

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب

Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الإلكترونيات

Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Science et de La
Technologique

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande Électrique

Thème

Réalisation et optimisation d'un précipitateur électrostatique à deux étages basé sur l'impact de l'ionisation corona

Présenté par :

1) Mr. BOUCHEKIF Yassine

2) Mr. BENICHOU Youcef

Devant le jury :

Pr ZELMAT Samir

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Président

Dr AOUMER Djilali

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Examineur

Pr AISSOU Massinissa

UAT.B.B (Ain Temouchent)

Encadrant

Année Universitaire 2025/2026



Remerciements

Nous offrons premièrement des incères et chaleureux remerciements « ALLAH » Le Tout - puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience durant toutes ces années d'études

Tout d'abord, nous adressons nos sincères remerciements à nos Superviseur «Professeur **Aissou Massinissa** »pour ses conseils et son encadrement.

Nous tenons à remercier, Dr "**AOUIMER Djilali**" pour la qualité des renseignements qu'il nous a fournis.

Nous voulons aussi remercier tous les étudiants pour notre promotion et Nous souhaitons bonne chance à tous les étudiants pour terminer leurs études.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui participent à la réalisation de ce mémoire ça commence avec nos parents.

Enfin, nous avons le grand honneur de dédier ce modeste travail à : Nos chers parents Toute la famille **BOUCHEKIF** et **BENICHO**

À tous nos amis

À tous nos Camara des du groupe de génie électrique

À tous les enseignants qui ont contribué

À notre formation tout au long de nos vies d'étude

Résume :

Ce travail porte sur l'étude des performances d'un précipitateur électrostatique à deux étages en tant que solution efficace pour réduire la pollution atmosphérique générée par les activités industrielles et humaines. Il se concentre sur la compréhension du mécanisme de la décharge couronne et de son rôle dans la charge et la collecte des particules, tout en analysant l'influence des paramètres géométriques des électrodes, de la polarité électrique et des caractéristiques de l'écoulement de l'air sur l'efficacité de séparation. L'objectif est également de déterminer la configuration de fonctionnement optimale permettant d'améliorer la collecte des particules fines, les plus dangereuses pour la santé humaine, afin d'accroître l'efficacité de l'épuration des gaz industriels et de contribuer à la protection de l'environnement et de la santé publique.

Abstract :

This work focuses on the study of the performance of a two-stage electrostatic precipitator as an effective solution for reducing air pollution generated by industrial and human activities. It emphasizes understanding the corona discharge mechanism and its role in particle charging and collection, while analyzing the influence of electrode geometry, electrical polarity, and airflow characteristics on separation efficiency. The study also aims to determine the optimal operating configuration for improving the collection of fine particles, which are the most harmful to human health, thereby enhancing the purification of industrial gases and contributing to the protection of the environment and public health.

ملخص :

تناول هذا العمل دراسة أداء مرسب كهروستاتيكي ثنائي المرحلة كوسيلة فعالة للحد من التلوث الهوائي الناتج عن الأنشطة الصناعية والبشرية. ويركز على فهم آلية التفريغ الإكليلي ودورها في شحن الجسيمات والتقاطها، مع تحليل تأثير العوامل الهندسية للأقطاب الكهربائية، والقطبية، وخصائص تدفق الهواء على كفاءة الفصل. كما يهدف إلى تحديد التكوين التشغيلي الأمثل لتحسين جمع الجسيمات الدقيقة، الأكثر خطورة على صحة الإنسان، بما يساهم في رفع كفاءة تنقية الغازات الصناعية وحماية البيئة والصحة العامة.

Sommaire

Remerciements	I
Résume :	II
List de figures et List de tableaux	IV
Liste abréviation	VII
Introduction générale.....	2
Chapitre I : Généralités sur la Précipitation électrostatique	
I.1 Introduction	4
I.2 Définition	Erreur ! Signet non défini.
I.3 Principe de fonctionnement d'un précipitateur électrostatique (PES)	5
I.4 Différents types d'électro filtres.....	6
I.4.1. Filtres électrostatiques à un seul étage	6
I.4.2. Filtres électrostatiques à deux étages	7
I.4.3. Filtres électrostatiques humides	8
I.4.4 Filtres électrostatiques secs	9
I.5 Avantages des précipitateurs électrostatiques	9
I.6 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques	10
I.7 Applications des précipitateurs industriels.....	10
I.8 La décharge couronne	11
I.8.1 Les différents types de décharges couronne.....	12
I.8.2. Les paramètres influençant la décharge couronne	13
I.8.3. Facteurs électriques.....	16
I.9 La décharge électrique	16
I.9.1. La charge des particules	16
I.10 Vitesse de migration des particules chargée	20
I.11 Conclusion	23
Chapitre II : Matériels ET Méthodes	
II.1Introduction.....	24
II.2 Matériel utilisé	25
II.3 Les particules utilisées	30
II.4 Dispositif expérimental de précipitateur électrostatique.....	33
II.5 Dispositif de filtration.....	34
II.6 Protocole expérimentale :	35

II.7 Conclusion	36
Chapitre III : Résultats ET Discussions	
III.1 Introduction	38
III.2 Caractéristique Courant – Tension :	39
III.3 Décharge couronne en absence de particule :	39
III.3.1 L’effet de polarité	40
III.3.2. L’effet de la géométrie et de la configuration de l’électrode.....	41
III.3.3 La comparaison entre le premier et le deuxième étage.....	42
III.4 Caractéristique courant-tension à différentes vitesses avec aspiration :	43
III.4.1 Comparaison de l'effet de la vitesse d'écoulement selon le type d'électrode :	44
III.4.2. Comparaison de l'effet de la vitesse d'écoulement sur les deux étages :	45
III.5 L’efficacité de collecte	45
III.5.1. Efficacité globale de la collecte.....	45
III.5.2. Influence de l’air sur le mécanisme de collecte des poussières dans le première et deuxième étage :	46
III.5.3. Influence de la géométrie des électrodes et de la polarité de la haute tension sur l'efficacité de collecte d'un ESP bi-étage :	47
III.6 L’effet du diamètre de l’électrode du deuxième étage	53
III.7 Conclusion :	54
Conclusion générale Erreur ! Signet non défini.	
Bibliographie	59

List de figures et List de tableaux

Figure. I.1 : Photographie d'un précipitateur électrostatique

Figure. I.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique

Figure. I.3 : Schéma simplifié d'un électro filtre à un seul étage

Figure. I.4 : Electro filtres classiques à un étage : (a) fil / plan et (b) fil / cylindre

Figure. I.5 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique à deux étages

Figure. I.6 : Électro filtre de type plan / plan : à deux étages

Figure. I.7 : Electro filtres : (a) sec et (b) humide

Figure. I.8 : Configurations d'électrodes pour la génération de décharges couronnes

Figure. I.9 : Représentation schématique de la décharge couronne (géométrie fil / cylindre) [20].

Figure. I.10 : Descriptif de la décharge couronne positive

Figure. I.11 : Descriptif de la décharge couronne négative

Figure. I.12 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne

Figure. I.13 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes ($d = 0.5\text{cm}$, $=125\mu\text{m}$, et $= 5\%$)

Figure. I.14 : Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression

Figure. I.15 : mécanisme de charge de particules.

Figure. I.16 : Schéma explicatif du mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles

Figure. I.17 : Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules ($T=150^\circ\text{C}$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$)

Figure. I.18 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules ($T = 150^\circ\text{C}$, $\lambda_g = 0.101 \mu\text{m}$ et $\varepsilon_r \rightarrow \infty$, cas des particules conductrices)

Figure. I.19 : Variations de la vitesse de migration théorique w_{th} en fonction de la taille des particules ($T = 150^\circ\text{C}$, $\lambda_g = 0.101 \mu\text{m}$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$)

Figure. II.1 : photographie de sources de haute tension

Figure. II.2 : photographie de microampèremètre

Figure. II.3 : photographie de Thermo-hygromètre numérique

Figure. II.4 : photographie d'Anémomètre à hélice

Figure. II.5 : Balance de laboratoire électronique

Figure. II.6 : Aspirateur et Souffleur électrique 600W

Figure. II.7 : Autotransformateur

Figure. II.8 : filler de calcaire.

Figure. II.9 : Meta kaolin.

Figure. II.10 : fumé de silice.

Figure. II.11 : Photo de principe du dispositif expérimental en 3D.

Figure. II.12 : Photo de principe du dispositif expérimental.

Figure. II.13 : Évolution de la géométrie du premier étage d'ionisation : (a) un seul fil central ; (b) quatre lames de scie en croix.

Figure. II.14 : Deuxième étage : système coaxial tubulaire pour la collecte des particules.

Figure. III.1 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la polarité de la tension appliquée au niveau première étage.

Figure. III.2 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la polarité de la tension appliquée au niveau deuxième étage

Figure. III.3 : Caractéristiques courant – tension en fonction de variation de vitesse au niveau première étage.

Figure. III.4 : Caractéristiques courant – tension en fonction de variation de vitesse au niveau deuxième étage.

Figure. III.5 : l'évolution du rendement de collecte en fonction de la tension négative appliquée avec variation de vitesse.

Figure. III.6 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.7 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.8 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.9 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.10 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.11 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.12 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.13 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Figure. III.14 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Tableau I.1 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative (kH=5%, fil 125 μ m).

Tableau. II.1 : composition du filler de calcaire.

Tableau. II.2 : composition du méta-kaolin.

Tableau. II.3 : composition de la fumée de silice

Liste abréviation

Lettres latines

ESP / PES : Précipitateur Électrostatique / Précipitateur Électrostatique (Filtreélectrostatique).

DC : Courant continu (Direct Current).

HT+ : Haute tension de polarité positive.

HT- : Haute tension de polarité négative

I : Courant de décharge électrique.

V : Tension appliquée.

Vs : Tension de seuil de l'effet couronne.

Vc : Tension de claquage électrique.

RH : Humidité relative.

T : Température.

dp : Diamètre de la particule.

k : Constante de Boltzmann.

e : Charge élémentaire de l'électron.

vi : Vitesse thermique des ions.

t : Temps.

q* : Constante de charge par diffusion.

Udn: Tension de claquage dans les conditions normales.

r : rayon de courbure de la pointe.

E : champ électrique.

qp : Charge de la particule

T : température.

d : distance inter électrodes (mm).

Rc : rayon de cylindre

Rf : rayon de fil

Ra : rayon de la zone active

Lettre des unités

V : Volt.

kV : Kilovolt.

A : Ampère.

mA : Milliampère.

μ A : Microampère.

g : Gramme.

W : Watt.

Hz : Hertz.

m : Mètre.

cm : Centimètre.

mm : Millimètre.

μ m : Micromètre.

s : Seconde.

m/s : Mètre par seconde.

m³/min : Mètre cube par minute.

°C : Degré Celsius.

% : Pourcentage.

INTRODUCTION GENERALE

Le monde moderne fait face à de graves crises environnementales, principalement le changement climatique et la pollution de l'air, causés par les déchets et les émissions industrielles. Les particules en suspension menacent directement la santé humaine et l'équilibre écologique. Pour respecter les réglementations étatiques strictes, il est désormais indispensable de développer des technologies de filtration hautement efficaces et éco énergétiques. [1-2]

La précipitation électrostatique est une technologie très efficace pour éliminer les particules polluantes solides et liquides présentes dans les gaz industriels. Grâce à son rendement élevé et à sa faible consommation d'énergie, elle est largement utilisée dans les installations industrielles ainsi que dans les espaces clos pour améliorer la qualité de l'air. [3]

Le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques (PES) repose sur un phénomène appelé «décharge couronne (ou décharge de corona). Ce phénomène se produit lorsqu'une haute tension continue est appliquée dans un champ électrique non uniforme autour d'électrodes à faible rayon de courbure. Ce champ intense entraîne l'ionisation des molécules de gaz et la génération d'ions libres. Lorsque les gaz pollués traversent cette zone, les ions entrent en collision avec les particules en suspension et leur confèrent une charge électrique. Sous l'effet de la force de Coulomb, ces particules chargées se déplacent pour finalement se déposer sur les électrodes de collecte reliées à la terre. [2]

L'efficacité de ce processus de séparation est étroitement liée à de nombreux facteurs interdépendants, tels que la géométrie et le diamètre des électrodes, la polarité de la tension appliquée (positive ou négative), les propriétés physiques et chimiques du gaz et des particules (comme la température et l'humidité), en plus de la vitesse hydrodynamique de l'écoulement de l'air. [25]

C'est dans cette optique que s'est cristallisée la problématique principale de ce travail de recherche, réalisé au sein du Laboratoire de Génie Électrique de l'Université « Belhadj Bouchaïb » d'Aïn Témouchent. Cette recherche vise à étudier et à évaluer les performances d'un système de précipitateur électrostatique à travers une étude comparative et détaillée de plusieurs configurations géométriques d'électrodes émissives (fils fins de différents diamètres, lames de scie, tiges filetées). Elle analyse également l'impact de la vitesse et de la polarité sur les caractéristiques courant-tension (I-V), ainsi que sur l'efficacité globale de captage de différents types de particules (poudre de calcaire, méta-kaolin et fumée de silice).

Afin de traiter ce sujet de manière scientifique et méthodique, ce mémoire a été structuré en chapitres fondamentaux selon l'organisation suivante :

Chapitre I : Généralités sur la Précipitation Électrostatique

Ce chapitre constitue une étude bibliographique approfondie portant sur les caractéristiques des particules en suspension, leurs impacts environnementaux, le principe de fonctionnement des précipitateurs électrostatiques, ainsi que les mécanismes de charge des particules (par champ ou par diffusion). Il aborde également l'étude du phénomène de décharge couronne et les facteurs qui l'influencent.

Chapitre II : Dispositif Expérimental et Méthodologie

Ce chapitre présente en détail les appareils et équipements utilisés lors des essais en laboratoire (tels que les générateurs haute tension, le micro-ampèremètre, et les instruments de mesure du débit et de l'humidité). De plus, il expose les caractéristiques et la composition des particules solides étudiées, ainsi que le protocole de mesure adopté pour le précipitateur bi-étage.

Chapitre III : Résultats et Interprétations

Dédié à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus, ce chapitre traite des caractéristiques électriques courant-tension (I-V) en l'absence et en présence de particules. Il examine également l'efficacité de captage de ces particules afin de déterminer la configuration géométrique et électrique optimale, garantissant la plus haute efficacité de filtration avec la plus faible consommation d'énergie.

Le travail se clôture par une Conclusion Générale qui résume les principales conclusions tirées de cette étude, tout en ouvrant des perspectives et des recommandations pour le développement futur des performances de ces systèmes.

Chapitre I: Généralités sur la précipitation électrostatique

I.1 Introduction

Le changement climatique est l'un des grands défis du monde moderne et est principalement lié aux pollutions issues des déchets industriels et ménagers. [1]

La précipitation électrostatique est une technique efficace permettant d'éliminer les particules polluantes solides et liquides présentes dans les gaz. Grâce à sa faible consommation d'énergie et à son efficacité élevée, elle est utilisée aussi bien dans les installations industrielles que dans les espaces fermés comme les bureaux, les ateliers et les hôpitaux.

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique est présentée sur les caractéristiques des particules en suspension dans l'air, leurs impacts sur la santé et l'environnement, ainsi que sur les principes de fonctionnement et les différents types de précipitateurs électrostatiques.[4]

I.2 Définition

Un précipitateur électrostatique (PES) est un dispositif industriel conçu pour capturer les particules de poussière générées ou émises par divers processus industriels, afin d'éviter leur dispersion dans l'atmosphère et la pollution qui en résulte. L'appareil est constitué de plusieurs canaux de passage de l'air, à l'intérieur desquels sont disposées des électrodes ou des plaques électriquement chargées. Lorsque l'air chargé de particules traverse ces zones, les particules sont ionisées et acquièrent généralement une charge négative, ce qui les attire vers les plaques collectrices chargées positivement sous l'effet du champ électrique. Les molécules d'air, beaucoup plus légères, poursuivent leur passage à travers le dispositif, tandis que les particules solides restent piégées sur les plaques. Ce mécanisme permet ainsi de filtrer et de purifier efficacement le flux d'air dans de nombreuses installations industrielles[5].



Figure. I.1 : Photographie d'un précipitateur électrostatique [5].

I.3 Principe de fonctionnement d'un précipitateur électrostatique (PES)

Le filtre électrostatique est un dispositif destiné à capturer les particules présentes dans un gaz en utilisant les forces électrostatiques. Il se compose d'électrodes actives et d'électrodes de collecte, pouvant présenter une géométrie plane ou cylindrique. La décharge électrique générée à l'intérieur du dispositif, souvent maintenue à un fort potentiel négatif, produit des ions en attachant des électrons libres aux molécules du gaz. Ces ions chargent les particules lors de leurs collisions, qui sont ensuite attirées vers les électrodes de collecte sous l'effet du champ électrique, processus connu sous le nom de précipitation électrostatique[6-7].

