

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2024



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: BATAH Hamza et AMIRA Zakaria

Thème

Mise en place d'un dispositif de filtrage électrostatique.

Soutenu publiquement, le 24/06/2024 devant le jury composé de :

M/ KACHI Miloud	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
M/ REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Examineur
Mme/ FETISSI Selwa	MCB	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2023 /2024

Remerciement

Nous remercions avant tous le Bon Dieu qu'il nous a aidé pour réaliser ce modeste travail.

Paix et Salut sur notre premier éducateur (محمد صلى الله عليه و سلم) le prophète pour ce qu'il a donné à l'humanité.

من لم يشكر الناس لم يشكر الله... " حدیث شریف "

Nous remercions sincèrement notre encadreur, Pr. Kachi Miloud. Nous vous remercions pour la qualité de votre encadrement et pour tous les précieux conseils que vous nous avez prodigués tout au long de la réalisation de ce travail. Votre expertise, votre patience et votre disponibilité ont été d'une grande aide et nous ont permis de surmonter les défis rencontrés. Merci pour tout ce que vous avez fait pour nous.

Nous tenons à remercier le président et tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nous tenons également à remercier l'ensemble du personnel du département de d'électrotechnique et ses étudiants ainsi que ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nos chaleureux remerciements vont également à tous ceux qui par leur fonction, ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire de fin d'étude :

A Mes parents

A mes frères et mes sœurs, a toute ma famille,

A Mon binôme zaki

A mes amis, Aymen, Lotfi

A toute la promotion de 2eme Année Master Réseaux

Électriques 2024,

A mon épouse Ibtissam, qui m'as soutenu inlassablement tout au long de ce parcours

Batah Hamza

Dédicace

Mes parents

Mes frères et ma sœur

Mes amis

Mes collègues

Mon binôme.

A mira Zakaria.

ملخص

هذا العمل هو مجرد مساهمة صغيرة في مجال فلتر الهواء. إنشاء وتركيب هذه الأجهزة على نطاق واسع قد يشكل تحديًا كبيرًا ومكلفًا. ولكن في عالم يعاني من التلوث، أصبح من الضروري النظر إلى فوائد هذه الأجهزة وتطبيقاتها اللامتناهية.

الهدف كان تصنيع جهاز فلتر بمقاييس صغيرة من أجل دراسة المتطلبات اللازمة لتشغيله، وكذلك دراسة قدرته على الفلتر في مختلف الظروف والتغيرات من خلال تعديل التوتر ونوعية المواد التي نريد فلترتها. مبدأ التشغيل يعتمد أساسًا على استغلال التفريغ الكوروني لخلق حقل كهربائي مشحون يقوم بشحن جزيئات الغبار المتدفقة نحوه عبر مجرى هوائي. ما إن تتم عملية شحن جزيئات الغبار أو الدخان، تنجذب مباشرة نحو منطقة تجميع خاصة، مما يسمح بتدفق هواء نظيف.

عمليات المحاكاة تمت من خلال استعمال كود بايثون لحساب قيمة الحقل الكهربائي، كما تم استخدام برنامج Agros2D من أجل إعطاء صورة مرئية للحقل الكهربائي ومسار الجزيئات. القيم المتحصلة عليها من خلال المحاكاة تم مقارنتها مع القيم التجريبية، وذلك من أجل إعطاء صورة واضحة عن كيفية عمل الجهاز والمتغيرات التي يلزم ضبطها للقيام بعملية فلتر فعالة.

في الختام، نأمل أن تساهم نتائج هذا البحث في تحسين تقنيات فلتر الهواء وتطبيقها على نطاق أوسع لتحسين جودة الهواء ومكافحة التلوث البيئي.

Résumé

Ce travail n'est qu'une petite contribution dans le domaine de la filtration de l'air. La mise en place et l'installation de ces appareils à grande échelle peuvent constituer un défi majeur et coûteux. Cependant, dans un monde confronté à la pollution, il est devenu nécessaire de considérer les avantages de ces appareils et l'étendue infinie de leurs applications.

L'objectif était de fabriquer un dispositif de filtration à petite échelle afin d'étudier les exigences nécessaires à son fonctionnement, ainsi que d'évaluer sa capacité de filtration dans différentes conditions et changements en ajustant la tension et le type de matériaux à filtrer. Le principe de fonctionnement repose principalement sur l'utilisation de la décharge couronne pour créer un champ électrique chargé qui ionise les particules de poussière s'écoulant à travers un conduit d'air. Une fois que les particules de poussière ou de fumée sont chargées, elles sont directement attirées vers une zone de collecte spéciale, permettant ainsi un flux d'air purifié. Les simulations ont été réalisées en utilisant un code Python pour calculer la valeur du champ électrique. Le programme Agros2D a également été utilisé pour fournir une image visuelle du champ électrique et de la trajectoire des particules. Les valeurs obtenues à partir des simulations ont été comparées aux valeurs expérimentales afin de fournir une image claire du fonctionnement de l'appareil et des variables à ajuster pour une filtration efficace.

Enfin, nous espérons que les résultats de cette recherche contribueront à l'amélioration des technologies de filtration de l'air et à leur application à plus grande échelle pour améliorer la qualité de l'air et lutter contre la pollution environnementale.

Abstract

This work is a small contribution to the field of air filtration. Setting up and installing these devices on a large scale may present a significant and costly challenge. However, in a world suffering from pollution, it has become essential to consider the benefits of these devices and their limitless range of applications.

The aim of this dissertation is the manufacturing of a lab-scale filtration device to study the requirements needed for its operation and to evaluate its filtration capacity under various conditions and changes by adjusting the voltage and the type of materials to be filtered. The operating principle primarily relies on utilizing corona discharge to create an electrically charged field that charges dust particles flowing towards it through an air duct. Once the dust or smoke particles are charged, they are directly attracted to a special collection area, allowing clean air to flow. Simulations were performed using a Python code to calculate the value of the electric field. The Agros2D program was also used to provide a visual representation of the electric field and the particle trajectories. The values obtained from the simulations were compared with experimental values to provide a clear picture of the device's operation and the variables that need to be adjusted for effective filtration.

Finally, we hope that the results of this research will contribute to the improvement of air filtration technologies and their broader application to enhance air quality and combat environmental pollution.

Liste de figure

Figure I.1 : filtre à plaque parallèle.	5
Figure I.2 : précipitateur à fil.	6

Figure I.3 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique humide.....	8
Figure II.1 : différent type de géométrie d'électrodes.	16
Figure II.2 : amorçage de la décharge.....	17
Figure II.3 : multiplication électronique (phénomène d'avalanche électronique).....	18
Figure II.4 : maintien de la décharge.	18
Figure II.5 : caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique.	19
Figure II.6 : décharge couronne négative pour une configuration pointe-plan, (a) cas de décharge couronne positive et (b) cas de décharge couronne négative.	20
Figure II.7 : influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne.	22
Figure II.8 : caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes en géométrie fil-plan (d= 0.5cm, $\phi = 125\mu\text{m}$).....	22
Figure II.9 : tube à décharge.....	25
Figure II.10 : principe de formation d'électret par décharge couronne.	28
Figure II.11 : représentation schématique d'un dispositif de chargement statique.....	29
Figure II.12 : principe de charge par rouleau électrostatique.	30
Figure II.13 : influence entre deux corps (le corps B étant isolé).....	31
Figure II.14 : influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre).	31
Figure III.1 : tube en PVC relie entre les deux boites.	34
Figure III.2 : schéma explicatif de filtre.....	35
Figure III.3 : le support de l'aiguille.	35
Figure III.4 : Emplacement de l'aiguille.	36
Figure III.5 : la zone de collection relié à la terre.	36
Figure III.6 : source d'haute tension négative.	37
Figure III.7 : multimètre numérique.	37
Figure III.8 : un thermomètre numérique.	38
Figure III.9 : un Hygromètre/ Anémomètre numérique.	38

Figure III.10 :l'expérience de filtration de fumée.	39
Figure III.11 : la filtration au niveau microscopique.	40
Figure III.12 : farine de blé.....	40
Figure III.13 : schéma de montage.	41
Figure IV.1 : résulta de filtration de fumée.	44
Figure IV.2 : résulta de filtration de farine.	45
Figure IV.3 : caractéristique courant tension.	46
Figure IV.4 : le champ électrique par apport la distance entre électrode.....	47
Figure IV.5 : la charge d'espace par apport la distance entre électrode.	47
Figure IV.6 : l'image visuelle du champ électrique.....	48
Figure IV.7 : la trajectoire pour la vitesse de 0.6 m/s.	48
Figure IV.8 : la trajectoire pour la vitesse de 1 m/s.	49

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative (HR=5%, Ø fil=125µm).	23
Tableau III.1 : Les données saisies dans Agros2D.	42
Tableau IV.1 : caractéristique I/V distance 0.5 cm.	45
Tableau IV.2 : caractéristique I/V distance 1cm.	46

Sommaire

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

Chapitre I : Etat de l'art.

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique du filtre électrostatique	3
I.3 Définition du filtre électrostatique	3
I.4 Fonctionnement du filtre électrostatique	4
I.5 Types de filtres électrostatiques	4
I.5.1 Les filtres à plaques parallèles.....	5
I.5.2 Les filtres à fil.....	5
I.5.3 Différentes conceptions.....	6
I.5.3.1 Les électrofiltres secs	6
I.5.3.2 Les précipitateurs à un seul étage	6
I.5.3.3 Electrofiltres à double étage.....	7
I.5.3.4 Les précipitateurs humides.....	7
I.6 Applications du filtre électrostatique	8
I.6.1 Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) résidentiels	9
I.6.2 Industrie pharmaceutique.....	9
I.6.3 Laboratoires de recherche	9
I.6.4 Salles blanches.....	9
I.6.5 Hôpitaux et établissements de soins de santé	9
I.6.6 Industrie alimentaire	9
I.6.7 Industrie automobile	9
I.6.8 Environnements informatiques sensibles	10
I.7 Facteurs influençant l'efficacité des filtres électrostatiques.....	10
I.7.1 Taille des particules	10
I.7.2 Charge électrostatique.....	10
I.7.3 Matériau du filtre	10
I.7.4 Conception du filtre.....	10
I.7.5 Débit d'air.....	11
I.7.6 Niveau de contamination de l'air.....	11

I.7.7 Entretien régulier.....	11
I.8 Amélioration l'efficacité des filtres électrostatiques -----	11
I.8.1 Choix du bon filtre.....	11
I.8.2 Entretien régulier.....	11
I.8.3 Surveillance de la charge électrostatique.....	11
I.8.4 Optimisation du débit d'air.....	12
I.8.5 Utilisation de pré-filtres	12
I.8.6 Élimination de sources de contaminants	12
I.9 Avantages et inconvénients -----	12
I.9.1 Avantages	12
I.9.1.1 Efficacité de filtration élevée.....	12
I.9.1.2 Durabilité.....	12
I.9.1.3 Performance constante.....	13
I.9.1.4 Faible résistance à l'écoulement d'air	13
I.9.2 Inconvénients	13
I.9.2.1 Entretien nécessaire.....	13
I.9.2.2 Coût initial élevé	13
I.9.2.3 Ozone	13
I.9.2.4 Moins efficaces pour les grosses particules.....	13
I.10 Limitations et défis des filtres électrostatiques -----	13
I.10.1 Possibilité de décharge électrostatique	14
I.10.2 Réduction de l'efficacité avec le temps.....	14
I.11 Conclusion -----	14

Chapitre II : Chargement des particules par la décharge couronne.

II.1 Introduction -----	15
II.2 Généralités sur la décharge couronne -----	15
II.2.1 Condition d'apparition	15
II.2.2 Différentes types de configuration des électrodes	16
II.2.3 Processus de formation de la décharge couronne	17
II.2.3.1 Amorçage de la décharge.....	17
II.2.3.2 Multiplication et avalanche	17
II.2.3.3 Phase de la recombinaison et maintien de la décharge.....	18
II.2.4 Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension).....	19
II.2.5 Types de décharge couronne	20

II.2.6 Les facteurs influençant de la décharge couronne	21
II.2.6.1 Facteurs géométriques	21
II.2.6.2 Facteurs physico-chimiques	23
II.2.6.3 Facteurs électriques	24
II.3 Mécanisme de Townsend	24
II.4 Chargement des particules	27
II.4.1 Phénomène et méthodes de chargement.....	27
II.4.2 Chargement des matériaux par décharge couronne	28
II.4.3 Chargement des matériaux par triboélectrique	29
II.4.4 Chargement des matériaux par rouleau électrostatique	30
II.4.5 Chargement des matériaux par influence électrostatique (induction)	30
II.4.6 Charge par champ.....	31
II.5 Conclusion.....	33

Chapitre III : Installation et description des expériences.

III.1 Introduction	34
III.2 Mise en place et conception de filtre	34
III.3 Appareillage	37
III.3.1 L'alimentation électrique.....	37
III.3.2 Mesure du courant.....	37
III.3.3 Mesure du la température	38
III.3.4 Mesure de la vitesse de vent et d'humidité.....	38
III.4 Partie expérimentale.....	39
III.4.1 Filtration de fumée	39
III.4.2 Filtration des particules solides (la farine)	40
III.4.3 Caractéristique courant tension	41
III.5 Simulation de champ électrique.....	41
III.5.1 Calcule du champ électrique	41
III.5.2 Trajectoire des particules	42
III.6 Conclusion	43

Chapitre IV : Résultats.

IV.1 Introduction	44
IV.2 Résultats expérimentaux :.....	44

IV.2.1 Filtration de fumée.....	44
IV.2.2 Filtration des particules solide.....	45
IV.3 Caractéristique courant tension-----	45
IV.4 Résultats de simulation-----	46
IV.4.1 Simulation de champ électrique	46
IV.4.2 Trajectoires des particules	48
IV.4 Conclusion-----	49
Conclusion générale-----	50
Bibliographie-----	51

Introduction générale.

Introduction générale

L'industrialisation rapide, amorcée au début du XIXe siècle, a apporté des transformations profondes et durables dans la société et l'économie mondiale. Toutefois, cette révolution industrielle a également eu des conséquences négatives, notamment sur la qualité de l'air. Les usines et les industries émettent des quantités significatives de polluants atmosphériques, contribuant à la dégradation de l'environnement et posant des risques pour la santé publique. Ainsi, la préservation de la pureté de l'air est devenue une priorité cruciale. Dans ce contexte, la nécessité de développer des systèmes de filtration de l'air s'est imposée pour atténuer les effets néfastes des émissions industrielles. Les premiers dispositifs de filtration étaient relativement simples et peu efficaces. Ils incluaient des filtres mécaniques, des scrubbers humides, et d'autres méthodes traditionnelles qui parvenaient à capturer une partie des particules en suspension. Cependant, avec le progrès technologique et la reconnaissance accrue des enjeux environnementaux, des solutions plus sophistiquées et performantes ont été mises au point. Parmi ces innovations, le filtre électrostatique s'est imposé comme un outil de choix dans la lutte contre la pollution de l'air. Exploitant les propriétés de la décharge électrique pour capturer les particules polluantes, ces filtres offrent une efficacité de filtration supérieure par rapport aux techniques conventionnelles. Aujourd'hui, les filtres électrostatiques jouent un rôle central dans les systèmes de purification de l'air, tant au niveau industriel que domestique. Ce mémoire, intitulé "**Mise en place d'un filtre électrostatique**", se divise en quatre chapitres principaux, chacun abordant une dimension essentielle de notre travail.

Dans le premier chapitre, nous passons en revue les développements et les avancées historiques des filtres électrostatiques, en mettant l'accent sur leurs principes de fonctionnement, leurs avantages, et les défis associés à leur utilisation.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des principes physiques et des mécanismes sous-jacents à la décharge couronne, un phénomène crucial pour le fonctionnement des filtres électrostatiques.

