \langle v \rangle) f d^3v, \quad (\text{III. 7})$$

Le tenseur de pression cinétique représente la mesure des écarts désordonnés des vitesses des particules autour de leur vitesse moyenne.

III.5.3 Equation d'énergie

En remplaçant $x(v)$, dans l'équation (III.5), par l'énergie cinétique $(1/2)mv^2$. On obtient, donc, l'équation d'énergie scalaire qui est le troisième moment de l'équation de Boltzmann :

$$\frac{1}{2} \frac{\partial Nm \langle v^2 \rangle}{\partial t} + \nabla_r \left[\frac{1}{2} Nm \langle v, v \rangle v \right] - N \langle F v \rangle = \int_v \frac{1}{2} m v^2 \left\{ \frac{\partial f}{\partial t} \right\}_{coll} d^3v, \quad (\text{III. 8})$$

Ces trois moments de l'équation de Boltzmann forment un système qui n'est pas fermé et ne peut donc pas décrire, à lui seul, le comportement des particules chargées dans une décharge électrique.

Dans le présent travail le système est fermé en le couplant avec l'équation de Poisson, ce qui nous mène à adopter l'approximation du champ local.

III.5.4 Equation de Poisson

Dans les décharges transitoires, les charges d'espace dues à la présence d'ions et d'électrons sont suffisantes pour distordre le champ électrique. Ces modifications dans le champ électrique font faire évoluer les densités d'espèces chargées à travers les coefficients de transport et de réactions. En conséquence, pour décrire correctement la décharge, il est donc nécessaire de coupler les équations de continuité des espèces chargées à de l'équation de Poisson ; car cette dernière équation donne les variations du champ électrique en fonction de la charge d'espace.

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\Delta \phi = \frac{\sum_i e_i N_i}{\epsilon_0}, \quad (\text{III. 9})$$

$$E = -\nabla \phi, \quad (\text{III. 10})$$

Où ϕ est le potentiel électrique, E le champ électrique et ϵ_0 la permittivité diélectrique de l'air.

III. 6 Modèle physique d'une décharge électrique couronne stationnaire

Le modèle développé dans ce travail, relevant d'une décharge couronne stationnaire, est basé sur la résolution des deux premiers moments de l'équation de Boltzmann (l'équation de continuité et l'équation de transport de la quantité de mouvement), qui est liée à la résolution de l'équation de Poisson (III.9) ; tout en apportant des simplifications supplémentaires. Dans le cas de la décharge couronne stationnaire on suppose que :

- dans le régime stationnaire, le terme $\frac{\partial N_i}{\partial t}$ se trouvant dans les équations de continuité, est négligeable.
- lorsque le champ électrique est élevé, on peut négliger la diffusion devant la dérive des particules chargées ($D_i \nabla N_i = 0$).
- la diffusion thermique et la recombinaison des ions sont négligeables.
- la mobilité des ions est constante.

Donc le système final d'équations prend la forme:

$$\nabla \left(\frac{e_i}{e_0} N_i \mu_i E + V N_i \right) = S_i \text{ avec } i = 1, \dots, l \quad (\text{III. 11})$$

$$\nabla (D_j \nabla N_j^n + V N_j^n) = S_j \text{ avec } j = 1, \dots, m, \text{ et } S \text{ terme dépendant de la géométrie du réacteur}$$

III.6. 1 Force Electro-Hydro-Dynamique (EHD)

La force Electro-Hydro-Dynamique (EHD) qu'exerce, sur le fluide, une décharge ou un plasma, est une force de collision entre les particules chargées et les molécules neutres. De façon générale, les ions, mais aussi les électrons, participent à cette force. Bœuf et al. [7], ont écrit cette force :

$$F = e_0 (N_p - N_e - N_n) E, \quad (\text{III. 12})$$

Cette expression de la force EHD est utilisée comme 'terme source' dans les équations de Navier-Stokes pour calculer la distribution spatiale de la vitesse V de gaz (c'est-à-dire la vitesse du vent électrique).

III.6. 2 Modèles du vent ionique proposés dans la littérature

En 1959, Stuezter [8] a proposé les premiers modèles analytiques de la pression et de la force électrostatiques pour différentes configurations géométriques simples (plan-plan, fil-cylindre,

pointe-sphère). Dans ces configurations géométriques, il est possible d'exprimer analytiquement la relation entre la force volumique et la pression du vent ionique en fonction du courant ou de la tension électrique à partir de l'équation de Poisson et de l'équilibre entre la force de Coulomb (produit de la densité de charges et du champ électrique) et le gradient de pression. En 1961, Robinson [9] propose un modèle analytique du vent ionique créé par une décharge couronne qui prédit la vitesse. Il part pour cela de l'équilibre de forces :

$$\nabla p = nE \text{ (III. 13)}$$

Où p est la pression et n la densité de charges. La densité de courant j s'exprime en première approximation par :

$$j = n\mu_i E \text{ (III. 14) d'où } \nabla p = \frac{j}{\mu_i} \text{ (III. 15)}$$

Où μ_i est la mobilité des ions (supposée constante et égale pour tous les ions). En se plaçant dans les cas particuliers de deux plaques parallèles, de deux portions de sphères ou de cylindres concentriques, le gradient de la pression peut s'écrire, en négligeant les effets de bords :

$$|\nabla p| = \frac{dp}{dr} \text{ (III. 16) d'où : } p = \int_{r_1}^{r_2} \frac{j}{\mu_i} dr \text{ (III. 17)}$$

r étant la distance aux électrodes, r_1 et r_2 étant les coordonnées de l'électrode stressée et de l'électrode collectrice, respectivement. Dans l'expression intégrale, la pression est celle au niveau de l'électrode collectrice. On peut donc écrire que :

$$p = \frac{KI}{\mu_i} \text{ (III. 18)}$$

Où K est une fonction de la géométrie et I le courant de la décharge. D'autre part, le fluide se déplace à une vitesse pour laquelle la pression aérodynamique compense cette pression électrostatique. On peut donc écrire :

$$p = \frac{K' \rho u^2}{2} \text{ (III. 19) ; autrement, on écrit : } u = \sqrt{\frac{2p}{K' \rho}} \text{ (III. 20)}$$

Où K' est un coefficient de perte dépendant de la géométrie, ρ la masse volumique de l'air et u la vitesse de l'air. On obtient que la vitesse varie comme la racine carrée du courant I et de l'inverse de la mobilité des ions μ_i :

$$u = \sqrt{\frac{2KI}{K' \rho \mu_i}} \quad (\text{III. 21})$$

Béquin et al. [10] et Lacoste et al. [11] utilisent la même démarche mais prennent en compte la géométrie de la décharge afin d'obtenir également la dépendance par rapport à la distance à la pointe ou au fil stressés. Pour cela Béquin et al. [10] se basent sur une formule empirique de la répartition du courant dans le cas 'pointe-plan' et obtiennent que la vitesse varie comme la racine carrée de la distance x de la pointe (III.9). Lacoste et al. [11] utilisent le modèle cylindrique de décharge de Stuezer [8] et obtiennent une dépendance en racine carrée du logarithme népérien (III.22). La dépendance de la vitesse vis à vis du courant et de la mobilité est la même que celle obtenue par Robinson [9] :

$$u \propto \sqrt{\frac{i}{\mu_i} (x - x_0)} \dots \quad u \propto \sqrt{\frac{i}{\mu_i} \log\left(\frac{x}{x_0}\right)} \quad (\text{III. 22})$$

Où x_0 est la limite de la zone d'ionisation.

En 1995, El-Khabiry et Colvert [12] réalisent des simulations de l'effet de la force créant le vent ionique dans la configuration de deux fils infinis parallèles incrustés sur une plaque et perpendiculaires à l'écoulement. Le couplage entre l'équation de Poisson et la conservation des charges fournit les profils de champ électrique et de la densité de charge nécessaires pour le calcul de la force de Coulomb, produit de ces deux termes. La cinétique chimique de l'ionisation de l'air n'est pas modélisée. Par conséquent la mobilité des ions est prise égale pour tous les ions, et on ne peut pas connaître les ions prépondérants dans le transfert de la quantité de mouvement vers le fluide.

Dans le cadre du vent ionique Sigmond et Goldman [13] ont utilisé le logiciel COMSOLE pour simuler les tourbillons (ou vortex) à proximité de la pointe dans une configuration 'pointe-plan' en se basant sur les calculs d'ionisation d'une décharge couronne de Sigmond [14], et une approximation pour le calcul des courants ioniques et le courant négatif pris nul à proximité de la pointe jusqu'à moins de 1mm puis croît linéairement jusqu'à 9 mm de la plaque, pour devenir, enfin, constant. Le courant positif part de zéro au même point d'apparition du courant négatif et croît en direction de la pointe. Oiseau et al. [15] ont aussi utilisé COMSOLE au début des années 2000 pour calculer les écoulements ionisés instationnaires en se basant sur les résultats de travaux de Grangé et al. [16] portant sur la propagation monodimensionnelle du front d'ionisation d'une décharge couronne pour estimer le champ électrique et les densités de charges.

Récemment des modélisations à 2D instationnaires ont été menées par Bœuf et al. [7], [17] pour la DBD et par Matéo Vélez [18- 20] pour la décharge couronne. Bœuf et al. [7], [17] considèrent un modèle de cinétique chimique à un ion positif dans le cas d'une décharge BD dans l'azote. Ils modélisent la continuité des espèces chargées (électrons et ions) et l'équation de Poisson. Leur simulation présente le caractère instationnaire de la décharge BD par la propagation successive de filaments de densité de charges. La force volumique s'appliquant aux neutres est calculée. Elle présente des pics d'intensité correspondant à ces filaments tout comme le courant. Leur courte durée compense leur intensité si bien que leur contribution est petite face à celle de la décharge de fond semblable à la décharge couronne. Matéo-Vélez [18- 19] propose un modèle à 2D de la décharge couronne dans l'air à la surface du diélectrique, couplé à l'écoulement. Ce modèle correspond au cas expérimental de Moreau et al. [21]. La cinétique chimique comporte 6 espèces. La décharge calculée comporte des pics de courant comme l'expérience, qui sont, certainement, liés à l'interaction avec le diélectrique. La description de l'actionneur plasma est bonne : la zone d'action du plasma se rapporte bien à celles des expériences. Elle s'étend au-delà de 1 cm au dessus de la surface et le fluide est aspiré des parties supérieures vers la paroi puis dirigé de l'anode vers la cathode. La vitesse est toutefois sous-estimée d'un facteur 2 par rapport aux résultats expérimentaux de Séraudie et al. [22].

Références bibliographiques

- [1] J.-L. Delacroix, et A. Bers, « Physique des plasmas », vol.1, EDP Sciences, 1994.
- [2] Z. Kanzari, M. Yousfi, et A. Hamani, « Modeling and basic data for streamer dynamics in N₂ and O₂ discharges », J. Appl. Phys., vol. 84, p. 4162-4169, oct. 1998.
- [3] O. Ducasse, « Modélisation électrohydrodynamique d'un réacteur plasma hors-équilibre de dépollution des gaz », Toulouse 3, 2006.
- [4] A. Fiala, « Modélisation numérique bidimensionnelle d'une décharge luminescente à basse pression », Toulouse, 1995.
- [5] V. Vehadi, C. K. Birdsall, M. A. Lieberman, G. DiPeso, et T. D. Rognien, « Verification of frequency scaling laws for capacitive radio-frequency discharges using two-dimensional simulations », Phys. Fluids B Plasma Phys., vol.5, n°7, p.2719-2729, juill. 1993.
- [6] T. J. Sommerer et M. J. Kushner, « Numerical investigation of the kinetics and chemistry of rf glow discharge plasmas sustained in He, N₂, O₂, He/N₂/O₂, He/CF₄/O₂, and SiH₄/NH₃ using a Monte Carlo-fluid hybrid model » J. Appl. Phys., vol. 71, n°4, p. 1654-1673, févr. 1992.
- [7] J. Boeuf, Y. Lagmich, T. Galligari, et L. Pitchford, « Electrodynamic force and accélération in surface discharges » in 37th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conférence, 2006, p. 3574.
- [8] O. M. Stuetzer, « Ion drag pressure generation », J. Appl. Phys., vol. 30, n°7, p. 984-993, 1959.
- [9] M. Robinson, « Movement of air in the electric wind of the corona discharge », Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part Commun. Electron., vol. 80, n°2, p.143-150, mai 1961.
- [10] P. Béquin, K. Castor, et J. Scholten, « Electric wind characterisation in negative point-to-plane corona discharges in air », Eur. Phys. J. – Appl. Phys., vol. 22, n°1, p. 41-49, avr. 2003.
- [11] D. Lacoste, D. Pai, et C. Laux, « Ion wind effects in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air », in 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004, p. 354.
- [12] S. El- Khabiri et G. M. Colvert, « Drag reduction by dc corona discharge along an electrically conductive flat plate for small number flow », Phys. Fluids, vol. 9, n°3, p. 585-599, 1997.
- [13] R. S. Sigmond, A. Goldman, et M. Goldman, « Ring vortex gas flow in negative point corona », in Proc. 10th Int. Conf. On Gas Disch. And their Appli., Swansea, UK, p. 330-333, 1992.
- [14] R. S. Sigmond, Electrical breakdown of gases. New York : J. M. Meek J. D. Craggs ; 1978.
- [15] J. F. Loiseau, J. Batina, F. Noël, et R. Peyrous, « Hydrodynamical Simulation of the electric wind generated by successive streamers in point-to-plane reactor », J. Phys. Appl., vol.35, n°10, p 1020, 2002.
- [16] F. Grangé, N. Soulem, J. F. Loiseau, et N. Spyrou, « Numerical and experimental determination of ionizing front velocity in a DC point-to-plane corona discharge » J. Phys. Appl., vol 28, n°8, p.1619, 1995.