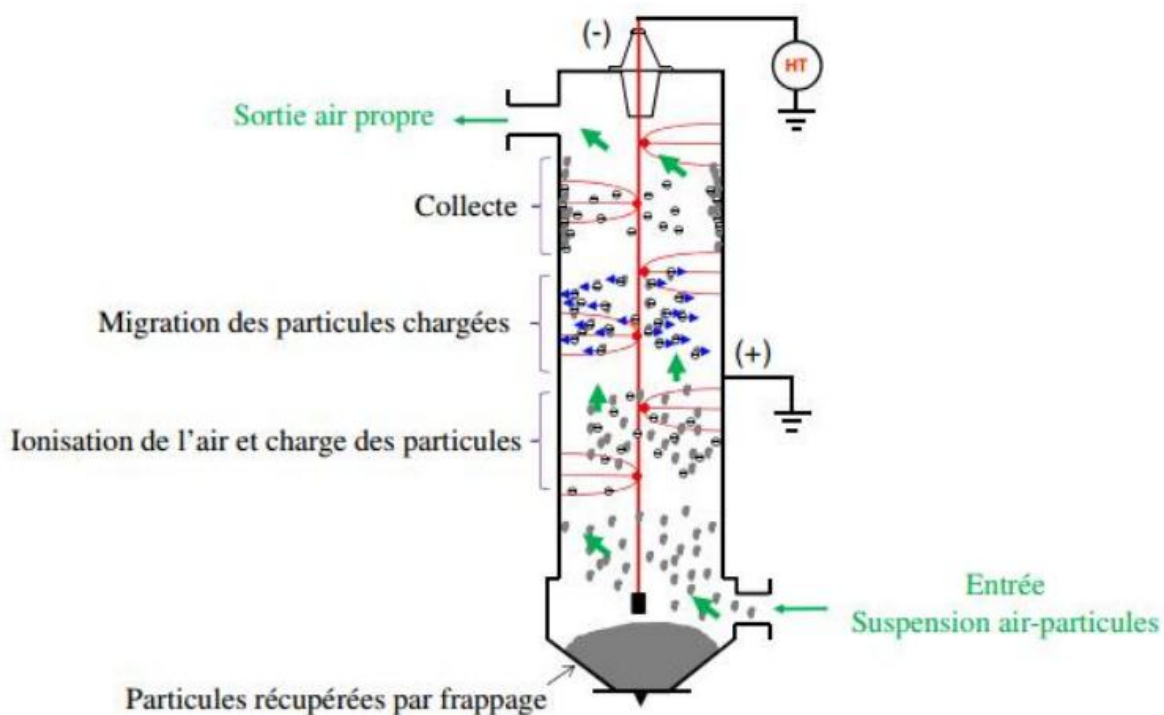


Figure. I.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique [8].

Pour illustrer le fonctionnement d'un électrofiltre industriel de géométrie cylindrique, celui-ci est constitué d'un cylindre métallique vertical servant d'électrode de collecte et d'un fil suspendu le long de l'axe central, représentant l'électrode active. L'électrode active est alimentée en haute tension continue, tandis que l'électrode de collecte est reliée à la masse. Lorsque la tension appliquée dépasse le seuil d'allumage, une décharge couronne se forme autour du fil, visible sous forme de points lumineux appelés « Tufts » (tension DC négative) ou sous la forme d'une « gaine lumineuse » (tension DC positive). Ces phénomènes lumineux signalent les régions ionisées du gaz à partir desquelles des ions de même polarité que l'électrode active sont émis vers l'électrode de collecte. Les ions traversent l'espace inter-

électrodes sous l'action du champ électrique. Les gaz pollués, introduits par la partie inférieure de l'électrofiltre, montent à travers cet espace ; les particules qu'ils contiennent captent les ions et se chargent électriquement. Soumises à la force de Coulomb, elles se dirigent vers la surface interne de l'électrofiltre où elles se déposent, formant progressivement une couche de poussière. L'air purifié s'évacue par la partie supérieure, tandis que les particules accumulées sont périodiquement éliminées par un procédé mécanique consistant à frapper les parois, faisant tomber la poussière au fond, où un dispositif spécifique permet leur évacuation [6-7].

I.4 Différents types d'électrofiltres

Outre la forme géométrique des électrodes collectrices, qui peut être cylindrique ou plane, il existe plusieurs types de précipitateurs électrostatiques :

- ❖ Filtres électrostatiques à un seul étage
- ❖ Filtres électrostatiques à deux étages
- ❖ Filtres électrostatiques humides
- ❖ Filtres électrostatiques secs

I.4.1. Filtres électrostatiques à un seul étage

La majorité des précipitateurs électrostatiques (ESP) utilisés pour réduire les émissions de particules des chaudières et autres procédés industriels sont des ESP à un seul étage. Dans ce type d'ESP, les phases de chargement et de collecte se déroulent dans la même zone, sous l'action d'un même champ électrique. Les ESP à un étage appliquent une très haute tension (entre 50 et 70 kV) pour charger les particules, qui sont ensuite déposées sur des surfaces de collecte portant une charge opposée, situées dans la même chambre.

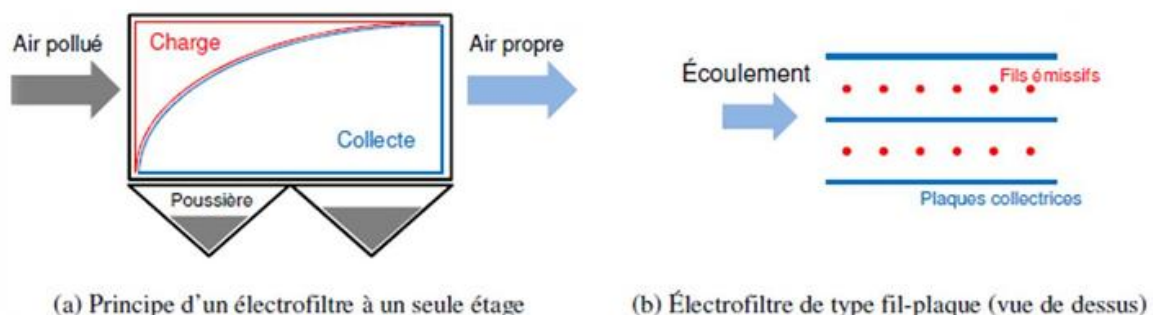


Figure. I.3 : Schéma simplifié d'un électro filtre à un seul étage [9].

Parmi les précipitateurs électrostatiques à un seul étage, les modèles de type plaque–plaque sont les plus répandus. Dans ces systèmes, les électrodes de collecte sont constituées de

plaques parallèles et équidistantes, tandis que le gaz est ionisé par des électrodes situées à mi-distance entre les plaques. Les particules collectées sont ensuite détachées soit par vibration ou choc dans le cas des précipitateurs secs, soit par un film liquide pour les précipitateurs humides. Elles tombent alors par gravité dans une trémie, où elles sont stockées avant d'être retirées et éliminées définitivement.

Les précipitateurs industriels, dont la longueur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, sont généralement divisés en plusieurs segments appelés champs. Chaque champ possède sa propre alimentation électrique, indépendante des autres parties de l'électrofiltre. Cette configuration permet d'ajuster les conditions électriques en fonction de la taille et de la concentration des particules dans chaque segment.

Les précipitateurs électrostatiques tubulaires sont constitués d'électrodes de collecte cylindriques, avec des électrodes de décharge placées en leur centre. Le gaz chargé de particules circule à l'intérieur du cylindre, où s'effectue la précipitation. La poussière collectée est ensuite éliminée en lavant les tubes à l'aide de pulvérisateurs d'eau situés au-dessus, ce qui détache les agglomérats. Sous l'effet de la gravité, ces particules tombent dans des trémies situées en bas du filtre. Ce type d'électrofiltre est donc particulièrement utilisé pour retirer des particules liquides (divers acides, huiles), du goudron, et d'autres substances similaires. [10]

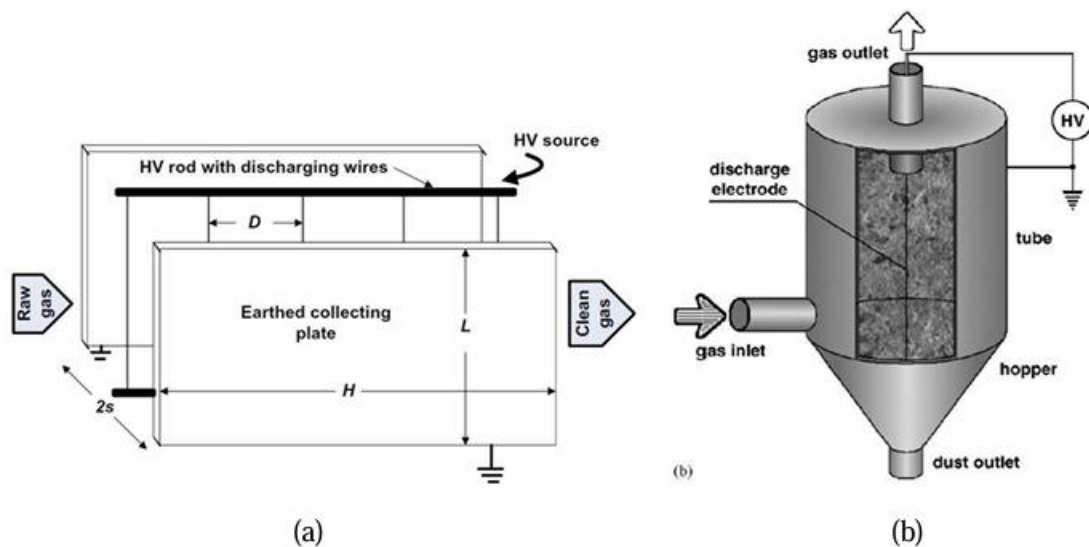


Figure. I.4 : Electrofiltres classiques à un étage : (a) fil / plan [11] et (b) fil / cylindre [9].

I.4.2. Filtres électrostatiques à deux étages

Les filtres électrostatiques à double étage possèdent une conception plus complexe, ce qui entraîne des coûts de fabrication plus élevés. C'est pourquoi ces appareils sont généralement de dimensions réduites et sont principalement utilisés pour la filtration de l'air ambiant dans

certaines bâtiments et halls de production. Les deux sections de l'électrofiltre sont alimentées séparément en tension, nécessitant souvent une double source d'alimentation et des câblages distincts.

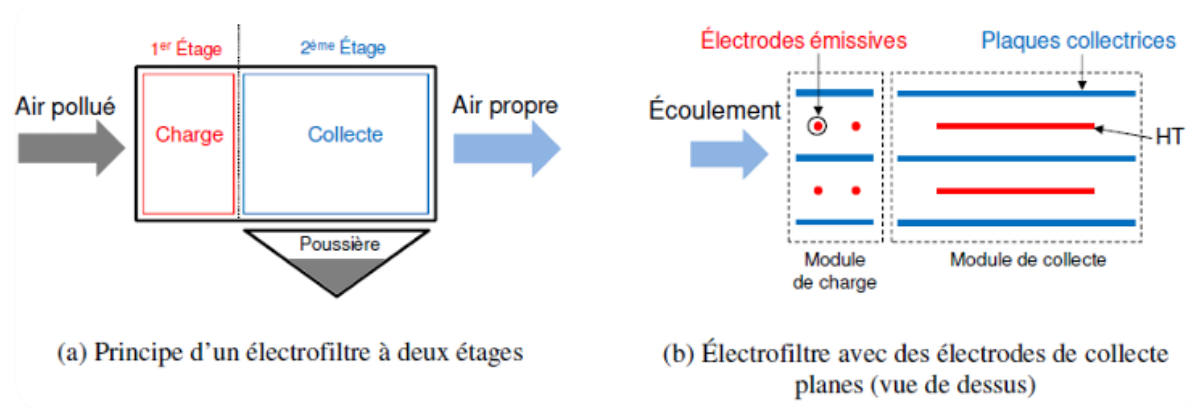


Figure. I.5 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique à deux étages [9].

Le premier étage, appelé ioniseur, est équipé d'électrodes de décharge en fil ou en tube, tandis que les électrodes de collecte peuvent être des plaques parallèles et équidistantes ou des cylindres coaxiaux. Dans ce type de précipitateur, l'utilisation du système de frappement est limitée, car il risque de renvoyer les particules non chargées. Le lavage des électrodes est donc privilégié pour leur nettoyage. Pour minimiser la production d'ozone, les électrodes de couronne sont généralement portées à un potentiel électrique de polarité positive.

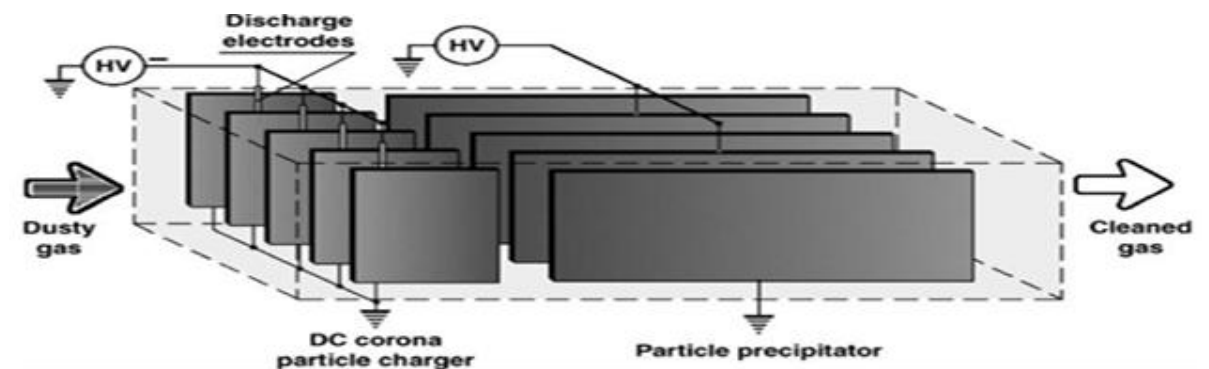


Figure. I.6 : Électro filtre de type plan / plan : à deux étages [12].

I.4.3. Filtres électrostatiques humides

Les filtres électrostatiques humides fonctionnent avec des courants d'air saturés, présentant une humidité relative de 100 %. Ils sont couramment utilisés pour éliminer des gouttelettes liquides telles que l'huile, la résine, le goudron ou le brouillard d'acide sulfurique dans les flux de gaz industriels. Ces précipitateurs sont particulièrement adaptés aux gaz chargés d'humidité, contenant des particules combustibles ou des particules collantes. L'un des

principaux avantages des ESP humides est qu'ils ne présentent pas de problèmes de réentraînement des particules ni de retour de décharge corona. [10]

I.4.4 Filtres électrostatiques secs

Les précipitateurs électrostatiques secs fonctionnent au-dessus du point de rosée du flux gazeux afin d'éliminer les impuretés de fumée et de poussière. Le terme « sec » fait référence au fait que les particules sont chargées et collectées à l'état sec, puis éliminées par des systèmes de frappe (rappeurs). La majorité des précipitateurs électrostatiques opèrent ainsi à sec, contrairement aux ESP humides qui utilisent un lavage à l'eau. Ce type de filtre supporte bien les températures élevées et présente un rendement élevé. [13]

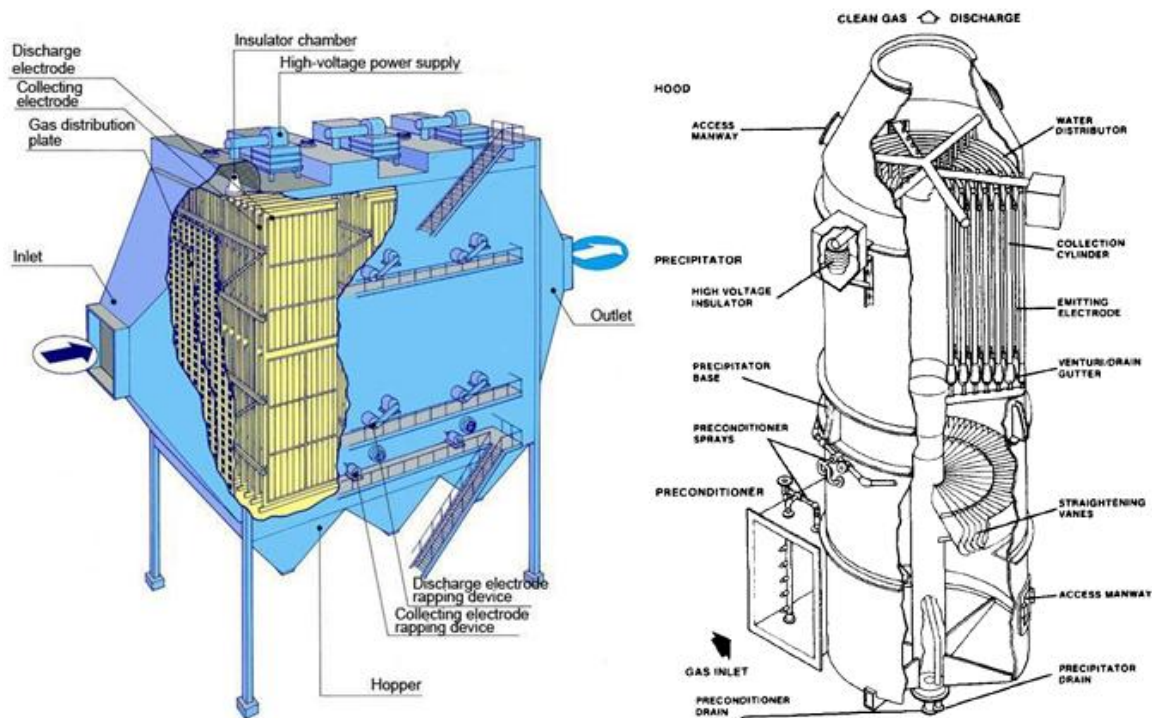


Figure. I.7 : Electrofiltres : (a) sec [14] et (b) humide [15].

I.5 Avantages des précipitateurs électrostatiques

- Capacité à éliminer des particules très fines, jusqu'à $0,1 \mu\text{m}$.
- Faibles coûts de maintenance et de fonctionnement.
- Faible chute de pression (0,25 à 1,25 cm d'eau).
- Possibilité de traiter de grands volumes de gaz à haute température.
- Temps de traitement très court (0,1 à 10 s).
- Aucun problème avec les produits chimiques solides, liquides ou corrosifs.

- Nettoyage facile en mettant hors service certaines sections de l'appareil.
- Filtre lavable, économique, efficace et respectueux de l'environnement. [16]

Pour maintenir une performance optimale et garantir que les particules continuent à être efficacement capturées, le filtre doit être nettoyé avant que l'encrassement ne devienne trop important. Le lavage s'effectue simplement à l'eau et au détergent.

I.6 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques

- Coûts d'installation élevés.
- Besoin important en espace en raison des grandes dimensions de l'équipement.
- Risque d'explosion lors de la collecte de gaz combustibles ou de fines particules.
- Des mesures de sécurité strictes sont nécessaires pendant l'exploitation. Il faut contrôler avec soin la distribution du flux de gaz, la résistivité du gaz, la conductivité des fines particules et le seuil d'ionisation corona.
- La production d'ozone, un gaz toxique, peut survenir pendant l'ionisation du gaz par les électrodes de décharge à charge négative.