Nous décrivons en détail dans le troisième chapitre la conception et la mise en place de notre filtre électrostatique, ainsi que les diverses expériences menées pour tester son efficacité. Cette partie inclut une présentation des matériaux utilisés, des méthodes expérimentales, et des protocoles suivis.

Introduction générale.

Le dernier chapitre présente les résultats obtenus lors de nos expérimentations et les analyse en profondeur. Nous discutons de la performance de notre filtre.

En somme, ce mémoire vise à apporter une contribution significative à la compréhension et à l'application des filtres électrostatiques dans la purification de l'air, tout en soulignant leur importance croissante face aux défis environnementaux actuels.

Chapitre I : Etat de l'art.

I.1 Introduction

Dans un monde où la qualité de l'air est devenue une préoccupation majeure de santé publique, les filtres électrostatiques émergent comme des remparts cruciaux contre la menace croissante de la pollution atmosphérique. Alors que les activités humaines génèrent une myriade de contaminants, des particules fines aux composés organiques volatils, le besoin de systèmes de filtration efficaces n'a jamais été aussi pressant.

Ce chapitre vise à explorer l'état actuel des filtres électrostatiques, une technologie prometteuse dans la lutte contre la pollution de l'air. Avant d'approfondir cette technologie, il est crucial de comprendre les divers types de filtres disponibles, chacun avec ses propres caractéristiques et performances. En examinant les avantages et les inconvénients de chaque type, nous serons en mesure de mieux apprécier les choix qui s'offrent à nous dans la quête d'une qualité d'air optimale.

I.2 Historique du filtre électrostatique

Le principe de l'électrofiltre remonte à 1820, mais son utilisation industrielle débute dans les années 1880 en Allemagne et en Angleterre. Initialement, la haute tension était produite par la friction de diélectriques et stockée dans des condensateurs primitifs ou des bobines de Ruhmkorff. Les premiers électrofiltres étaient installés lorsque la valeur commerciale des particules récupérées justifiait leur construction, sans tenir compte de l'environnement. Les progrès étaient limités aux cas de pollution extrême, comme les cimenteries. Les électrofiltres industriels étaient de grande taille pour optimiser l'efficacité. En 1922, Walter Deutsch développe une relation théorique entre l'efficacité de filtration, le débit et la surface collectrice, utilisée pendant des décennies. Depuis 1907, de nombreux travaux ont été réalisés sur les électrofiltres, avec des applications potentielles dans la réduction des brouillards naturels et la purification des zones de transports denses. [1]

I.3 Définition du filtre électrostatique

Un filtre électrostatique est un dispositif de purification de l'air qui exploite les propriétés de l'électricité statique pour piéger les particules en suspension dans l'air. Il fonctionne en aspirant l'air chargé de particules, puis en le soumettant à un champ électrique qui charge ces particules. Ensuite, cet air polarisé traverse des plaques collectrices agissant comme des aimants pour attirer et retenir les particules chargées.

Contrairement aux filtres classiques qui ne capturent que les particules de taille supérieure à leurs mailles, les filtres électrostatiques attirent et retiennent toutes les particules,

ce qui les rend très efficaces. Ils sont couramment utilisés dans divers environnements industriels, tels que les cuisines industrielles, les usines, les papeteries, etc., pour filtrer les poussières et les fumées. [2]

I.4 Fonctionnement du filtre électrostatique

Le principe fondamental de fonctionnement d'un électrofiltre est assez facile à saisir. Il implique d'abord de charger les particules de poussière, initialement neutres, présentes dans un flux gazeux, puis de les collecter pour finalement libérer un gaz purifié. Cependant, derrière cette explication simplifiée, se cachent de nombreux phénomènes physico-chimiques.

Initialement, l'électrode émissive, connectée à une source de tension, crée un champ électrique assez puissant pour initier une décharge électrique entre les électrodes [3]. La géométrie joue un rôle crucial en favorisant la formation de charges et en limitant les arcs électriques, ce qui explique l'utilisation de décharges électriques de polarité négative. Les charges créées dans le gaz sont ensuite transférées aux particules de poussière en suspension. [4] [5]

Sous l'effet des forces électrostatiques, les particules chargées de la même polarité que l'électrode émissive sont attirées vers l'électrode de collecte reliée à la masse. Idéalement, le gaz sort "dépollué" sans poussière, tandis que les poussières accumulées sur l'électrode collectrice sont récupérées en utilisant soit un impact (filtre sec) soit un liquide (filtre humide).

Selon K. R. Parker [6], le transport et la dérive de ces particules sont influencés par de nombreux phénomènes physico-chimiques interconnectés. Outre l'influence des particules, tous ces paramètres et leurs interactions physico-chimiques dépendent de la géométrie de l'électrofiltre.

I.5 Types de filtres électrostatiques

Les précipitateurs électrostatiques sont des dispositifs utilisés pour éliminer les particules en suspension dans un gaz en les chargeant électriquement, puis en les faisant adhérer à une surface opposée chargée de manière opposée. Il existe principalement deux types de filtre électrostatiques :

I.5.1 Les filtres à plaques parallèles

Ce type utilise un champ électrique pour charger les particules, les attirant ensuite vers des plaques électriquement chargées où elles sont rassemblées. Cette méthode permet de diminuer les émissions de particules dans l'air, ce qui contribue à améliorer sa qualité. [7]

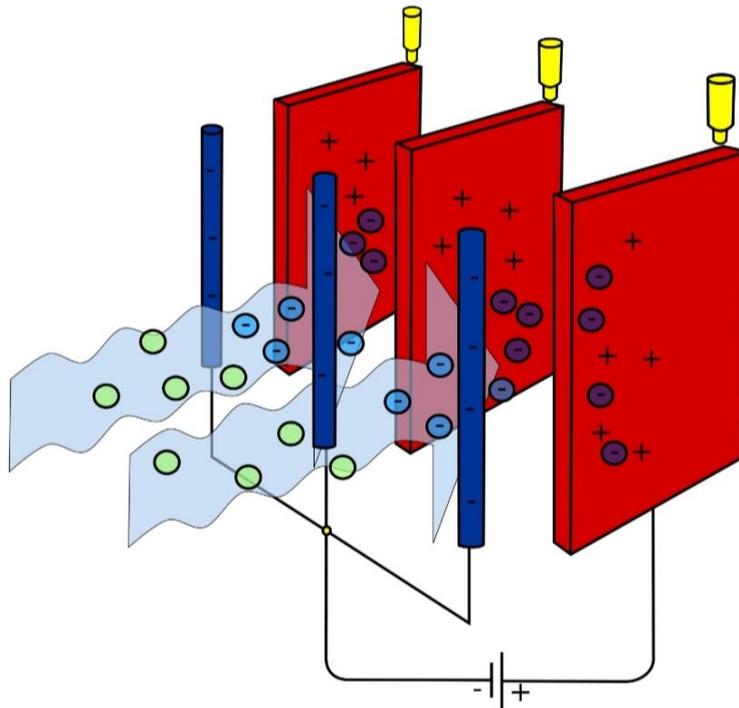


Figure I.3 : filtre à plaque parallèle. [12]

I.5.2 Les filtres à fil

Le précipitateur à fil est un dispositif largement employé dans divers secteurs industriels pour contrôler la pollution de l'air. Il fonctionne selon le principe de l'électrostatique en utilisant des fils métalliques chargés électriquement pour attraper les particules en suspension dans l'air. Lorsque ces particules chargées rencontrent les fils chargés, elles sont attirées et retenues à leur surface. Cette méthode de filtration est efficace pour capturer des particules fines telles que la fumée, la poussière et les particules métalliques, présentes dans les gaz de combustion des procédés industriels. [8]

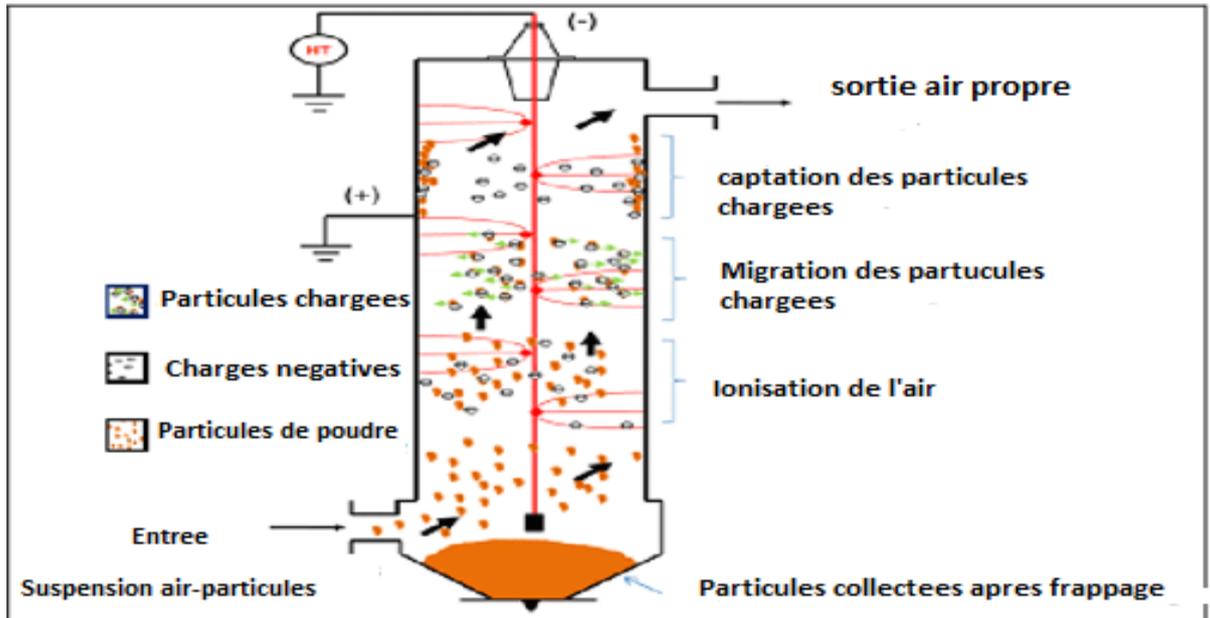


Figure I.4: précipitateur à fil. [13]

En plus de ces deux types principaux, il existe également des variantes et des conceptions spécifiques adaptées à des applications particulières.

I.5.3 Différentes conceptions

I.5.3.1 Les électrofiltres secs

Ces types présentent des pertes de charge faibles, généralement comprises entre 50 et 100 Pa, et sont recommandés pour le traitement de débits gazeux importants, atteignant plusieurs milliers de mètres cubes par heure. Leur efficacité de purification peut atteindre jusqu'à 99% pour les particules ayant un diamètre supérieur à $1\ \mu\text{m}$. L'efficacité minimale est observée pour les particules dont le diamètre se situe entre $0,1$ et $1\ \mu\text{m}$.

Ces électrofiltres se composent d'un caisson (dans le cas des électrofiltres à plaques), d'une ou plusieurs électrodes émissives, de une ou plusieurs électrodes collectrices (plaques ou conduits cylindriques), d'un système d'extraction et de récupération des poussières (par exemple, des marteaux ou un système de mise en résonance), ainsi que d'une alimentation haute tension, généralement entre 30 et 120 kV, pour un courant de 20 à 600 mA. [9]

I.5.3.2 Les précipitateurs à un seul étage

Les électrofiltres à un seul étage sont les plus couramment utilisés dans les applications industrielles. L'ionisation et la collecte des particules se déroulent simultanément le long de

l'électrofiltre. Ils présentent des pertes de charge faibles, généralement de l'ordre de 50 à 100 Pa, ce qui les rend adaptés au traitement de grands débits gazeux (par exemple, jusqu'à 80 000 m³/h). Ces systèmes peuvent atteindre une efficacité de purification pouvant aller jusqu'à 99 % pour les particules fines de l'ordre du micromètre. Le niveau d'efficacité le plus bas est observé pour les poussières ayant un diamètre d'environ 0,2 µm. Cependant, ces électrofiltres nécessitent un investissement initial élevé, et la consommation électrique est d'environ 1 Wh/m³ traité. [10]

I.5.3.3 Electrofiltres à double étage

Les électrofiltres à double étage sont composés d'un premier stade où les particules sont chargées électriquement, suivi d'un filtre électrostatique principal. Leur conception plus complexe entraîne des coûts de fabrication plus élevés, raison pour laquelle ces appareils sont généralement de taille réduite et sont utilisés dans les systèmes de conditionnement d'air. Chaque étage du filtre est alimenté séparément en tension, ce qui nécessite généralement deux sources de haute tension distinctes.

Le premier stade, appelé zone d'ionisation, comprend des électrodes de décharge sous forme de fils ou de tubes. Les électrodes de collecte peuvent être des plaques parallèles ou des cylindres coaxiaux. [11]

I.5.3.4 Les précipitateurs humides

Les électrofiltres humides utilisent un film d'eau qui coule le long de la ou des électrodes collectrices. Avant de passer à travers le filtre, le gaz d'échappement est saturé en vapeur d'eau, ce qui améliore l'efficacité de collecte par rapport à un électrofiltre sec. De plus, cela permet de purifier le gaz en éliminant les polluants gazeux. Cette technologie présente plusieurs avantages.



Figure I.3 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique humide. [14]

Le film d'eau étant mis à la terre, il n'est pas nécessaire d'utiliser des plaques collectrices en matériau conducteur, les performances de collecte ne dépendent pas de la résistivité des particules, le risque de réentraînement des particules collectées est éliminé, et les particules submicroniques sont plus facilement capturées, car elles agissent comme des noyaux de condensation pour la vapeur, augmentant ainsi leur taille au-delà de la gamme de filtration minimale.

Cependant, l'ajout d'un film d'eau sur les électrodes collectrices entraîne des coûts supplémentaires significatifs en termes d'investissement, de fonctionnement et de traitement de la phase liquide. De plus, il devient difficile, voire impossible, de valoriser les particules collectées, comme c'est le cas pour les cendres issues de la combustion du charbon dans les centrales thermiques, qui sont souvent réutilisées dans la fabrication de ciment. [9]

I.6 Applications du filtre électrostatique

Les filtres électrostatiques sont utilisés dans une variété d'applications pour purifier l'air en capturant les particules en suspension. Leur efficacité, leur durabilité et leur faible résistance à l'écoulement d'air en font un choix attrayant pour de nombreuses industries et environnements. Voici quelques-unes des principales applications des filtres électrostatiques :

I.6.1 Systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (CVC) résidentiels

Les filtres électrostatiques sont couramment utilisés dans les systèmes de CVC domestiques pour améliorer la qualité de l'air intérieur en capturant la poussière, le pollen, les allergènes et autres contaminants.

I.6.2 Industrie pharmaceutique

Dans les environnements pharmaceutiques où la stérilité de l'air est essentielle, les filtres électrostatiques sont utilisés pour éliminer les particules et maintenir des conditions de travail propres.

I.6.3 Laboratoires de recherche

Les laboratoires de recherche utilisent des filtres électrostatiques pour purifier l'air et maintenir des conditions optimales pour les expériences sensibles.

I.6.4 Salles blanches

Dans les industries telles que la fabrication de semi-conducteurs, les salles blanches utilisent des filtres électrostatiques pour maintenir des niveaux de pureté d'air extrêmement élevés en éliminant les particules microscopiques.

I.6.5 Hôpitaux et établissements de soins de santé

Les filtres électrostatiques sont utilisés dans les systèmes de CVC des hôpitaux pour aider à contrôler la propagation des germes, des bactéries et des virus, contribuant ainsi à maintenir des environnements de soins propres.

I.6.6 Industrie alimentaire

Les filtres électrostatiques sont utilisés dans les usines de transformation alimentaire pour maintenir des normes d'hygiène élevées en éliminant les contaminants de l'air.

I.6.7 Industrie automobile

Les cabines de peinture et d'assemblage automobile utilisent souvent des filtres électrostatiques pour éliminer les particules de peinture et autres contaminants de l'air.