- [17] J. P. Bœuf et L. C. Pitchford, « Electrohydrodynamic force and aerodynamic flow acceleration in surfaces discharges », in 37th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, p. 3574, 2006.
- [18] J. -C. Matéo-Vélez, « Modélisation et simulation numérique de la génération de plasmas dans les décharges couronnes et de son interaction avec l'aérodynamique », Toulouse, ENSAE, 2006.
- [19] J. -C. Matéo-Vélez, P. Degond, F. Rogier, A. Séraudie, et F. Thivet, « Modeling wire-to-wire corona discharge action on aerodynamics and comparison with experiment », J. Phys. Appl. Phys., vol 43, n°3, p. 035205, 2008.
- [20] J. -C. Matéo-Vélez, F. Rogier, et F. Thivet, P. Degond, « Numerical Modeling of Plasma-Flow Interaction », in Computational Science – ICCS, p. 1-9, 2006.
- [21] E. Moreau, « Applications des plasmas non thermiques au contrôle électrofluidodynamique des écoulements », in Conférence invitée aux journées CNRS plasmas froids, Bonascre, Octobre 2005, France, 2005.
- [22] A. Séraudie, E. Aubert, N. Naudé, et J. Cambromne, « Effect of plasma actuators on a flat plane laminar layer in subsonic conditions », in 3rd AIAA Flow Control Conference, p.3350, 2006.

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

IV. Résultats et discussion.....	45
IV. 1 Vitesse du gaz.....	45
IV. 2 Variation de la vitesse induite par la force EHD le long de l'axe inter-électrodes.....	47
IV. 3 Distribution spatiale des radicaux atomiques	48
IV.3. 1 Distribution spatiale de l'oxygène atomique (O)	49
IV.3. 2 Distribution spatiale de l'ozone (O ₃)	50
IV. 4 Production de l'ozone en fonction de la haute tension	52
IV.4. 1 Production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz	54
IV. 5 Étude paramétrique	55
IV.5. 1 Production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz pour trois valeurs de la haute tension	55
IV.5. 2 Effet du rayon de fil (r)	57
IV.5.2. 1 Caractéristique 'courant-tension'	57
IV.5.2. 2 Variation de la vitesse du vent ionique en fonction de l'intensité du courant	58
IV.5.2. 3 Variation du champ électrique et de la densité électronique le long de l'axe oy.....	60
IV.5.2. 4 Variation de la production d'ozone en fonction de l'intensité du courant électrique pour les trois valeurs de r.....	63
IV.5. 3 Effet du déplacement des électrodes (L).....	65
IV.5.3. 1 Effet sur la caractéristique 'courant-tension'	65
IV.5.3. 2 Effet sur la variation de la vitesse du vent ionique en fonction de la haute tension.....	67
IV.5.3. 3 Effet sur la production de l'ozone en fonction du courant électrique.....	68
Références bibliographiques.....	70

IV. Résultats et discussion

Les résultats présentés dans ce travail ont été obtenus pour un système d'électrodes 'fil-grille'. Nous considérons que l'écoulement est confiné entre deux plaques (ou deux plans) parallèles distantes de 1 cm et de longueur 7 cm chacune (figure 1). Entre les deux plaques et en leur centre se trouve, perpendiculairement à elles et à l'écoulement d'air, une grille liée à la masse, constituée de fils très fins. En amont de la grille, du côté de l'entrée de l'air, est placé un fil le long l'axe oz , de rayon $r_0 = 100 \mu m$, distant de $d = 0,5 \text{ cm}$ de cette grille, et parallèle, en même temps, à la grille et aux plaques, de telle sorte que la largeur des plaques est égale à la longueur du fil (w). Le centre du repère (O) coïncide avec celui de la grille. Le fil est soumis à une haute tension positive $\phi = +10 \text{ kV}$, ce qui correspond à une intensité de courant par unité de longueur du fil de $91,14 \mu A/cm$ [1], [2].

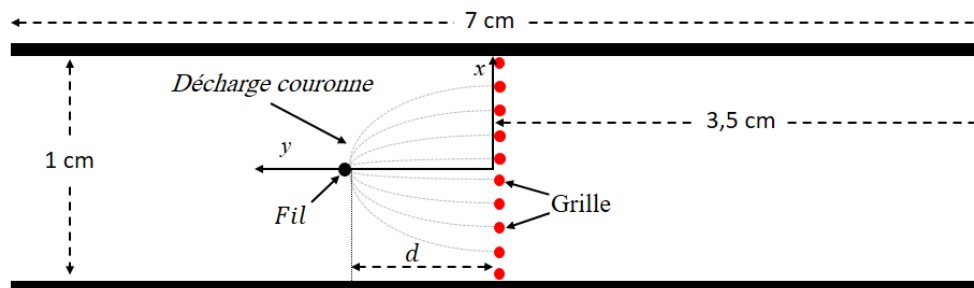


Figure IV. 1: Illustration schématique de la géométrie utilisée explicitant les paramètres géométriques (sans échelle).

Tableau IV. 1: Paramètres utilisés dans la modélisation

Paramètres géométriques et tension	
Rayon du fil (r_0)	$100 \mu m$
La distance fil-grille (d)	$0,5 \text{ cm}$
La distance fil-fil (grille)	0.02 cm
Tension	10 kV

IV. 1 Vitesse du gaz

La figure 2 montre les distributions des vitesses, en incluant les lignes de courant, correspondant aux trois cas mentionnés ci-dessous ((a), (b) et (c)).

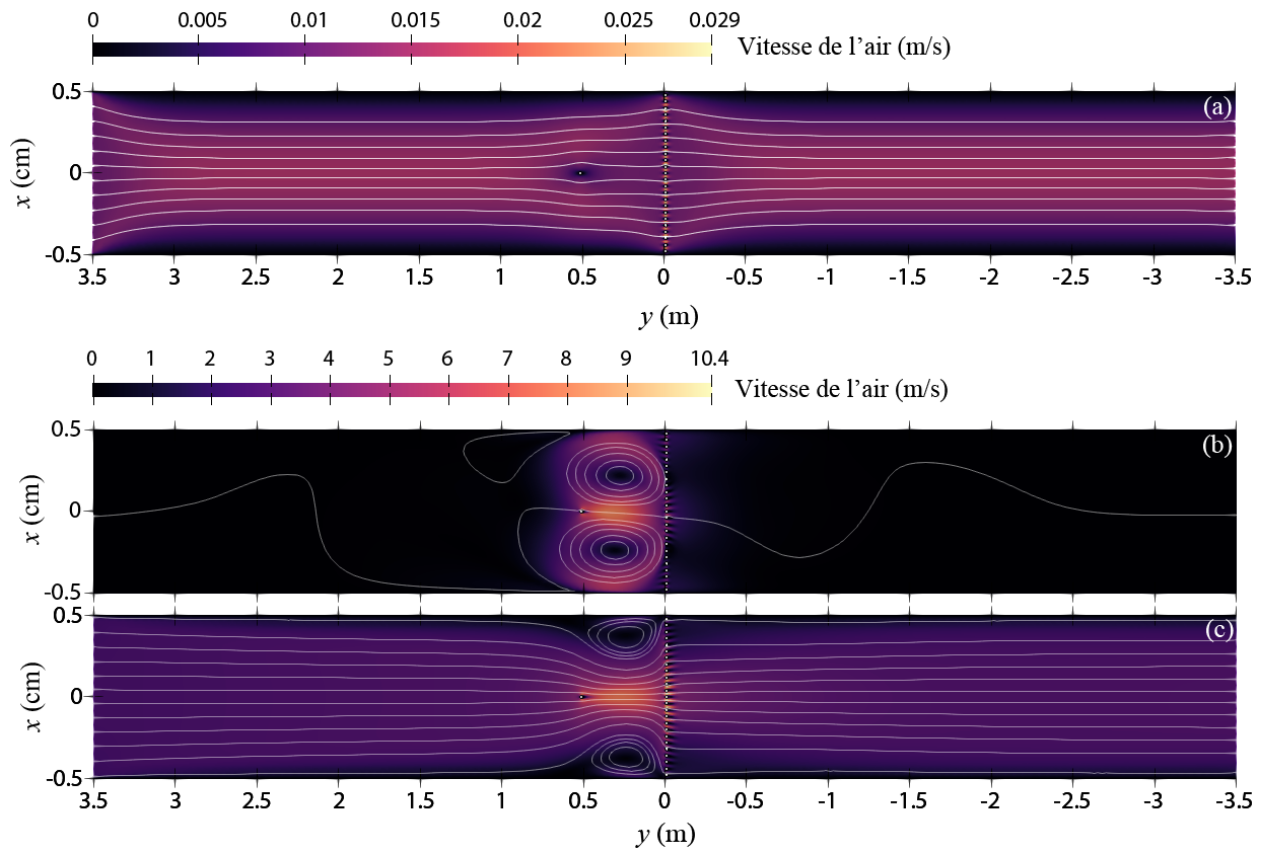


Figure IV. 2: Distribution spatiale à 2D de l'amplitude de la vitesse du gaz et lignes d'écoulement correspondant à : (a) une vitesse d'entrée du gaz de $V_0 = 2.4 \text{ cm/s}$ sans force EHD, (b) une vitesse d'entrée de $V_0 = 1 \text{ cm/s}$ avec force EHD, et (c) une limite d'entrée du gaz ouverte avec force EHD ; pour un rayon de fil

Lorsque l'écoulement EHD est ignoré (figure 1a), les lignes de vitesse sont approximativement parallèles et la vitesse maximale (2,9 cm/s) est atteinte au niveau de l'espace inter-fils de la grille. En revanche, la prise en compte de la force EHD donne lieu à une augmentation substantielle de la vitesse du fluide (1040 cm/s), et affecte considérablement les lignes de vitesse (figure 1b). Donc, la force EHD accélère le gaz à partir du fil (anode) vers la grille (cathode). Arrivant à la grille, le gaz est contraint de changer sa direction, à cause de la présence de cette grille ; et il y aura formation de deux grands tourbillons (ou vortex) de recirculation, dans deux sens opposés, occupant tout l'espace inter-électrodes, s'étalant jusqu'aux surfaces des plaques et, presque, symétriques par rapport à l'axe oy ($x=0$). Le centre de chaque tourbillon se situe à une distance d'environ $d-y = 0,25 \text{ cm}$ du fil, le long de l'axe de symétrie, et à environ $x = \pm 0,25 \text{ cm}$ de chaque côté du fil. Ces valeurs de vitesses élevées ont été confirmées, expérimentalement, dans différentes configurations géométriques d'électrodes dans la décharge couronne [3]. Quand la limite d'entrée du gaz est supposée être ouverte (figure 1c), là où la vitesse d'entrée de l'air est négligeable, l'effet de l'aspiration de l'air par la force EHD est remarquable et se manifeste à partir de l'entrée du canal et, en outre, cette force EHD fait déplacer les tourbillons vers les plaques et

provoque la réduction de leur taille. Cette aspiration se fait à partir du fil (anode) vers la grille (cathode). Nous remarquons que la condition aux limites concernant l'entrée du gaz joue un rôle considérable concernant l'absence (cas b), ou l'apparition des lignes de vitesse ainsi que le changement de leur forme (cas c). La forme des lignes est très semblable entre le cas (a) (présence d'une vitesse d'entrée et absence de la force EHD) et le cas (c) (limite d'entrée libre et présence de la force EHD). Au contraire pour le cas (b) (présence conjointe d'une vitesse d'entrée et d'une force EHD), le changement est radical concernant la forme des lignes de vitesse. Il est à noter que malgré la différence de l'allure générale concernant les lignes de vitesse, la valeur de la vitesse au niveau du milieu de la distance inter-électrodes est presque la même, ou légèrement supérieure, dans le cas (b) par rapport au cas (c).

IV. 2 Variation de la vitesse induite par la force EHD le long de l'axe inter-électrodes

La figure 3 met en évidence la différence, de variation de la vitesse induite par la force EHD le long de l'axe inter-électrodes (axe de symétrie) (oy) depuis l'entrée du réacteur ($y = +3,5$) et jusqu'à sa sortie ($y = -3,5$), pour les deux cas ((b) et (c)).

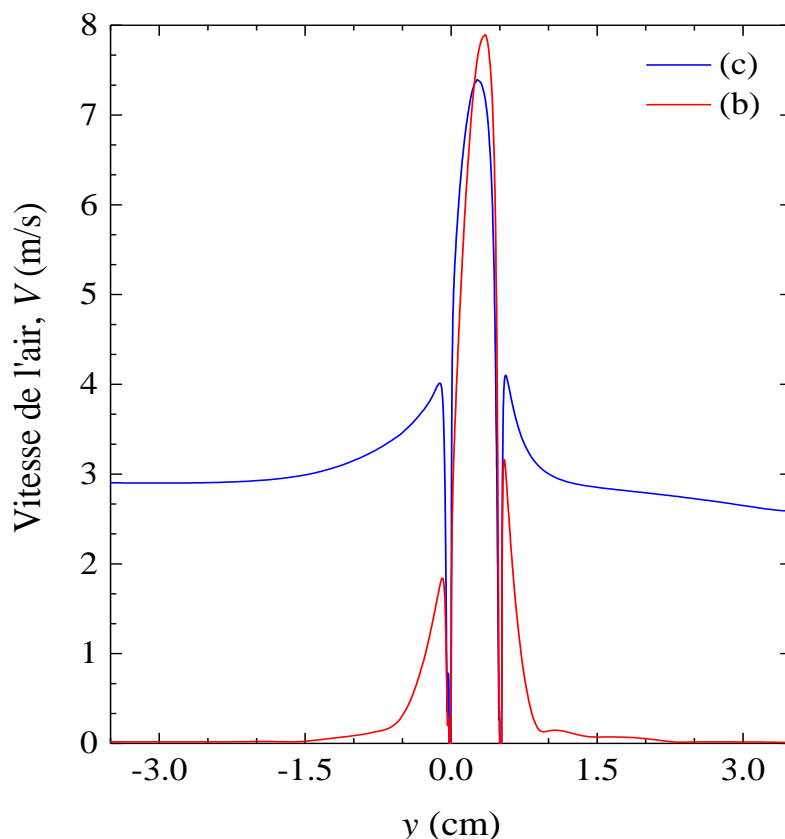


Figure IV. 3: Vitesse du gaz le long de l'axe de symétrie ($x = 0$) dans les deux cas : (b) une vitesse d'entrée du gaz $V_0 = 2.4$ cm/s avec force EHD, et (c) limite d'entrée du gaz ouverte avec force EHD, pour un rayon de fil $r_0 = 100$ μ m, une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm et une tension appliquée $\phi = 10$ kV.