I.7 Applications des précipitateurs industriels

La précipitation électrostatique est un procédé largement utilisé pour éliminer les particules polluantes solides, telles que la poussière et les cendres, présentes dans les gaz rejetés dans l'atmosphère. Les principales applications des précipitateurs électrostatiques dans l'industrie sont présentées ci-dessous [17] :

1. Cimenteries :

- Nettoyage des gaz d'échappement des fours de ciment.
- Récupération des fines particules des fours.

2. Moulins à pulpe et à papier :

- Récupération des fumées de soude dans les moulins à pulpe de Kraft.

3. Aciéries :

- Nettoyage des gaz des hauts fourneaux afin de pouvoir les utiliser comme combustible.
- Elimination des goudrons du gaz des fours à coke.
- Nettoyage des gaz de foyers ouverts et des fourneaux électriques.

I.8 La décharge couronne

La décharge couronne est une décharge non homogène se produisant dans un milieu gazeux à pression atmosphérique et sous un champ électrique non uniforme. Elle apparaît lorsque le champ électrique est élevé mais reste non disruptif, et se manifeste par une gaine lumineuse, d'où le terme « effet couronne » [18]. Ce type de décharge se développe généralement à partir d'une électrode ayant un faible rayon de courbure. Les géométries les plus couramment utilisées sont : pointe/plan, fil/cylindre, fil/plan, sphère/plan, etc.

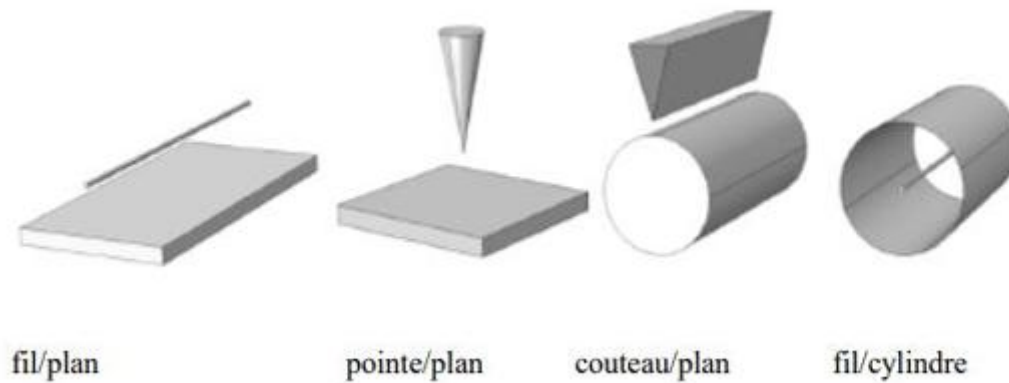


Figure. I.8 : Configurations d'électrodes pour la génération de décharges couronnes [19].

L'espace entre les électrodes peut être divisé en deux zones [20] :

- **Zone active d'ionisation** : c'est la région où les charges sont générées et où le champ électrique est élevé.
- **Zone de recombinaison et d'attachement des électrons** : dans cette région, les charges dérivent sous l'effet d'un champ électrique plus faible que dans la zone active.

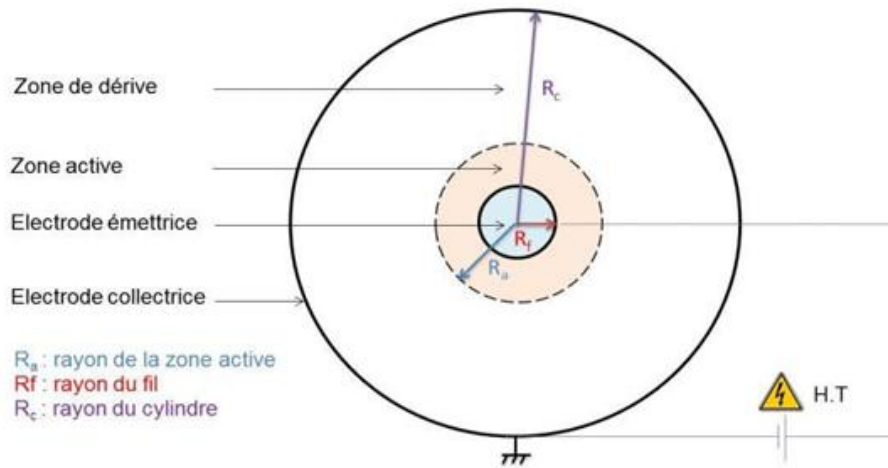


Figure I.9 : Représentation schématique de la décharge couronne (géométrie fil / cylindre) [20].

I.8.1 Les différents types de décharges couronne

Selon la polarité et l'intensité du champ électrique, on distingue plusieurs modes de décharges couronne.

I.8.1.1. Décharge couronne positive

Dans le cas d'une décharge positive, les avalanches électroniques se forment dans la zone interne au rayon critique et se dirigent vers la cathode. Au-delà de ce rayon, il ne reste qu'un nuage d'ions positifs. Ces ions, beaucoup moins mobiles que les électrons (environ 400 fois moins [21]), ne peuvent générer d'ionisation supplémentaire.

En polarité positive, les ions créent une densité de charge d'espace importante dans la zone de champ électrostatique élevé, ce qui entraîne un claquage plus rapide. Pour un gaz donné, la décharge électrique négative est donc généralement plus stable [22].

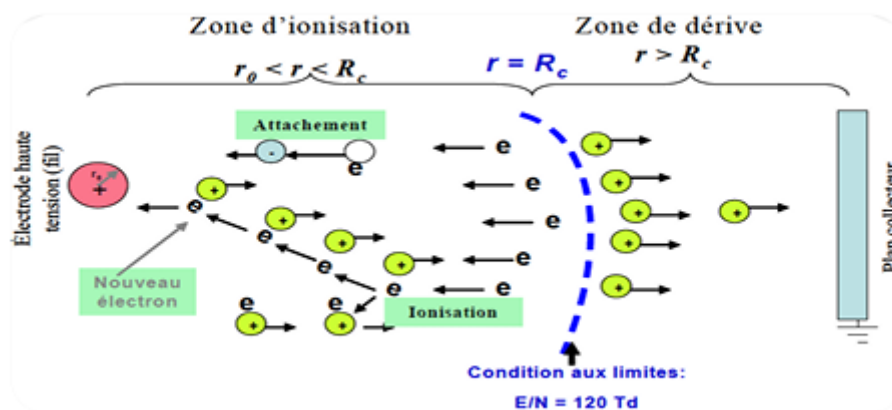


Figure. I.10 : Descriptif de la décharge couronne positive [23].

I.8.1.2. Décharge couronne négative

Dans le cas d'une décharge négative, l'avalanche électronique se propage de la cathode vers l'extérieur et s'arrête au rayon critique. Les électrons issus de l'avalanche se fixent sur les molécules neutres de la zone de dérive, formant ainsi des ions négatifs. Les ions positifs, quant à eux, se concentrent à proximité immédiate de l'électrode active. Ce type de décharge a toutefois l'inconvénient de produire des molécules d'ozone [22].

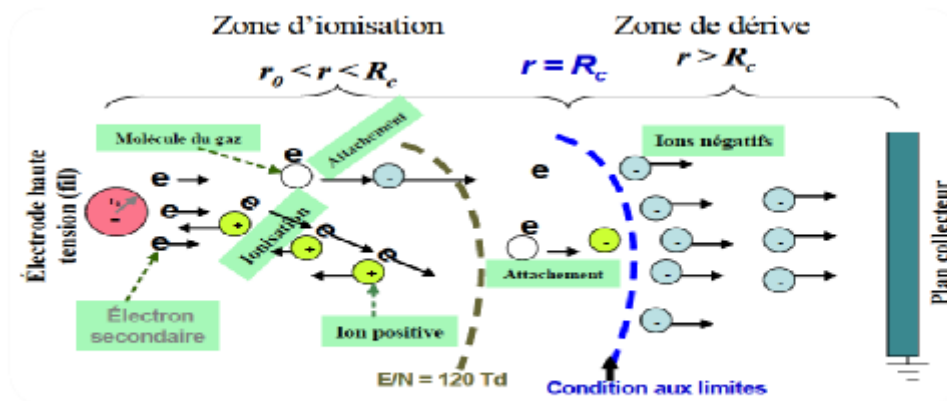


Figure. I.11 : Descriptif de la décharge couronne négative [23].

I.8.2. Les paramètres influençant la décharge couronne

Les caractéristiques d'une décharge couronne peuvent être influencés par plusieurs facteurs [24], que l'on peut classer en trois catégories principales :

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

I.8.2.1 Facteurs géométriques

Rayon de la courbure

L'augmentation du rayon de courbure entraîne une élévation de la tension seuil nécessaire à l'apparition de l'effet couronne.

Distance inter-électrodes

La Figure I.12 montre que, pour de faibles distances entre électrodes, le courant augmente plus rapidement avec la tension et les seuils de décharge couronne apparaissent à des tensions plus faibles [25,26].

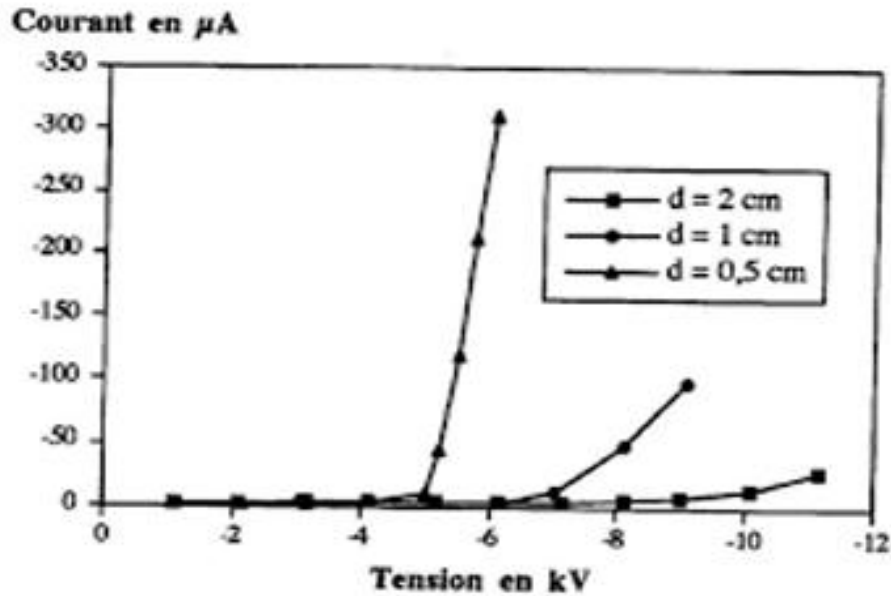


Figure. I.12 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [25,26].

La nature des électrodes

La Figure I.13 illustre la caractéristique courant-tension en fonction du matériau des électrodes (cuivre, aluminium et acier).

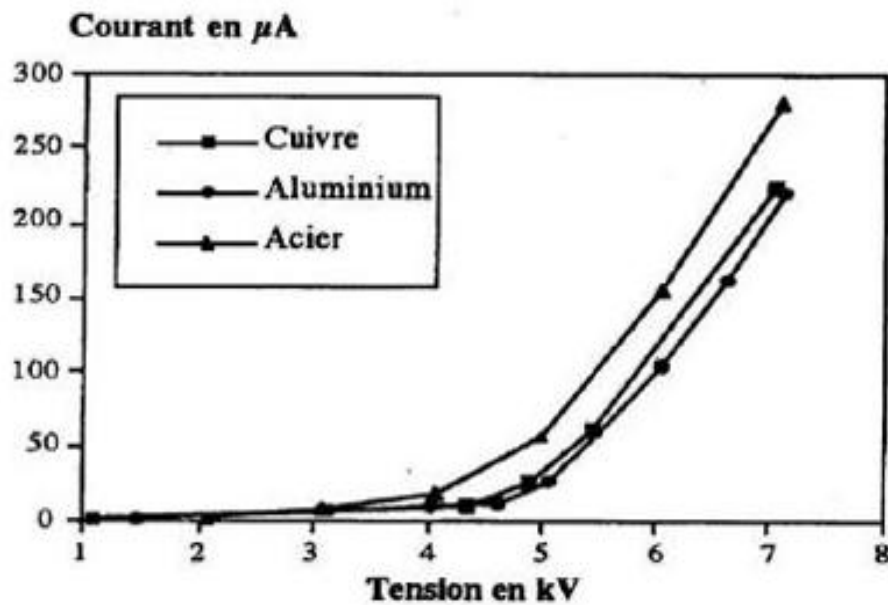


Figure. I.13 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes ($d = 0.5$ cm, $r = 125 \mu m$, et $\epsilon = 5\%$) [25,26].

Le tableau I.1 montre que la mobilité ionique est influencée à la fois par la nature des électrodes et par la tension appliquée.

Tableau. I.1 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative (kH=5%, fil 125 μ m).

Tension positive	μ: en [$m^2.V^{-1}.S^{-1}$] à $d=0.5cm$
Electrode en cuivre	8.10^{-5}
Electrode en aluminium	$7,4.10^{-5}$
Électrode en acier	12.10^{-5}
Tension negative	μ: en [$m^2.V^{-1}.S^{-1}$] à $d=0.5cm$
Électrode en acier	4.10^{-4}
Électrode en aluminium	$2,9.10^{-4}$
Électrode en cuivre	$4,5.10^{-4}$

Nous observons une grande mobilité ionique avec des électrodes en acier qu'avec des électrodes en aluminium quelle que soit la polarité de la tension appliquée.

I.8.2.2. Les facteurs physico-chimiques

La température

À pression normale, l'augmentation de la température diminue la rigidité diélectrique de l'air, ce qui favorise l'apparition de la décharge couronne, car le libre parcours moyen des particules augmente [25,27]. En revanche, si la hausse de température s'accompagne d'une augmentation de la pression, cela affecte le produit « pd » [25,28].

L'humidité

L'humidité réduit la rigidité diélectrique de l'air, surtout dans un champ électrique non uniforme, abaissant le seuil de décharge couronne en raison de l'augmentation de l'attachement des électrons et de la conductivité de l'air [25,27].

La pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La Figure I.14 illustre l'influence de la pression sur la décharge.

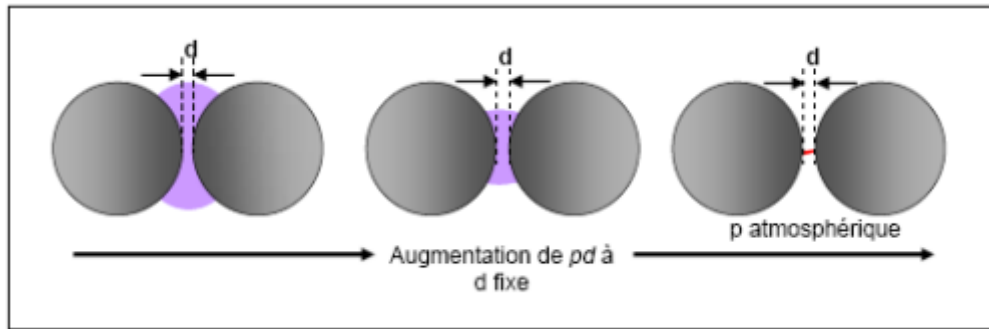


Figure. I.14 : Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [25,29].

La densité de l'air

Les paramètres climatiques, et en particulier la densité de l'air, affectent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

La tension « U_d » est proportionnelle à la densité de l'air :

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad \text{I.1}$$

U_{dn} : Tension de claquage dans les conditions normales.

K_h/δ : Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

I.8.3. Facteurs électriques

L'effet couronne varie selon que le système d'électrodes est soumis à une tension continue ou alternative. Les modes d'émission de charges observés en tension alternative se retrouvent également en tension continue. La différence principale réside dans le fait qu'en tension alternative, les émissions de charges sont concentrées autour du pic de la sinusoïde du courant, tandis qu'en tension continue, l'émission de charges est permanente.

I.9 La décharge électrique

I.9.1. La charge des particules

Les poussières naturellement dispersées dans un gaz possèdent des charges électriques acquises par frottement, effet thermique ou rayonnements naturels. Cependant, ces charges sont trop faibles pour qu'un champ électrique puisse modifier leur trajectoire et les collecter efficacement. Pour qu'un électrofiltre agisse efficacement, il est nécessaire que les poussières reçoivent une charge uniforme et aussi élevée que possible, obtenue uniquement par une ionisation intense grâce à un champ porteur (Figure I.15). Une fois le champ électrique et le courant établis, l'ionisation des particules peut alors se produire.

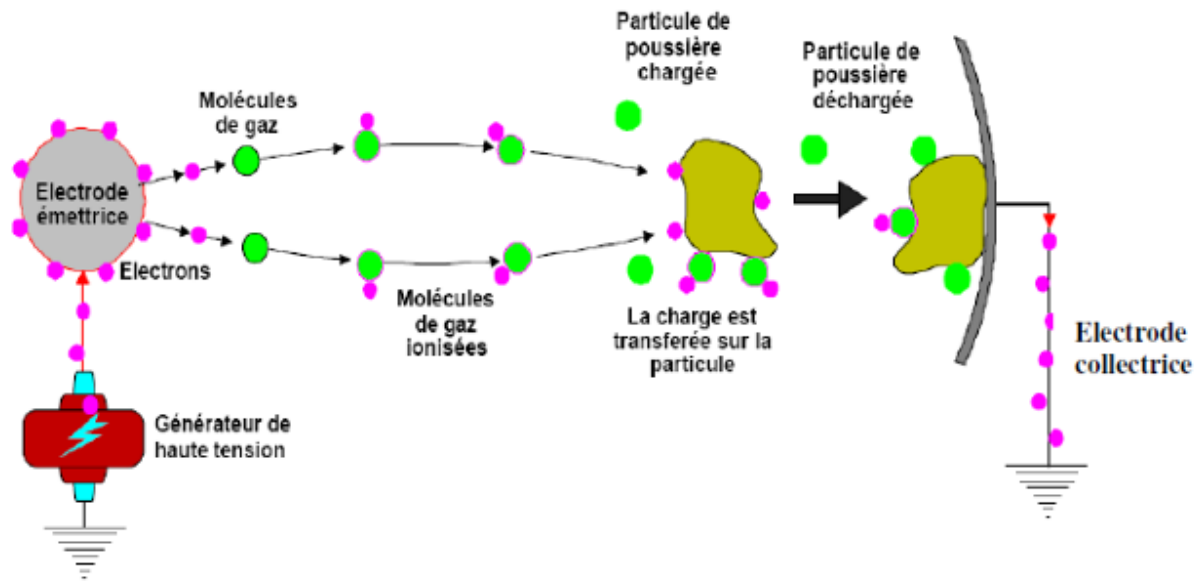


Figure. I.15 : mécanisme de charge de particules.