I.6.8 Environnements informatiques sensibles

Dans les centres de données et les salles informatiques, les filtres électrostatiques aident à protéger les équipements sensibles en éliminant la poussière et d'autres particules de l'air.

Ces exemples montrent la polyvalence des filtres électrostatiques et leur importance dans de nombreux secteurs pour assurer des environnements de travail et de vie sains et propres.

I.7 Facteurs influençant l'efficacité des filtres électrostatiques

L'efficacité des filtres électrostatiques est influencée par plusieurs facteurs qui peuvent affecter leur capacité à capturer les particules en suspension dans l'air. Voici quelques-uns des principaux facteurs à prendre en compte :

I.7.1 Taille des particules

Les filtres électrostatiques sont plus efficaces pour capturer les particules de petite taille, telles que la poussière fine, le pollen et les allergènes. Cependant, leur efficacité peut varier en fonction de la taille des particules visées.

I.7.2 Charge électrostatique

La charge électrostatique appliquée au filtre est essentielle pour attirer les particules vers la surface du filtre. Une charge électrostatique plus élevée peut améliorer l'efficacité de capture des particules.

I.7.3 Matériau du filtre

Le matériau utilisé dans la construction du filtre électrostatique peut avoir un impact sur son efficacité. Des matériaux spécifiques sont choisis pour maximiser l'adhérence des particules chargées.

I.7.4 Conception du filtre

La conception du filtre, y compris la configuration des électrodes et des collecteurs, peut affecter son efficacité globale. Une conception optimisée peut améliorer la capture des particules et réduire la perte de charge.

I.7.5 Débit d'air

Le débit d'air à travers le filtre peut influencer son efficacité. Un débit d'air élevé peut réduire le temps de contact des particules avec le filtre, tandis qu'un débit d'air trop faible peut entraîner une saturation prématurée du filtre.

I.7.6 Niveau de contamination de l'air

Le niveau initial de contamination de l'air peut également influencer l'efficacité du filtre électrostatique. Des niveaux élevés de contaminants peuvent réduire la durée de vie utile du filtre et nécessiter un entretien plus fréquent.

I.7.7 Entretien régulier

La maintenance régulière du filtre, y compris le nettoyage périodique ou le remplacement des éléments filtrants, est essentielle pour maintenir son efficacité à long terme.

I.8 Amélioration l'efficacité des filtres électrostatiques

Pour améliorer l'efficacité des filtres électrostatiques, voici quelques mesures à considérer :

I.8.1 Choix du bon filtre

Optez pour un filtre électrostatique de qualité supérieure, conçu pour répondre aux normes de filtration les plus élevées. Recherchez des filtres certifiés par des organismes de réglementation ou des normes industrielles pour garantir leur efficacité.

I.8.2 Entretien régulier

Effectuez un entretien régulier du filtre en suivant les recommandations du fabricant. Cela peut inclure le nettoyage périodique du filtre pour éliminer les particules accumulées et maintenir sa performance.

I.8.3 Surveillance de la charge électrostatique

Assurez-vous que la charge électrostatique du filtre est maintenue à un niveau optimal. Si le filtre perd sa charge électrostatique, son efficacité de filtration peut diminuer. Certains filtres électrostatiques sont équipés de dispositifs de surveillance de la charge pour indiquer quand il est temps de nettoyer ou de remplacer le filtre.

I.8.4 Optimisation du débit d'air

Assurez-vous que le débit d'air à travers le filtre est correctement dimensionné pour maintenir une efficacité de filtration optimale tout en répondant aux besoins de ventilation de l'environnement. Un débit d'air trop élevé peut réduire le temps de contact des particules avec le filtre, tandis qu'un débit d'air insuffisant peut entraîner une saturation prématurée du filtre.

I.8.5 Utilisation de pré-filtres

Pour prolonger la durée de vie et améliorer l'efficacité des filtres électrostatiques, envisagez d'installer des pré-filtres en amont. Les pré-filtres peuvent aider à capturer les particules grossières et réduire la charge de particules sur le filtre électrostatique principal.

I.8.6 Élimination de sources de contaminants

Identifiez et réduisez les sources de contaminants dans l'environnement pour minimiser la charge de particules sur le filtre. Cela peut inclure le contrôle des sources de poussière, l'installation de systèmes de ventilation adéquats et la gestion des produits chimiques potentiellement nocifs.

En suivant ces conseils, vous pouvez optimiser l'efficacité des filtres électrostatiques et assurer une purification de l'air efficace et fiable dans diverses applications.

I.9 Avantages et inconvénients**I.9.1 Avantages****I.9.1.1 Efficacité de filtration élevée**

Les filtres électrostatiques sont capables de capturer efficacement de petites particules, y compris la poussière fine, les allergènes et les contaminants, grâce à leur méthode de filtration électrostatique.

I.9.1.2 Durabilité

En raison de leur conception sans pièces mobiles et de leur fonctionnement électrostatique, ces filtres ont tendance à être plus durables que les filtres mécaniques traditionnels.

I.9.1.3 Performance constante

Contrairement aux filtres mécaniques qui peuvent se boucher avec le temps, les filtres électrostatiques conservent généralement leur efficacité de filtration pendant de longues périodes s'ils sont entretenus correctement.

I.9.1.4 Faible résistance à l'écoulement d'air

Les filtres électrostatiques ont souvent une faible résistance à l'écoulement d'air, ce qui signifie qu'ils n'entravent pas significativement la circulation de l'air dans les systèmes de ventilation.

I.9.2 Inconvénients

I.9.2.1 Entretien nécessaire

Les filtres électrostatiques nécessitent un entretien régulier pour maintenir leur efficacité. Les surfaces chargées doivent être nettoyées périodiquement pour éliminer les particules piégées.

I.9.2.2 Coût initial élevé

Comparés aux filtres mécaniques, les filtres électrostatiques peuvent avoir un coût initial plus élevé. Cependant, cela peut être compensé par leur durabilité à long terme.

I.9.2.3 Ozone

Certains filtres électrostatiques peuvent produire de l'ozone comme sous-produit lorsqu'ils sont en fonctionnement, ce qui peut être nocif pour la santé s'ils ne sont pas correctement conçus et entretenus.

I.9.2.4 Moins efficaces pour les grosses particules

Bien qu'ils soient efficaces pour les petites particules, les filtres électrostatiques peuvent avoir une efficacité réduite pour les particules plus grosses, telles que les cheveux ou les peluches, par rapport aux filtres mécaniques.

I.10 Limitations et défis des filtres électrostatiques

Bien que les filtres électrostatiques offrent de nombreux avantages en matière de purification de l'air, ils présentent également certaines limitations et défis qu'il est important de prendre en compte :

I.10.1 Possibilité de décharge électrostatique

Les filtres électrostatiques peuvent parfois générer des décharges électrostatiques, en particulier dans des environnements où l'air est sec. Cela peut potentiellement endommager les équipements électroniques sensibles à proximité.

I.10.2 Réduction de l'efficacité avec le temps

Au fil du temps, les performances des filtres électrostatiques peuvent diminuer à mesure que les surfaces chargées deviennent moins efficaces pour attirer les particules. Un entretien régulier est nécessaire pour maintenir leur efficacité.

En tenant compte de ces limitations et défis, il est possible de maximiser les avantages des filtres électrostatiques tout en minimisant les risques potentiels pour la santé et l'environnement.

I.11 Conclusion

En conclusion, les filtres électrostatiques sont des dispositifs de filtration essentiels utilisés dans une variété d'applications pour améliorer la qualité de l'air en éliminant les particules en suspension. Leur fonctionnement repose sur des principes électriques simples mais efficaces, offrant une solution de filtration hautement performante. Malgré leurs avantages, les filtres électrostatiques présentent également des défis, tels que l'encrassement et la production de sous-produits indésirables. Cependant, avec des recherches continues et des innovations technologiques, ces défis peuvent être surmontés et les filtres électrostatiques peuvent jouer un rôle crucial dans la promotion d'un environnement intérieur et extérieur plus sain.

Entant que domaine de recherché en constant évolution, les filtres électrostatiques offrent de nombreuses opportunités pour des améliorations futures, notamment le développement de nouvelles technologies et l'optimisation des performances des filtres existants. Il est essentiel de continuer à explorer ces opportunités afin de maximiser l'efficacité et la durabilité des filtres électrostatiques dans un large éventail d'applications.

Chapitre II : Chargement des particules par la décharge couronne.

II.1 Introduction

Le chargement des particules par la décharge couronne est un élément central dans le fonctionnement des filtres électrostatiques, jouant un rôle essentiel dans la purification de l'air et la séparation des particules solides.

Les phénomènes de décharge électrique ont été largement étudiés depuis plus d'un siècle, comme en témoignent de nombreuses études scientifiques [15,16]. Au début du XX^{ème} siècle, les premières études détaillant l'évolution des phénomènes de décharge électrique et proposant des mécanismes explicatifs ont vu le jour [17,18]. Les premières publications concernant l'effet couronne remontent à l'année 1915, grâce aux travaux menés par F. Peek. Par le biais d'essais expérimentaux, Peek a établi une loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de l'effet couronne.

L'objet de ce premier chapitre c'est d'effectuer une brève synthèse bibliographique sur la théorie de la décharge couronnes, nous commençons dans un premier temps par quelques rappels et généralités dont nous rappellerons d'étapes et processus d'apparition sur le niveau microscopique, les déferont type de décharge couronne et Les facteurs influençant sur ce phénomène, le mécanisme de Townsend et enfin nous allons parler sur chargement des particules.

II.2 Généralités sur la décharge couronne

II.2.1 Condition d'apparition

Pour que ce phénomène se produise, il est essentiel que le champ électrique soit suffisant, surpassant ainsi le seuil de champ critique pour le PEEK. Ce champ spécifique est en fonction de la tension appliquée. Lorsque certaines particules du gaz environnant sont suffisamment excitées, elles peuvent ioniser une région spécifique du gaz. Ce processus repose sur l'accélération des électrons libres par le champ électrique intense. Lorsque l'énergie des électrons dépasse le seuil d'ionisation des molécules du gaz, les collisions entre ces électrons et les molécules provoquent l'ionisation de ces dernières. Cela engendre la création de nouveaux électrons, soumis au même champ. L'ionisation génère également des photons hautement énergétiques, contribuant ainsi à une réaction en chaîne appelée avalanche de Townsend. Cette succession d'avalanches forme ce que l'on appelle la décharge couronne.

Les ions et les électrons nouvellement créés se déplacent selon leur polarité, influençant à leur tour le champ électrique. Ces charges en mouvement sont appelées "charges d'espace".

II.2.2 Différents types de configuration des électrodes

Les décharges coronaires, définies comme des décharges électriques proches de la rupture, se déploient dans un environnement gazeux. Parmi les schémas d'électrodes les plus fréquemment employés pour induire ces phénomènes, on distingue les configurations point-plan, couteau-cylindre, fil-plan, fil-cylindre ou cylindre-cylindre. La distance entre les électrodes, un paramètre crucial dans ces dispositifs, est généralement maintenue à un niveau d'environ un centimètre. [19]

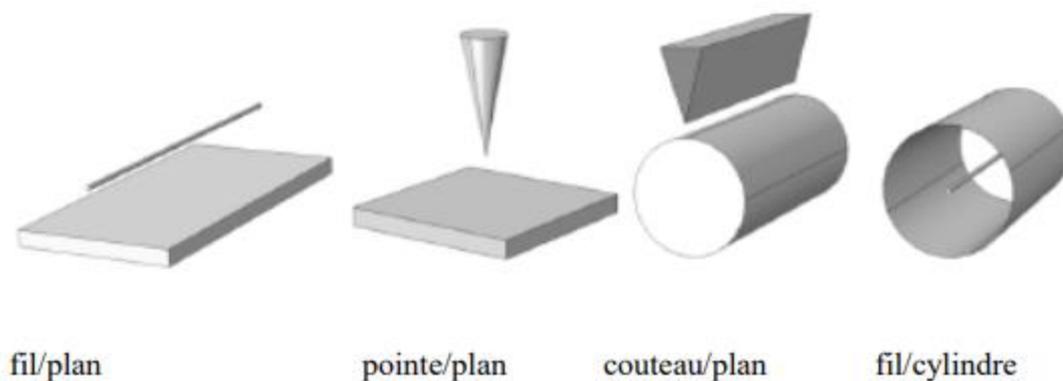


Figure II.1 : différents types de géométries d'électrodes. [20]

En raison de cette asymétrie, le champ électrique entre les deux électrodes présente une distribution inégale. Les décharges couronnes peuvent être appliquées dans une gamme variée de milieux, allant de quelques centaines de pascals à plusieurs atmosphères de pression. Cependant, à ces mêmes niveaux de pression, les plasmas de gaz rares exempts d'impuretés tendent à se transformer instantanément en arcs. En outre, les décharges couronnes présentent l'avantage d'être relativement simples à générer dans des conditions de stabilité et de reproductibilité satisfaisantes. Selon les besoins spécifiques des applications envisagées, la tension élevée, généralement appliquée à l'électrode active, peut être de nature pulsée, alternative ou continue, avec une polarité positive ou négative. L'utilisation d'une alimentation pulsée permet de produire des courants intenses pendant des durées très brèves, ce qui permet d'obtenir des électrons à haute énergie sans qu'il y ait passage à l'arc. Ces électrons de haute énergie sont souvent adaptés au traitement de certains polluants. Les tensions de

fonctionnement typiquement utilisées varient généralement de quelques kilovolts à environ une trentaine de kilovolts, tandis que les puissances délivrées dépassent rarement quelques kilowatts. [21]

II.2.3 Processus de formation de la décharge couronne

D'un point de vue microscopique, il est possible de décomposer ce processus en trois étapes distinctes.

II.2.3.1 Amorçage de la décharge

Un photon ou tout autre événement externe intervient pour ioniser une molécule spécifique du gaz près de l'électrode active. Cela conduit à la libération d'un ion positif et d'un électron.

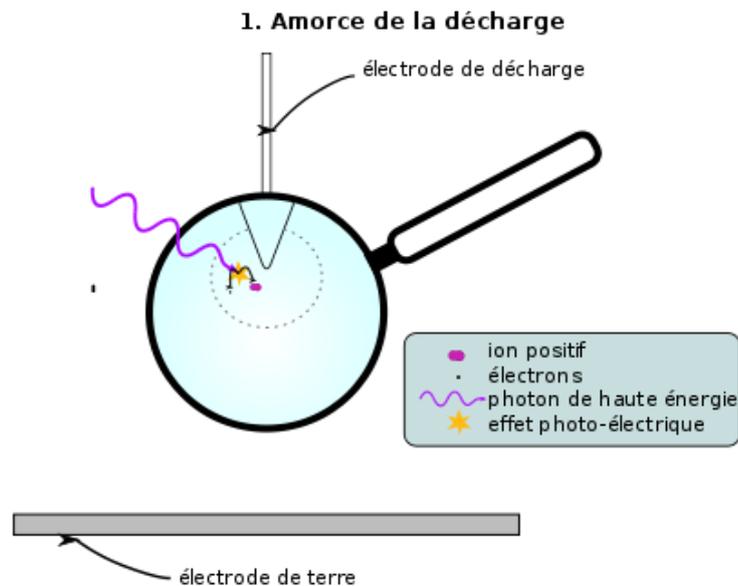


Figure II.2 : Amorçage de la décharge. [22]

II.2.3.2 Multiplication et avalanche

À proximité de l'électrode active, un champ électrique extrêmement intense est présent, générant une force électrique sur les particules libérées qui ont des charges de polarité opposée. Cette force induit un mouvement cinétique dans des directions opposées, empêchant ainsi la recombinaison de ces particules et initiant le phénomène de claquage. Comme les électrons libérés sont beaucoup plus légers que les ions, ils se déplacent plus rapidement, ce qui entraîne des collisions inélastiques avec les atomes neutres. Ces collisions génèrent une multitude de

paires ion/électron supplémentaires, qui subissent ensuite le même processus. Ce mécanisme entraîne le phénomène d'avalanche électronique.