Pour le cas (b), la vitesse du gaz, le long de l'axe de symétrie oy ($x = 0$), est nulle sur le fil et sur la grille ; ce qui est une conséquence directe des conditions aux limites imposées aux électrodes. Tandis que dans le cas (c), là où la vitesse de l'air à l'entrée du réacteur ($y = +3,5 \text{ cm}$) est négligeable, voire nulle, l'application de la décharge électrique induit une force EHD qui aspire l'air au niveau de l'entrée du réacteur et, par conséquent, la vitesse atteint, instantanément, une valeur de l'ordre de 290 cm/s ; puis elle augmente lentement en s'approchant du fil où elle prend, juste avant le fil, une valeur d'environ 400 cm/s . Sur la surface du fil, et en amont, la vitesse chute vers la valeur zéro. Mais en aval du fil, et à partir de sa surface, elle subit une brusque augmentation, et aboutit à sa valeur maximale, d'environ 730 cm/s , au niveau du milieu de l'espace inter-électrodes ($y = + 0,25 \text{ cm}$). Et, instantanément, elle commence à chuter de la même manière et atteint, au niveau des fils de la grille une valeur nulle. Juste après la grille, et sur la surface de ses fils, cette vitesse augmente, instantanément, à une valeur de 400 cm/s ; puis elle diminue lentement jusqu'à aboutir, à $y = -1,5 \text{ cm}$, à une valeur constante de 290 cm/s en allant vers la sortie du réacteur. La comparaison entre les cas (c) et (b) révèle que l'allure des vitesses est, globalement, le même dans l'espace inter-électrodes, quoique qu'on remarque une légère augmentation de cette vitesse dans le cas (b), ce qui pourrait être expliqué par une forte recirculation des grands tourbillons qui renforce cette vitesse en l'augmentant de 730 cm/s (cas (c)) à 790 cm/s (cas (b)). Finalement, pour ce dernier cas, la valeur imposée de la vitesse à l'entrée (1 cm/s) est conservée à la sortie. A remarquer que dans le cas (b) (présence d'une vitesse initiale d'entrée de l'air et d'une force EHD), la vitesse du vent électrique est, légèrement, plus supérieure dans l'espace inter-électrodes par rapport au cas (c) (présence d'une force EHD uniquement), mais en dehors de cet espace la vitesse de l'écoulement est insignifiante.

IV. 3 Distribution spatiale des radicaux atomiques

Puisque la tension appliquée sur le fil est positive, les électrons germes libres, formés naturellement dans l'espace inter-électrodes, sont accélérés par le champ électrique vers le fil. Dans la région d'ionisation, très près du fil, là où la valeur du champ électrique réduit (E/N , où N est la densité moléculaire) dépasse $120 \text{ Townsend (Td)}$, les électrons accélérés par ce champ deviennent très énergétiques. Par conséquent, leurs collisions avec les molécules neutres du gaz sont inélastiques et produisent, par ionisation, des paires électron-ion positif. Les électrons germes libres et ceux libérés à travers l'ionisation sont, à leur tour, accélérés par le champ électrique et forment une avalanche électronique. Dans la zone d'ionisation, en s'approchant du fil, ces électrons énergétiques, initient d'importantes réactions chimiques. Parmi ces réactions, la dissociation de molécules

neutres, telles que O_2 et N_2 , par impact électronique, conduisant ainsi à l'apparition d'espèces atomiques (ou radicaux atomiques) libres comme O et N :



Notons que la durée de vie caractéristique (durée écoulée entre l'apparition et la disparition d'une espèce chimique, c'est-à-dire durée pendant laquelle l'espèce se trouve à l'état libre) de l'oxygène atomique (O) est très courte et est de $\tau_O \approx (k_1[O_2][N_2])^{-1} \sim 20$ ms. Il s'ensuit que l'O est rapidement consommé en produisant, notamment, de l' O_3 .

IV.3.1 Distribution spatiale de l'oxygène atomique (O)

La figure 4 représente la distribution spatiale à 2D du taux d'oxygène atomique (O) produit par la décharge couronne.

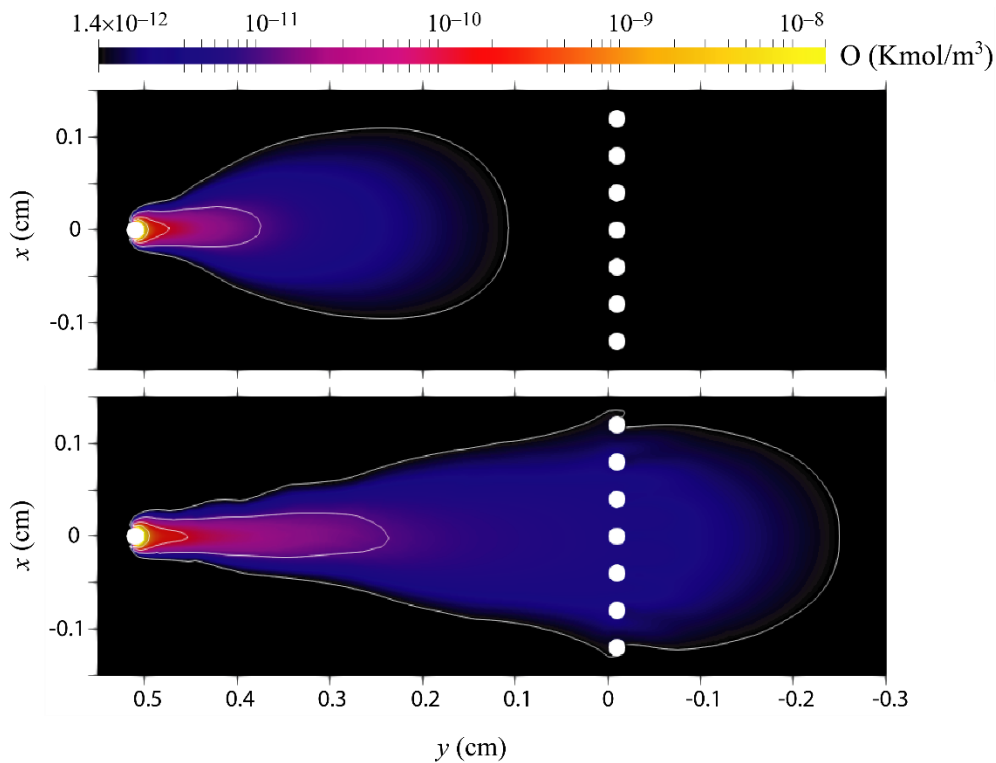


Figure IV. 4: Distribution spatiale à 2D de l'oxygène atomique (O), dans les deux cas : (b) une vitesse d'entrée du gaz $V_0 = 2.4$ cm/s, et (c) une limite d'entrée du gaz ouverte ; pour un rayon de fil de $r_0 = 100 \mu m$, une distance inter-électrodes de $d = 0,5$ cm et une tension appliquée de $\phi = 10$ kV.

A cause de l'existence d'une vitesse du vent ionique, les atomes O générés dans la zone d'ionisation devraient s'étendre jusqu'à quelques centaines de microns vers la grille, quoique le taux de la répartition spatiale de l'O s'affaiblit, progressivement, en s'approchant de cette grille (figure 4). Cependant, cette étendue de la répartition de l'O est, remarquablement, plus importante (à un

taux d'environ $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ mol/m}^3$) au niveau du fil, lors de la présence d'une limite d'entrée libre de l'air (figure 4c). Et ce par rapport à celle se révélant en présence d'une faible vitesse d'entrée, où la production d'O diminue, légèrement, jusqu'à un taux d'environ 10^{-8} mol/m^3 (figure 4b). En outre, le taux de production d'O, qui est visiblement plus accentué en présence d'une limite d'entrée d'air libre (cas c), présente une répartition spatiale plus étendue (figure 4c). Plus précisément, cette répartition (cas c), qui devient négligeable à partir d'environ la mi-distance 'fil-grille', se manifeste même en aval de la grille, à un taux non négligeable et, jusqu'à une distance d'environ un-tiers de la distance 'fil-grille' dans le sens de l'écoulement EHD (figure 4c). Dans les deux cas (figures 4b et 4c), l'O n'apparaît qu'en aval du fil et uniquement sur sa surface. Mais en se dirigeant, à partir du fil, vers la sortie du canal, l'O se répartit, en s'approchant, progressivement, des surfaces des plaques, sans les atteindre.

IV.3. 2 Distribution spatiale de l'ozone (O_3)

La distribution spatiale, à 2D, de l' O_3 est représentée dans la figure 5:

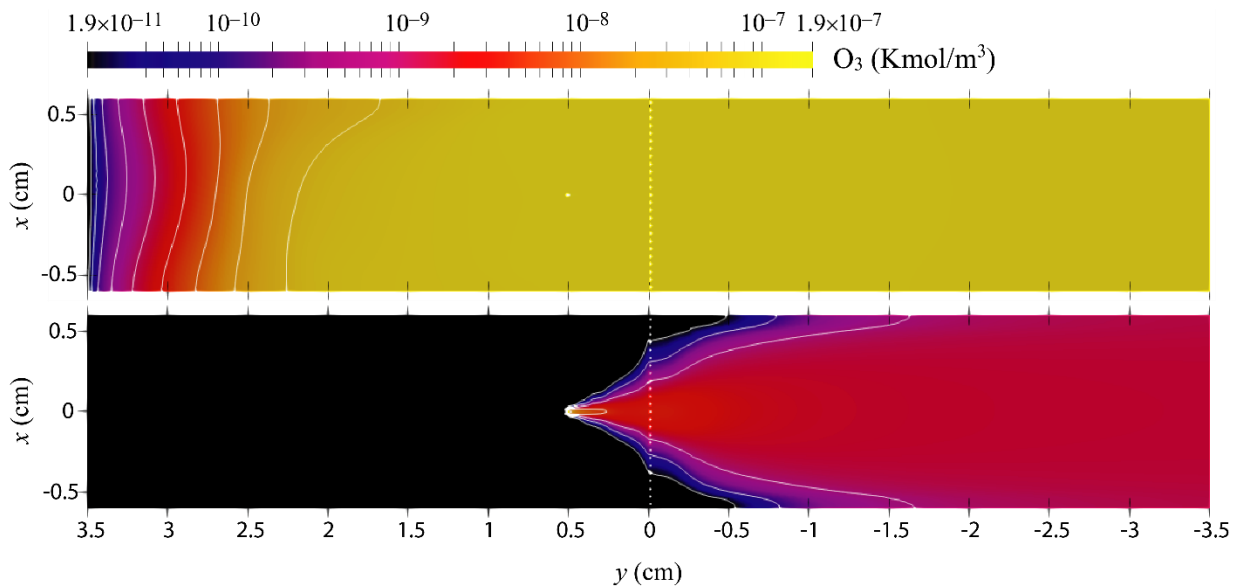


Figure IV. 5: Distribution spatiale à 2D de l' O_3 , dans les deux cas : (b) une vitesse d'entrée du gaz $V_0 = 2.4 \text{ cm/s}$, et (c) limite d'entrée du gaz ouverte ; pour un rayon de fil de $r_0 = 100 \mu\text{m}$, une distance inter-électrodes de $d = 0,5 \text{ cm}$ et une tension appliquée de $\phi = 10 \text{ kV}$.

La consommation de l'O (qui est présent à de grandes densités dans la zone d'ionisation au niveau de la surface du fil), en réagissant avec l' O_2 de l'air, explique la production de grandes concentrations d' O_3 à cet endroit, à travers les réactions (R3, R4) :



Même pour cette faible vitesse d'entrée (1 cm/s), le gaz tout en s'écoulant réside dans le réacteur pendant une durée plus courte (< 7 s) que la durée de vie caractéristique de l' O_3 (d'environ $\tau_{O_3} \approx (k_5[NO])^{-1} \sim 10$ s, qui est relativement très longue. En conséquence, l' O_3 produit dans la région active de la décharge couronne, peut-être transporté très loin du fil sans subir beaucoup de pertes. En outre, les tourbillons générés par le vent ionique participent, beaucoup plus efficacement, à l'homogénéisation de la répartition de l' O_3 . En revanche, l' O_3 peut même diffuser contre le courant du gaz et se diriger vers l'entrée du canal avec un taux qui se révèle important et constant (environ 10^{-7} mol/m³), à partir d'une distance d'environ 1,25 cm de l'entrée du canal. Ce taux reste, globalement, constant jusqu'à la sortie du canal (figure 5b). En revanche, cette distribution de l' O_3 subit une diminution progressive, en amont du fil, en se dirigeant vers l'entrée du canal. A partir de cette distance (1,25 cm), la diminution s'effectue avec de grands gradients jusqu'à devenir négligeable au niveau de l'entrée du canal. Cette propagation de l' O_3 , en amont du fil, dans le sens inverse de l'écoulement d'air, pourrait-être expliquée par une présence simultanée de deux grands tourbillons et d'une étroite répartition de l'O qui reste confinée, notamment, au niveau de la surface du fil, et jusqu'à une distance ne dépassant pas, environ, le milieu de la distance inter-électrodes. Par conséquent, l' O_3 est formé presque exclusivement, dans cet espace et, compte tenu de la faible vitesse d'entrée, les deux grands tourbillons participent, efficacement, à la propagation de l' O_3 vers l'entrée du canal.