La modélisation du fonctionnement des électrofiltres nécessite de calculer la charge accumulée par les particules au cours de leur trajectoire. Cela requiert des modèles physiques capables de décrire avec précision le processus de charge, en tenant compte des conditions particulières présentes dans les précipitateurs électrostatiques.

Selon plusieurs études [16,21], la charge des particules est essentiellement due à deux mécanismes : la charge par champ et la charge par diffusion.

La charge électrique d'une particule résulte des interactions avec les ions de la décharge couronne, les mécanismes de charge agissant simultanément selon la taille des particules et l'intensité du champ électrique.

I.9.1.1 Charge par champ

Le champ électrique est le facteur principal du processus de charge des particules dans un gaz. La présence d'une particule provoque une distorsion locale du champ, maximale pour une particule conductrice. Les ions se déplacent le long des lignes de champ et modifient la distribution locale jusqu'à ce que la particule atteigne sa **charge de saturation par champ** q_p^s [22,25]. Ce mécanisme, prédominant pour des particules supérieures à $0,5 \mu\text{m}$ [23,24], dépend du diamètre des particules, du champ électrique, de la densité et mobilité des ions, du temps de présence dans le champ E et de la constante diélectrique. Le calcul de la charge limite repose sur la théorie de Pauthenier [23].

L'expression suivante proposée par White [16] :

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

Dans laquelle q_p représente la densité d'ions et μ est la mobilité ionique. La charge limite par champ est donnée par l'expression suivante [16] :

$$q_p^s = 3 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \cdot E \cdot d_p^2 \quad \text{I.3}$$

Où ϵ_r représente la permittivité relative des particules. L'équation (2) montre que la charge limite par champ dépend de l'intensité du champ électrique local ainsi que de la permittivité relative ϵ_r des particules. Cette charge q_p est obtenue par l'intégration dans le temps de l'équation (I.2). Dans le cas particulier où la distribution du champ électrique et celle de la charge d'espace ionique sont uniformes, l'intégration de l'équation (I.3) conduit à l'expression suivante :

$$q_p(t) = q_p^s \cdot \left(\frac{t}{t + \tau_p} \right) \quad \text{I.4}$$

$$\tau_p = \frac{4 \cdot \epsilon_0}{\rho \cdot \mu}$$

Où τ_p représente le temps caractéristique de la charge par champ, c'est-à-dire la durée nécessaire pour que la particule atteigne la moitié de sa charge limite. Dans le cas des filtres électrostatiques, l'intensité du champ électrique ainsi que la densité d'ions varient dans l'espace inter-électrodes ; par conséquent, la valeur de la charge limite dépend de la position occupée par les particules.

À partir de la théorie de Pauthenier, Cochet [26] a proposé en 1961 une expression simple permettant de calculer la charge limite des particules fines dont la taille est comparable au libre parcours moyen des ions. Cette relation (I.5), qui fait intervenir le rapport λ_g/d_p correspondant, constitue une méthode simple pour déterminer la charge de saturation, tout en offrant une bonne précision pour les particules de diamètre supérieur à 0,1 μm [21].

$$q_p^s = \left[\left(1 + \frac{2 \cdot \lambda_g}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + 2 \cdot \lambda_g/d_p}\right) \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}\right) \right] \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad \text{I.5}$$

Avec λ_g est libre parcours moyen des molécules de gaz peut être estimé par :

$$\lambda_g = \frac{\mu_g}{0.499 \cdot \rho_g} \sqrt{\frac{\pi \cdot M}{8 \cdot R \cdot T}} \quad \text{I.6}$$

Où $\mathbf{M}$ représente la masse molaire, $\mathbf{R}$ la constante universelle des gaz parfaits ($8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$) et $\mathbf{T}$ la température absolue. Dans les conditions normales de température et de pression, le libre parcours moyen des ions vaut : $\lambda=6,53.10^{-8}(\text{m})$

I.9.1.2. Charge par diffusion :

Le mécanisme de charge par diffusion décrit le processus de charge des particules lorsque le champ électrique appliqué est faible, voire nul, et lorsque la taille des particules est très petite, de l'ordre de quelques libres parcours moyens. Dans ce cas, le phénomène de diffusion des ions doit être pris en compte dans le processus de charge [16, 21, 27].

Ce mécanisme repose sur la probabilité de collision entre les particules et les ions animés d'un mouvement aléatoire dû à l'agitation thermique. Dans une zone où le champ électrique appliqué est nul, les ions se répartissent uniformément autour des particules. Ainsi, tous les éléments de surface d'une particule ont la même probabilité d'entrer en collision avec les ions, ce qui permet à la particule d'accumuler une certaine charge électrique.

Ce type de charge concerne principalement les particules très fines, de diamètre inférieur à $0,2 \mu\text{m}$ [16]. Dans ce mécanisme, la charge accumulée dépend de plusieurs paramètres, notamment la taille des particules, la densité des ions, la vitesse moyenne d'agitation thermique des ions, la constante diélectrique de la particule, la température absolue du gaz ainsi que le temps de présence des particules dans le champ.

White [16] montre que l'évolution au cours du temps de la charge acquise par une particule sous l'effet du processus de diffusion est :

$$\begin{cases} \frac{dq_p}{dt} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot v_i \cdot \rho \cdot \exp\left(-\frac{q_p \cdot e}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot M \cdot T}\right) \\ v_i = \sqrt{\frac{3 \cdot k_B \cdot T}{m_i}} \end{cases} \quad \text{I.7}$$

Où $K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ représente la constante de Boltzmann, v_i est la vitesse d'agitation thermique des ions et avec m_i la masse de l'ion. En considérant une densité d'ions uniforme, l'expression (I.7) après intégration conduit à :

$$q_p(t) = q^* \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_d}\right) \quad \text{I.8}$$

Avec $q^* = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot k_B \cdot T/e$ représente la constante de charge par diffusion et $\tau_d = 8 \cdot \epsilon_0 \cdot k_B \cdot T/d_p \cdot v_i \cdot \rho \cdot e$ est le temps caractéristique de charge par diffusion. Nous observons que l'équation (I.8) ne conduit pas à une limite de charge pour t Cependant, l'expression (I.7)

montre que le processus de charge par diffusion est influence d'une façon continue par la charge op déjà acquise par la particule.

I.10 Vitesse de migration des particules chargée

Le mouvement d'une particule solide sphérique au sein du précipitateur est régi par le principe fondamental de la dynamique. Cette particule, caractérisée par un diamètre d_p , une charge électrique q_p et une vitesse $\vec{w}$, évolue dans un écoulement de gaz laminaire de vitesse $\vec{U}_g$ et est soumise à un champ électrique uniforme et constant $\vec{E}$ (figure I.16) [30] :

$$m_p \cdot \frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_f \quad \text{I.9}$$

Où m_p représente la masse de la particule, $\vec{F}_e$ et $\vec{F}_f$ respectivement la force électrique et la force de traînée.

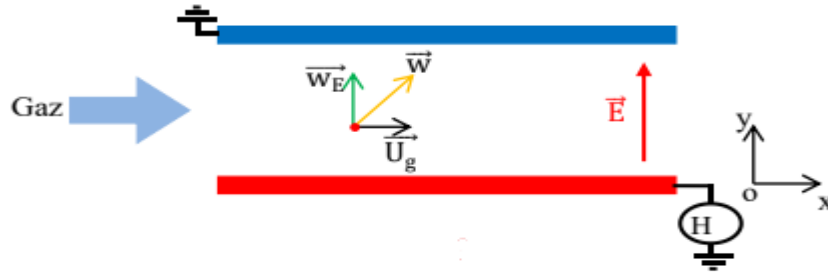


Figure. I.16 : Schéma explicatif du mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles [30].

En remplaçant dans la relation I.9 l'expression de chaque force, la migration de la particule vers l'électrode de collecte suivant l'axe Oy est caractérisée par la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dw_E}{dt} + \frac{3\pi\eta_g d_p}{m_p Cu} \cdot w_E = \frac{q_p}{m_p} \cdot E \quad \text{I.10}$$

Ici, w_E représente la composante de la vitesse de la particule dans la direction normale aux plaques, appelée « vitesse effective de migration ». En considérant une particule initialement au repos à l'instant $t = 0$ ($w_E = 0$), la résolution de l'équation (I.10) permet d'obtenir l'évolution temporelle suivante :

$$w_E = w_{th} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right] \quad \text{I.11}$$

Où w_{th} est appelée vitesse théorique de migration [14, 16, 48] et a pour expression :

$$w_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3\pi \cdot \eta_g \cdot d_p} Cu \quad I.12$$

Dans la relation I.11, τ_p est le temps de relaxation de la particule considérée, qui dépend de la masse et de la taille de la particule, ainsi que de la viscosité dynamique du gaz porteur :

$$\tau_p = \frac{m_p}{3\pi \cdot \eta_g \cdot d_p} \cdot Cu = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta_g} \cdot Cu \quad I.13$$

Dans cette expression, ρ_p désigne la masse volumique des particules. Le temps de relaxation τ_p caractérise le régime transitoire de la particule avant qu'elle n'atteigne sa vitesse constante w_{th} . On remarque que ce temps est totalement indépendant des conditions électriques régnant à l'intérieur du filtre. La figure I.17 illustre l'évolution de τ_p en fonction du diamètre des particules d_p . Il convient de noter que pour les particules fines ($d_p \leq 1 \mu m$), ce temps est extrêmement court, n'excédant pas 10 μs . [30]

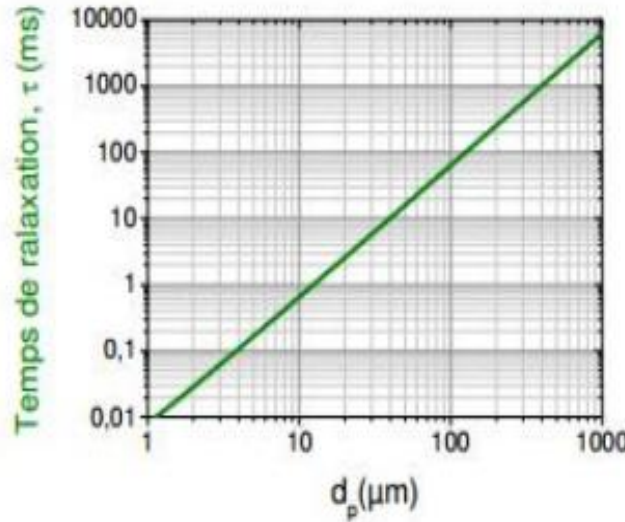


Figure. I.17 : Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules ($T=150^{\circ}C$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$) [30].

Dans cette approche, la vitesse de migration théorique, définie par l'équation (I.12), représente la valeur stationnaire de la vitesse des particules dans la direction du champ électrique, c'est-à-dire perpendiculairement aux plaques collectrices. Ce paramètre, qui caractérise le processus de migration au sein de l'électrofiltre, constitue le concept fondamental sur lequel repose l'ensemble des modèles analytiques.

L'étude de la vitesse théorique de migration requiert au préalable la connaissance de la charge électrique des particules en fonction de leur granulométrie. Afin d'illustrer l'évolution de w_{th} selon la taille des particules, la littérature s'appuie généralement sur le modèle simplifié développé par Cochet [31]. Cette relation permet de déterminer la charge limite acquise par une particule soumise à un champ électrique d'intensité E . Elle présente une excellente corrélation avec les données expérimentales, en particulier pour les diamètres supérieurs à $0.3 \mu\text{m}$ [31] :

$$q_p^s = \left[\left(1 + \frac{2\lambda_g}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1+2\lambda_g/d_p} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right) \right] \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad \text{I.14}$$

Où ε_0 est la permittivité du vide et ε_r est la permittivité relative des particules.

La figure I.18 montre les variations de la charge limite en fonction du diamètre des particules en considérant deux valeurs de l'intensité du champ électrique E .

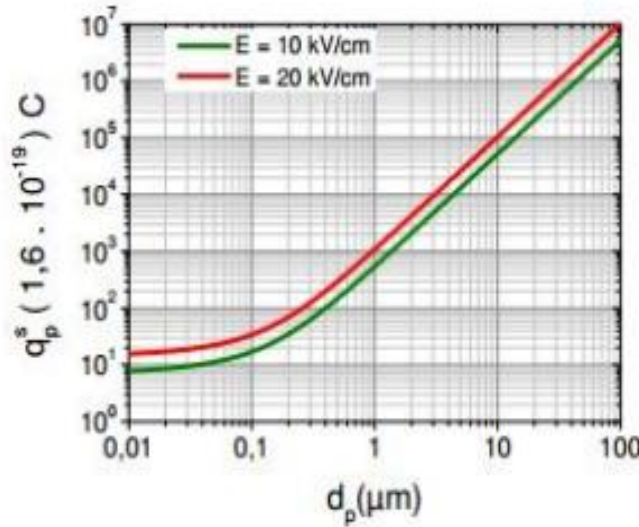


Figure I.18 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules ($T = 150^\circ\text{C}$, $\lambda_g = 0.101 \mu\text{m}$ et $\varepsilon_r \rightarrow \infty$, cas des particules conductrices) [30].

En s'appuyant sur les résultats de la figure I.18 relatifs à la charge électrique des particules, il est possible d'évaluer les variations de la vitesse théorique de migration w_{th} (Figure I.19). On observe que la courbe de la vitesse w_{th} en fonction du diamètre particulaire passe par un minimum distinct, situé aux alentours de $d_p \cong 0.25 \mu\text{m}$ [30].

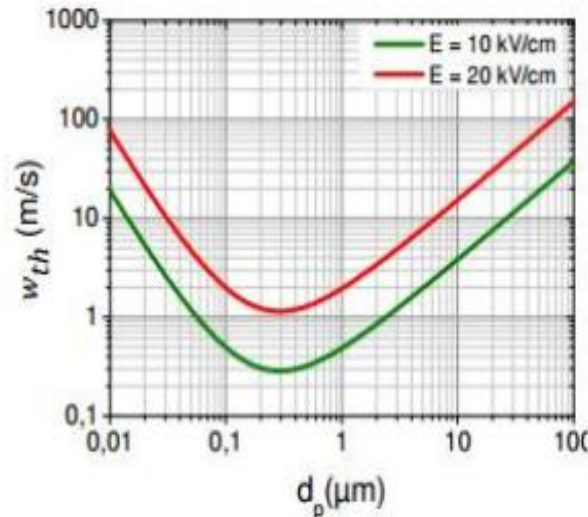


Figure. I.19 : Variations de la vitesse de migration théorique w_{th} en fonction de la taille des particules ($T = 150^{\circ}\text{C}$, $\lambda_g = 0.101 \mu\text{m}$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$) [30].

Une faible vitesse de migration limite le transport des particules vers les plaques collectrices, ce qui dégrade directement l'efficacité de capture. Par conséquent, puisque la vitesse de migration atteint son niveau le plus bas pour les particules dont le diamètre est compris entre 0.1 et 1 μm , l'efficacité de collecte subit une baisse similaire dans cette même gamme granulométrique [30].

I.11 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur la problématique du changement climatique liée aux pollutions industrielles et l'importance de la précipitation électrostatique pour l'élimination des particules polluantes. En effet, nous avons abordé les décharges électriques en précisant que le fonctionnement des filtres repose sur l'ionisation des gaz. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux décharges couronne (positives et négatives), générées dans un champ électrique non uniforme à partir d'électrodes à faible rayon de courbure.

Nous avons décrit les différents mécanismes et facteurs (géométriques, physico-chimiques et électriques) influençant la formation et la stabilité de ces décharges. L'ensemble de ces phénomènes intervient directement dans le processus de capture des polluants au sein des filtres.

Ce chapitre explique le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques, les types existants, les mécanismes de charge des particules et leur migration vers les électrodes de collecte.

Chapitre II : Matériels ET Méthodes

II.1 Introduction

Ce travail a été réalisé au laboratoire d'électrotechnique de l'Université Belhadj Bouchaïb d'AïnTémouchent. Ce chapitre vise à étudier et à évaluer les performances d'un système (fil-cylindre) en analysant l'influence de différentes géométries d'électrodes couronne (Corona Electrode) sur les caractéristiques de la décharge et de l'ionisation.

Dans une première phase expérimentale, plusieurs types d'électrodes couronne ont été utilisés, notamment des fils fins, une tige filetée, une lame de scie, ainsi qu'une tige filetée avec des disques métalliques disposés à intervalles réguliers. Cette diversité de configurations vise à analyser l'effet des arêtes vives et des surfaces irrégulières sur l'augmentation de la densité d'ionisation et l'amélioration de la répartition des charges le long du cylindre.

Dans une seconde phase, une série d'essais a été réalisée en augmentant progressivement le diamètre de l'électrode. L'objectif est de réduire localement l'intensité du champ électrique, afin de retarder l'apparition de la décharge couronne. Ce retard permet de limiter le phénomène d'accumulation des particules lors de la phase d'ionisation, tout en autorisant l'application de tensions plus élevées dans la phase de collecte, connectée en série au même générateur.

Cette étude comparative vise à identifier la géométrie optimale permettant d'assurer une efficacité maximale de chargement des particules, tout en réduisant la consommation énergétique et en évitant l'accumulation prématurée des poussières dans la zone d'ionisation. Ces résultats contribuent ainsi à l'amélioration des performances du précipitateur électrostatique à deux étages, notamment sous différentes conditions de fonctionnement.