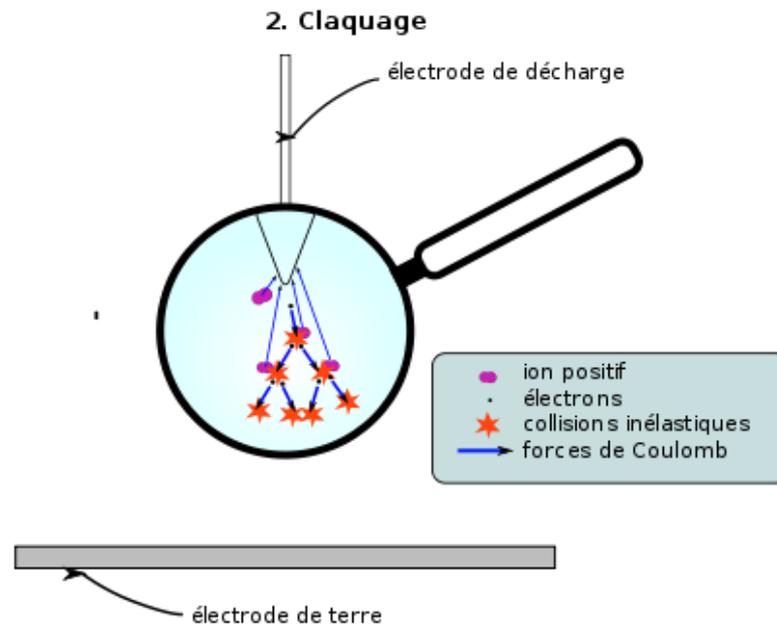


Figure II.3 : Multiplication électronique (phénomène d’avalanche électronique). [22]

II.2.3.3 Phase de la recombinaison et maintien de la décharge

Pendant cette étape, un flux électrique se forme dans la configuration inter-électrode à cause du déplacement des ions créés vers la seconde électrode inactive par attraction.

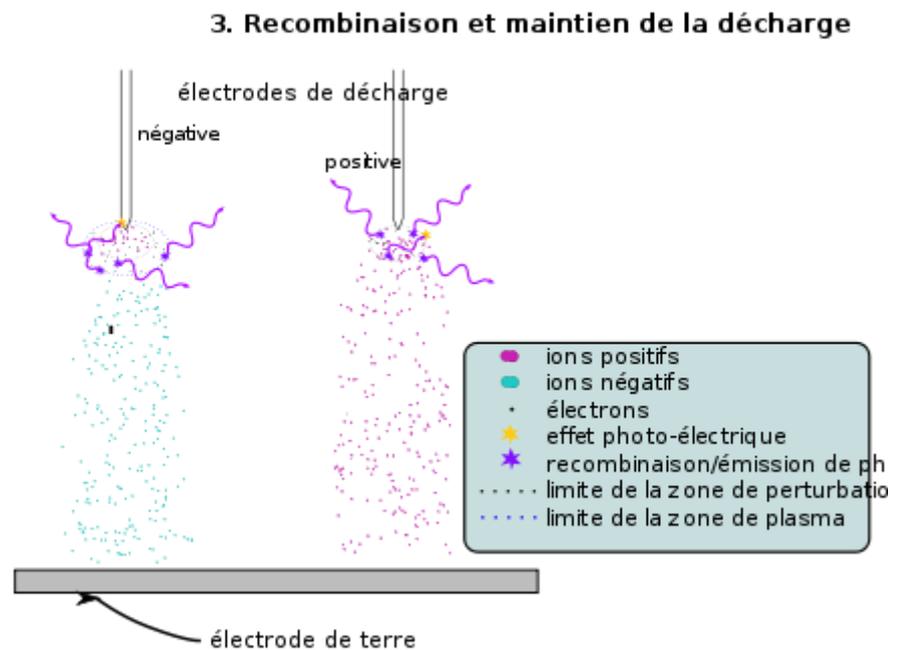


Figure II.4 : Maintien de la décharge. [22]

II.2.4 Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)

En appliquant un champ électrique entre deux électrodes dans l'air, toutes les charges électriques créées vont se déplacer dans l'espace inter-électrodes et génèrent un courant électrique (courant de décharge). La figure II.5 montre le comportement du courant de décharge en fonction de l'augmentation de la tension appliquée. La courbe de cette figure permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge électrique dans l'air. [23]

- **Dans le régime I**, la décharge n'est pas auto-entretenu. Le courant est extrêmement faible ($\leq 10^{-12} A/cm^{-2}$), résultant de la capture des espèces chargées naturellement présentes dans le milieu. Ces espèces sont générées par l'impact de rayons cosmiques ou de particules provenant de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace entre les électrodes. Dans ce scénario, le champ électrique est trop faible pour initier l'avalanche électronique.
- **Dans le régime II**, lorsque le potentiel extérieur appliqué atteint une valeur seuil V_0 , le champ électrique devient suffisamment intense pour engendrer des avalanches électroniques. Le courant électrique mesuré augmente considérablement pour une variation très minime de la tension appliquée. Toutefois, ce courant demeure toujours faible ($\leq 10^{-6} A/cm^{-2}$), caractérisant ainsi une décharge non auto-entretenu.

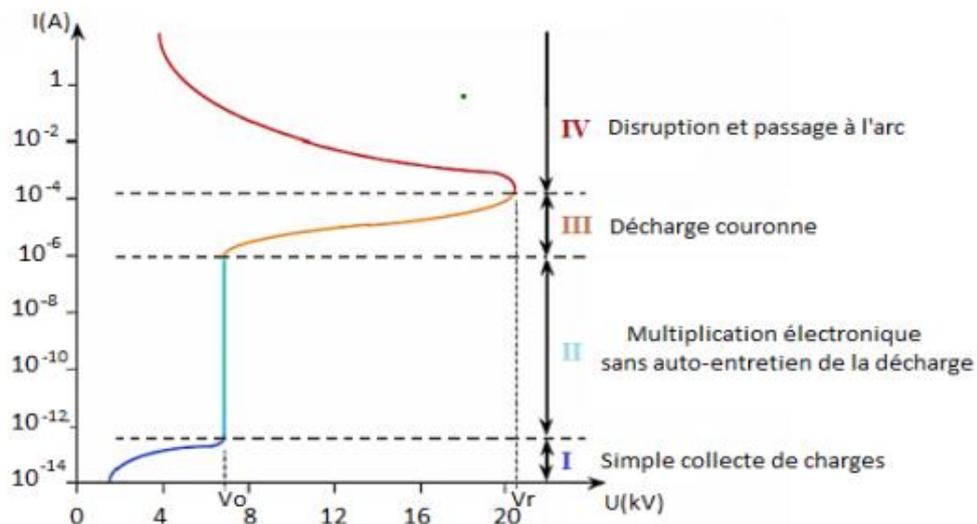


Figure II.5 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique. [20]

- **Régime III** Dans ce régime, il s'agit d'une décharge couronne auto-entretenue. À partir d'un seuil de potentiel appliqué à l'électrode, des streamers se forment, marquant ainsi le seuil de la décharge couronne.
- **Régime IV** : Dans ce régime, on entre dans le domaine de l'arc au-delà d'une tension appliquée V_r . Le courant de décharge devient très élevé et la tension aux bornes des électrodes diminue rapidement.

II.2.5 Types de décharge couronne

La décharge couronne présente un avantage significatif dans la mesure où il est possible de générer des charges positives ou négatives en fonction de la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure (pointe), désignée sous le nom d'« électrode active ». Lorsque cette électrode est positive, on parle de décharge couronne positive, tandis que lorsqu'elle est négative, on parle de décharge couronne négative. En raison de la différence de masse entre les électrons (de charge négative) et les ions (de charge positive), la physique sous-jacente de ces deux types de décharges couronnes est fondamentalement distincte. [24][25]

Le champ électrique près de la pointe est suffisamment intense pour entraîner l'ionisation du gaz environnant (voir Figure II.6 (a)). Lorsque l'électrode active est polarisée positivement, les électrons germes situés à proximité sont attirés vers elle et accélérés. Cette attraction engendre une région fortement ionisée autour de l'électrode active, indiquée en pointillés sur la Figure II.8. Les ions positifs ainsi formés sont repoussés par l'anode sous l'effet des forces de Coulomb et migrent vers une région de champ électrique plus faible, désignée comme la zone de dérive [23]. Étant donné que seuls des ions positifs sont présents dans cette zone, la décharge est unipolaire.

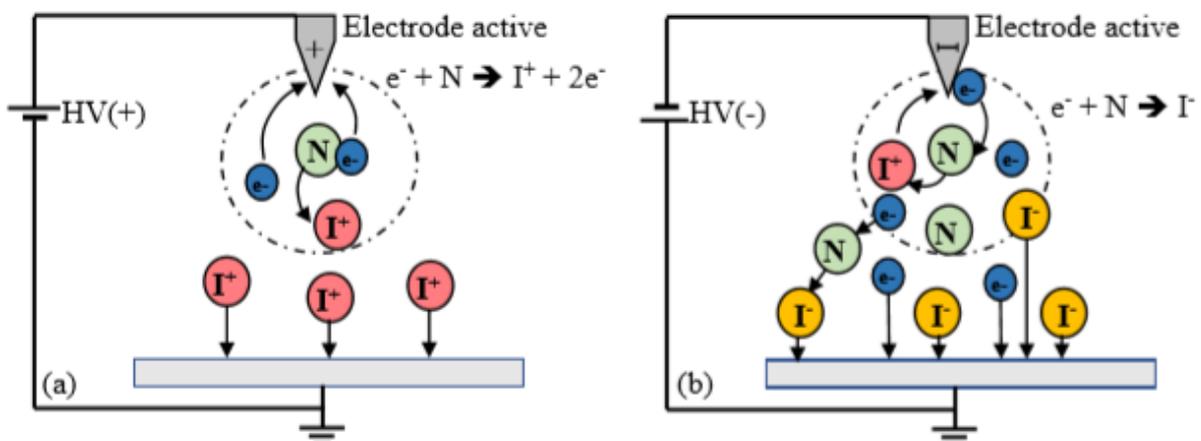


Figure II.6 : Décharge couronne négative pour une configuration pointe-plan, (a) cas de décharge couronne positive et (b) cas de décharge couronne négative. [20]

Lorsque l'électrode est polarisée à un haut potentiel négatif, dans la zone d'ionisation ainsi créée, les ions positifs produits se déplacent dans le sens du champ électrique et convergent vers la pointe (voir Figure II.6 (b)). Des électrons sont éjectés de la cathode suite aux chocs, chaque électron ainsi libéré déclenche une nouvelle avalanche. Les électrons et les ions négatifs sont repoussés par la pointe vers une région où le champ électrique est faible, appelée zone de dérive [26]. En présence d'un gaz électronégatif, comme c'est le cas pour l'air, lors de leur déplacement, les électrons se lient aux molécules électronégatives, formant ainsi des ions négatifs dans la zone de dérive. L'avalanche électronique se propage de l'électrode vers le plan de masse, s'arrêtant à une distance où le champ électrique n'est plus suffisant pour maintenir l'ionisation du gaz [27].

II.2.6 Les facteurs influençant de la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne. Parmi eux, trois facteurs essentiels sont généralement distingués :

- Facteurs géométriques.
- Facteurs physico-chimiques.
- Facteurs électriques.

II.2.6.1 Facteurs géométriques

- **L'augmentation de rayon de courbure** augmente la tension de seuil d'apparition d'effet couronne [28]
- **La distance entre les électrodes** : elle joue un rôle crucial dans le comportement des courants électriques. Pour de courtes distances entre les électrodes, le courant est plus important et augmente rapidement avec la tension appliquée. De plus, les seuils de décharge de couronne se manifestent à des tensions plus faibles lorsque la distance entre les électrodes est réduite. [29]

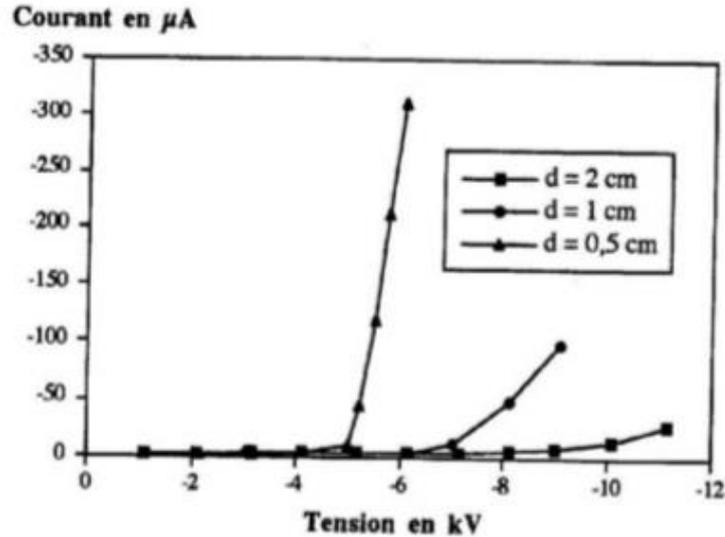


Figure II.7 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne. [30]

- **La nature des électrodes :** Les caractéristiques courant-tension de la figure II.10 montrent l'effet de la nature des électrodes (cuivre, aluminium et acier) sur le courant de décharge couronne. [31]

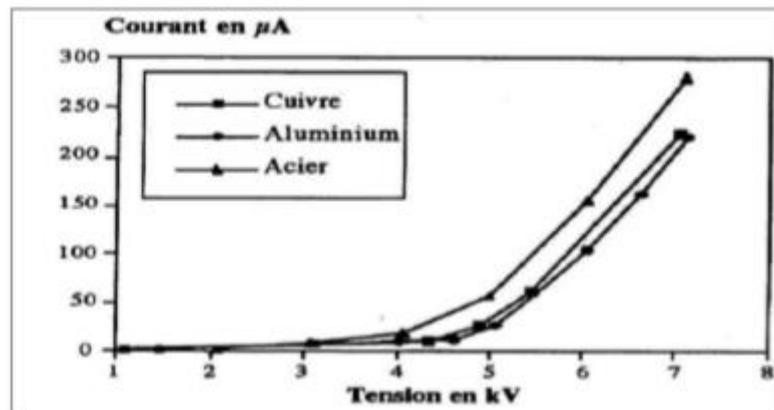


Figure II.8 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes en géométrie fil-plan ($d = 0.5\text{cm}$, $\varnothing = 125\mu\text{m}$). [31] [32]

La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique, comme indiqué dans le tableau I.2. La mobilité ionique est plus grande avec des électrodes en acier qu'avec des électrodes en aluminium, quelle que soit la polarité de la tension appliquée.

Tableau II.1 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative (HR=5%, Ø fil=125µm). [30]

Nature des électrodes	Mobilité μ : [$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] à $d=0.5\text{cm}$.	
	Tension positive	Tension négative
Electrode en cuivre	$8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$
Electrode en aluminium	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
Electrode en acier	$12 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$

- **La distribution du champ électrique** : dans l'espace entre les électrodes est influencée par la configuration géométrique des électrodes, comme dans le cas des géométries pointe-plan et fil-plan. Dans la configuration pointe-plan, la décharge couronne présente une zone de stabilité et offre une gamme de fonctionnement étendue. En revanche, dans la configuration fil-plan, dès l'apparition du champ électrique, la décharge évolue rapidement vers l'arc électrique, ce qui limite considérablement la gamme de fonctionnement. [33]

II.2.6.2 Facteurs physico-chimiques

- **Effets de la température sur la décharge couronne**

Des études expérimentales ont été menées pour comprendre l'effet de température sur la décharge couronne.