D'autre part, pour une limite d'entrée d'air ouverte (figure 5c), la production de l' O_3 ne se manifeste qu'en aval du fil et sur sa surface, là où le taux de l' O_3 atteint une valeur maximale moyenne d'environ 10^{-7} kmol/m³. Cette valeur maximale reste, presque, constante dans une zone étroite le long de l'axe 'fil-grille', et s'étend jusqu'à une distance du fil d'environ 0,25 cm. En dehors de cette zone, et à partir de l'espace formé par l'intérieur d'un triangle, globalement, équilatéral (dont les trois sommets se situent, respectivement, sur le fil, au point $x = + 0,5$ cm et $y = - 1,75$ cm; puis au point $x = - 0,5$ cm et $y = - 1,75$ cm), et tout le reste de l'espace inter-plaques du côté de la sortie du canal, le taux d' O_3 prend une valeur d'environ $0,7 \cdot 10^{-8}$ kmol/m³ et reste constant, où diminue très légèrement. Dans le reste de l'espace inter-plaques, le taux d' O_3 subit d'importants gradients de diminution, en se dirigeant dans le sens positif de l'axe oy, et aboutit, très rapidement, à une valeur négligeable en s'approchant de la surface des plaques, même pour des valeurs négatives de la coordonnée y.

IV.4 Production de l'ozone en fonction de la haute tension

La production d'ozone (O_3) est représentée pour les deux cas ((b) et (c)), lors de la variation de la haute tension (figure 6).

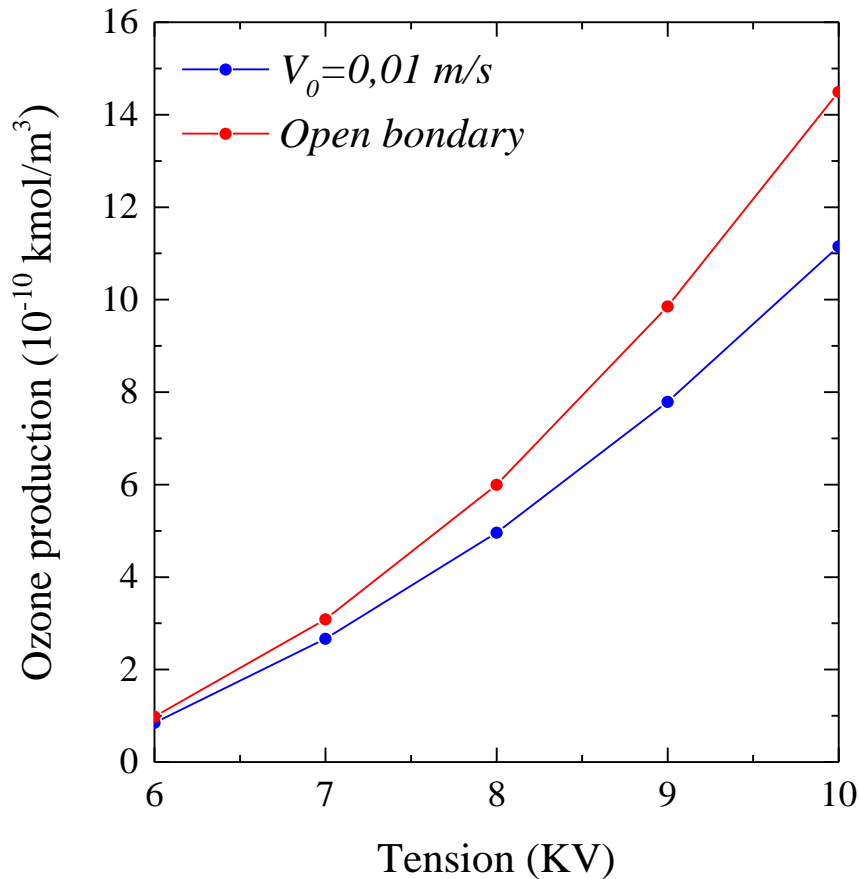


Figure IV. 6: Production de l'ozone (O_3) en fonction de la haute tension appliquée au fil (de 6 à 10 kV) pour les deux cas : b) vitesse d'entrée d'air $V_0 = 2,4$ cm/s et c) entrée libre ; pour un rayon du fil $r = 100$ μ m et une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm.

La figure 6, qui représente la production de l' O_3 en présence d'une force EHD, en fonction de la vitesse d'entrée du gaz, montre que cette production ne commence à être appréciable qu'à partir d'une tension de 6 kV où se révèle un taux très faible se situant aux environs de 10^{-10} kmol/m³ (cas (c)). Mais cette production est, très légèrement, inférieure quand la présence de la force EHD est accompagnée d'une vitesse d'entrée (cas (b)). En revanche, en augmentant la haute tension (de 6 à 10 kV), la production d' O_3 croît, quasi-quadratiquement, pour les deux cas. Néanmoins, cette production d' O_3 croît plus rapidement dans le cas (c) que dans le cas (b), au fur et à mesure que la haute tension augmente. Par conséquent, l'écart entre les deux productions s'accroît constamment. Par exemple, pour la haute tension 10 kV, la production d' O_3 passe d'environ $11,2 \cdot 10^{-10}$ kmol/m³ (cas b) à environ $14,5 \cdot 10^{-10}$ kmol/m³ (cas c). Plus précisément, ce qui est fort remarquable, c'est que cette production d' O_3 croît, apparemment, dans un rapport moyen d'environ de 1,23, du cas (c) au

cas (b), quand la haute tension augmente (Tableau 1). Cette croissance dans la production d'O₃ est, vraisemblablement, due à une croissance de l'intensité de la force EHD en fonction de la haute tension. La production d'O₃ dans l'air est due, essentiellement, à la présence de l'oxygène atomique (O) (équations R3 et R4)), et il est connu que la présence de le champ est à l'origine, entre autres, de la production de O, à travers l'accélération des électrons germes libres, vers l'électrode positive. Ces électrons dissocient, les molécules O₂ de l'air, dès qu'ils gagnent assez d'énergie cinétique. Sachant que l'O est produit dans la zone d'ionisation de la décharge couronne, très proche de l'électrode positive, il est évident que l'O₃ se forme, en prédominance, dans la zone d'ionisation. Néanmoins, la croissance de la force EHD fait augmenter la vitesse des ions positifs dans la zone d'ionisation et, par conséquent, celle du vent ionique dans la zone de dérive, y compris celle de l'oxygène atomique O. Dans le cas (c), là où la vitesse du vent ionique est, légèrement, plus inférieure par rapport à celle du cas (b), l'augmentation relative de la production d'O₃ peut-être expliquée par la faible recirculation des deux tourbillons qui se réduisent dans ce cas (c), tout en se décalant vers les surfaces des deux plaques. Il s'ensuit, dans ce cas (c), qu'une quantité supplémentaire d'atomes O auraient, vraisemblablement, plus de possibilité pour réagir avec les molécules O₂ de l'air et former un supplément de l'O₃ par rapport au cas (b).

Tableau IV. 2: Comparaison de la production d'O₃, en fonction de la (HT), entre le cas (b) et le cas (c).

Haute Tension (kV)	O ₃ (10 ⁻¹⁰ kmol/m ³), cas b	O ₃ (10 ⁻¹⁰ kmol/m ³), cas c	O ₃ (cas c)/O ₃ (cas b)
6	0,8	1	1,25
7	2,6	3	1,16
8	4,9	6	1,23
9	7,7	10	1,30
10	11,2	14,5	1,29

Cette augmentation de la vitesse du vent ionique, en présence d'une vitesse initiale d'entrée, pourrait faire éviter à plus d'atomes O de se combiner avec des molécules O₂, pour former l'O₃. Ceci pourrait expliquer, même en partie, la diminution dans la production d'O₃, en présence d'une vitesse initiale d'entrée. Il n'empêche, qu'en absence ou en présence d'une vitesse initiale et, parallèlement, à l'augmentation de la haute tension, la production de l'ozone croît dans les deux cas ((b) et (c)) (figure 6). Dans tous les cas, les atomes O n'ayant pas eu la possibilité de réagir avec les molécules O₂ de l'air pour former des molécules O₃, vont disparaître, rapidement, vu leur très courte durée de vie, via d'autres réactions chimiques.

IV.4.1 Production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz

La production d'ozone est représentée dans les deux cas ((b) et (c)) en fonction de la vitesse d'entrée du gaz (figure 7).

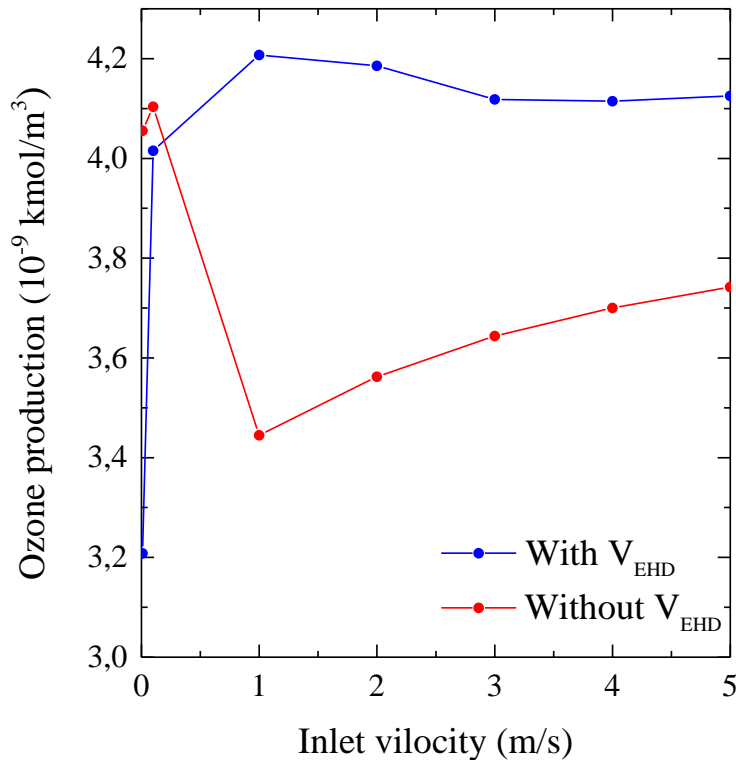


Figure IV. 7: Production de l'ozone (O_3) en fonction de la vitesse d'entrée dans les cas : b) vitesse d'entrée d'air de $V_0 = 2.4$ cm/s et c) entrée libre ; pour un rayon du fil $r_0 = 100$ μ m, une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm et une tension de 10 kV.

La figure 7 indique qu'il y a toujours une certaine production d' O_3 , en présence d'un force EHD, qu'elle soit la vitesse d'entrée de l'air. Par conséquent, même à une vitesse d'entrée négligeable, voire nulle, la production d' O_3 se situe aux environs de $3,21 \cdot 10^{-9} \text{ kmol/m}^3$. Plus encore, quand cette vitesse d'entrée croît, même légèrement, en allant vers 0,1 m/s, la production d' O_3 subit une brusque augmentation aboutissant à une valeur de $4,02 \cdot 10^{-9} \text{ kmol/m}^3$. Ainsi, quand la vitesse continue à augmenter, la production d' O_3 croît sans cesse, mais d'une manière moins accentuée, jusqu'à un taux de $4,20 \cdot 10^{-9} \text{ kmol/m}^3$, où la vitesse atteint 1 m/s. Néanmoins, à partir de cette vitesse (1 m/s), la production d' O_3 subit une légère diminution et aboutit à $4,18 \cdot 10^{-9} \text{ kmol/m}^3$, pour une vitesse de 2 m/s. Cette diminution se poursuit, très légèrement, et la production d' O_3 prend la valeur de $4,10 \cdot 10^{-9} \text{ kmol/m}^3$ quand la vitesse atteint 3 m/s. Mais quelle que soit l'augmentation de cette vitesse, à partir de cette dernière valeur, il semble que la production d' O_3 reste constante, ou ne varie

pas d'une manière significative. Dans ce cas, la production d' O_3 estimée tourne autour d'une valeur moyenne de $4,11 \cdot 10^{-9} \text{ kmol/m}^3$. D'après ces observations, il est peut-être justifiable de noter qu'une vitesse d'entrée du gaz qui dépasse 1 m/s, n'a pas une influence significative sur la production d' O_3 et que, au contraire, elle peut même être à l'origine d'une très faible diminution. D'où, probablement, l'économie d'une certaine quantité d'énergie qui aurait été nécessaire à une augmentation appréciable de la vitesse d'entrée du gaz.

IV. 5 Étude paramétrique

IV.5.1 Production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz pour trois valeurs de la haute tension

La production de chaque espèce est calculée comme étant la moyenne de la densité de cette espèce multipliée par la vitesse de l'écoulement le long de l'axe ox , à la sortie du réacteur.

La figure 8 montre la variation de la production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz, qui est imposée dans une gamme de variation (de ≈ 0 à 3 m/s) ; mais pour trois tensions appliquées (8, 9 et 10 kV).

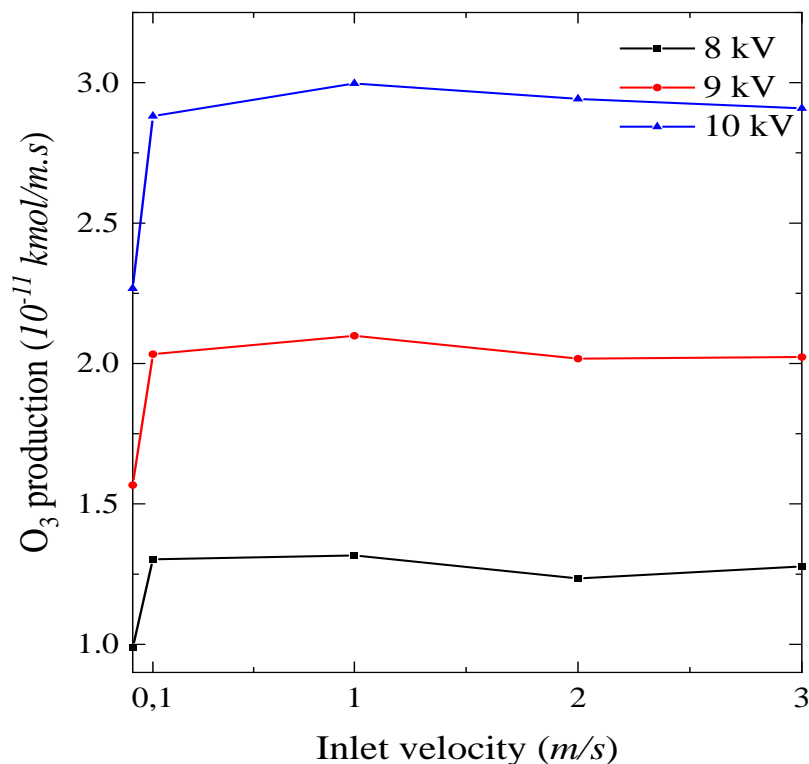
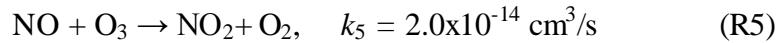


Figure IV. 8: Production d' O_3 , au niveau de la sortie du réacteur, en fonction de la vitesse d'entrée du gaz, en présence d'une force EHD, pour une tension variée ($\phi = 8, 9$ et 10 kV), un rayon de fil $r_0 = 100 \mu\text{m}$ et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.