II.2 Matériel utilisé

1. Source De Haute Tension

Les deux électrodes du séparateur sont connectées à deux sources de haute tension, l'une positive et l'autre négative, délivrant des tensions comprises entre 0 et 60 kV (Figure II.1). Le champ électrique ainsi généré entre les électrodes joue un rôle essentiel dans la séparation des particules de charges opposées.

Le système d'alimentation utilisé dans nos expériences est constitué d'un générateur de haute tension continue, de polarité positive et négative, de marque Spellman, série SL300 (± 40 kV ; $\pm 7,5$ mA), avec une précision de 0,1 kV [32].



Figure. II.1 : photographie de sources de haute tension [32].

2. Micro-Ampèremètre :

Le microampèremètre est un dispositif de mesure permettant de quantifier le courant associé à la décharge couronne [33].



Figure. II.2 : photographie de microampèremètre [33].

3. Thermo-hygromètre numérique :

Avant chaque série d'expériences, l'humidité relative (RH %) ainsi que la température sont mesurées à l'aide d'un thermo-hygromètre numérique (Figure II.3), de marque Testo, qui assure la mesure simultanée de ces deux paramètres.



Figure. II.3 : photographie de Thermo-hygromètre numérique [34].

4. Anémomètre thermique à hélice :

Les anémomètres à hélice constituent des dispositifs conventionnels dédiés à la mesure de la vitesse de l'air, utilisables en milieux intérieur et extérieur. Leur facilité d'emploi permet une acquisition rapide et précise des données. Par ailleurs, certains modèles intègrent des fonctionnalités supplémentaires, telles que la mesure du débit volumétrique et de la température, ce qui optimise l'analyse et la comparaison des résultats expérimentaux [35].



Figure. II4 : photographie d'Anémomètre à hélice [35].

5. Balance de laboratoire électronique :

Une balance numérique est employée afin de déterminer la masse de poussières récupérées par le cyclone ainsi que celle collectée au sein du précipitateur électrostatique (ESP). Cet instrument se caractérise par une capacité maximale de 2400 g et une résolution de 0,1 g [36].



Figure. II5 : Balance de laboratoire électronique [36].

6. Aspirateur et Souffleur électrique 600W

Un souffleur 2-en-1 a été employé pour garantir un écoulement contrôlé de la fumée et assurer le refroidissement de l'appareil. Ses spécifications techniques incluent une pression d'air de 560 mm, un débit volumétrique de 3,5 m³/min, une puissance de 600 W, et une alimentation électrique de 220 V à 50/60 Hz [37].



Figure. II.6 : Aspirateur et Souffleur électrique 600W [37].

7. Auto-transformateur :

La vitesse d'aspiration du cyclone est réglée à l'aide d'un autotransformateur. En modulant la tension d'alimentation du ventilateur couplé au cyclone, il est possible de faire varier le débit d'air à travers le système. Cette variation permet de maîtriser la quantité de particules aspirées et d'optimiser les performances du dispositif de collecte. L'emploi de l'autotransformateur confère ainsi une flexibilité expérimentale, facilitant l'analyse de l'impact du débit sur l'efficacité globale de séparation des particules.



Figure. II.7 : Autotransformateur [38].

II.3 Les particules utilisées

1. filler de calcaire

Le filler calcaire, ou poudre de calcaire, est un matériau minéral finement broyé dont la composition principale est le carbonate de calcium (CaCO_3). Ses caractéristiques physiques et son coût réduit en font un matériau largement utilisé dans le génie civil, le secteur de la construction et l'industrie des matériaux.



Figure. II.8 : filler de calcaire.

Tableau. II.1 : composition du filler de calcaire

Element/Compound	PPM ▼	±3σ
Ca	519 364	1 947
Al	24 788	13 001

SiO ₂	24 010	9 425
Fe	2 049	363
Cl	897	526
Ag	358	103
Mo	315	22
Mn	177	85
Zn	142	42
Cr	63	46
Pb	27	12

2. Meta kaolin

Le méta-kaolin, obtenu par calcination du kaolin – une argile à forte teneur en kaolinite est une pouzzolane artificielle hautement réactive. Il est principalement incorporé dans les matériaux cimentaires afin d’optimiser leurs propriétés mécaniques et d’accroître leur durabilité.



Figure. II.9 : Meta kaolin.

Tableau. II.2 : composition du méta-kaolin

Element/Compound	PPM ▼	±3σ
SiO ₂	385 831	20 279
Al	114 090	13 381
Fe	35 910	746
Ti	2 481	97
Ba	2 411	109
Ca	2 196	125
Cl	882	387
V	762	66
Pb	587	43

Ag	358	116
Mn	304	52
Zn	244	50
Mo	157	12
Cr	96	26
Sr	90	9

3. La fumée de silice

La fumée de silice – sous-produit riche en silice amorphe – est une pouzzolane très réactive. Elle est utilisée dans les matériaux cimentaires pour améliorer leurs propriétés mécaniques, réduire leur porosité et accroître leur durabilité.



Figure. II.10 : fumé de silice.

Tableau. II.3 : composition de la fumée de silice

Element/Compound	PPM ▼	±3σ
SiO ₂	862 624	22 644
Fe	11 157	422
Al	6 024	5 286
Ca	2 644	135
Mn	875	58
Ag	358	80
Cl	244	221
Zn	120	39
Sr	94	12
Mo	91	7
Cr	85	24
Ba	81	52
Pb	10	10

II.4 Dispositif expérimental de précipitateur électrostatique

Le schéma du dispositif expérimental est illustré à la Figure II.12. Le système se structure en trois sections principales : le circuit d'admission et de transport des particules submicroniques, les modules de précipitation électrostatique (ESP) à deux étages avec leurs composants de contrôle associés, et les instruments de mesure permettant l'acquisition des données expérimentales.

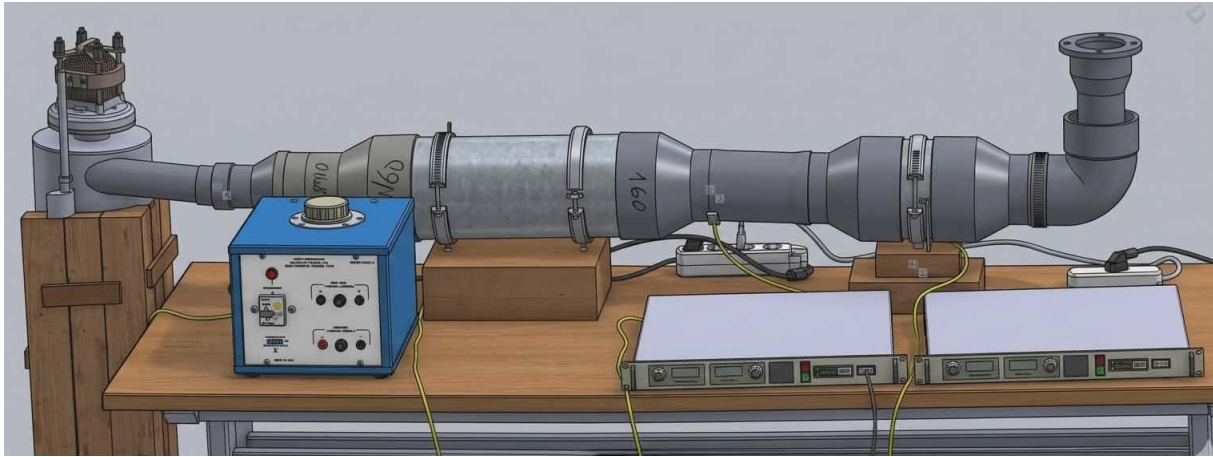


Figure. II.11 : Photo de principe du dispositif expérimental en 3D.

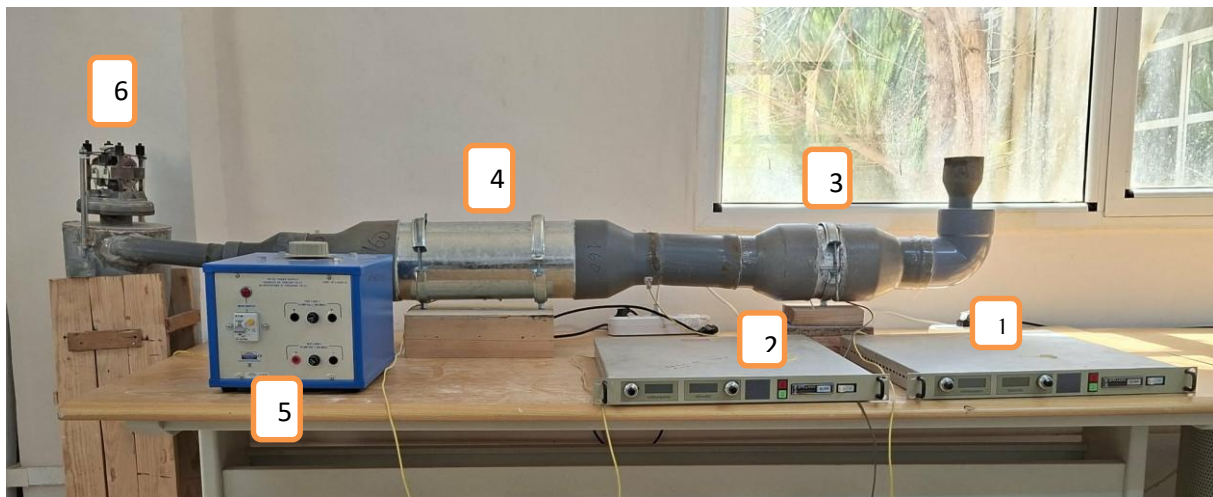


Figure. II.12 : Photo de principe du dispositif expérimental.

- 1- Source De Haute Tension positive.
- 2- Source De Haute Tension négative.
- 3- PES 1 er étage.
- 4- PES 2 eme étage

5- Autotransformateur.

6- Cyclone.

II.5 Dispositif de filtration

Le dispositif expérimental étudié est un précipitateur électrostatique à deux étapes fonctionnant en deux étapes distinctes : **l'ionisation** et **la captation des particules**.

Électrode alimentée par une haute tension, sont disposés à l'intérieur d'un cylindre galvanisé de 200 mm de longueur et 160 mm de diamètre, mis à la terre.

Deux configurations ont été étudiées pour ce premier étage. La première consiste en un seul fil corona placé sur l'axe central du cylindre, avec des diamètres variant de 0,1 mm à 0,4 mm, correspondant à une distance inter-électrodes de 80 mm. La seconde configuration, dite « à quatre lames de scie », utilise des lames métalliques disposées en croix autour d'un axe central servant d'électrodes d'ionisation. Leur forme dentée permet d'augmenter l'intensité du champ électrique. Dans ce cas, la distance inter-électrodes est réduite à 55 mm. Cette configuration accroît également la densité de charge générée dans la zone d'ionisation.

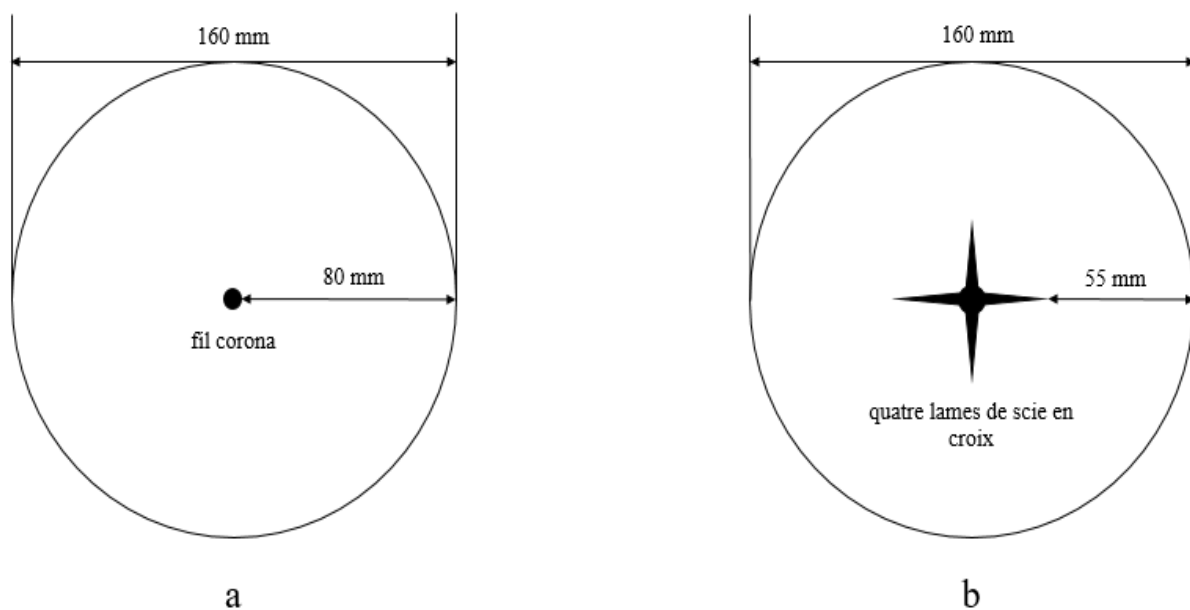


Figure. II13 : Évolution de la géométrie du premier étage d'ionisation : (a) un seul fil central ; (b) quatre lames de scie en croix.

Le second étage du précipitateur est consacré à la collecte des particules préalablement ionisées. Il adopte une configuration coaxiale tubulaire, composée d'un cylindre interne en cuivre de 10 mm de diamètre et 550 mm de longueur, centré à l'intérieur d'un cylindre externe

galvanisé de 160 mm de diamètre et 500 mm de longueur. Le cylindre interne est relié à la haute tension, tandis que le cylindre externe est mis à la terre. Cette configuration permet de générer un champ électrique radial uniforme entre les deux électrodes, favorisant la déviation des particules chargées vers la paroi du collecteur et assurant ainsi leur dépôt. L'ensemble du système peut être alimenté soit par un seul générateur de haute tension reliant les deux étages en série, soit par deux générateurs distincts, offrant ainsi un contrôle indépendant des tensions appliquées à chaque étage.

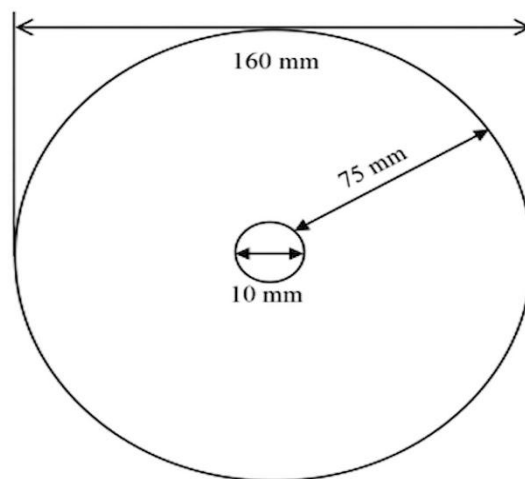


Figure. II.14 : Deuxième étage : système coaxial tubulaire pour la collecte des particules.

La troisième étape est consacrée à un précipitateur électrostatique à un seul étage. Elle adopte une configuration coaxiale cylindrique, constituée d'un fil corona de 0,4 mm de diamètre et de 750 mm de longueur, centré à l'intérieur d'un cylindre externe galvanisé de 160 mm de diamètre et de 700 mm de longueur. Le fil corona est relié à la haute tension, tandis que le cylindre externe est mis à la terre. Cette configuration permet de générer un champ électrique radial uniforme entre les deux électrodes, favorisant la déviation des particules chargées vers la paroi du collecteur et assurant ainsi leur dépôt.

II.6 Protocole expérimentale :

L'étude expérimentale du précipitateur électrostatique à deux étages débute par la préparation du dispositif, incluant la vérification des connexions électriques, de la mise à la terre, ainsi que le réglage des conditions ambiantes telles que le débit d'air et l'humidité. Les particules sont ensuite injectées dans le système à l'aide d'une source calibrée, avant la mise en fonctionnement des deux étages du précipitateur : le premier dédié à l'ionisation des particules et le second à leur collecte. Cette étude a été conçue afin de comparer deux configurations

géométriques de l'étage d'ionisation, en s'appuyant principalement sur la mesure de la masse des particules collectées au niveau du second étage, ainsi que sur l'identification d'éventuels dépôts indésirables au niveau du premier étage.

Dans une première phase, une caractérisation électrique à vide (en absence de particules) est effectuée afin d'établir les courbes courant–tension ($I-V$) du système. Cette étape permet de déterminer la tension de seuil de la décharge couronne et d'analyser le comportement électrique du dispositif jusqu'à des niveaux de tension proches du claquage. L'alimentation est assurée par un générateur unique de haute tension alimentant les deux étages.

Dans une seconde phase, des particules solides sont introduites dans le système à l'aide d'un écoulement d'air présentant des vitesses comprises entre 4.3 m/s et 5.3m/s. et un débit massique de 1 g/s. Deux configurations géométriques du premier étage sont comparées :

- Configuration à un seul fil
- Configuration à 4 lames de scie

Pour chaque configuration, la masse totale des particules collectées au niveau du second étage est mesurée. Parallèlement, le premier étage fait l'objet d'une inspection visuelle après chaque essai afin de détecter d'éventuels dépôts indésirables sur les parois internes, indicateurs d'une collecte non souhaitée dans la zone d'ionisation. Ce critère constitue un élément déterminant pour évaluer la capacité du système à assurer une ionisation efficace des particules sans entraîner leur dépôt prématuré.

Enfin, les essais sont réalisés selon deux modes d'alimentation électrique. Dans le premier cas, un seul générateur de haute tension négative alimente les deux étages en série. Dans le second cas, deux générateurs distincts sont utilisés : le premier, de polarité négative ou positive, est dédié à l'ionisation au niveau du premier étage (décharge couronne), tandis que le second, de polarité positive ou négative, est réservé à la collecte au niveau du deuxième étage (champ de collecte).

II.7 Conclusion

En conclusion, la partie expérimentale s'inscrit dans la continuité des travaux d'observation et d'investigation réalisés. Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée l'appareillage expérimental ainsi que l'ensemble des dispositifs et moyens mis en œuvre au cours de cette étude, notamment les types de particules utilisées et le principe de

fonctionnement de l'électrofiltre. Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus en laboratoire, afin d'évaluer les performances et de mettre en évidence l'efficacité ainsi que l'adaptabilité de l'électrofiltre étudié.