Lorsqu'on augmente la température à pression atmosphérique normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, favorisant ainsi la décharge couronne. Ce phénomène est dû au fait que, dans ce cas, le libre parcours moyen des particules augmente. [33]. Lorsque la température augmente, les électrons gagnent plus d'énergie pour former l'avalanche. Ainsi, le seuil de la décharge couronne diminue à une température élevée des gaz [34] une élévation de température augmente la mobilité des ions, ce qui entraîne une intensification de l'ionisation dans l'espace de la couronne et un accroissement du courant dans la zone extérieure. Par conséquent, la tension à laquelle l'effet couronne se produit devient plus faible. Cependant, il est également important de noter que la densité des gaz augmente avec la température. Par conséquent, la vitesse de migration et le rendement du dépolluage diminuent lorsque la température augmente. [35]

- **Effets de l'humidité sur la décharge couronne**

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est particulièrement significative, surtout lorsque le champ électrique est non uniforme.

Ce phénomène est attribuable à deux facteurs principaux : d'une part, l'augmentation de l'attachement des électrons libres en raison de la présence de vapeur d'eau dans l'air (en raison de sa grande électronégativité), et d'autre part, une plus grande absorption des photons à l'avant des streamers, là où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation.

Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour une humidité relative de 90% que pour 5%. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative dans la cellule de décharge augmente. [31]

- **Effet de la pression sur la décharge couronne**

L'influence de la pression sur le courant de décharge fourni par la source d'ions est très significative dans une plage de pressions comprise entre 0,1 bar et 1,0 bar. L'effet de la pression sur le seuil est similaire à celui de la distance entre les électrodes. Selon la loi de Paschen, à mesure que la pression augmente, le nombre de particules dans l'espace inter-électrode augmente tandis que le libre parcours moyen des particules chargées diminue. En conséquence, l'ionisation de l'air est réduite. Le seuil d'apparition de la décharge couronne augmente avec la pression, tandis que la mobilité des porteurs de charges diminue. [36][37]

II.2.6.3 Facteurs électriques

La décharge couronne est influencée par les paramètres électriques de la tension appliquée au système d'électrodes à savoir :

- La forme d'onde (continue /sinusoïdale / triangulaire / rectangulaire).
- L'amplitude.
- La fréquence.
- la largeur d'impulsion.

II.3 Mécanisme de Townsend

La théorie de Townsend repose sur le processus de multiplication des électrons par ionisation du gaz [38]. Sous l'effet d'un champ électrique homogène, un ou plusieurs électrons

initiaux peuvent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les molécules rencontrées lors de leur déplacement vers l'anode (voir Figure.II.9). Lors de chaque collision ionisante, un ion positif et un nouvel électron sont générés. Ce nouvel électron peut à son tour ioniser les molécules du gaz, suivant le même processus de multiplication électronique. Ainsi, un électron peut donner naissance à une avalanche contenant N électrons. L'irradiation de la cathode émet N_0 électrons par unité de temps, chacun d'eux générant α électrons sur chaque unité de longueur de son parcours. Supposons qu'à une distance x de la cathode, N électrons se soient formés, alors ils vont produire dN électrons sur une distance dx , où :

$$dN = N \cdot \alpha \cdot dx \tag{II.1}$$

α est le premier coefficient de Townsend. Il représente le nombre d'ionisations par centimètre de parcours d'un électron soumis au champ électrique E . Dans le cas d'un champ homogène, ce coefficient α reste constant. À $x=0$, lorsque $N=N_0$, nous obtenons :

$$N = N_0 \cdot e^{\alpha \cdot x} \tag{II.2}$$

Le courant total collecté à l'anode vaut :

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha \cdot x} \tag{II.3}$$

$I_0 = e \cdot N_0$, e étant la charge de l'électron.

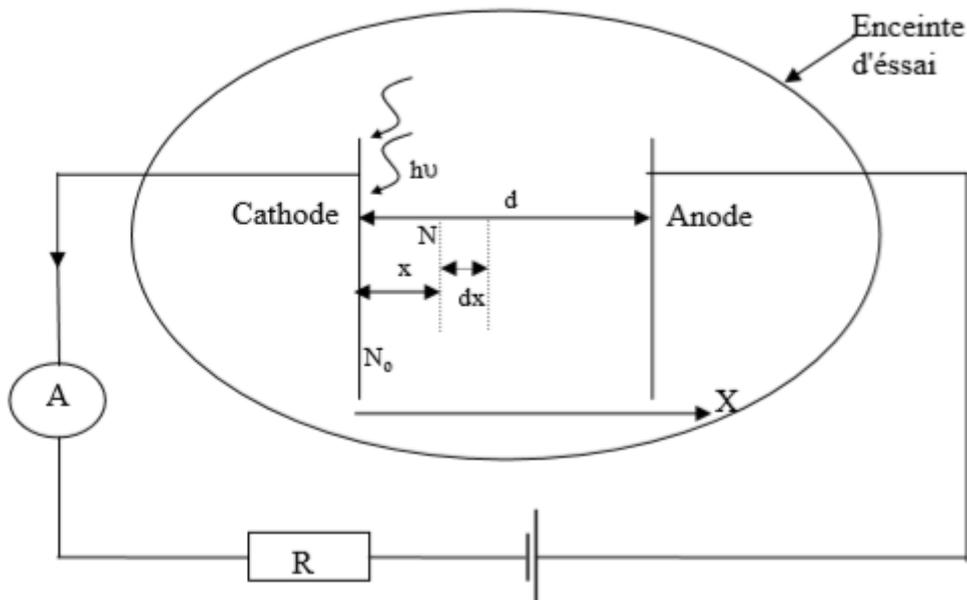


Figure II.9 : Tube à décharge. [52]

L'étude expérimentale du courant I en fonction de la distance d réalisée par Townsend a révélé que ce courant augmente plus rapidement que celui prédit par la relation (II.3). Cette augmentation rapide est due au phénomène d'ionisation secondaire qui se produit près de la cathode. En effet, lorsqu'un ion positif se déplace vers la cathode et acquiert une énergie cinétique suffisante, il peut arracher un certain nombre d'électrons de la cathode. Ce phénomène est caractérisé par le taux d'émission secondaire γ , qui représente le nombre d'électrons secondaires extraits de la cathode par un ion positif. La valeur de γ dépend de la vitesse et de la nature des ions, ainsi que de la nature de la cathode elle-même. Townsend a également démontré que l'existence simultanée de ces deux phénomènes (ionisation des gaz inter-électrodes et ionisation en surface de la cathode par les ions positifs) peut entraîner le déclenchement de la décharge autonome. Le courant collecté à l'anode vaut alors :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (\text{II.4})$$

D'après Townsend, la condition nécessaire pour que la décharge soit auto-entretenu est que le dénominateur de l'équation (II.4) soit nul. Ce critère, où le courant tend vers l'infini, se traduit alors par l'existence d'une distance critique d_c , telle que :

$$1 - \gamma(e^{\alpha \cdot d_c} - 1) = 0 \quad (\text{II.5})$$

Comme $1 \gg e^{\alpha \cdot d_c}$, le critère devient :

$$e^{\alpha \cdot d_c} = \frac{1}{\gamma} \quad (\text{II.6})$$

Dans le cas où le rapport entre le champ électrique et la pression (E/p) n'est pas constant, ce qui se produit lorsque le champ électrique est non uniforme en raison de la géométrie des électrodes (pointe-plan, pointe-pointe, etc.), le coefficient α varie. Dans ce contexte, le critère de claquage s'exprime par la relation suivante :

$$\left(e^{\int_0^d \alpha \cdot dx} - 1 \right) = \frac{1}{\gamma} \quad (\text{II.7})$$

Le passage à la décharge de Townsend signifie que chaque électron primaire est remplacé par au moins un électron secondaire. Ces électrons secondaires peuvent être émis soit

par la cathode suite au bombardement direct des ions positifs, soit par les molécules du gaz sous l'effet de la collision avec les électrons [39].

Effectivement, les électrons secondaires peuvent également provenir d'autres sources, telles que la photo-ionisation dans le gaz, induite par les photons émis lors de la désexcitation de certains atomes. Lorsque le nombre d'électrons dans une avalanche singulière atteint un niveau compris entre 10^6 et 10^8 , une zone intermédiaire se forme où le champ électrique local est fortement accentué entre les électrons en tête de l'avalanche et les ions positifs qui les suivent. Dans cette région, les charges positives et négatives s'accumulent en nombre égal, ce qui favorise la formation d'un plasma filamentaire appelé streamer.

La théorie proposée par Townsend a été enrichie par de nombreux compléments et ajustements au fil du temps. En effet, il a été initialement supposé que les électrons ne pouvaient être éjectés de la cathode que sous l'action des ions positifs. Cependant, d'autres phénomènes peuvent également contribuer à la production d'électrons lors de la décharge. Parmi ceux-ci, on peut citer l'extraction des électrons de la cathode sous l'effet de la radiation due à la décharge elle-même (effet photoélectrique). De plus, les électrons nécessaires à l'entretien de l'avalanche peuvent être générés dans le volume du gaz suite aux collisions entre les atomes et les ions positifs. À des pressions élevées, les ions positifs sont ralentis et leur énergie cinétique n'est plus suffisante pour extraire des électrons de la surface cathodique. En fait, les travaux de Fletcher ont confirmé l'invalidité de cette théorie pour des pressions de gaz élevées en présence d'un champ électrique uniforme. [40]

Le mécanisme de Townsend est applicable pour un produit pression-distance (p.d) inférieur ou égal à 200 torr.cm (où p représente la pression du gaz et d la distance entre les électrodes). [41]

II.4 Chargement des particules

II.4.1 Phénomène et méthodes de chargement

Lorsqu'un corps est chargé électriquement, cela signifie qu'il a accumulé ou perdu des charges électriques. En situation d'équilibre, un corps est électriquement neutre. Cependant, il devient électrisé lorsque certains de ses atomes gagnent ou perdent un ou plusieurs électrons, rompant ainsi cet équilibre et cette neutralité. À ce stade, on dit que le corps est chargé électriquement.

Il y a de nombreux modes d'électrisation possibles :

- Par frottement (triboélectricité).
- Par contact (transfert direct de charges).
- Par ionisation (émissions d'ions sous haute tension).
- Par influence (à l'aide d'un champ électrique).
- Par clivage (fragmentation).
- Par effet photoélectrique.
- Par émission thermoélectronique.
- Par ballo-électricité (agitation des particules dans un flux de gaz) etc....

Les méthodes les plus répandues sont l'effet triboélectrique, qui implique le transfert de charges à l'aide d'un rouleau électrostatique, et la décharge couronne. Ces techniques sont largement utilisées pour charger les diélectriques afin d'évaluer leur capacité à conserver leur état de charge. [42]

II.4.2 Chargement des matériaux par décharge couronne

La décharge couronne représente le moyen le plus simple et le plus fiable pour réaliser le chargement électrostatique des isolants. Grâce à cette méthode, il est possible de déposer des charges, qu'elles soient positives ou négatives, en fonction de la polarité du système de décharge, sur les surfaces des isolants. Cette technique de chargement par décharge couronne suscite un intérêt croissant en raison de la nécessité de charger électriquement des films ou des matériaux fibreux pour diverses applications telles que l'électro-photographie et les électrets.

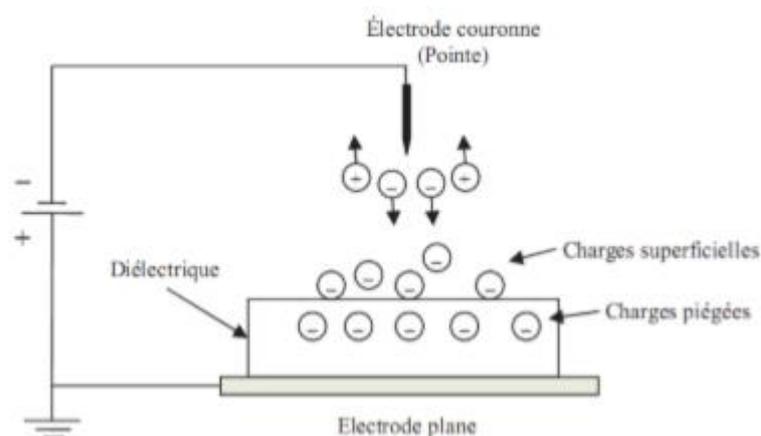


Figure II.10 : Principe de formation d'électret par décharge couronne. [43]

Dans cette méthode, une tension relativement élevée (de l'ordre de dizaines de kV) est appliquée à une électrode de faible rayon de courbure (de l'ordre de centaines de micromètres), située à une certaine distance (de plusieurs centimètres) par rapport à un plan de masse.

L'électrode active peut prendre la forme d'une pointe, de plusieurs pointes disposées en forme de peigne, ou d'un fil très fin. Le champ électrique dans l'espace entre les électrodes est non uniforme, avec une intensité suffisamment élevée près de l'électrode active pour ioniser l'air. Le diélectrique est placé sur le plan de masse. Sous l'action du champ électrique, il acquiert des charges de même polarité que l'électrode couronne. La figure II.10 illustre le principe de formation d'électrets par décharge couronne négative. [44]

II.4.3 Chargement des matériaux par triboélectricité

La triboélectricité fait référence au phénomène électrostatique qui se produit lorsqu'on met en contact deux matériaux de natures différentes : une partie des électrons de la surface de contact de l'un des deux matériaux est transférée à l'autre, et ce transfert persiste lors de leur séparation. L'effet triboélectrique peut être amplifié en fournissant de l'énergie mécanique, par exemple en frottant les matériaux l'un contre l'autre. [45]

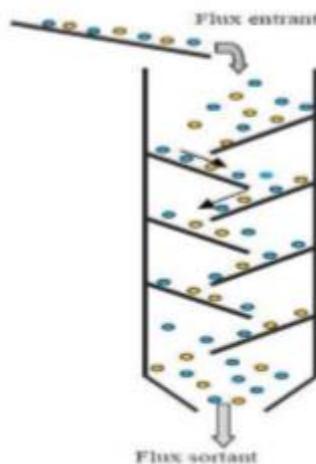


Figure II.11 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique. [43]

Lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, des charges sont transférées, résultant en deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux à une faible conductivité, les charges demeureront après la séparation, et de nouveaux contacts pourront entraîner de nouveaux transferts de charges. L'effet triboélectrique est généralement associé à la création de charges électriques par frottement entre deux

matériaux, mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par simple contact. Le frottement est ainsi considéré comme une succession de contacts suivis de séparations, accompagnés parfois de génération de chaleur et de transfert de masse. [42]

II.4.4 Chargement des matériaux par rouleau électrostatique

Effectivement, le simple contact entre deux matériaux peut induire un phénomène d'électrisation. Un diélectrique peut également être chargé par un rouleau électrostatique en contact avec sa surface libre, le potentiel de charge étant contrôlé par une source haute tension.

Le transfert de charge au contact entre le rouleau et la surface du diélectrique est probablement de type électronique. La séparation des charges résulte des différences dans la structure électronique des deux matériaux en contact, influencées principalement par leur nature et les traitements subis par leurs surfaces. [45]

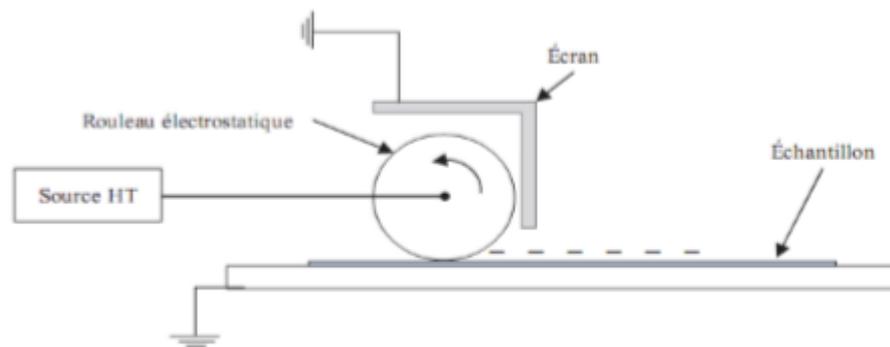


Figure II.12 : Principe de charge par rouleau électrostatique. [43]

La distribution de charge de surface déposée étant uniforme à une échelle macroscopique, ces rouleaux sont couramment utilisés pour charger les feuilles de papier dans les imprimantes laser.