Pour les trois tensions, la production de l'ozone augmente considérablement lorsque la vitesse d'entrée varie d'environ 0.01 à 0,1 m/s, ensuite elle diminue légèrement quand la vitesse augmente jusqu'à 2 m/s et, enfin, elle reste presque constante au-delà de cette dernière valeur de la vitesse d'entrée. Ce comportement de la production d'ozone est expliqué par la durée de vie caractéristique de l'ozone qui est étroitement liée à sa destruction à travers la réaction :



Comme le montre la figure 8 , pour une tension de 9 kV par exemple, à une faible vitesse d'entrée de gaz (c'est-à-dire pour un temps de résidence de gaz dans le réacteur plus grand), la durée de vie caractéristique de l'ozone calculée par la relation $\tau_{\text{O}_3} \approx (k_5 [\text{NO}])^{-1}$ est faible car la réaction 5 (R5) a suffisamment de temps pour consommer l'ozone. A grande vitesse d'entrée du gaz (c'est-à-dire pour un temps de résidence du gaz dans le réacteur plus petit), la réaction R5 ne contribue pas efficacement à la destruction de l'ozone, parce que la durée de vie caractéristique de l'ozone est grande (de l'ordre de 10 s) par rapport au temps de résidence du gaz dans le réacteur.

La figure 9 indique clairement que lorsque le temps de résidence du gaz dans le réacteur est court, l'ozone formé (qui a une grande durée de vie) s'écoule rapidement dans le gaz et, par conséquent, la réaction 5 ne participe pas efficacement à sa destruction. En d'autres termes, plus le temps de résidence du gaz dans le réacteur est court, plus la durée de vie de l'ozone dans le réacteur est importante, car il échappe efficacement à sa destruction via la réaction 5 (figure 9).

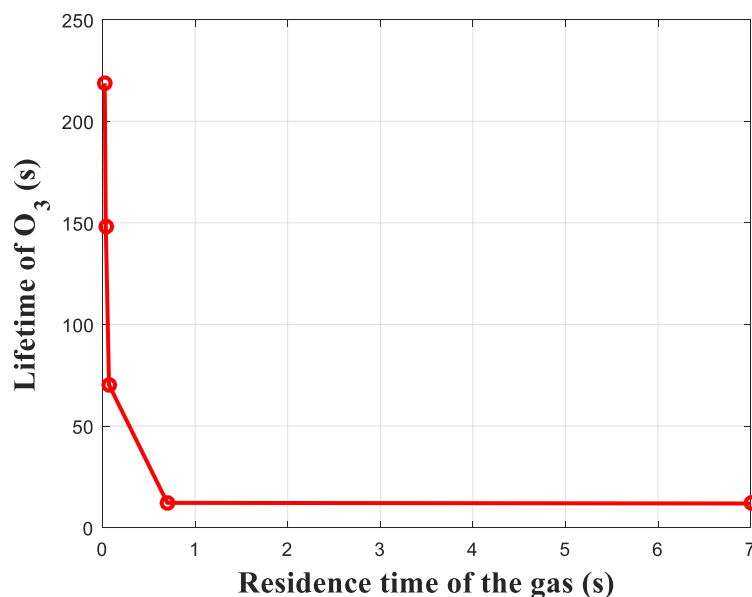


Figure IV. 9: Variation de la durée vie de l'ozone dans le réacteur en fonction du temps de résidence du gaz dans le réacteur, pour une tension de 9 kV

IV. 5. 2 Effet du rayon de fil (r)

IV. 5. 2. 1 Caractéristique ‘courant-tension’

La figure 10 montre la caractéristique ‘courant-tension’ pour trois rayons du fils (80 μm , 100 μm et 120 μm).

Pour une tension donnée, lorsque le rayon du fil augmente le champ électrique créé diminue, ce qui entraîne la réduction du courant électrique.

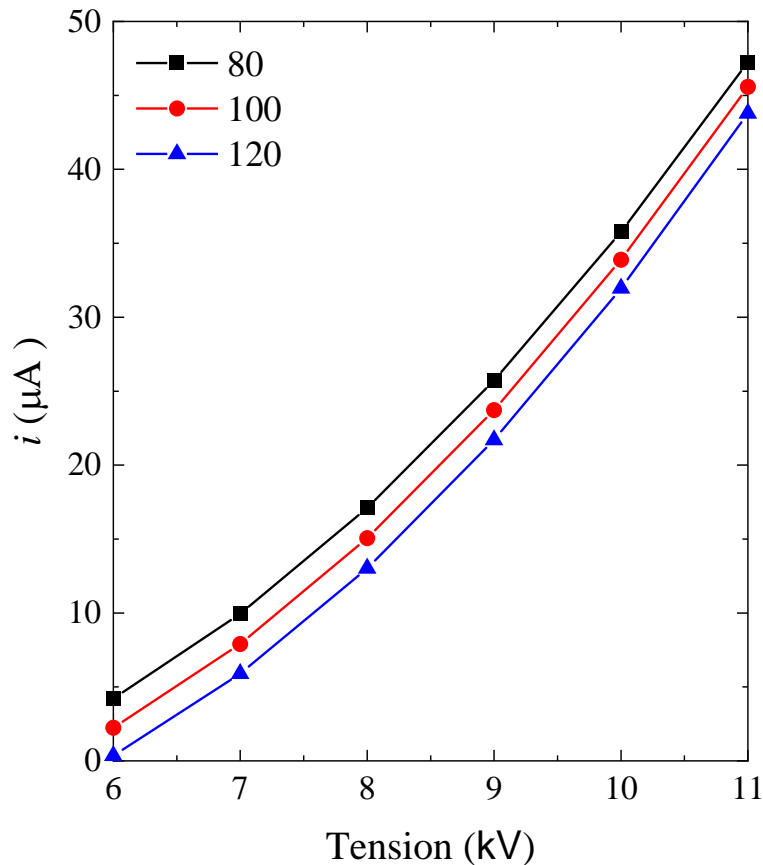


Figure IV. 10: Caractéristique ‘courant-tension’ pour les trois valeurs du rayon de fil.

Tout d’abord, pour une valeur donnée de rayon du fil (r_0), l’intensité du courant électrique (I) croît, quadratiquement, en fonction de la HT; ce qui est en bon accord avec la littérature. Cependant, quelque soit la HT, cette intensité I augmente, de la même manière, en passant d’un fil de rayon donné à un fil de rayon plus petit. En d’autres termes, lorsque le rayon du fil diminue, le champ électrique créé augmente ; ce qui entraîne l’augmentation du courant électrique (I).

IV.5.2. 2 Variation de la vitesse du vent ionique en fonction de l'intensité du courant

La variation de la vitesse du vent électrique, en fonction de I , pour les trois valeurs de r , est représentée sur la figure 11.

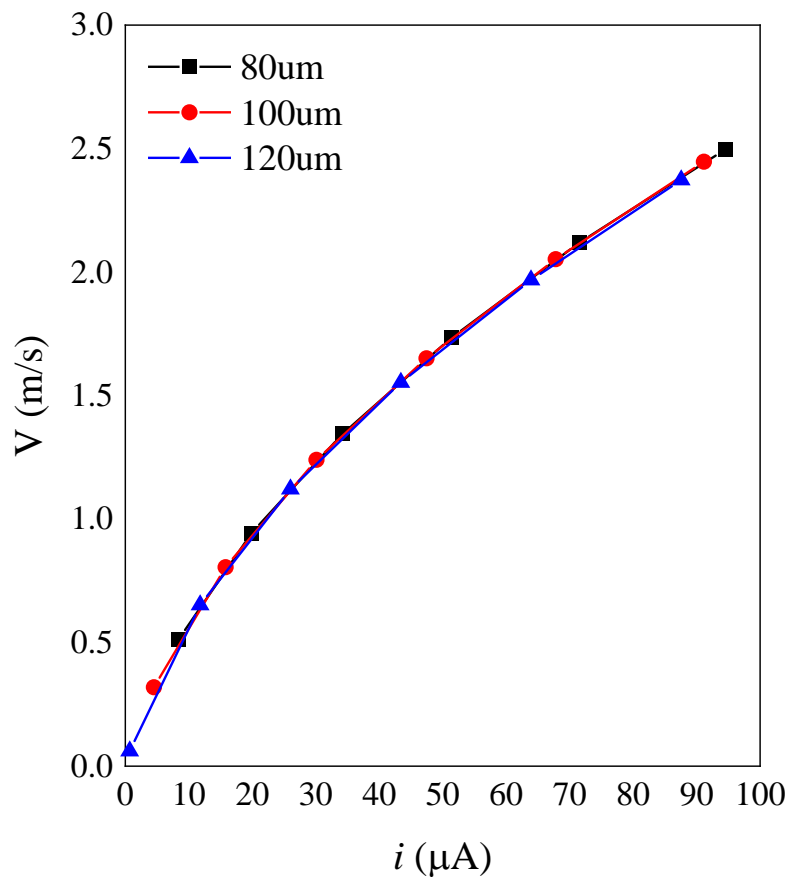


Figure IV. 11: Variation de la vitesse du vent électrique en fonction du courant électrique pour les trois valeurs du rayon de fil, pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$) et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.

La figure 11 montre que l'intensité du courant électrique varie quadratiquement en fonction de la vitesse du vent électrique, en changeant le rayon du fil.

La figure 12 présente la variation de la vitesse du vent électrique en fonction de la racine carrée de l'intensité du courant électrique, pour les trois valeurs du fil.

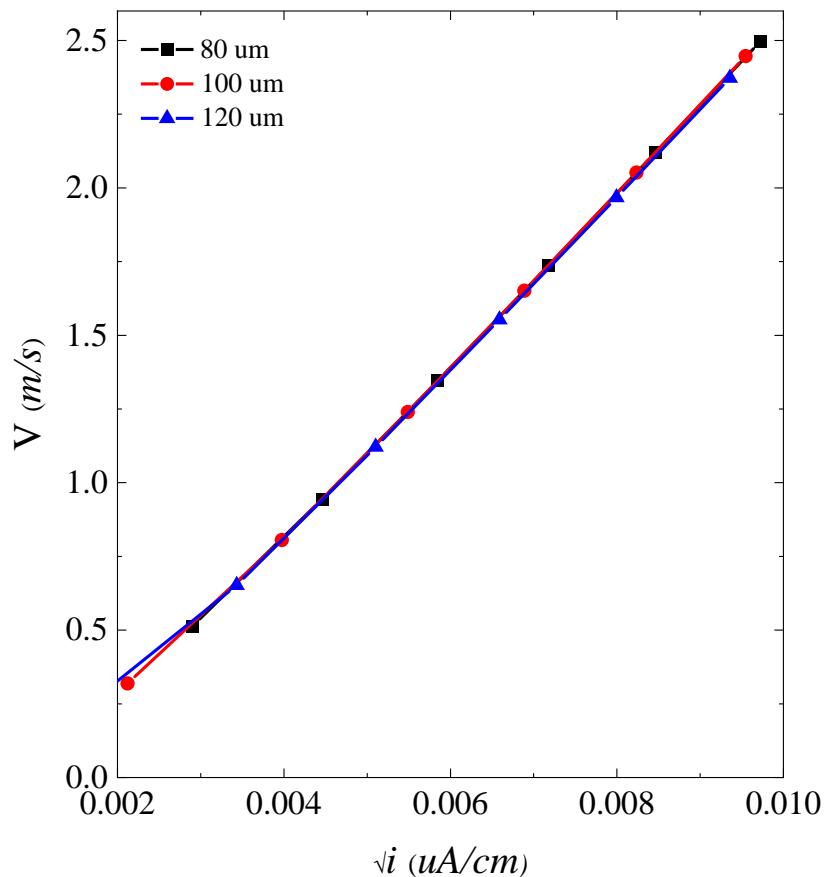


Figure IV. 12: Variation de la vitesse du vent électrique en fonction de la racine carrée du courant électrique pour trois valeurs du rayon de fil, pour une tension ($\phi = 10$ kV) et une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm.

La figure 12 indique la variation de la vitesse du vent électrique, en fonction de la racine carrée du courant électrique (I), est linéaire pour les trois valeurs de r . Ceci est en accord avec les mesures expérimentales de la littérature [4]–[6].

Il est remarquable, d'après la figure 12 que le rayon du fil a un effet négligeable, voire inexistant, sur la variation de la vitesse du vent électrique quand le courant électrique est constant. Il découle de cette remarque que pour une valeur constante donnée du courant I , le temps de résidence du gaz dans le réacteur reste le même pour les trois valeurs du rayon de fil.

Remarquons que, puisque I augmente avec l'augmentation de la HT, mais il diminue avec l'augmentation de rayon du fil, la maintenance de I à une valeur constante donnée exige l'augmentation de la HT à une valeur convenable, parallèlement, à l'augmentation du rayon du fil (figures 12 et 13). A titre d'exemple, pour une intensité de courant d'environ $9,5 \cdot 10^{-5} \mu\text{A}$, la valeur de la vitesse du vent ionique, au niveau de la sortie du réacteur, se situe aux environs de 2,5 m/s quel que soit le rayon du fil.