Chapitre III : Résultats ET Discussions

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les résultats expérimentaux obtenus lors de la précipitation électrostatique selon différentes configurations. L'objectif principal de cette étude est d'analyser les facteurs susceptibles d'influencer le processus de filtration électrostatique.

Cette étude est subdivisée en deux parties principales :

Le premier volet porte sur la détermination des caractéristiques électriques courant-tension (I–V) en fonction de plusieurs paramètres, tels que le type d'électrodes et l'effet de la polarité. Il comprend également l'évaluation de courant à vide et avec l'écoulement des particules du précipitateur électrostatique.

Le deuxième volet est consacré à l'étude des différents facteurs influençant les performances et l'efficacité du filtre électrostatique.

Trois types de particules ont été utilisés au cours des expériences : le filler calcaire, le méta-kaolin et fumée de silice.

Les essais ont été réalisés selon deux géométries d'électrodes du précipitateur électrostatique à deux étages : dans le premier cas on utilise quatre lames de scie et en deuxième cas, un fil de différents diamètres. On applique haute tension de polarité positive et négative, un micro-ampèremètre mesure les différentes valeurs de courant de la décharge, avec et sans injection de particules.

Enfin, les résultats expérimentaux obtenus feront l'objet d'une analyse et d'une interprétation détaillée.

III.2 Caractéristique Courant – Tension :

Nous avons étudié les caractéristiques courant-tension en fonction des paramètres suivants :

Distance inter-électrodes, différents types d'électrode, le nombre et le diamètre et la nature de la tension appliquée (HT+) ou (HT-).

III.3 Décharge couronne en absence de particule :

Premier étage :

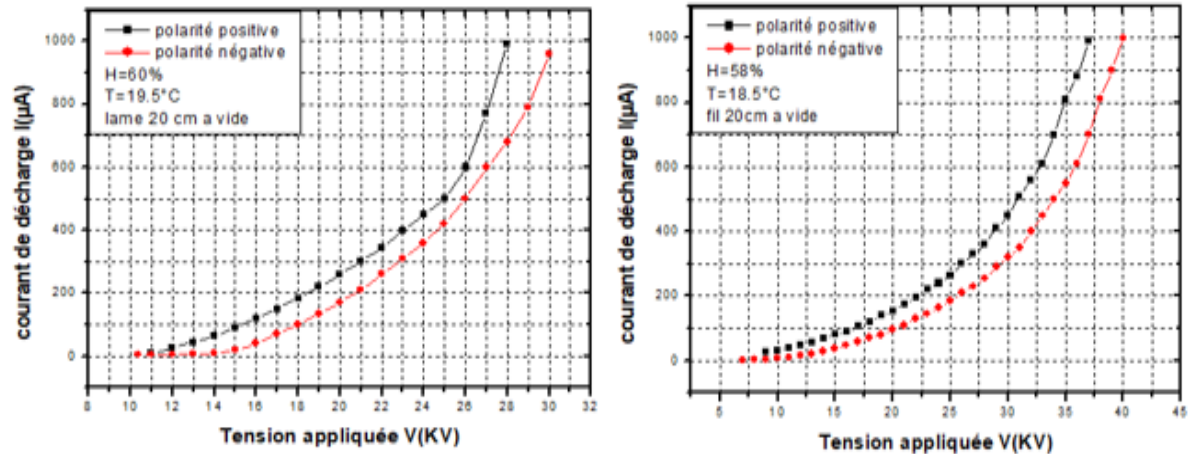


Figure. III.1 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la polarité de la tension appliquée au niveau première étage.

Deuxième étage :

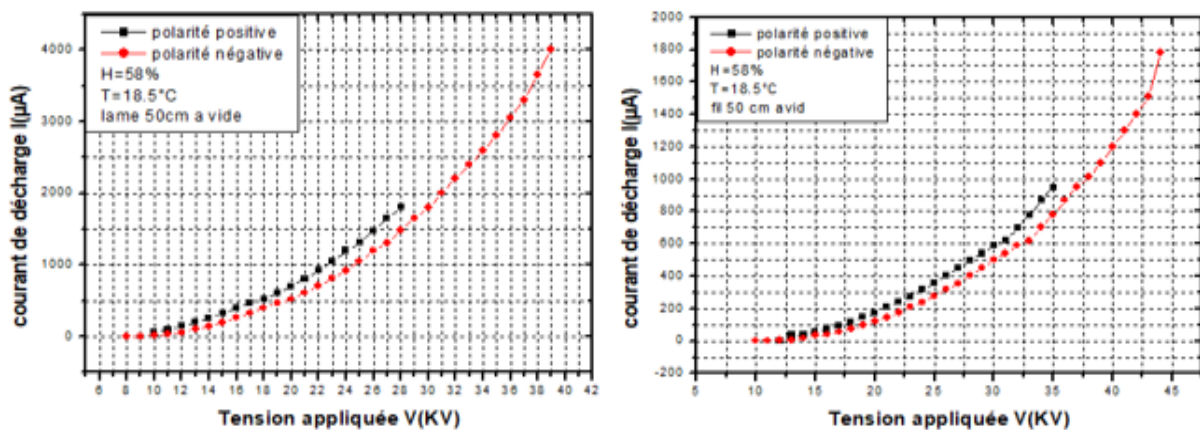


Figure. III.2 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la polarité de la tension appliquée au niveau deuxième étage.

Les courbes représentent l'influence de la polarité sur les caractéristiques courant-tension (I-V), au niveau du premier et du deuxième étage, pour deux configurations différentes : la géométrie « lames de scie croisées en croix-cylindre » et la géométrie « fil-cylindre ».

III.3.1 effet de polarité

En comparant les caractéristiques obtenues sous polarités positive et négative pour une même configuration d'électrode et une même longueur d'intervalle dans le vide, deux phénomènes physiques distincts et systématiques sont mis en évidence :

Tension de seuil de l'effet couronne (V_s) :

Il apparaît clairement que la décharge couronne s'amorce à une tension plus faible en polarité positive qu'en polarité négative. À titre d'exemple, pour une configuration de fil Au niveau du premier étage, le courant commence à croître à environ 7 kV en polarité positive, tandis que ce seuil est retardé pour atteindre environ 9 à 10 kV en polarité négative.

Tension de claquage électrique (V_c) :

Les courbes correspondant à la polarité positive s'interrompent systématiquement à des niveaux de tension inférieurs et plus précoces comparativement à la polarité négative, cette dernière s'étendant vers des tensions de fonctionnement nettement plus élevées. Par exemple, pour un fil Au niveau du premier étage, la rupture disruptive de l'intervalle (le claquage) survient à 34 kV en polarité positive, alors que la configuration sous polarité négative se maintient jusqu'à 40 kV.

Ce comportement asymétrique est attribué à la différence de nature et de dynamique de la charge d'espace :

En polarité positive : Les électrons libres sont attirés à très grande vitesse vers l'électrode centrale de faible rayon, laissant derrière eux un nuage dense d'ions positifs caractérisés par une faible mobilité. Ce phénomène accélère la propagation des canaux de pré-décharge vers le cylindre collecteur, provoquant ainsi un claquage précoce.

En polarité négative : Les électrons sont rejetés loin de l'électrode centrale vers les régions où le champ électrique est plus faible (en direction du cylindre). Au cours de leur migration, ils se fixent sur les molécules électronégatives (telles que l'oxygène), formant ainsi des ions négatifs lourds et lents. Ce mécanisme inhibe la transition soudaine vers l'arc électrique et permet d'appliquer des tensions nettement plus élevées sans induire de claquage.

III.3.2. effet de la géométrie et de la configuration de l'électrode

La comparaison est établie ici entre l'électrode à lame de scie et l'électrode à fil :

Électrode à lame de scie : Elle enregistre systématiquement une densité de courant nettement supérieure à celle du fil pour une même valeur de tension appliquée.

Électrode à fil : Elle génère un courant relativement plus faible, mais garantit une excellente stabilité électrique ainsi qu'une plage de tension de fonctionnement plus large avant l'amorçage du claquage.

L'électrode à lame de scie utilise ses formes pointues pour concentrer intensément le champ électrique (l'effet de pointe), ce qui abaisse le seuil d'ionisation de l'air et permet d'injecter massivement du courant ionique. D'autre part, l'électrode à fil lisse génère un courant

plus faible mais offre une plus grande stabilité électrique ; sa forme cylindrique répartit le champ de manière uniforme, ce qui nécessite une tension plus élevée pour ioniser l'air mais retarde efficacement l'apparition d'un arc électrique (le claquage).

De plus, le choix de la distance inter-électrodes joue un rôle crucial dans les deux géométries de précipitateurs (à un ou deux étages). En effet, la réduction de cette distance intensifie le champ électrique, ce qui accélère l'ionisation du gaz (génération de l'effet couronne). À l'inverse, une distance plus grande affaiblit le champ électrique et exige une tension plus élevée pour atteindre le même niveau d'ionisation.

III.3.3 comparaison entre le premier et le deuxième étage

Premier étage :

Les valeurs du courant maximal restent limitées et modestes, oscillant seulement entre 960 μA et 1000 μA . Cette limitation est due à la restriction de la zone de décharge et au nombre réduit de points de concentration du champ électrique.

Le claquage électrique survenant de manière précoce à des niveaux de tension relativement bas, compris entre 27 et 40 kV selon la polarité appliquée.

Deuxième étage :

L'accroissement de la longueur entraîne une augmentation massive des valeurs du courant. Ce mécanisme permet de générer un courant ionique intense, atteignant jusqu'à 4000 μA en polarité négative.

Elle confère au système une sécurité électrique exceptionnelle et une très haute stabilité, élargissant ainsi la plage de fonctionnement qui peut supporter des tensions élevées allant de 37 à 45 kV sans amorçage de claquage.

III.4 Caractéristique courant-tension à différentes vitesses avec aspiration :

Premier étage :

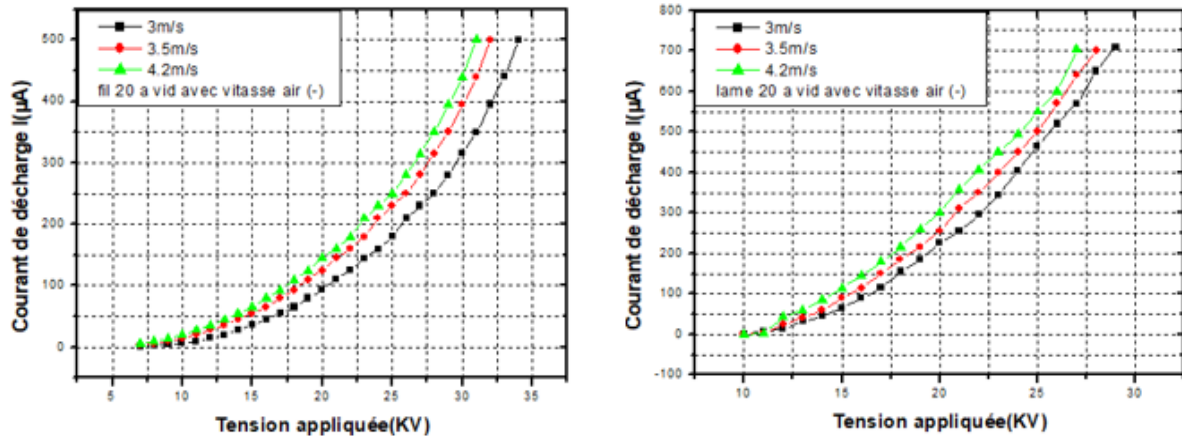


Figure. III.3 : Caractéristiques courant – tension en fonction de variation de vitesse au niveau première étage.

Deuxième étage :

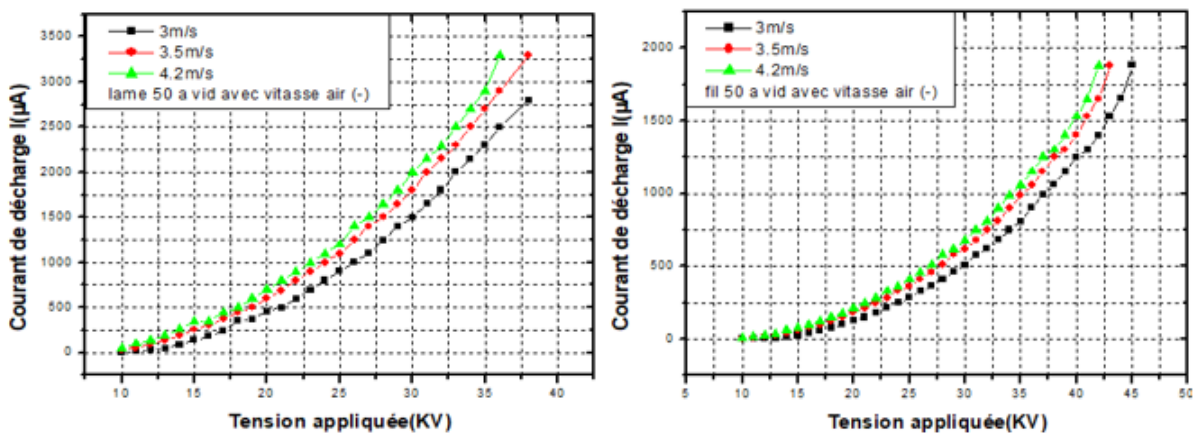


Figure. III.4 : Caractéristiques courant – tension en fonction de variation de vitesse au niveau deuxième étage.

Les courbes représentent l'influence de la vitesse d'écoulement de l'air sur les caractéristiques courant-tension (I-V) en polarité négative (-), au niveau du premier et du deuxième étage pour deux configurations différentes.

Un comportement général commun est observé sur les quatre courbes : à tension appliquée constante, le courant de décharge couronne augmente systématiquement avec l'élévation de la vitesse de l'air.

En l'absence d'écoulement d'air les ions négatifs créés par l'ionisation se rassemblent autour de l'électrode active. Comme ces ions se déplacent lentement, ils forment un nuage appelé "charge d'espace". Ce nuage réduit la force du champ électrique à cet endroit, ce qui freine et bloque la décharge.

Lors de l'introduction du paramètre de vitesse de l'écoulement d'air, les forces hydrodynamiques interagissent avec les forces électriques, Le flux mécanique induit un « balayage convectif » des ions accumulés, les entraînant rapidement vers la paroi collectrice. Ce renouvellement continu de l'intervalle inter-électrodes atténue l'effet inhibiteur de la charge d'espace. Par conséquent, l'électrode peut réioniser de nouvelles molécules d'air avec une intensité accrue, ce qui se traduit expérimentalement par une augmentation progressive du courant mesuré lorsque la vitesse de l'écoulement passe de 3 à 4.2 m/s.

III.4.1 Comparaison de l'effet de la vitesse d'écoulement selon le type d'électrode :

La réponse de la décharge à l'effet de l'écoulement d'air varie distinctement en fonction des caractéristiques géométriques de chaque électrode :

Électrode à lame de scie :

Cette électrode présente une très grande sensibilité à l'écoulement de l'air, ce qui se traduit par une séparation nette des courbes électriques lorsque la vitesse varie. Elle enregistre les valeurs de courant les plus élevées parmi toutes les configurations étudiées (par exemple, plus de 3250 μA pour au niveau deuxième étage et une vitesse de 4.2 m/s).

Les lignes de champ électrique se concentrent intensément au niveau des pointes acérées des dents de la lame, en raison de l'effet de pointe. Ces extrémités constituent des zones privilégiées pour la génération d'un vent ionique intrinsèquement intense. Sous l'action du flux d'air externe, les ions sont entraînés avec une efficacité accrue grâce au caractère ponctuel de l'émission ionique, ce qui favorise un écoulement abondant du courant de couronne. Toutefois, l'absence d'homogénéité du champ électrique accélère l'apparition du claquage diélectrique à des tensions plus faibles comparativement à l'électrode filaire.

Électrode à fil :

Les courbes électriques associées à cette électrode apparaissent plus rapprochées et plus stables. Les valeurs du courant de décharge restent modérées en comparaison avec celles obtenues pour les lames de scie (avec un maximum d'environ 1900 μA pour une longueur au niveau deuxième étage), mais cette configuration présente une excellente tenue diélectrique permettant d'atteindre des tensions élevées pouvant aller jusqu'à 45 kV.

La distribution du champ électrique autour du fil lisse est cylindriquement symétrique sur toute sa longueur. Cette symétrie confère au nuage de charges d'espace une structure cylindrique homogène, difficilement perturbée de manière brutale par l'écoulement de l'air. Par conséquent, l'influence de la vitesse de l'air sur la décharge reste progressive et régulière, ce qui limite les instabilités dans l'entrefer et retarde la formation des canaux de claquage de type streamers.

III.4.2. Comparaison de l'effet de la vitesse d'écoulement sur les deux étages :

Premier étage :

Le volume d'interaction demeure limité en raison du faible temps de séjour du gaz à l'intérieur du champ électrique. Le courant de fonctionnement reste relativement faible, ne dépassant pas environ 710 μA pour les électrodes en lames de scie et 500 μA pour l'électrode filaire. L'entraînement des charges par l'écoulement de l'air est efficace, mais il s'exerce sur une zone d'émission restreinte.

Deuxième étage :

Une amplification marquée et non linéaire du courant de couronne est observée avec l'augmentation de la vitesse de l'air. Les électrodes en lames de scie atteignent des valeurs avoisinant 3250 μA , tandis que l'électrode à fil lisse atteint près de 1900 μA .

L'augmentation de la longueur a entraîné une multiplication significative du courant de décharge. Ce comportement s'explique par le fait que l'extension de la zone active offre au flux d'air un temps de séjour plus important, favorisant ainsi l'entraînement cumulatif et successif des ions. Ce mécanisme empêche efficacement l'accumulation excessive de charges d'espace susceptible de freiner le processus d'ionisation. Par conséquent, le deuxième étage se comporte comme un générateur ionique à très haute densité, stimulé par l'action mécanique du flux d'air.