II.4.5 Chargement des matériaux par influence électrostatique (induction)

Le phénomène d'influence se réfère à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps conducteur en raison de la proximité d'un autre corps déjà chargé, sans qu'il y ait de contact entre les deux. La présence du corps chargé crée un champ électrique à l'intérieur du corps influencé, entraînant des forces agissant sur les porteurs de charges libres et provoquant leur redistribution. La charge ainsi induite sera de signe opposé à celle du corps influent. En présence d'un champ électrique, le matériau se polarise, ce qui engendre l'apparition d'une

charge surfacique induite appelée polarisation. Comme illustré dans la figure II.14, autant de charges positives que négatives apparaissent dans ce processus.

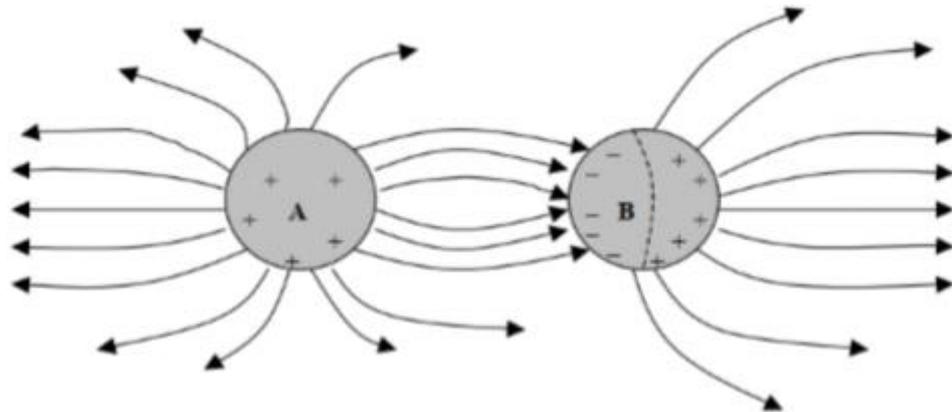


Figure II.13 : Influence entre deux corps (le corps B étant isolé). [43]

Lors de la séparation des deux zones chargées formées sur le corps influencé, une ligne neutre apparaît. La région la plus proche du corps influent est chargée de manière opposée. Comme illustré dans la figure, une partie des lignes de champ issues du corps influent ne parviennent pas jusqu'au corps influencé, ce qui entraîne une charge induite toujours moins importante en valeur absolue que celle portée par le corps A. Si le corps influencé B est mis à la terre, il ne portera que des charges de signe opposé à celles du corps influent, et leur valeur absolue sera toujours inférieure à celle d A. [46]

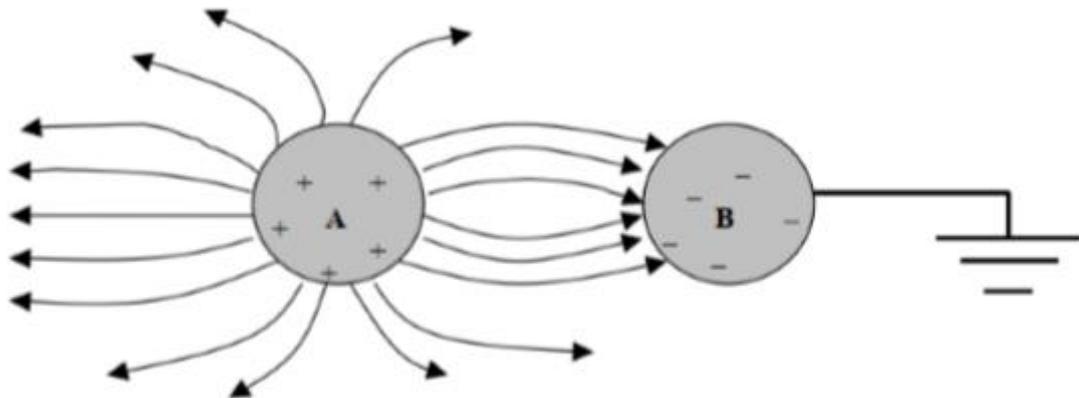


Figure II.14 : Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre). [43]

II.4.6 Charge par champ

Dans ce contexte, le champ électrique est le facteur déterminant du processus de charge. Lorsqu'une particule est présente dans un gaz, elle engendre une distorsion locale du champ électrique, les lignes de champ convergeant vers sa surface. Cette distorsion dépend de la nature de la particule : pour une particule conductrice, la distorsion du champ est maximale. Pour une

particule non-conductrice (isolante), la perturbation du champ est fonction de sa permittivité. Ainsi, l'intensité du champ électrique augmente à la surface de la particule. Dans cette situation, les ions présents dans le gaz se déplacent le long des lignes de champ électrique et peuvent atteindre la surface de la particule. Chaque ion qui atteint la particule modifie la distribution locale du champ électrique. Tant que le champ électrique généré par la charge de la particule est inférieur au champ électrique maximal existant à la surface de la particule non chargée, les ions continuent d'atteindre sa surface. Lorsque la charge acquise devient suffisante, les lignes de champ contournent la particule, indiquant que la particule a atteint la charge de saturation par champ q_p^S [47,48].

Pauthenier [49] a démontré qu'en raison du phénomène de répulsion électrostatique, seule une partie réduite de la surface des particules est atteinte par les ions. Selon McDonald [50], ce mécanisme de charge est dominant tant que la taille des particules dépasse environ 0,5 μm . La quantité de charge acquise par les particules dépend de leur diamètre, du champ électrique, de la densité des ions présents, du temps de présence des particules dans le champ électrique, de la mobilité des ions et de la constante diélectrique des particules. Le calcul de la charge limite des particules repose principalement sur la théorie développée par Pauthenier [49]. L'évolution temporelle de la charge pour une particule située dans un champ électrique E est décrite par l'expression suivante donnée par White [10] :

$$\frac{dq_p}{dt} = \frac{\rho \cdot \mu \cdot q_p^S}{4 \cdot \epsilon_0} \cdot \left(1 - \frac{q_p}{q_p^S}\right)^2 \quad \text{Pour } q_p < q_p^S \quad (\text{II.8})$$

Dans laquelle ρ représente la densité d'ions et μ est la mobilité ionique. La charge limite par champ est donnée par l'expression suivante [10] :

$$q_p^S = 3 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \cdot E \cdot d_p^2 \quad (\text{II.9})$$

où ϵ_r est la permittivité relative des particules. Nous observons dans l'équation (II.9) que la charge limite par champ est une fonction de l'intensité du champ électrique local, de la permittivité relative ϵ_r des particules ; q_p est obtenue par l'intégration dans le temps de l'équation (II.8). Dans le cas particulier où les répartitions du champ électrique et de la charge d'espace ionique sont uniformes, l'intégration de (II.9) conduit à :

$$\begin{cases} q_p(t) = q_p^s \cdot \left(\frac{t}{t + \tau_p} \right) \\ \tau_p = \frac{4 \cdot \epsilon_0}{\rho \cdot \mu} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Ou τ_p représente le temps caractéristique de charge par champ et correspond à la durée nécessaire pour que la charge de la particule atteigne la moitié de sa charge maximale. Dans le cas des filtres électrostatiques, l'intensité du champ électrique et la densité d'ions varient dans l'espace entre les électrodes ; ainsi, la valeur de la charge limite sera spécifique à chaque position des particules.

II.5 Conclusion

En résumé, la décharge corona est un phénomène électrique complexe qui se produit dans des conditions de champ électrique élevé autour de conducteurs chargés, et qui présente à la fois des effets nuisibles et des applications utiles. Sa compréhension est essentielle pour la conception et le fonctionnement efficaces des systèmes haute tension.

Chapitre III : Installation et description des expériences.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la mise en place et l'étude expérimentale du filtre électrostatique, ainsi que la simulation du champ électrique et la trajectoire des particules à l'intérieur de filtre. Nous commencerons par décrire la méthodologie utilisée pour la mise en place du filtre, en expliquant les différents composants et leur fonctionnement. Ensuite, nous présenterons les différents types d'expérimentations que nous avons menées pour évaluer l'efficacité du filtre dans la capture des particules. En parallèle, nous procéderons à la simulation du champ et électrique l'intérieur du filtre, en utilisant des outils numériques pour montrer le comportement des particules chargées.

III.2 Mise en place et conception de filtre

La figure III.1 montre une photographie du filtre réalisé au laboratoire. Il est composé de deux boîtes en plastique comme structure externe afin de fournir un support solide et une enceinte pour éviter la fuite et la dispersion de la poussière. Le plastique se distingue par sa légèreté et sa résistance à la corrosion, ce qui en fait un choix idéal pour nos applications de filtres, nécessitant le déplacement et la transmission de l'air. Cette transmission est réalisée à travers un tube en PVC qui relie entre les deux boîtes (figure III.1) et forme la conduite principale pour l'air pollué, où l'air est dirigé du bas vers le haut.



Figure III.1 : tube en PVC relie entre les deux boîtes.

Le choix s'est porté sur un tube en PVC d'un diamètre de 40 mm car il offre une flexibilité de conception et une facilité d'installation. De plus, il peut être découpé et modifié facilement pour répondre aux besoins spécifiques du projet. De plus, les propriétés électriques du PVC en font un matériau approprié pour une utilisation dans un environnement nécessitant

une protection contre les chocs électriques, ce qui en fait un choix idéal pour faire passer l'air pollué en toute sécurité. Nous utilisons un coude en PVC de 40 millimètres de diamètre pour diriger l'extrémité du tuyau vers la gauche avec un angle de 90 degrés.

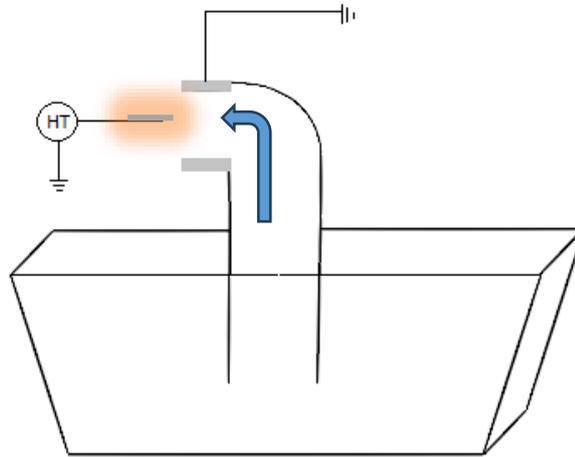


Figure III.2 : schéma explicatif de filtre.

Cette orientation vise à assurer un guidage précis des courants d'air pollués vers notre électrode avec efficacité, contribuant ainsi à améliorer la qualité de notre processus ou de notre système. L'aiguille est suspendue à un support en forme de L pour assurer une stabilité maximale, le support est fabriqué d'un matériau conducteur (Le fer) (Figure III.3).



Figure III.3 : le support de l'aiguille.

L'extrémité de l'aiguille est placée avec précision au centre de la sortie d'un tube en PVC, qui agit comme un échappement pour l'air pollué. Lorsque l'air pollué atteint la sortie du tube, il entre en contact avec une zone d'air chargée par effet de la décharge couronne, ce qui fait que les particules de poussière acquièrent une charge électrique. Cela les attire ensuite vers

la masse, formée de papier d'aluminium fixée à l'extrémité du coude pour attirer les particules chargées dans l'air (Figure III.4).



Figure III.4 : Emplacement de l'aiguille.

Le choix du papier a été fait avec soin pour garantir sa stabilité et sa fixation à l'extrémité du tube, et son épaisseur et son type peuvent être ajustée selon les exigences de conception et de performance spécifiques de l'appareil.



Figure III.5 : la zone de collection relié à la terre.

Pour connecter la feuille d'aluminium à la terre nous avons utilisé un fil de cuivre gainé d'un matériau isolant connecté entre le papier d'aluminium et le point de mise à la terre, facilitant

ainsi la décharge sécurisée des charges électriques accumulées vers la terre. Cette connexion crée une zone de collection qui attire les particules chargées vers le papier d'aluminium (Figure III.5).

III.3 Appareillage et accessoires

III.3.1 L'alimentation électrique

Pour l'alimentation de l'électrode couronne du filtre, on a utilisé une source haute tension continue négative. La source est un modèle TECHNIX 0-10 kV, 0-30 mA (Figure III.6).



Figure III.6 : source d'haute tension négative.

III.3.2 Mesure du courant

Pour mesurer le courant de décharge, la zone de collection est reliée à la terre à travers un multimètre numérique modèle PHILIP M3900 (Figure III.7).



Figure III.7 : multimètre numérique.

III.3.3 Mesure de la température

La température est mesurée avec un thermomètre numérique modèle LUTRON TM-915A (Figure III.8).



Figure III.8 : un thermomètre numérique.

III.3.4 Mesure de la vitesse de vent et d'humidité

L'instrument utilisé avant les expériences pour la mesure de vitesse de vent et de l'humidité est un Hygromètre/ Anémomètre numérique modèle LUTRON AM-4205A (Figure III.9).

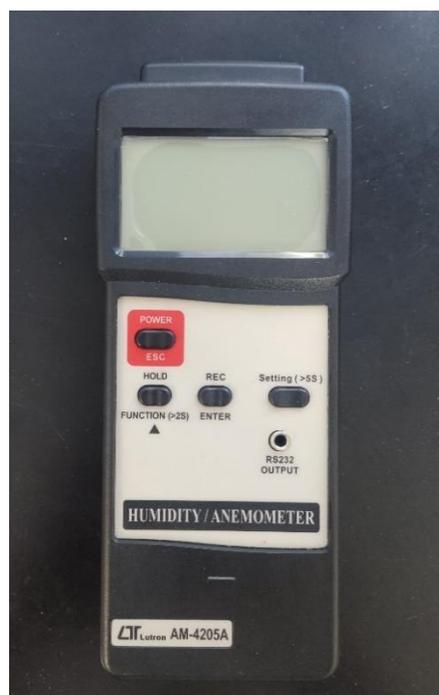


Figure III.9 : un Hygromètre/ Anémomètre numérique.

III.4 Description des expériences

Toutes les expériences ont été réalisées en laboratoire à une température de 19 degrés Celsius et une humidité de 40%.

III.4.1 Filtration de la fumée

L'expérience commence par l'emplacement la source de la fumée à l'intérieur de la boîte en plastique inferieur. La fumée dégagée doit passer par le tube en PVC constituant le filtre, ou à la fin se place la zone de décharge couronne. La fumée permet la visualisation de l'action de filtrage menée par la décharge et ainsi de juger de son efficacité (Figure III.10).



Figure III.10 :l'expérience de filtration de fumée.

Le désigne originale du filtre a été affiné en introduisant un flux d'air injecté dans la partie (boite) inferieur du filtre grâce à un trou de 35 mm de diamètre. L'objectif était d'augmenter la vitesse du flux d'air (1 m/s à la sortie du filtre) et d'évaluer son effet sur le mouvement des particules de la fumée. Cela aidera à comprendre comment le débit de particules affecte les performances du filtre.