IV.5.2.3 Variation du champ électrique et de la densité électronique le long de l'axe oy

Le champ électrique et la densité électronique sont deux paramètres responsables, à la fois et indirectement, de la production du vent électrique et de la productivité chimique des espèces dans le réacteur. En conséquence, la variation de ces deux principales caractéristiques, au voisinage du fil, le long de l'axe de symétrie, est abordée.

a -Variation du champ électrique le long de l'axe inter-électrodes, pour les trois valeurs de r

Comme l'indique la figure 13, quand le rayon du fil augmente, le champ électrique (E) diminue au voisinage très proche du fil (jusqu'à environ 5 μm) et croît dans le reste de la zone d'ionisation. Ainsi, l'augmentation de E provoque un élargissement de la zone d'ionisation comme la montre la figure ci-dessous indiquant, dans la zone considérée, l'augmentation de la densité électronique (figure 14). Cet élargissement de la zone d'ionisation signifie qu'il aura plus de productivité chimique.

On rappelle que la production d'une espèce chimique donnée, à la sortie du réacteur, est égale à moyenne de la concentration de cette espèce multiplié par la vitesse du vent ionique. Alors, lorsqu'on fixe la valeur du courant électrique et on augmente le rayon du fil, la production de toutes les espèces chimiques accroîtra à la sortie du réacteur parce que les concentrations de toutes les espèces augmentent (figure 14), quoique la vitesse du gaz reste presque la même. La figure 13 représente la distribution du champ électrique (E), au voisinage du fil, le long de l'axe inter-électrodes ($x=0$), pour les trois valeurs du rayon de fil (r).

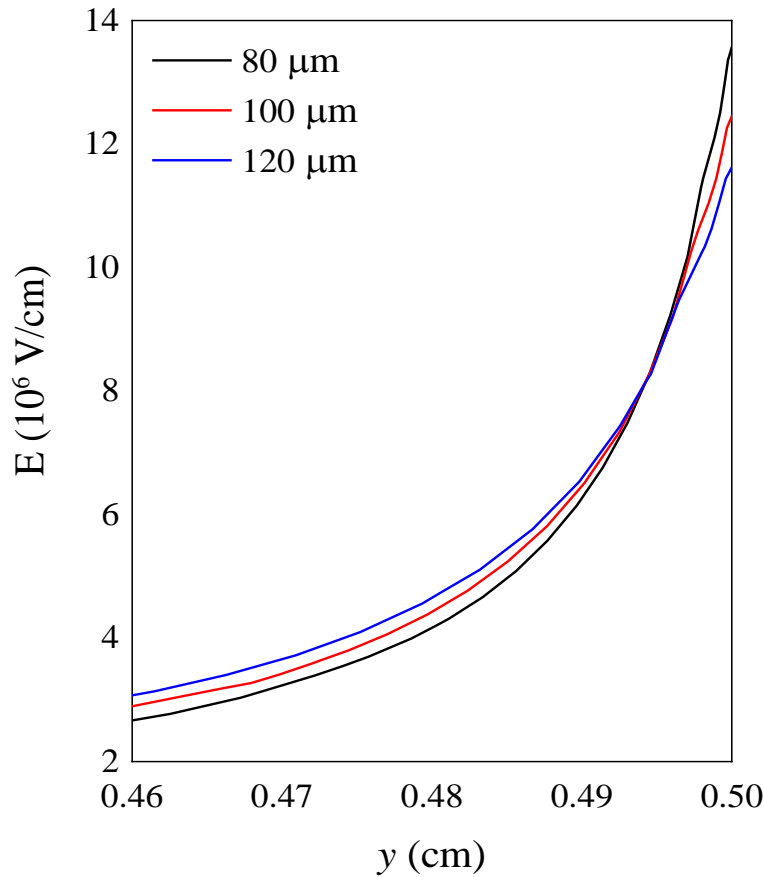


Figure IV. 13: Distribution du champ électrique (E), au voisinage du fil, le long de l'axe inter-électrodes, pour les trois valeurs du rayon de fil (r), pour une tension ($\phi = 10$ kV) et une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm.

Illustrons ce comportement de E en fonction de la coordonnée (y) par des valeurs numériques. Tout d'abord, au niveau de la surface du fil, les intensités de E sont $E_1 = 1,36 \cdot 10^7$, $E_2 = 1,24 \cdot 10^7$ et $E_3 = 1,15 \cdot 10^7$ Volt (V) pour les fils de rayons 80 μm , 100 μm et 120 μm , respectivement. Ensuite, au voisinage immédiat du fil, vers la distance de 5 μm , le champ E prend une valeur unique, pour les trois fils, se situant aux environs de $8,2 \cdot 10^6$ V. Tandis qu'aux environs de la limite de la zone d'ionisation, le champ E prend les valeurs $2,6 \cdot 10^6$ V, $2,9 \cdot 10^6$ V et $3,9 \cdot 10^6$ V pour les fils de rayons 80 μm , 100 μm et 120 μm , respectivement. Il découle, clairement, de la comparaison de ces valeurs que la variation du rayon de fil joue deux rôles contradictoires, concernant la variation de l'intensité du champ E , le long de l'axe de symétrie à l'intérieur de la zone d'ionisation. En d'autres termes, dans l'intervalle se situant entre la surface du fil et le point dont $d-y \approx 5$ μm , le champ E diminue davantage quand le rayon augmente. Mais, inversement, dans l'intervalle (5 μm ; limite de la zone d'ionisation ≈ 40 μm), la diminution du champ E s'accroît quand le rayon augmente.

Indiquons qu'au-delà du voisinage immédiat du fil (à environ 5 μm), l'augmentation relative du champ E , en fonction de l'augmentation relative du rayon du fil, est accompagnée par un élargissement de la zone d'ionisation [7]. Cet élargissement de la zone d'ionisation implique une

augmentation de la productivité chimique. Par conséquent, afin d'augmenter la productivité chimique, pour une haute tension donnée, il faudrait opter pour le fil du plus grand rayon.

b - Variation de la densité électronique le long de l'axe inter-électrodes, pour les trois valeurs de r

La distribution de la densité électronique (N_e) le long de l'axe inter-électrodes (oy), au voisinage du fil, pour les trois valeurs de r , est représentée sur la figure 15.

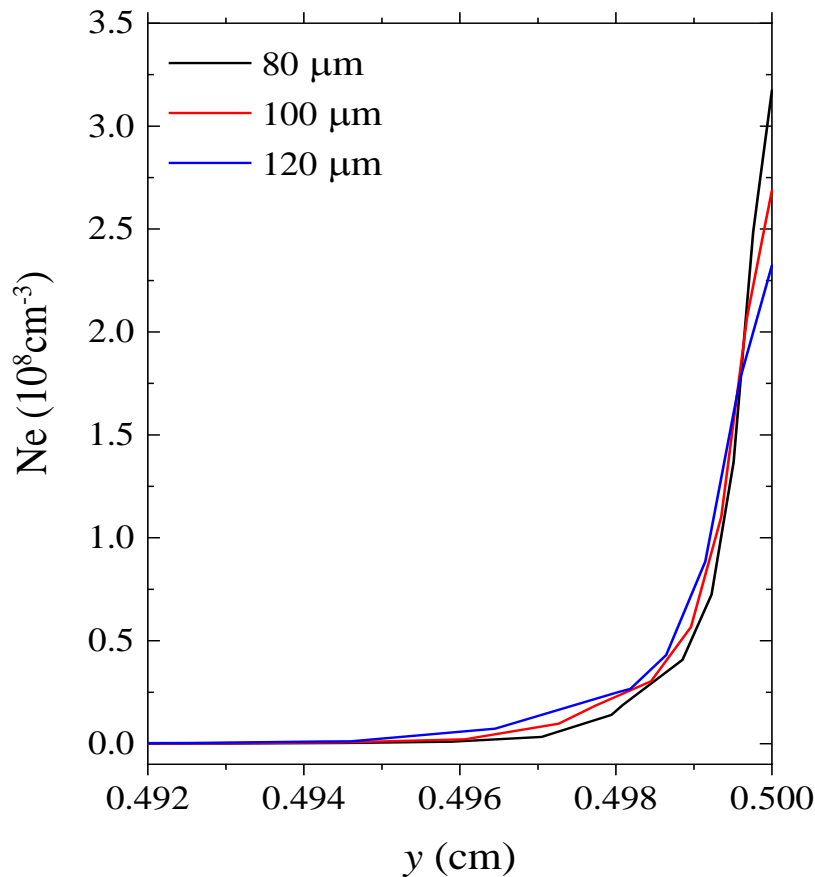


Figure IV. 14: Distribution de la densité électronique (N_e), au voisinage du fil, le long de l'axe inter-électrodes, pour les trois valeurs du rayon de fil (r), pour une tension ($\phi = 10 \text{ kV}$) et une distance inter-électrodes $d = 0,5 \text{ cm}$.

Une lecture interprétative de la figure 14 révèle que la densité N_e diminue le long de l'axe inter-électrodes à partir de la surface du fil, en se dirigeant vers la grille et jusqu'à une distance d'environ $5 \mu\text{m}$, quelque que soit le rayon du fil. A partir de cette distance, la densité N_e devient négligeable. Lors du changement rayon de fil, la densité N_e varie selon trois intervalles différents le long de la distance inter-électrodes. Dans le premier intervalle, qui s'étend à partir de la surface du fil et jusqu'à environ $0,4 \mu\text{m}$, la densité N_e diminue davantage en passant d'un fil de rayon donné à un fil de rayon plus grand. Ainsi, au niveau de la surface du fil, quand le rayon du fil augmente de 80 à 100 , puis à $120 \mu\text{m}$, la densité N_e diminue d'environ $3,15 \cdot 10^{14}$ à environ $2,65 \cdot 10^{14}$, puis à

environ $2,30 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, respectivement. A la fin de ce premier intervalle, la densité N_e prend la même valeur d'environ $1,75 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, pour les trois fils. Au contraire, dans le deuxième intervalle qui s'étend d'environ $0,4 \text{ }\mu\text{m}$ à environ $5 \text{ }\mu\text{m}$, cette densité N_e subit une diminution moins accentuée, en passant d'un fil de rayon donné à un fil de rayon plus grand et aboutit à la fin de cet intervalle à une valeur presque négligeable. Dans le troisième intervalle, qui constitue le reste de la distance inter-électrodes, la densité N_e devient, manifestement, négligeable.

Mais ce qui pourrait inviter à une réflexion plus approfondie, concernant la comparaison entre la variation du champ E et celle de la densité N_e , dans un intervalle s'étendant de la surface du fil jusqu'à environ $5 \text{ }\mu\text{m}$, c'est de constater que cet intervalle est divisé en deux parties différentes concernant la variation de ces deux grandeurs physiques (E , N_e). Dans la première partie (surface du fil ; $0,4 \text{ }\mu\text{m}$), le champ E et la densité N_e diminuent, parallèlement, quand le rayon du fil augmente. En revanche, dans la deuxième partie ($0,4 \text{ }\mu\text{m}$; $5 \text{ }\mu\text{m}$), là où le champ E continue à diminuer davantage quand le rayon du fil augmente, la densité N_e diminue davantage aussi, mais quand le rayon du fil diminue.

L'inversion du comportement de la densité N_e dans l'intervalle (surface du fil ; $5 \text{ }\mu\text{m}$), où N_e augmente dans l'intervalle (surface du fil ; $0,4 \text{ }\mu\text{m}$) quand le rayon du fil diminue, et diminue dans l'intervalle ($0,4 \text{ }\mu\text{m}$; $5 \text{ }\mu\text{m}$) quand le rayon du fil diminue ;

IV.5.2.4 Variation de la production d'ozone en fonction de l'intensité du courant électrique pour les trois valeurs de r

Puisque à un courant I fixe, la vitesse du vent électrique reste pratiquement constante quand le rayon du fil change (figures 11, 12), il est impératif que la HT croît jusqu'à une valeur convenable, pour maintenir le courant I à la valeur désirée (figure 10). Sachant que la concentration de toute espèce chimique croît avec la HT, il s'ensuit que la production de cette espèce croît avec l'augmentation de cette concentration, à la sortie du canal; malgré que la vitesse du vent électrique reste quasiment constante lors du changement du rayon du fil.

La figure 15 représente la production de l'ozone (O_3), en fonction du courant I , pour les trois valeurs de r .

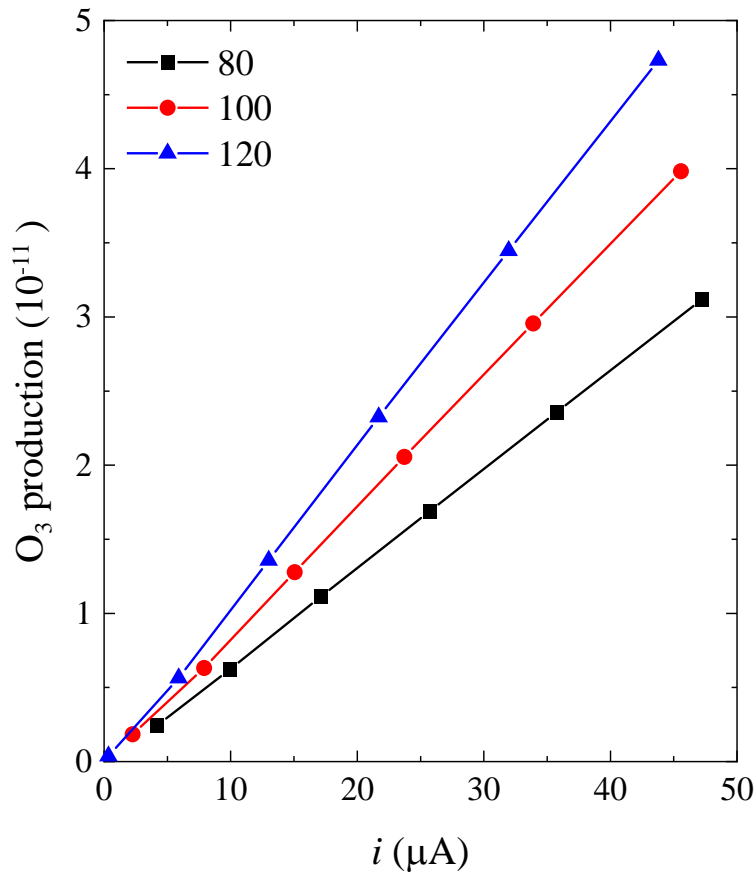


Figure IV. 15: Production de l'O₃ en fonction du courant électrique (*I*) pour trois valeurs du rayon de fil (*r*), une tension ($\phi = 10$ kV) et une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm.