III.5 efficacité de collecte

III.5.1. Efficacité globale de la collecte

L'efficacité de collecte du dépoussiéreur électrostatique (ESP) est fortement influencée par la tension appliquée. Cette étude a été menée pour une masse d'aérosol de 10 g injectée à un débit massique constant $Q = 1 \text{ g/s}$, sous l'influence de deux vitesses d'écoulement distinctes : 4.3 et 5.3 m/s.

Trois types de poussières ont été testés, avec des tailles de particules comprises entre 2,5 et 45 μm . Les résultats globaux montrent que l'efficacité de collecte à la sortie de l'ESP

augmente de manière continue avec l'élévation de la tension appliquée. Cette efficacité est définie par la relation suivante :

$$\eta = \left(1 - \frac{m_s}{m_{inj}}\right) \times 100\%$$

Où m_s et m_{inj} représentent respectivement la masse sortante non filtrée et la masse totale injectée.

III.5.2. Influence de l'air sur le mécanisme de collecte des poussières dans le première et deuxième étage :

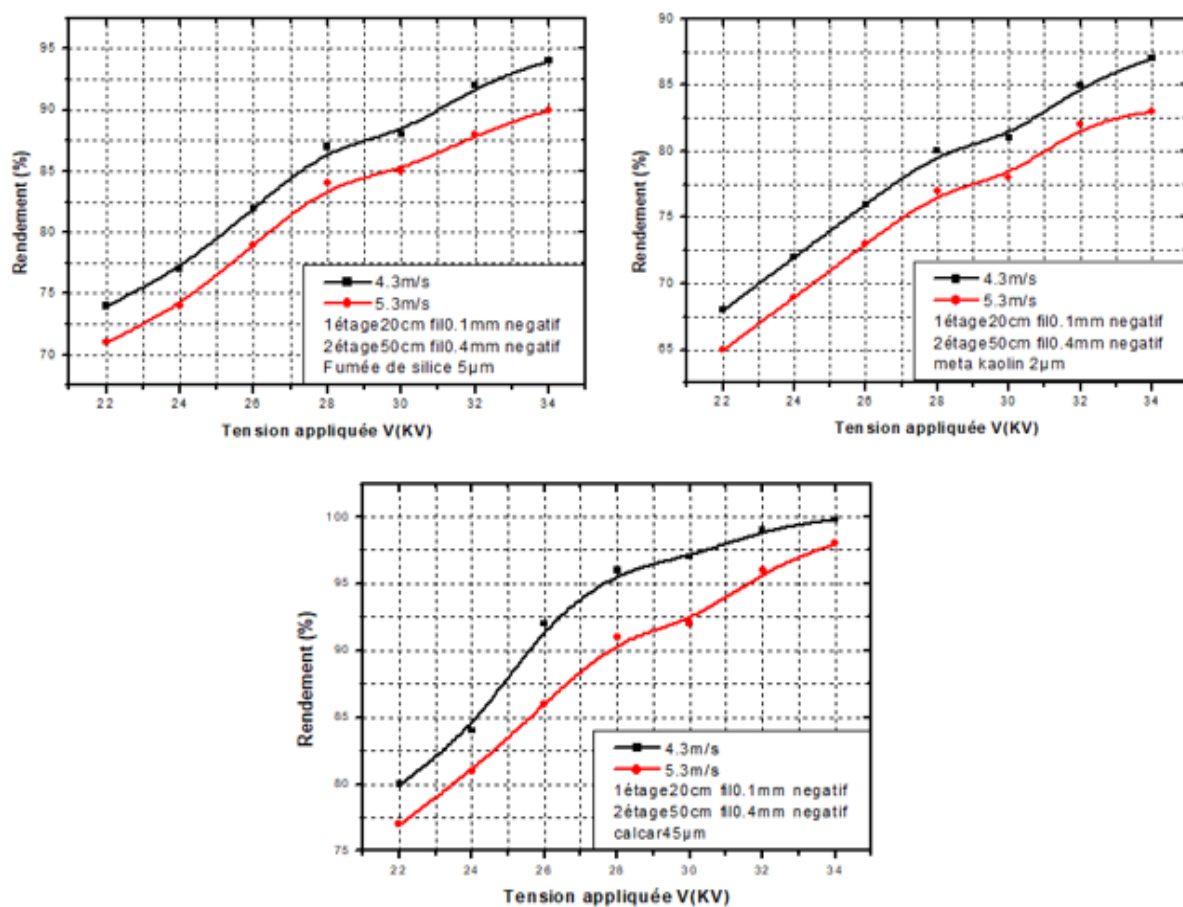


Figure. III.5 : l'évolution du rendement de collecte en fonction de la tension négative appliquée avec variation de vitesse.

Les courbes représentent l'évolution du rendement de collecte en fonction de la tension négative appliquée a été réalisée pour plusieurs échantillons de poussières présentant différentes tailles. Le premier étage a été équipé d'un fil corona de diamètre 0.1 mm, tandis que deuxième étage a été muni d'un fil corona de diamètre 0.4 mm.

Toutes les courbes présentent un comportement physique de précipitateur électrostatique (dépollueurs) : l'efficacité de collecte $\eta\%$ augmente et progressivement avec l'élévation de la tension électrique appliquée.

En comparant, on observe une diminution nette et globale de l'efficacité de collecte pour tous les types de poussières lors du passage à la vitesse d'écoulement supérieure.

L'augmentation de la vitesse de l'air de 4.3 à 5.3 m/s entraîne une élévation du débit volumique (Q), ce qui réduit directement le temps de séjour des particules de poussière à l'intérieur du champ électrique du précipitateur. Les particules traversent alors la zone active très rapidement, sans recevoir une quantité suffisante d'ions négatifs, ce qui conduit à un phénomène de sous-chargement des particules.

La vitesse élevée de l'écoulement engendre des turbulences hydrodynamiques générant d'importantes forces de traînée mécanique (forces de traînée), lesquelles s'opposent à la force d'attraction électrostatique. Dans certains cas, ces perturbations peuvent même provoquer le réentraînement des particules déjà déposées sur les parois collectrices (re-entraînement), entraînant ainsi une diminution du rendement global de collecte.

III.5.3. Influence de la géométrie des électrodes et de la polarité de la haute tension sur l'efficacité de collecte d'un ESP bi-étage :

Première étage (fil corona 0.1 mm) et deuxième étage (fil corona 0.4 mm)

Polarité négative – négative

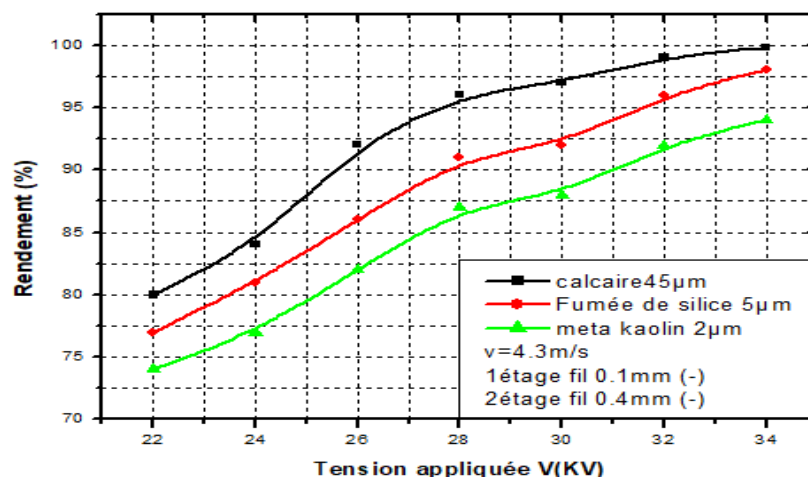


Figure. III.6 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

La figure montre que le rendement de collecte à l'intérieur du précipitateur électrostatique à deux étages augmente progressivement avec l'élévation de la tension appliquée, à vitesse d'écoulement d'air constante (4,2 m/s).

Le rendement débute à des valeurs moyennes (74%–80%) à 22kV, puis atteint des performances très élevées, proches de 100% pour les grosses particules et d'environ 94% pour les particules fines à 34kV.

L'utilisation de fils très fins (0.1mm) dans le premier étage génère une décharge corona particulièrement intense même à faibles tensions, en raison du très faible rayon de courbure qui concentre fortement le champ électrique.

Première étage (fil corona 0.4 mm) et deuxième étage (Tige filetée 10 mm)

Polarité négative – négative

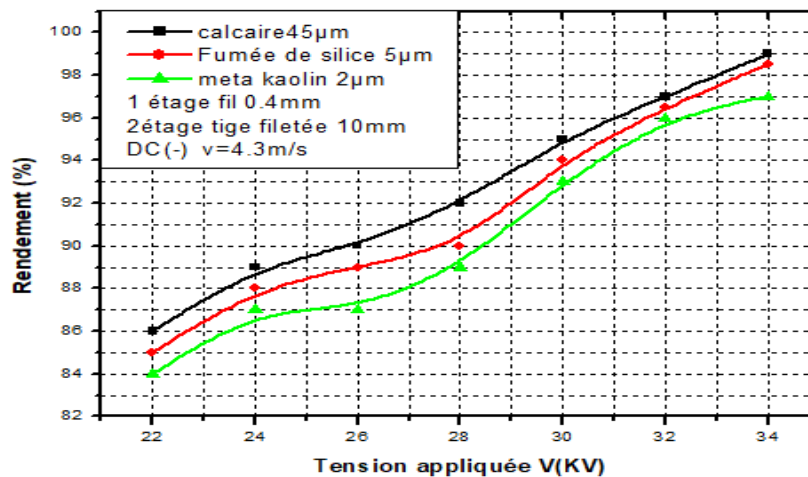


Figure. III.7 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

La courbe présente une évolution fluide et continue. Le rendement débute à 22kV avec des valeurs comprises entre 84% et 86%, puis atteint des niveaux très élevés à 34kV, compris entre 97% et 99%.

La tige filetée (Tige filetée) présente des aspérités et des irrégularités acérées qui agissent comme des points de concentration locale du champ électrique. Cette configuration assure la stabilité de la décharge corona le long de la surface de l'électrode, ce qui explique l'obtention de rendements élevés même pour les particules fines (2µm, atteignant environ 97%).

Première étage (lame scie) et deuxième étage (fil corona 0.4 mm)

Polarité négative – positive

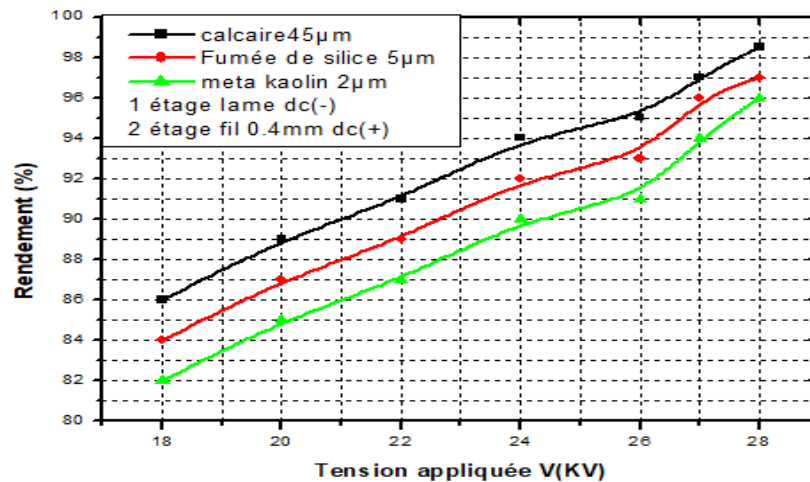


Figure. III.8 :Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Le système démarre à une faible tension (18kV). L'efficacité atteint, à la tension maximale de 28kV, des valeurs comprises entre 86% et 98.5%.

La polarité positive appliquée au deuxième étage limite la tension maximale atteignable avant l'apparition du claquage électrique, ce qui explique l'arrêt des courbes à 28kV. La décharge corona positive est généralement plus homogène, mais elle présente une capacité de production de charges inférieure à celle de la corona négative, ce qui influence directement la dynamique de chargement des particules et les performances globales du système.

Polarité négative – négative

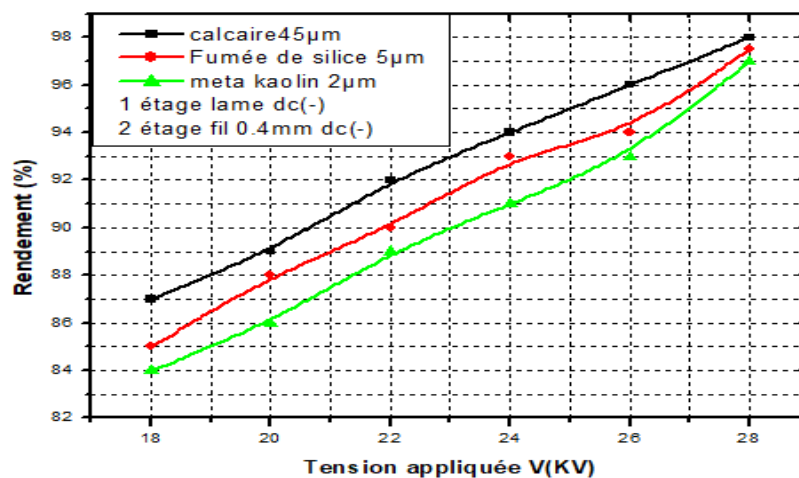


Figure. III.9 :Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

La plage expérimentale s'étend de 22kV à 32kV. Le rendement évolue de 84%–87% pour atteindre 97%–98% à la tension maximale appliquée.

Le passage du deuxième étage en polarité négative a permis d'augmenter la tension d'exploitation jusqu'à 32kV en toute sécurité. Cette configuration améliore nettement l'efficacité de collecte des particules fines, en comparaison avec la configuration à polarité mixte, en favorisant une génération d'ions plus intense et une meilleure stabilité du champ de décharge corona.

Première étage (lame scie) et deuxième étage (lame scie)

Polarité négative – positive

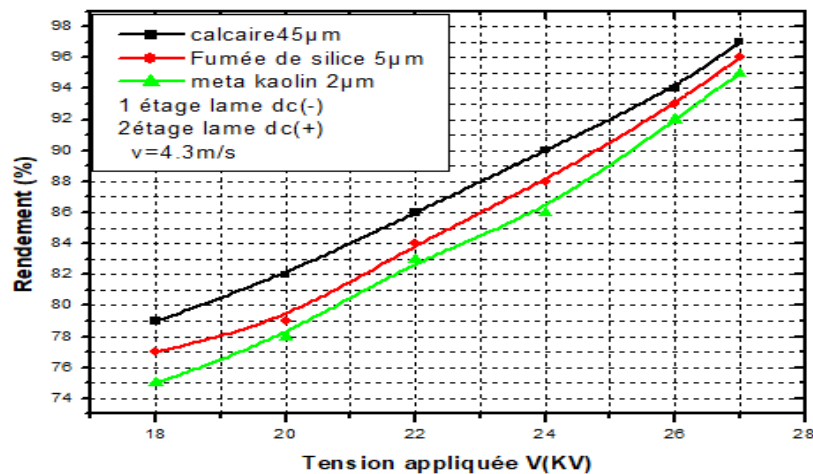


Figure. III.10 :Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

La plage de tension est relativement réduite (18kV–27kV). Le rendement débute à des valeurs faibles (75%–79%) et atteint 95%–97% à la tension maximale.

La configuration électrode-lame associée à une polarité positive au deuxième étage favorise l'apparition précoce du claquage électrique à des tensions relativement faibles (27kV). Cette limitation réduit la possibilité d'exploiter des tensions plus élevées, empêchant ainsi le système d'atteindre son efficacité maximale, notamment pour la collecte des particules fines.

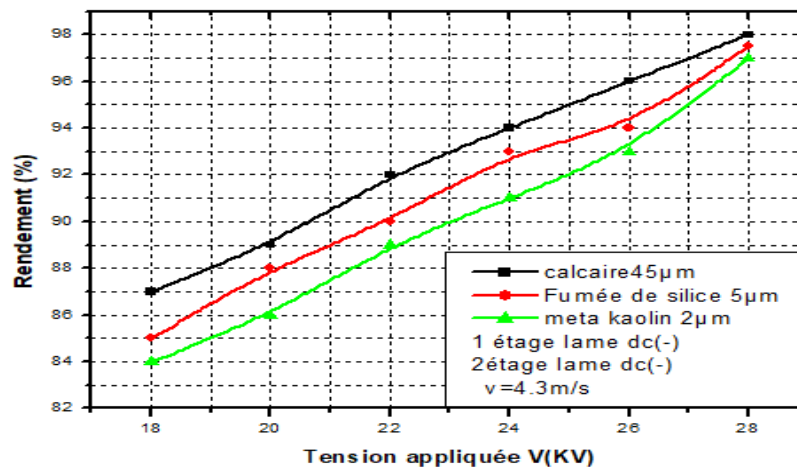
Polarité négative – négative

Figure. III.11 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Cette configuration enregistre le rendement de collecte global le plus faible. Celui-ci débute à des valeurs très réduites (65%–68%) à 18kV et n'excède pas 83%–85% à la tension maximale de 27kV.

La géométrie des lames larges ne permet pas une concentration suffisante du champ électrique, contrairement aux fils fins ou aux tiges à aspérités. Cette faible intensification du champ limite la formation des ions de décharge corona, ce qui réduit significativement l'efficacité globale du processus de charge et de collecte des particules.