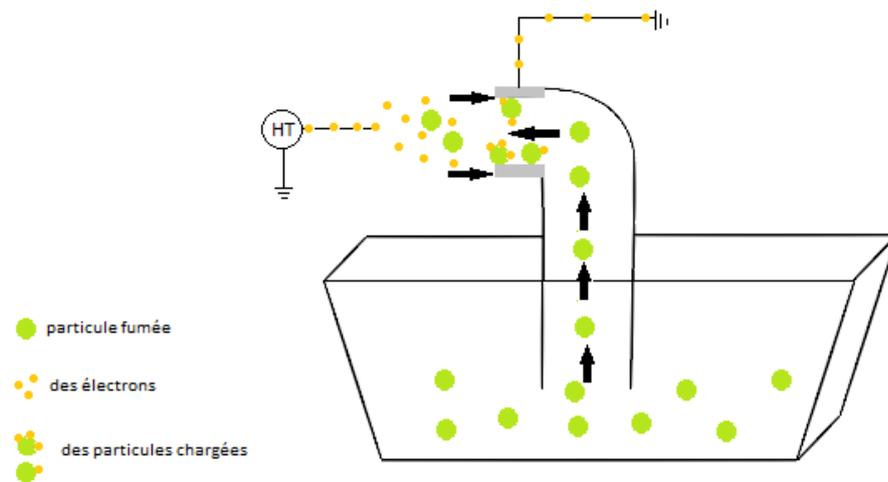


Figure III.11 : La filtration au niveau microscopique.

III.4.2 Filtration des particules solides (la farine)

En plus de la fumée, la pollution industrielle peut englober de la poussière, comme c'est le cas des cimenteries. Dans ce cas, il est question quant à l'efficacité des filtres électrostatiques pour ce genre de pollution dont les particules sont relativement grandes. Pour cela, nous avons remplacé la source de la fumée par la poudre de la farine de blé, un type de grain dont les particules sont plus grandes que celles de la fumée traditionnelle. En effet, le diamètre des particules de farine de blé varie de 100 à 200 μm et dont la masse volumique peut être d'environ 0.55 à 0.65 (g/cm^3) [52]. En raison de la taille des particules de la farine, il est nécessaire de d'utiliser le vent, créer par un sèche-cheveux, pour disperser et pousser les particules de la farine de blé à monter à travers la conduite d'air et donc de traverser le filtre.



Figure III.12 : La farine de blé.

III.4.3 Caractéristique courant - tension

La caractéristique courant-tension (I-V) de l'électrode couronne a été mesurée à travers un micro-ampèremètre relié entre l'électrode de collecte et la terre, comme montré sur la figure III.13. La caractéristique est obtenue par mesure du courant s'écoulant à la terre pour plusieurs tensions appliquées.

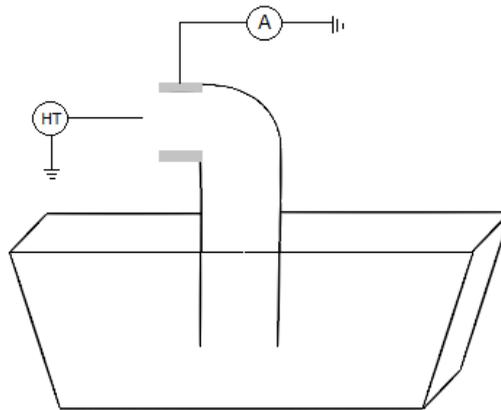


Figure III.13 : schéma de montage.

III.5. Pseudo modèle de la décharge couronne

III.5.1 Calcul du champ électrique

Le calcul du champ électrique en présence d'une charge variable dans l'espace liées à la décharge couronne peut être assez complexe. Cependant, dans ce mémoire une modélisation approchée de la décharge et des grandeurs électriques qui en sont liées est proposée. L'objectif est loin d'être l'établissement d'un modèle précis mais plutôt un ensemble d'équations permettant un calcul rapide des grandeurs électriques et leur dépendance aux différents paramètres. De plus, des logiciels de modélisation électromagnétique, tels qu'Agros2D, peuvent faciliter le calcul du champ dans certaines conditions.

Partant de la première équation de Maxwell :

$$\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{III.11})$$

Dans notre cas l'électrode est de forme presque coaxiale. Donc, en coordonnées cylindriques, et selon le rayon r :

$$\nabla E = \frac{dE}{dr} + \frac{E}{r} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{III.12})$$

En appliquant la méthode de différence finie :

$$\frac{dE}{dr} = (E_i - E_{i-1})/dr \quad (\text{III.13})$$

En solvant par rapport à E_i :

On aura :

$$E_i = \left\{ \left(\frac{\rho}{\epsilon} \right) + \frac{E_{i-1}}{dr} \right\} \frac{1}{\left\{ \frac{1}{dr} + \frac{1}{r} \right\}} \quad (\text{III.14})$$

La distribution du champ électrique varie dans ce cas suivant la valeur de la densité de charge d'espace ρ et de la distance r par rapport à l'électrode pointue. Dans le cas d'une électrode coaxiale, Janischewskyj [53] a calculé analytiquement la distribution de la densité de charge d'espace et a établi la formule suivante :

$$\rho(r) = \rho_w \frac{\sqrt{R_1^2 + R_1 R_2}}{\sqrt{r^2 + R_1 R_2}} \quad (\text{III.15})$$

Avec ρ_w la densité de charge au voisinage du fil. R_1 et R_2 respectivement le rayon de l'électrode pointue et le rayon du cylindre externe.

Les deux équations (III.14) et (III.15) ont été implémentées dans un code Python afin de visualiser la distribution de la charge d'espace et du champ électrique à travers l'électrode couronne.

III.5.2 Trajectoire des particules

Basées sur l'équation (III.14), la valeur moyenne du champ électrique est donnée par :

$$E_{moy} = \frac{E_{fil}}{R_1 + R_2} \quad (\text{III.16})$$

Cette valeur sert à simuler le cheminement des particules chargées dans le système, ce qui permet de comprendre la répartition du champ électrique et son effet sur les particules chargées. Pour cela, le logiciel Agros2D est utilisé pour visualiser la trajectoire des particules traversant la zone de décharge. Les paramètres de simulation sont donnés par le tableau III.1.

Tableau III.1 : Les données saisies dans Agros2D.

Nombre de particules	10
La distance entre les particules	0.001 (m)
La masse de chaque particule	$9 \cdot 10^{-7}$ (kg)
La charge de particule	$2 \cdot 10^{-10}$ (C)
La valeur de champ électrique	$1.49 \cdot 10^{-4}$ (V/m)

Les particules sont censées entrer dans la zone de décharge avec une certaine vitesse qu'on va appeler vitesse initiale. La vitesse initiale des particules est l'un des paramètres qui ont été changés afin de montrer son influence sur le processus de filtration.

III.6 Conclusion

Ce chapitre décrit en détail les équipements nécessaires et les installations utilisées pour mener les études.

Chapitre IV : Résultats

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons examiner et analyser les résultats obtenus à la fois des simulations et des expériences menées sur les installations expérimentales décrites dans chapitre III.

IV.2 Résultats expérimentaux :

Les résultats de filtrage des deux types de pollutions traitées par le filtre électrostatique sont présentés dans les sections suivantes.

IV.2.1 Filtration de la fumée

La fumée commence à être dévié par la décharge lorsque la tension atteint 4 kV. Cette valeur de tension, en fait, correspond au seuil d'apparition de la décharge couronne. Lorsque la tension atteint 6 kilovolts, nous remarquons que la fumée cesse complètement de sortir. Une couche jaune, constituée de particules de la fumée, se forme sur l'électrode de masse, formée du papier d'aluminium (figure IV.1).

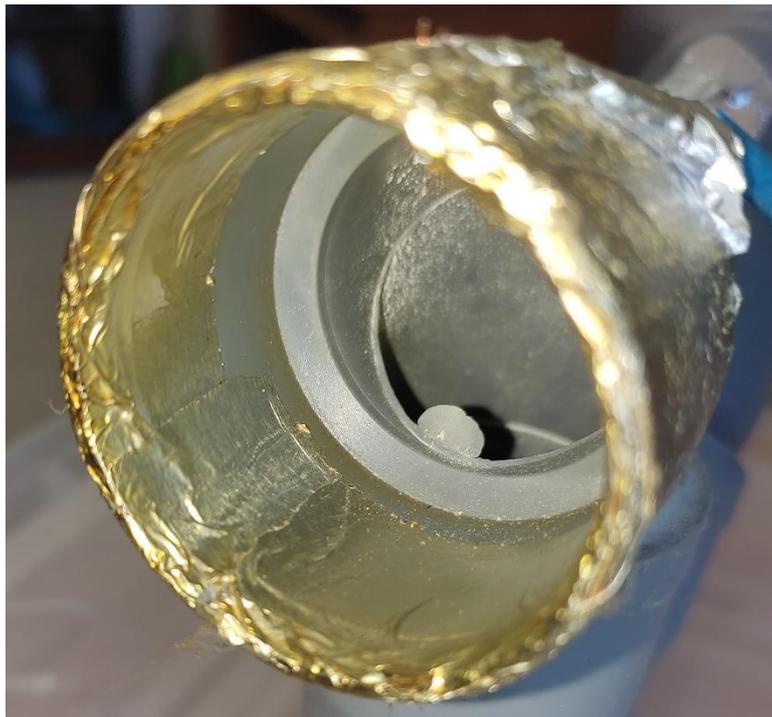


Figure IV.1 : Résultat de filtration de la fumée.

Lorsque la vitesse du flux d'air augmente, la tension nécessaire pour filtrer les particules de la fumée doit être augmentée jusqu'à 8,5 kV pour assurer l'efficacité du filtrage.

La tension (KV)	3.3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10
Courant (mA)	0.09	0.2	0.9	1.2	2.8	4.6	6.2	8.4	10.9	13.8	17	22	25.7	30	35.4

IV.2.2 Filtration des particules solides

En raison du poids relativement important des particules de la poudre de blé, il était nécessaire d'augmenter la tension jusqu'à 10 kilovolts pour assurer une filtration complète de l'air. Une couche blanche de poudre de blé se forme alors sur la surface de papier d'aluminium comme le montre la figure IV.2.

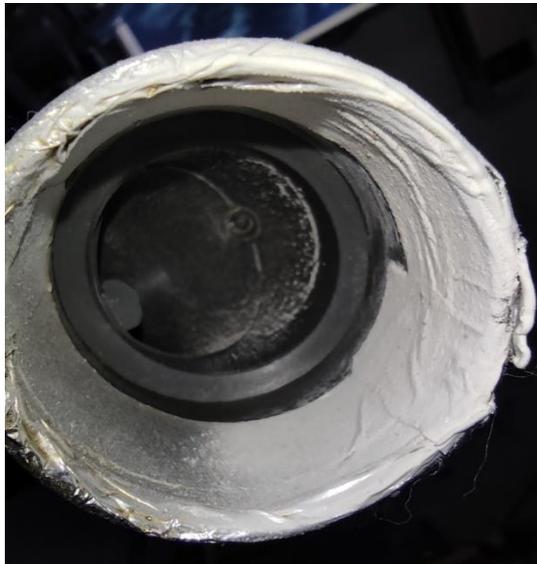


Figure IV.2 : Résultat de filtration de la farine.

IV.3 Caractéristique courant - tension

La caractéristique est mesurée pour deux distances entre la pointe et l'électrode de collecte, à savoir 0.5 cm et 1cm. La figure IV.3 montre le tracé deux de la caractéristique pour les deux distances.

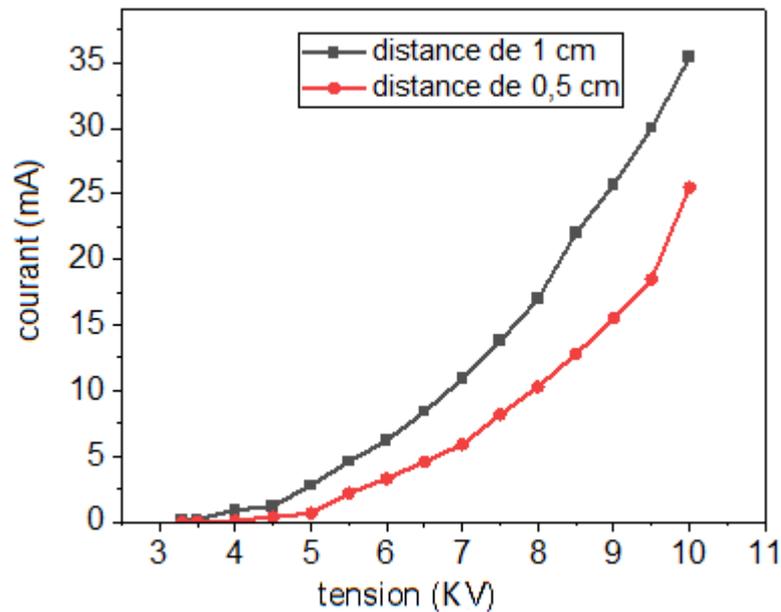


Figure IV.3 : caractéristique courant tension.

En augmentant la distance entre l'électrode et le centre de la sortie du filtre (la mise à la terre), passant de 0,5 centimètre à 1 centimètre, la valeur du courant traversant la masse augmente.

IV.4 Résultats de simulation

IV.4.1 Calcul du champ électrique et de la densité de charge d'espace

Les figures IV.4 et IV.5 montrent respectivement la répartition du champ électrique et de la densité de la charge d'espace calculée pour trois valeurs de la charge au niveau de la pointe : $3 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}^3$, $6 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}^3$, et $9 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}^3$. Il est clair que le champ électrique décroît en s'éloignant de l'électrode centrale. Cependant, loin de la pointe la valeur du champ électrique est liée à la charge d'espace.

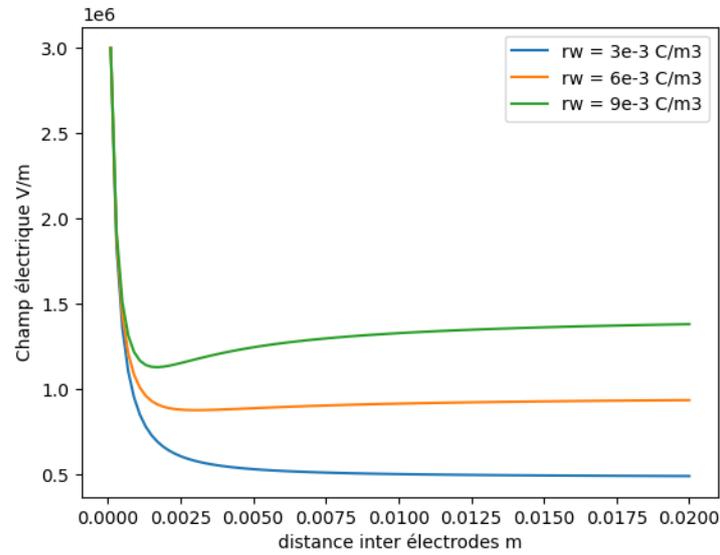


Figure IV.4 : le champ électrique par rapport la distance entre électrode.

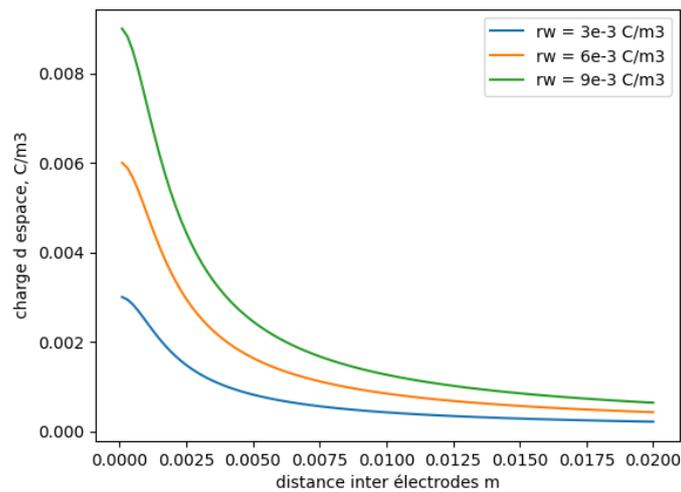


Figure IV.5 : la charge d'espace par rapport la distance entre électrode.