La production de l'O₃ augmente linéairement en fonction de l'augmentation de l'intensité du courant électrique (*I*), pour tout rayon du fil (figure 15). Mais, l'écart dans la production de l'O₃ grandit, au fur et mesure que le courant *I* augmente, en passant d'un fil de rayon donné à un autre fil de rayon différent. Cependant, pour une valeur constante donnée du courant *I*, quand un fil d'un rayon donné est remplacé par un fil d'un plus grand rayon, la production de l'O₃ augmente, parallèlement. A titre d'exemple, la figure 16 indique qu'à un courant *I* d'une valeur d'environ $4,4 \cdot 10^{-5} \mu\text{A}$ correspond une production d'O₃ d'environ $2,8 \cdot 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$ pour le fil de rayon 80 μm, d'environ $3,8 \cdot 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$ pour le fil de rayon 100 μm et d'environ $4,8 \cdot 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$ pour le fil de rayon 120 μm. Remarquons qu'à un écart constant entre deux rayons de longueurs successives ($\Delta r = 20$ μm) correspond un écart constant entre deux productions successives de l'O₃ ($\Delta(\text{O}_3) = 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$), respectivement. Cette dernière remarque laisse suggérer que la production de l'O₃ subit une variation linéaire en fonction de l'écart entre les rayons de fils.

En effet, cette relation de linéarité exprimant l'écart successif entre deux rayons de fils ($\Delta r = 20$ μm) et l'écart correspondant de la production de l'O₃, s'est avérée vérifiée pour toutes les valeurs de l'intensité du courant électrique. Le tableau II indique les différentes productions de

O_3 en fonction de quelques intensités correspondantes (I), tout en précisant pour chaque I, les écarts dans la production de O_3 , lors du passage d'un fil à un autre fil dont la différence de rayons est $\Delta r = 20 \mu\text{m}$.

Tableau IV. 3: Comparaison de la production de O_3 en fonction de I, pour trois valeurs de r.

$I(10^{-5} \mu\text{A})$	$O_3(10^{-11} \text{ mol/m}^3)_1$ $r_1=80 \mu\text{m}$	$O_3(10^{-11} \text{ mol/m}^3)_2$ $r_2=100 \mu\text{m}$	$O_3(10^{-11} \text{ mol/m}^3)_3$ $r_3=120 \mu\text{m}$	$\Delta O_3(10^{-11} \text{ kmol/m}^3)$
3,2	2,1	2,8	3,5	$(O_3)_{r2}-(O_3)_{r1} = 0,7$ $(O_3)_{r3}-(O_3)_{r2} = 0,7$
2,2	1,4	1,9	2,4	$(O_3)_{r2}-(O_3)_{r1} = 0,5$ $(O_3)_{r3}-(O_3)_{r2} = 0,5$
1,3	0,8	1,1	1,4	$(O_3)_{r2}-(O_3)_{r1} = 0,3$ $(O_3)_{r3}-(O_3)_{r2} = 0,3$
0,6	0,3	0,4	0,5	$(O_3)_{r2}-(O_3)_{r1} = 0,1$ $(O_3)_{r3}-(O_3)_{r2} = 0,1$

En outre, une lecture plus attentive du tableau II pourrait révéler qu'il existe une relation de linéarité entre l'écart de production de O_3 (ΔO_3) et l'intensité du courant (I).

On constate aussi que le rayon du fil a un effet négligeable sur la vitesse du vent électrique, lorsqu'on a une valeur de courant constante et, en conséquence, le temps de résidence du gaz dans le réacteur est le même pour les trois rayons du fil.

IV.5. 3 Effet du déplacement des électrodes (L)

IV.5.3.1 Effet sur la caractéristique 'courant-tension'

La figure 16 indique la variation de la caractéristique 'courant-tension' lors de la variation de la distance des électrodes par rapport à l'entrée du canal (L), où L est la distance 'entrée du canal-grille'.

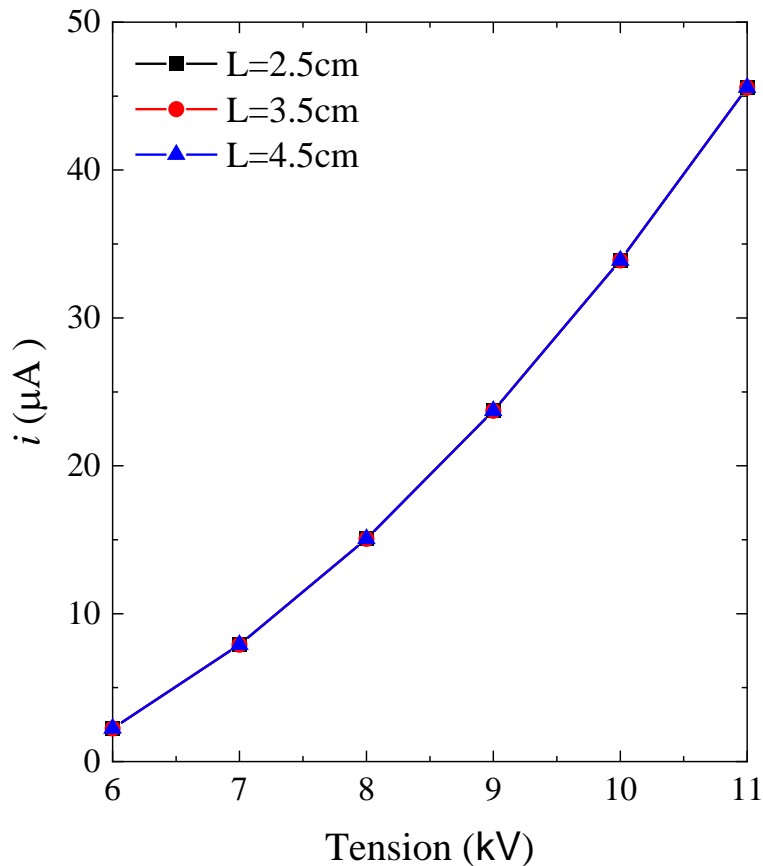


Figure IV. 16: Caractéristique 'courant-tension' pour trois valeurs de $L = 2,5 ; 3,5$ et $4,5$ cm.

Notons que la variation de L n'a pratiquement aucune influence sur la caractéristique 'courant-tension'. pour une tension ($\phi = 10$ kV), une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm et rayon du fil $r_0 = 100$ μm .

Nous avons tracé la variation de la vitesse du vent ionique à la sortie du réacteur en fonction de la haute tension (figure 17) et la variation de la production de l' O_3 en fonction du courant (I) (figure 18), en déplaçant les électrodes par rapport à l'entrée du réacteur d'une distance de $L = 2.5\text{cm}$, $L = 3.5\text{cm}$ et $L = 4.5\text{cm}$.

Trois raisons ont poussé à penser au changement de la distance L :

- Premièrement, le profil de la vitesse du gaz change aux alentours du fil en changeant la distance L , plus particulièrement dans la zone d'ionisation. Par conséquent, vu ce changement de la vitesse du gaz, le temps de résidence de gaz dans la zone d'ionisation va changer, ce qui peut avoir une conséquence directe sur les réactions chimiques.

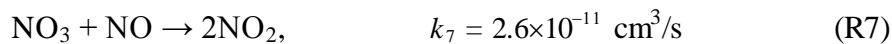
- Deuxièmement, la position des électrodes peut aussi influencer la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Autrement dit, la vitesse d'aspiration du gaz à partir de l'entrée du canal, ainsi que le temps de résidence du gaz dans le réacteur peuvent changer en fonction de L .

Finalement, même après la sortie du gaz de l'espace inter-électrodes, il y a des réactions chimiques qui continuent à se produire. Donc, plus la longueur de la partie restante du canal, en aval de la grille, est grande plus l'activité chimique est importante.

La production des espèces O_3 et NO , n'est que très légèrement infectée par la distance L , contrairement aux espèces NO_2 et NO_3 . La raison de ce comportement est que les durées de vie caractéristiques de l' O_3 (10 s) par exemple et de NO sont plus grandes par rapport au temps de résidence du gaz dans le réacteur. Donc la distance L n'influence pas vraiment la production de ces deux espèces chimiques. Inversement, les durées de vie caractéristiques de NO_2 et NO_3 sont plus petites que le temps de résidence du gaz dans le réacteur. Ce qui conduit à dire que la distance L agit sur ces deux espèces chimiques. Notons que la production de NO_3 est liée à la disparition de NO_2 à travers la réaction :



Cependant, le radical NO_3 se recombine avec le monoxyde d'azote (NO), pour donner NO_2 , selon la réaction :



Cette réaction (R7) est le principal processus de la destruction de NO_3 mais son temps caractéristique dépend de la concentration de NO . Comme ce temps caractéristique ($\tau_{NO_3} = (k_7[NO])^{-1}$) est plus court que le temps de séjour du gaz dans le réacteur, un équilibre entre la formation et la recombinaison tend à s'établir. Ceci permet d'estimer, globalement, la densité de NO_3 dans le réacteur : $[NO_3] = k_6[NO_2][O_3]/(k_7[NO])$. Puisque la production de l'ozone en fonction de la vitesse d'entrée du gaz est similaire à celle du monoxyde d'azote, cette relation montre que la production du trioxyde d'azote (NO_3) est proportionnelle à la production du dioxyde d'azote (NO_2) et cela explique la réduction de la production du trioxyde d'azote (NO_3) lorsque la distance L augmente.

IV.5.3.2 Effet sur la variation de la vitesse du vent ionique en fonction de la haute tension

La figure 17 représente la variation de la vitesse du vent ionique en fonction de l'intensité du courant pour les trois valeurs de $L = 2,5 ; 3,5$ et $4,5$ cm.

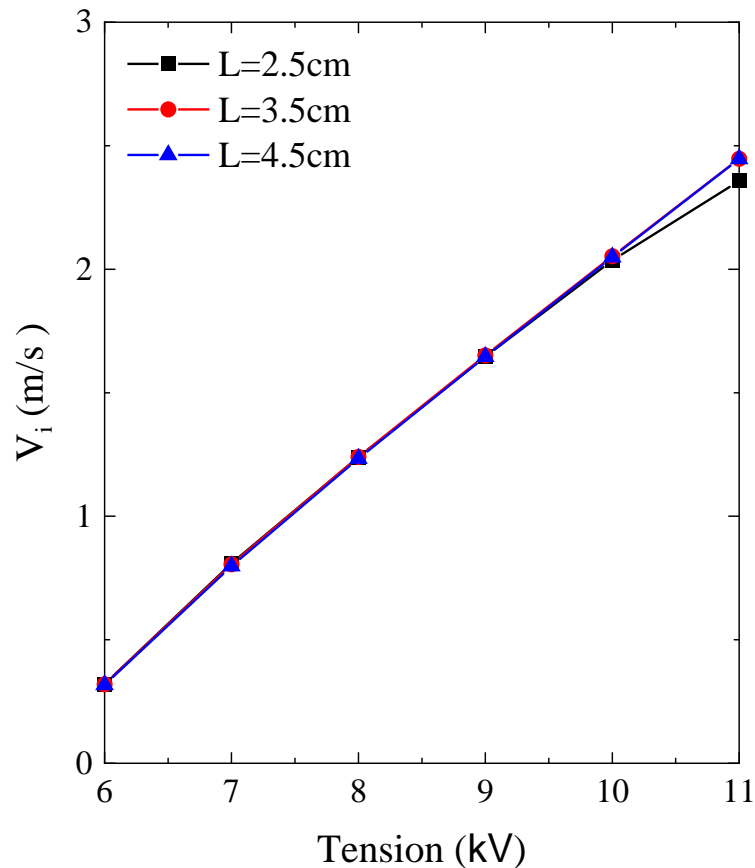


Figure IV. 17: Variation de la vitesse du vent électrique (V_i) en fonction de la tension appliquée (V) pour $L = 2,5 ; 3,5$ et $4,5$ cm. pour une tension ($\phi = 10$ kV), une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm et rayon du fil $r_0 = 100 \mu\text{m}$.

La figure 17, qui trace la variation de la vitesse du vent ionique en fonction de la haute tension lorsque L varie (2,5 ; 3,5 et 4,5 cm), indique que quelle que soit la haute tension (de 6 à 10 kV), la distance L n'a, très semblablement, pas d'influence sur cette vitesse. Cependant, à partir d'une tension supérieure à 10 kV, la vitesse commence à subir une légère diminution pour la plus basse valeur de $L = 2,5$ cm. Cette diminution de la vitesse s'accroît progressivement en fonction de la haute tension jusqu'à aboutir à une tension de 11 kV. Ceci pourrait laisser suggérer que la diminution de L au-delà de 3,5 cm ne fait que diminuer la vitesse du vent ionique quand la haute tension dépasse 10 kV ; ce qui pourrait être indésirable.

IV.5.3.3 Effet sur la production de l'ozone en fonction du courant électrique

La figure 18 indique la variation de la production de l'ozone en fonction du courant électrique (I), pour les trois valeurs de L .