La figure IV.6 montre le résultat de calcul du potentiel électrique à l'intérieur du filtre obtenu par le logiciel Agros2D.

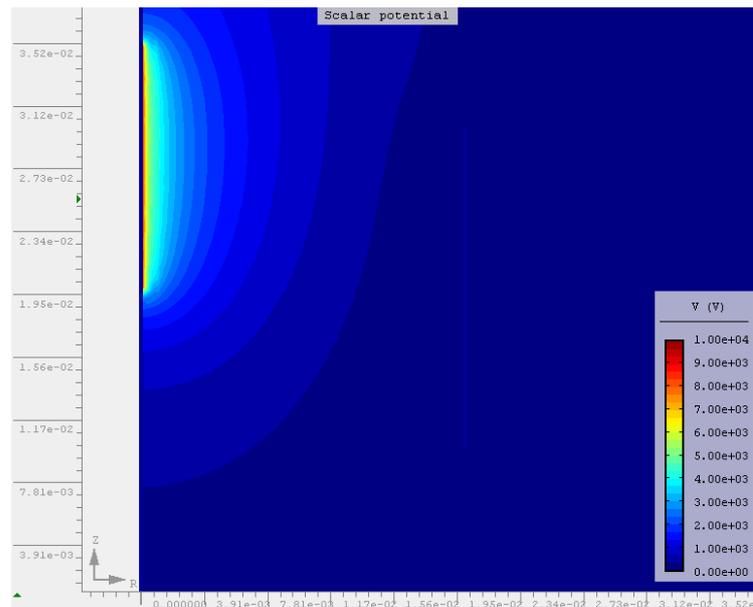


Figure IV.6 : Répartition du potentiel électrique à l'intérieur du filtre.

IV.4.2 Trajectoires des particules

Les figures suivantes sont obtenues par le programme Agros2D. Elles montrent l'effet de la vitesse des particules sur le processus des particules le processus de filtration.

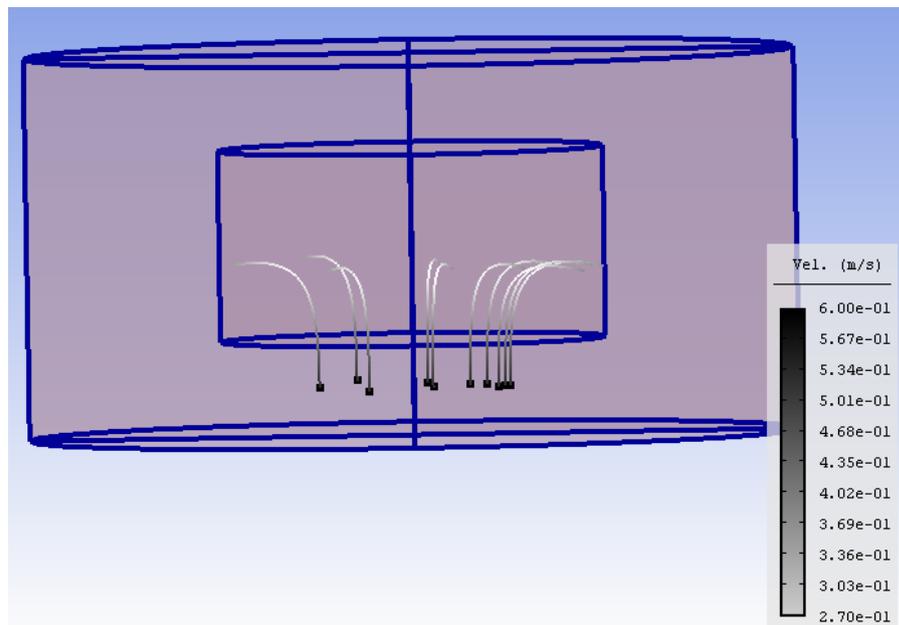


Figure IV.7 : la trajectoire pour la vitesse de 0.6 m/s.

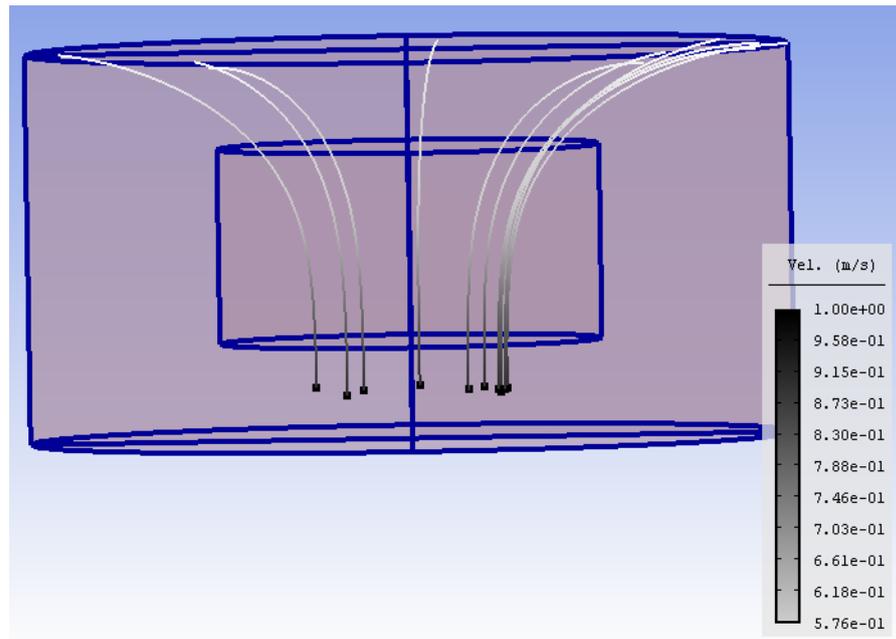


Figure IV.8 : la trajectoire pour la vitesse de 1 m/s.

À une vitesse de 0,6 mètre par seconde, toutes les particules sont attirées par la masse. Par contre, lorsque la vitesse augmente à 1 mètre par seconde, les particules auront une énergie cinétique assez importante de sorte que le champ électrique n'aura pas de force suffisante pour les dévier vers l'électrode de collecte. Ainsi, il est important de noter que la vitesse des particules affecte négativement la capacité de filtration du dispositif.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats expérimentaux et de simulation. Les résultats relatifs au filtrage de la fumée et de la poussière sont présentés. De même, le calcul de la répartition du champ et de la charge d'espace ainsi que la trajectoire des particules ont été présentés.

Conclusion générale.

Conclusion générale

Le filtre électrostatique est un dispositif de purification de l'air. Son principe de fonctionnement repose sur la charge des particules de la poussière ou de la fumée à l'aide d'une décharge corona. Lorsque les particules traversent le filtre, elles sont chargées électriquement et attirées vers des plaques collectrices opposées, où elles se déposent et y restent collées.

La relation entre la taille des particules filtrées et le filtre est directement proportionnelle à la tension appliquée et à la valeur du champ électrique. En augmentant la tension, on augmente l'efficacité de la charge des particules, ce qui permet de capturer des particules de plus en plus fines. Cependant, la vitesse de déplacement des particules dans la conduite d'air dédié à la filtration joue également un rôle important. Cette vitesse est inversement proportionnelle à la capacité de filtration. En effet, si les particules se déplacent trop rapidement, elles n'ont pas suffisamment de temps pour acquérir une charge électrique adéquate, ce qui réduit leur probabilité d'être attirées vers la zone de collecte. Les particules ont besoin de temps pour se charger correctement afin d'être efficacement filtrées et capturées par le filtre électrostatique.

Ainsi, pour maximiser l'efficacité de la filtration, il est essentiel de trouver un équilibre entre la tension appliquée (le champ électrique) et la vitesse de déplacement des particules dans la conduite d'air.

Bibliographie

- [1] Berrached Djelloul. « Contribution à l'étude des précipitateurs électrostatiques de poussière. Réalisation d'un prototype de laboratoire » Thèse Doctorat, Université DJILLALI Liabes Sidi-bel-abbes, 25/04/2017.
- [2] "filtres-électrostatiques ", <https://www.franceenvironnement.com/sous-rubrique>.
- [3] F. Menéndez, A. Gómez, F. Voces, et V. García. « Porcelain insulators in electrostatic precipitator » J. Electrostat., vol. 76, p. 188-193, août 2015.
- [4] R. Gouri. « Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré. Application aux particules submicroniques », Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [5] B. Benamar. « La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : Etude expérimentale et numérique » Thèse Doctorat, Université H. Poincaré, Nancy 1, 2008.
- [6] K. R. Parker. « Applied Electrostatic Precipitation » Dordrecht: Springer Netherlands, 1996.
- [7] Lawrence.K Wang, Norman.C Pereira, Yung-Tse Hung. « Air Pollution Control Engineering » Humana Press, New Jersey, 2008.
- [8] Shan K.Wang. « Handbook of Air Pollution Prevention and Control » McGraw-Hill, New York, 2000.
- [9] Sylvain Gaychet. « Modélisation des décharges couronnes négatives application à la précipitation électrostatique » Thèse Doctorat, Université de PAU et des PAYS de l'ADOUR, 14 décembre 2010.
- [10] H. J. WHITE. « Industrial electrostatic precipitation » Addison Wesley Publishing Company, New York, 1963.
- [11] Idouchi Oualid, Ameer Azedine. « Étude de l'effet couronne dans les précipitateurs électrostatiques d'aérosol » Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2017.
- [12] "Précipitateur électrostatique", « <http://energyeducation.ca/fr> ».

- [13] "Optimisation de l'efficacité de filtration d'un précipitateur électrostatique fil-cylindre", [«www.semanticscholar.org»](http://www.semanticscholar.org).
- [14] Ouari Abbes. « Etude et réalisation d'un système hybride pour la dépollution des effluents gazeux » Thèse Doctorat, Université DJILLALI Liabes de Sidi-bel-abbes, 2022.
- [15] R. Farhi, C. Morel, G. Cheron. «Matières plastique et adjuvant hygiène et sécurité » INRS, ED, Février 2008.
- [16] M. Handala, Mohand Amokrane. «Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50Hz : une interface isolante air/solide » Thèse de Doctorat, UMMT.O, décembre 2007.
- [17] Julien Jarrige, «Etudes expérimentale des décharge électriques impulsionnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface » Thèse Doctorat, Université de Rouen, Février 2008.
- [18] B.Gueller, A.Veverka. «Les processus impulsionnels dans les machines éclectiques » Energiya, Moscou, 1976.
- [19] MEGHAR Abdelghani, OUNNOUGHI Tacfarinas. « Etude de la distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative » Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, juin 2014.
- [20] Mohamed Sofiane Bendilmi «Étude expérimentale de la décharge couronne multipointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique » Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 23/06/2022.
- [21] Ahmerlaine Selma, Bendjakhnoune Hassina. «Etude de la décharge couronne en configurations multipointes-plan et Fil-Cylindre » Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 14/07/2021.
- [22] Décharge couronne, [«https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet-coronna»](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet-coronna).
- [23] A. Labergue. «Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas - Application au contrôle de décollements d'écoulements » Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.
- [24] J.M.Plewa. «Simulation 3D d'une décharge couronne pointe-plan, dans l'air : calcul haute performance, algorithmes de résolution de l'équation de Poisson et analyses physiques » Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017.

- [25] J.C. Matéo-Vélez. «Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharges couronnes et de son interaction avec l'aérodynamique » Thèse de Doctorat, ONERA - Centre de Toulouse, 2006.
- [26] A. Nadjem. « Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques » Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.
- [27] A. hamidi. « Développement d'un chargeur à décharge couronne pour la mesure à 10 Hz de la concentration d'aérosol atmosphérique » Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2014.
- [28] M. Rezzouga, A.Tilmatine, R.Gouri, k.Medles, L.Dascalescu. « Experimental modiling of high-voltage corona discharge using design of experiments » front, electr, electron, eng, 2, pp, 139-143, 2007.
- [29] M.P. Panaget. « Etude en laboratoire des effets physico-chimiques induits par les pertes de transport à haute tension » Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 1997.
- [30] Mihoubi Soumia, Kerdoussi Hakima. « Décharge couronne en configuration coaxiale : Application à la neutralisation des charge » Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945, Guelma, 3/10/2020.
- [31] Meghar Abdelghani, Ounnoughi Tacfarinas. « Etude de la distribution du potentiel de surface de films en PVC chargés par décharge couronne négative » Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira Bejaia, juin 2014.
- [32] Tifaoui Djilali, Ladjel Amine. « Etude de la décharge couronne en géométrie pointe plan sous tension continu » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tiziouzu, 28/6/2016.
- [33] Acte de la 2ème conference nationale sur la Haute Tension de Tizi-Ouzou, 1997.
- [34] X. Wang, C. You: « Effect of Humidity on Negative Corona Discharge of Electrostatic Precipitators » IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, PP, 1720-1725, 2013.
- [35] J.-P. BORRA. «Etude des problèmes liés aux précipitateurs électrostatiques pour le traitement des cendres volantes» Rapport final, 51 p, n°97-0115/1A. Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), 1999.
- [36] H. Nouri. «Influence des paramètres physiques de l'air sur le précipitateur électrostatique d'aérosols» Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2010.

- [37] H. Nouri, M. Aissou, Y. Zebboudj. «Modeling and simulation of the effect of pressure on the corona discharge for wire–plane Configuration» IEEE TDEI, 20, pp, 1547-1553, 2013.
- [38] J.S, Townsend. « Electricity in gases » Oxford University Press, 1914.
- [39] A. Goldman, R. Haug, R. V. Latham. « Electrical Breakdown and Gas Discharge part B» Journal of Applied Physics, 47:2418, USA, pp.56, 1981.
- [40] R.Fournier. « Les isolants en électrotechnique concepts et théories » Edition Eyrolles, Paris, 1986.
- [41] E.Badaru, J.Popescu. « Gaz ionisée –décharges électriques dans les gaz » Edition Dunod, Paris, 1965
- [42]KETIR Amar, MAY Bouzid. « Paramètres influent sur le dépôt de charge électrique par effet couronne sur une surface d’un diélectrique » Mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2015.
- [43] Mouhoub Sara. « Mesure de la charge dans les canalisations de transport des matériaux pulvérulents » Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945, Guelma, 02/07/2019.
- [44] Sadoud Hamou. « Dépôt de charges électriques sur la surface d’un diélectrique fibreux » Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2015.
- [45] “Triboélectricité”, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tribo%C3%A9lectricit%C3%A9> .
- [46] Hammi Tarik, « Etude de méthodes de mesures et réalisation d’un banc de test pour l’évaluation des propriétés électrostatiques des textiles » Thèse de Doctorat, Université de Lille, Avril 2005.
- [47] BROCK J.R., «Non continuum unipolar charging of aerosol: the role of external electric field. » Journal applied Physics, Vol. 41, 5, pp. 1940-1944, 1970.
- [48] CHAN-YEUNG. M, MALO, J.-L. « Tables of major inducers of occupational asthma. ». Bernstein, D. et al., Asthma in the workplace 2nd ed Chap. 35 pp 683-720, New York, 1999.
- [49] PAUTHENIER M.M, MOREAU M, HANOT « La charge des particules sphériques dans un champ ionisé » Journal de physique et radium, 3, pp. 590-613, 1932.
- [50] SMITH W.B, MCDONALD J.R. « Development of theory for the charging of particle by unipolar ions » Journal of aerosol science 7, pp. 473-477, 1976.

[51] Emmanuel Hadjiandreou. «Farine et fabrication du pain » Ryland peters and small, 2011.

[52] Mouhoubi Samia. « Etude de l'influence d'une barrière dans un intervalle pointe – plan, par la mesure de la tension disruptive, du champ électrique et des décharges partielles» Thèse de Doctorat école nationale polytechnique, 16 Novembre 2008.

[53] W.Janischewskyj, G.Gela. «Finite element solution for electric fields of coronating DC transmission lines » Université Toronto Canada,1979.