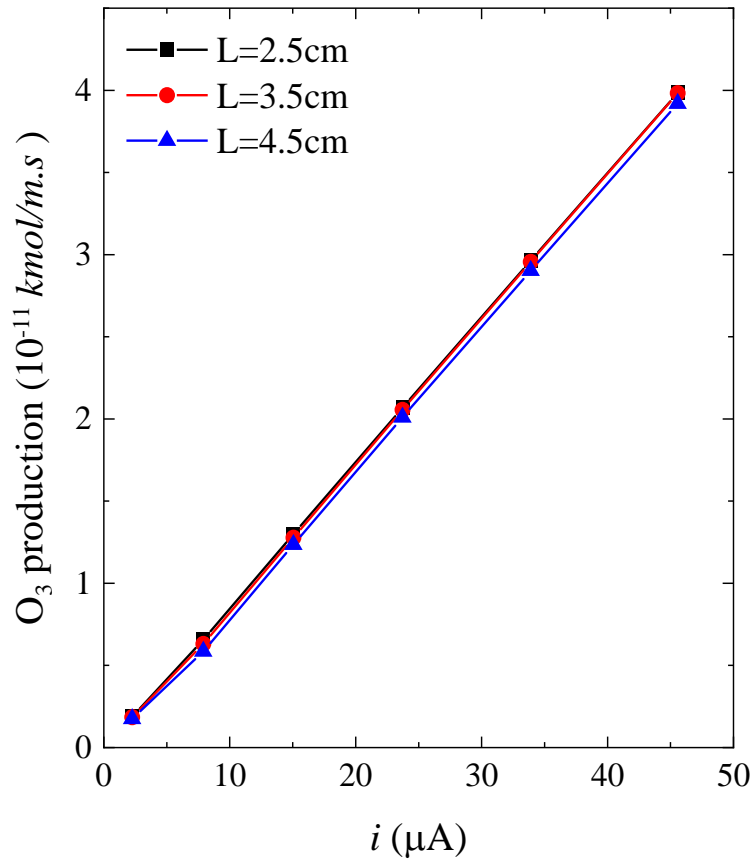


Figure IV. 18: Variation de la production de l'O₃ en fonction du courant *I* pour $L = 2,5 ; 3,5$ et $4,5$ cm. pour une tension ($\phi = 10$ kV), une distance inter-électrodes $d = 0,5$ cm et rayon du fil $r_0 = 100$ μm.

La production de l'ozone varie linéairement en fonction du courant électrique (*I*). Mais, d'après la figure 18, les productions de l'O₃ ne sont, pratiquement, pas affectées par la variation de la distance *L*. La raison de ce comportement est que les durées de vie de l'O₃ sont plus grandes par rapport au temps de résidence du gaz dans le réacteur ; donc la distance *L* n'influe pas vraiment sur la production de cette espèce chimique.

Références bibliographiques

- I.1 [1] W. Deutsch, « Über die dichtevertelung unipolarer ionenströme », *Ann. Phys.*, vol. 408, n° 5, p. 588- 612, 1933.
- I.2 [2] R. S. Sigmond, « The unipolar corona space charge flow problem », *J. Electrostat.*, vol. 18, n° 3, p. 249- 272, oct. 1986, doi: 10.1016/0304-3886(86)90021-5.
- I.3 [3] D. F. Colas, A. Ferret, D. Z. Pai, D. A. Lacoste, et C. O. Laux, « Ionic wind generation by a wire-cylinder-plate corona discharge in air at atmospheric pressure », *J. Appl. Phys.*, vol. 108, n° 10, p. 103306, nov. 2010, doi: 10.1063/1.3514131.
- I.4 [4] E. Moreau, « Airflow control by non-thermal plasma actuators », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 40, n° 3, p. 605, 2007, doi: 10.1088/0022-3727/40/3/S01.
- I.5 [5] J.-C. Matéo-Vélez, P. Degond, F. Rogier, A. Séraudie, et F. Thivet, « Modelling wire-to-wire corona discharge action on aerodynamics and comparison with experiment », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 41, n° 3, p. 035205, 2008, doi: 10.1088/0022-3727/41/3/035205.
- I.6 [6] P. Bérard, *Etude du vent ionique produit par décharge couronne à pression atmosphérique pour le contrôle d'écoulement aérodynamique*. Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris, 2008. Consulté le: juill. 06, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2008ECAP1085>
- I.7 [7] A. Yehia, A. Mizuno, et K. Takashima, « On the characteristics of the corona discharge in a wire-duct reactor », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 33, n° 21, p. 2807, 2000, doi: 10.1088/0022-3727/33/21/321.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de montrer la production d'ozone lors d'une décharge électrique couronne de polarité positive, dans l'air à pression atmosphérique, dans une configuration géométrique 'fil-grille'.

Le point a été mis, plus particulièrement, sur la production de l'ozone par cette décharge et sur sa répartition spatiale à 2D, ainsi que l'effet du changement de certains paramètres sur cette production.

Tout d'abord nous avons pris connaissance de certaines généralités sur l'ozone, des techniques physiques naturelles et artificielles de production d'ozone ainsi que ses principales applications.

La décharge électrique couronne a été, globalement, définie et ses principales caractéristiques ont été évoquées.

Les modèles de simulation et leur couplage ont été brièvement décrits. L'étude a fait l'objet d'une modélisation à 2D, dans un régime stationnaire.

Il est à rappeler, pour cette polarité positive, que la force EHD est générée, essentiellement, par les ions positifs, et qu'elle est, constamment, dirigée du fil vers la grille. Mais dans la zone d'ionisation, qui est très étroite par rapport à la zone de dérive, cette force EHD est supérieure d'environ d'un ordre de grandeur à celle générée dans la zone de dérive, parce que l'intensité du champ électrique dans la zone d'ionisation est très supérieure à celle de ce champ dans la zone de dérive.

Tout d'abord, en l'absence de la force EHD, mais en présence d'une vitesse d'entrée d'air même faible, il a été constaté des lignes de vitesse d'air parallèles et une légère augmentation de cette vitesse, qui atteint une vitesse maximale au niveau du milieu de l'espace inter-électrodes. Cependant la présence de la force EHD fait apparaître deux tourbillons symétriques par rapport à l'axe fil-grille, qui se situent au niveau du milieu de la distance inter-électrodes. En présence d'une faible vitesse d'entrée d'air et en présence d'une force EHD, les variations de la vitesse du gaz sont importantes (quelques mètres par secondes), mais elles n'apparaissent que dans l'espace inter-électrodes. En revanche, en l'absence d'une vitesse d'entrée d'air, mais en présence d'une force EHD, les variations de la vitesse du gaz sont semblables à celles se produisant en présence d'une vitesse d'entrée d'air et subissent d'importantes variations, mais depuis l'entrée du canal, car la force EHD aspire librement l'air depuis l'entrée du réacteur, déplace les tourbillons vers les plaques et réduit leur taille ; tout en conservant une vitesse importante du vent ionique à la sortie du canal. Les valeurs maximales de cette vitesse sont, en présence d'une force EHD, atteintes au milieu de la distance inter-électrodes.

En résumé :

- Quand, à l'entrée du gaz dans le canal, la condition de la limite ouverte a été considérée, en présence de la force EHD, une vitesse très importante du vent ionique s'est révélée à la sortie du canal.
- Cette vitesse croît avec l'augmentation de la tension appliquée et, inversement, elle diminue avec l'augmentation du rayon du fil, ce qui est conforme aux résultats de la littérature.
- L'ozone produit dans la région active de la décharge couronne (près du fil) est transmis loin du fil, et même en son amont, en présence d'une faible vitesse d'entrée du gaz, et sa répartition devient homogène grâce à la présence des tourbillons.
- Au fur et à mesure que la haute tension augmente, la production d'ozone augmente et se révèle plus importante quand la vitesse d'entrée du gaz est négligeable.
- En présence d'une certaine vitesse d'entrée du gaz, la variation de cette vitesse n'a pas une influence significative sur la production de l'ozone.
- Pour une valeur donnée du courant électrique, la production de l'ozone augmente parallèlement à l'augmentation du rayon du fil. Plus encore, il apparaît que l'écart dans la production de l'ozone (quand le rayon du fil augmente) subit une variation linéaire en fonction de l'écart correspondant entre les rayons du fil.
- Concernant l'effet de la distance entre l'entrée du canal et la grille (L) (la distance entre les électrodes restant constante), il semblerait que ce paramètre (L) n'a d'influence ni sur la caractéristique 'courant-tension', ni sur la relation 'vitesse du vent ionique-tension', ni, par conséquent, sur la production de l'ozone en fonction du courant électrique.

Il serait intéressant, comme perspective d'avenir, d'étudier d'autres configurations, l'influence de la pression ou encore la présence d'une humidité, relativement importante, dans le gaz initial, siège de la production d'ozone. Plus encore, ce travail pourrait être élargi à l'étude de la polarité négative et à la validation des résultats par l'expérience.

ملخص:

في تشكيل ثنائي قطب كهربائي حيث يكون أحد القطبين منحنياً والآخر أقل انحناءً، فإن تطبيق الجهد العالي، في غاز، على القطب المنحني يولد تفريراً كهربائياً تاجياً بالموازاة مع ربط القطب الآخر بالأرضي. عندئذ، تتحرك الأيونات الناتجة عن الاصطدام الإلكتروني بين القطبين وتصطدم بالجسيمات المحايدة الشحنة في الغاز حيث تنقل إليها جزءاً من كمية حركتها، مما يتسبب في حركة شاملة للغاز تسمى "الرياح الأيونية" أو "الرياح الكهربائية"، أو حتى التدفق الكهروديناميكي (EHD). عندما يكون الغاز عبارة عن هواء، ينتج توزيع مكاني للعديد من الجسيمات المحايدة بما في ذلك الأوزون O_3 ، بالإضافة إلى التطبيقات المختلفة للرياح الأيونية بشكل عام، يستخدم الأوزون، من بين أمور أخرى، في معالجة المياه. يركز عمل المحاكاة هذا على الإنتاج والتوزيع المكاني للأوزون الشكل الهندسي للقطبين هو "سلك - شبكة"، في حالة الاستقرار خلال التفريغ التاجي الإيجابي. ينتقل الأوزون الناتج بالقرب من السلك بعيداً عن هذا السلك، وحتى اتجاه مدخل القناة، ويصبح توزيعه متجانساً بفضل وجود الدوامات. ركزت نمذجة الرياح الأيونية بشكل أساسي على حل نظام معادلات تدفق (نافيه-ستوكس)، والتي ندخل فيها عبارة تحليلية للقوة الكهروديناميكية التي أنشأها سابقاً فريقنا البحثي. بعد ذلك، يتم استخدام الربط المناسب بين النماذج لتحديد إنتاج الأوزون وتوزيعه المكاني، اللافت للنظر أن الفرق المتعلق بالزيادة في إنتاج الأوزون، مع زيادة نصف قطر السلك هو أن إنتاج الأوزون يتناسب خطياً مع الفرق المقابل في زيادة نصف قطر السلك؛ وأن المسافة بين مدخل القناة والشبكة يبدو أنه ليس لها تأثير على العلاقة بين "تغير إنتاج الأوزون مع تغير التيار كهربائي".

الكلمات المفتاحية: الرياح الأيونية سرعة الرياح الأيونية التفريغ التاجي، إنتاج الأوزون القوة الكهروديناميكية

Abstract:

In an electrode configuration where one is curved and the other is less curved, the application of high voltage, in a gas, to the stressed electrode generates a corona electric discharge; the other electrode being grounded. From then on, ions created by electronic impact on neutral particles circulate between the electrodes where they collide with other molecules of the gas to which they transmit part of their momentum to them, thus causing an overall movement of the gas called 'wind ionic' or 'electric wind', or even electro hydrodynamic flow (EHD).

When the gas is air, there is a spatial distribution of several neutral particles including ozone (O_3). In addition to the various applications of ionic wind, ozone is used, among other things, in water treatment and fruit ripening.

This simulation work focuses on the production and spatial distribution of O_3 in a geometrical configuration of "wire-grid" electrodes, during a steady state during a positive corona discharge. The ozone produced near the wire is transmitted far from this wire, even upstream, and its distribution becomes homogeneous thanks to the presence of vortices. The modeling of the ionic wind focused mainly on solving the system of Navier-Stokes equations, into which we inject an analytical expression of the EHD force, already established by our research group. Then, an appropriate pairing of models is used to determine the production of O_3 .

Among the results, it is remarkable that the difference concerning the increase in O_3 production, as the radius of the wire increases, would undergo a linear variation depending on the corresponding difference between the radii of the wire; and that the distance between the inlet of the channel and the wire would seem to have no influence on the function "production of O_3 -electric current".

Keywords: Electric corona discharge, Ionic wind, O_3 production, EHD force, Ionic wind speed.

Résumé:

Dans une configuration d'électrodes où l'une est courbée et l'autre est moins courbée, l'application d'une haute tension, dans un gaz, sur l'électrode stressée génère une décharge électrique couronne ; l'autre électrode étant mise à la terre. Dès lors, des ions créés, par impact électronique sur les particules neutres, circulent entre les électrodes où ils percutent d'autres molécules du gaz auxquelles ils leur transmettent une partie de leur quantité de mouvement, provoquant ainsi un mouvement global du gaz appelé 'vent ionique' ou 'vent électrique', ou même écoulement électro hydrodynamique (EHD).

Quand le gaz est l'air, il se produit une répartition spatiale de plusieurs particules neutres dont l'ozone (O_3). Outre les diverses applications du vent ionique en général, l'ozone est utilisé, entre autres, dans le traitement d'eau et le mûrissement des fruits. Ce travail de simulation porte, essentiellement, sur la production et la répartition spatiale de l' O_3 dans une configuration géométrique d'électrodes 'fil-grille', pendant un régime stationnaire lors d'une décharge couronne positive.

L'ozone produit près du fil est transmis loin de ce fil, même en son amont, et sa répartition devient homogène grâce à la présence des tourbillons. La modélisation du vent ionique a porté, essentiellement, sur la résolution du système des équations d'écoulement de Navier-Stokes, dans lesquelles on injecte une expression analytique de la force EHD, déjà établi par notre équipe de recherche.

Ensuite, un couplage approprié de modèles est utilisé pour déterminer la production de l' O_3 . Parmi les résultats, il est remarquable que l'écart concernant l'augmentation de la production d' O_3 , quand le rayon du fil augmente, subirait une variation linéaire en fonction de l'écart correspondant entre les rayons du fil ; et que la distance entre l'entrée du canal et le fil semblerait n'avoir pas d'influence sur la fonction 'production d' O_3 -courant électrique'.

Mots clés : *Décharge électrique couronne, Vent ionique, Production d'ozone, Force EHD, Vitesse du vent ionique.*