Première étage (lame scie) et deuxième étage (Tige filetée 10 mm)

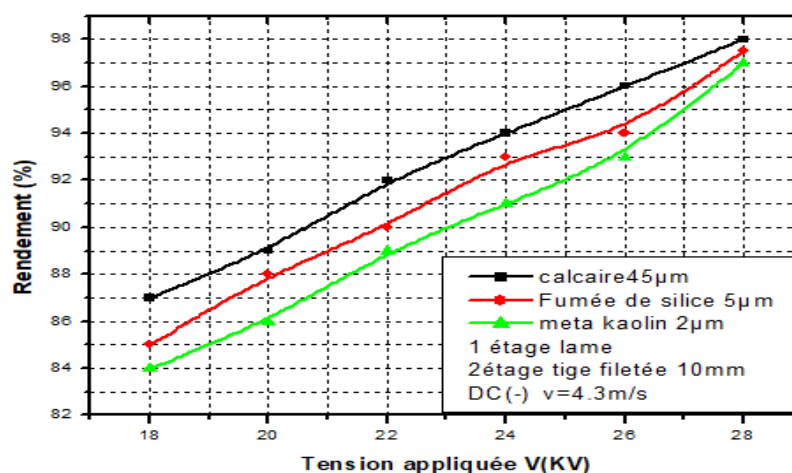
Polarité négative – négative

Figure. III.12 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Ce système présente un comportement très équilibré. Le rendement débute à 18kV avec des valeurs comprises entre 79% et 83%, puis atteint des performances élevées à 28kV, situées entre 95% et 97%.

Première et deuxième étages (fil 0.4 mm)

Négative - négative

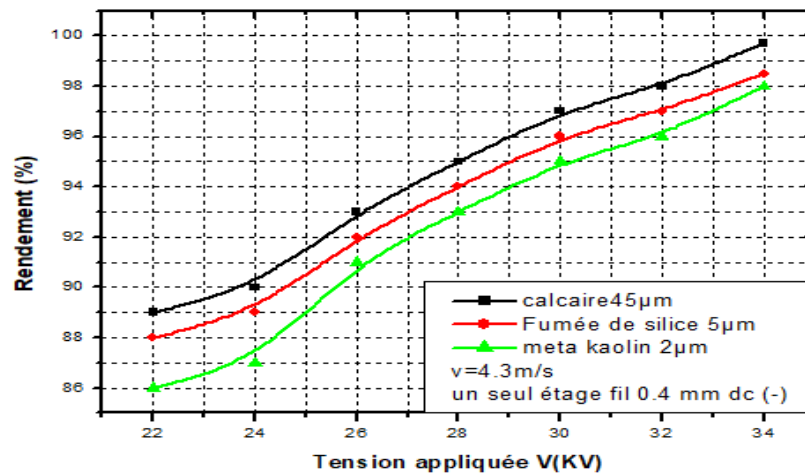


Figure. III13 :Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Les résultats montrent que l'efficacité du précipitateur électrostatique augmente avec la tension de 22 à 34kV, atteignant des valeurs proches de 100% à haute tension, tout en conservant le même classement des matériaux (calcite > silice > métakaolin). Cette amélioration est due au renforcement du champ électrique et de la décharge corona, ce qui augmente la charge des particules et leur migration. Les particules de grande taille sont collectées plus efficacement que les particules fines, en raison des différences de mécanismes de charge et de l'influence des perturbations aérodynamiques.

III.6 effet du diamètre de l'électrode du deuxième étage

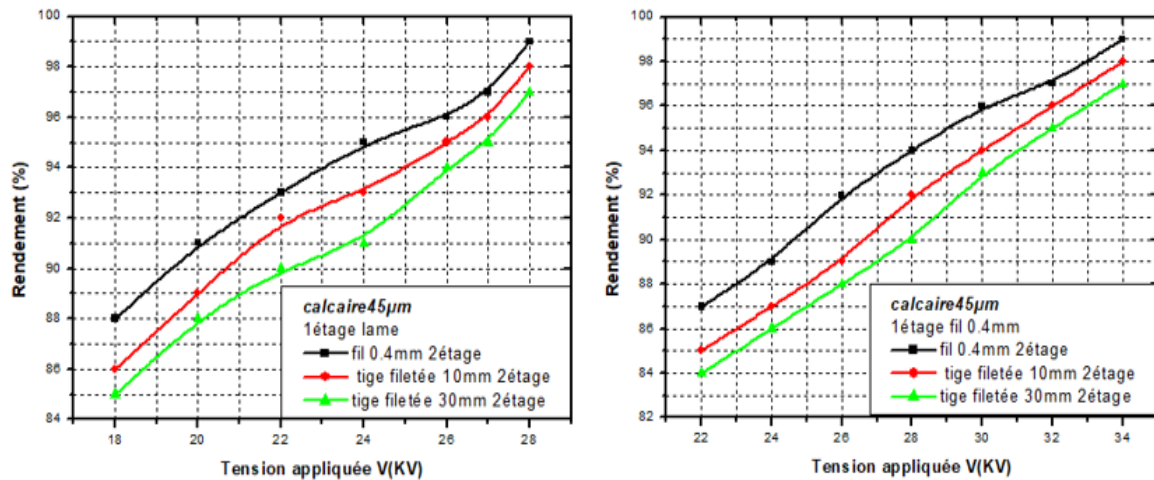


Figure. III.14 : Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.

Pour une comparaison précise de ces systèmes et l'identification de la configuration optimale, il convient de s'appuyer sur les considérations physiques suivantes :

Comparaison des géométries (fil vs lame vs tige filetée)

Les fils fins (Fil 0,1 mm et 0,4 mm) se distinguent par les rendements de collecte les plus élevés à haute tension (figures 6 et 7). Cela s'explique par le fait que l'intensité du champ électrique à la surface de l'électrode est inversement proportionnelle à son rayon. Ainsi, la forte courbure des fils favorise une ionisation intense et efficace.

Les tiges filetées (Tige filetée) présentent quant à elles une excellente stabilité et des performances élevées (figure 7). Leurs aspérités géométriques agissent comme des points locaux d'intensification du champ électrique, générant des micro-décharges corona continues. Ce mécanisme limite également les phénomènes de « blindage de poussière » de l'électrode, améliorant ainsi la stabilité du fonctionnement.

Les électrodes en lames (Lame) affichent des performances globalement plus faibles (figure 11), car leur géométrie étendue répartit le champ électrique au lieu de le concentrer. Cela nécessite des tensions plus élevées pour initier et maintenir l'ionisation efficace.

Comparaison de l'effet de la polarité :

Les configurations entièrement négatives (figures 6, 7 et 9) permettent d'atteindre des tensions de fonctionnement élevées (32kV–34kV) sans apparition prématurée de claquage

électrique. La décharge corona négative est caractérisée par la libération d'électrons à forte mobilité, ce qui améliore significativement le taux de charge des particules de poussière.

À l'inverse, les configurations positives ou mixtes (figures 9 et 10) imposent une limite inférieure de tension (27kV–28kV) en raison d'une plus grande sensibilité au claquage de l'air en régime positif. Bien que la corona positive soit plus homogène et génère moins d'ozone, son efficacité de collecte dans des conditions de flux d'air élevé (4.3m/s) reste inférieure, principalement à cause de l'impossibilité d'exploiter des tensions plus élevées.

III.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis d'analyser expérimentalement les performances d'un précipitateur électrostatique à deux étages en étudiant l'influence de la polarité, de la géométrie des électrodes et de la vitesse d'écoulement de l'air sur les caractéristiques électriques et l'efficacité de collecte. Les résultats obtenus montrent que la polarité négative offre les meilleures performances grâce à sa capacité à fonctionner sous des tensions élevées sans claquage précoce par rapport à la polarité positive, plus sensible aux décharges électriques.

L'étude montre que les fils fins (0,1 et 0,4 mm) offrent la meilleure efficacité de collecte grâce à la forte concentration du champ électrique, qui intensifie l'ionisation et amplifie ainsi la décharge couronne.

Les tiges filetées présentent une bonne stabilité électrique grâce à leurs aspérités favorisant la concentration locale du champ et réduisant l'accumulation de poussières. En revanche, les électrodes à lames, malgré une forte densité de courant, affichent une efficacité plus faible en raison de la dispersion du champ électrique.

L'augmentation de la vitesse de l'air de 3 à 4,2 m/s favorise le courant de décharge en réduisant l'effet de charge d'espace. En revanche, à des vitesses plus élevées (4,3 à 5,3 m/s), l'efficacité de collecte diminue à cause du temps de séjour plus court des particules dans le champ électrique, de l'augmentation des forces de traînée et du ré-entraînement des particules déposées.

Les résultats montrent que l'efficacité de collecte augmente avec la tension appliquée, atteignant des valeurs quasi optimales pour les grosses particules et de 94 à 97 % pour les particules fines. L'ordre de séparabilité reste constant (calcaire > silice > métakaolin), en lien avec la taille et le comportement des particules. L'étude conclut que la configuration optimale

est une polarité négative avec des fils fins ou des tiges filetées et une vitesse d'air modérée, assurant stabilité électrique et haute efficacité de séparation.

Conclusion Générale

Ce travail de recherche s'est articulé autour de l'étude et de l'évaluation des performances du système de précipitation électrostatique, en tant que technologie efficace et écoresponsable pour réduire les émissions de particules polluantes issues des activités industrielles. À travers le volet expérimental, nous avons pu analyser l'effet conjugué de la polarité électrique, de la configuration géométrique des électrodes et de la vitesse hydrodynamique de l'écoulement de l'air sur les caractéristiques électriques ainsi que sur l'efficacité de captage des particules.

Les résultats expérimentaux, soutenus par des discussions physiques approfondies, nous ont permis de dégager les conclusions fondamentales suivantes :

- ❖ La polarité négative offre une meilleure stabilité électrique au précipitateur électrostatique, car elle permet de fonctionner à des tensions plus élevées sans provoquer de claquage électrique prématuré. Cela est dû au rôle efficace des électrons dans le renforcement du courant ionique et le chargement plus efficace des particules, ce qui rend la performance du précipitateur plus efficiente par rapport à la polarité positive.
- ❖ La géométrie des électrodes influence directement l'efficacité du précipitateur électrostatique. Ainsi, les fils fins ont atteint l'efficacité la plus élevée grâce à leur forte concentration du champ électrique et à l'accentuation de l'ionisation. De même, les barres dentées ont affiché des performances stables et efficaces en raison de la présence de pointes qui agissent comme des zones de décharge continue. En revanche, les électrodes à lames plates ont enregistré une efficacité moindre, car elles distribuent le champ électrique au lieu de le concentrer.
- ❖ La vitesse de l'air influence de manière contradictoire les performances du précipitateur électrostatique. En effet, l'augmentation de la vitesse accroît le courant de décharge et améliore les conditions électriques en réduisant l'effet de charge d'espace. Cependant, à des valeurs élevées, elle entraîne une baisse de l'efficacité de captage en raison de la réduction du temps de séjour des particules au sein du champ électrique et de l'augmentation du risque de réenvol des particules déposées.
- ❖ Les résultats ont montré une efficacité de séparation élevée pour le précipitateur électrostatique, atteignant environ 100 % pour les grosses particules et 94 à 97 % pour les particules fines à des tensions élevées. De plus, l'ordre de séparabilité est resté constant en fonction des propriétés et de la taille des particules, le calcaire enregistrant l'efficacité la plus élevée, suivi de la silice, puis du méta-kaolin.

Sur la base de ces conclusions, nous déduisons que la configuration optimale du précipitateur électrostatique consiste à appliquer une polarité négative en utilisant des électrodes à fils fins ou à barres dentées, tout en maintenant une vitesse de flux d'air modérée. Cette combinaison garantit un équilibre idéal entre la stabilité électrique du système et une efficacité élevée de séparation des particules polluantes.

Par ailleurs, ce travail ouvre d'intéressantes perspectives de recherche, notamment à travers l'intégration de systèmes d'asservissement automatique et de capteurs intelligents, la modélisation numérique approfondie du champ électrique, ainsi que l'exploration de nouveaux matériaux visant à optimiser la durabilité et la compacité du dis

Bibliographie

- [1] J.I. Davidson, R.F. Phalen, P.A. Solomon, « Airborne particulate matter and human health » : à review, *Aerosol Sci. Technol.* 39 (8) (2005) 737–749.
- [2] C. Zheng, X. Zhang, Z. Yang, C. Liang, Y. Guo, W. Yi, G. Xiang, « Numerical simulation of corona discharge and particle transport behavior with the particle space charge effect », *J. Aerosol Sci.* 118 (2018) 22–33.
- [3] M. Ni, G. Yang, S. Wang, X. Wang, X. Gang, C. Zheng, G. Xiang, Z. Luo, K. Cen, « Experimental investigation on the characteristics of ash layers in a high temperature wire-cylinder electrostatic precipitator », *Sep. Purif. Technol.* 159 (2016) 135–146
- [4] KADOUS Nezha, "Modélisation numérique et expérimentale de la précipitation électrostatique des particules de fumée de taille micronique" Thèse de Doctorat Es-Sciences en Électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, janvier 2022.
- [5] BERRACHED Djelloul, "Contribution à l'étude des précipitateurs électrostatiques de poussière. Réalisation d'un prototype de laboratoire" Thèse de Doctorat Es-Sciences en Électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, avril 2017.
- [6] H. J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation", Wesley Publishing Company, Inc, 1963.
- [7] K. R. Parker, "Electrostatic precipitation", Chapman & Hall, 1997.
- [8] J.S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley, "Handbook of Electrostatic Processes" Marcel Dekker, New York, 1995.
- [9] KHIM, K.D., MITCHNER M. & SELF S.A. Comparison of wire-plate and plate-plate electrostatic precipitators in turbulent flow. *Journal of electrostatics*, 19, pp. 21-32, 1987.
- [10] J. Electrostatics, 67, 37-47. Dumitran L. M. (2001) Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- [11] D. Blanchard, P. Atten, et L.-M. Dumitran, « Correlation between current density and layer structure for fine particle deposition in a laboratory electrostatic precipitator », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no 3, p. 832-839, mai 2002.
- [12] B. Navarrete, L. F. Vilches, M. Rodriguez-Galan, B. Alonso-Fariñas, et L. Cañadas, « A pilot scale study of the rapping re-entrainment and fouling in electrostatic precipitation », *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 34, no 1, p. 7-14, janv. 2015.
- [13] SELF.S.A., MITCHNER M., KHIM K.D., CHOI D.H., LEACH R. – Effect of turbulence on precipitator performance – Presented at second International Conference on Electrostatic Precipitation, Kyoto, Japan, Nov. 1984.
- [14] J.-B. Lee, J.-H. Hwang, et G.-N. Bae, « Soot Particle Re-entrainment in a Corona Discharge Reactor », *JSME Int. J. Ser. B*, vol. 43, no 4, p. 602-607, 2000.

- [15] D. Blanchard, P. Atten, et L.-M. Dumitran, « Correlation between current density and layer structure for fine particle deposition in a laboratory electrostatic precipitator », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no 3, p. 832-839, mai 2002.
- [16] OPTISEPT, « Le filtrage électrostatique, principe de fonctionnement, ses avantages », Domaine de la Chesnaye 77123 NOISY SUR ECOLE.
- [17] G. ZHONGYI, A. ROBERT & J. SCHILL, « Nouvel quasi-electrostatic air filter: a single – particule study », Journal of Electrostatic vol. 39, pp, 203-230, 1997.
- [18] PAUTHENIER M.M., MOREAU M., HANOT – La charge des particules spheriques dans un champ ionise – Journal de physique et radium, 3, 590-613, 1932.
- [19] GOLDMAN M., GOLDMAN A. – Corona discharges – Gaseous electronic, Merles, Hirsh, N. & Oskam, H.J., Academic Press, chapter 4, 1978.
- [20] Gooch J. P. & Francis N. L. (1975) A theoretically based mathematical model for calculation of electrostatic precipitator performance. Journal of The Air Pollution Control ASS., 25 (2), 108 – 113.
- [21] F.G. Cottrell, Art of separating suspended particles from gaseous bodies, 1908, US 895729 A.
- [22] F. Paschen, “Sur la différence de potentiel nécessaire à la formation d’arc électrique dans de l’air, de l’hydrogène et du gaz carbonique sous différentes pressions (Traduction de : Über die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff and Kohlensäure bei verschiedenen Drücken erforderliche Potentialdifferenz)”, Wied. Annales de physique, Vol. 37, pp. 69–96. 1889.
- [23] James H. Turner, Phil A. Lawless, Toshiaki Yamamoto, David W. Coy, 68 pages, September 1999.
- [24] Rezzoug M, Tilmatine A, Gouri R, Medles K, Dascalescu L « Experimental modeling of high-voltage corona discharge using design of experiments ». Front. Electr. Electron. Eng, 2(2): 139-143. China 2007.
- [25] SAAD Djedjiga « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques » Thèse : de magister en Electrotechnique, Option : Machines électriques. L’ Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 21 décembre 2011.
- [26] Brahim. Benamar « La faisabilité de l’électrofiltration d’une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique ». Thèse de doctorat de l’université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.

- [27] Hailong PANG « dépolluissage électrostatique pour les particules submicronique en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète mars) ». thèse de doctorat l'université, JOSEPH FOURIER 18 Décembre 2006.
- [28] Flavien. Koliatene «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.
- [29] A. C. Mermigkas, I. V. Timoshkin, S. J. MacGregor, M. J. Given, M. P. Wilson, et T. Wang, « Removal of Fine and Ultrafine Particles From Air by Microelectrostatic Precipitation », IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no 10, p. 2842-2850, oct. 2013.
- [30] A. Bensenoussi and I. Amri, "Conception et réalisation expérimental d'un nouveau dispositif de filtration électrostatique a deux étages," Master thesis, Dept. Electrotechnique, Université d'Ain Temouchent - Belhadj Bouchaib, Algeria, 2025.
- [31] R. Cochet, "Loi de charge des fines particules (submicroniques)", in Colloque International N°102 : La physique des forces électrostatiques et leurs applications, C.N.R.S., Paris, Paris, pp. 331–338, 1961.
- [32] Spellman High Voltage Electronics Corp., "SL Series: 30W through 300W High Voltage Power Supply Datasheet," Spellman High Voltage Electronics Corporation, Hauppauge, NY, USA. [Online]. Available: <https://www.spellmanhv.com>
- [33] kern-sohn.com/z-cb-fr-kp.
- [34] Tinkercad.com/Autodesk .
- [35] B. L. Henson, « A space-charge region model for microscopic steady coronas from points », J. Appl. Phys. 52, pp, 709–15, 1981.
- [36] Y. Zebboudj, G. Hartmann, « Current and electric field measurements in coaxial system during the positive DC corona in humid air », Eur. Phys. J. AP 7, pp, 167-176, 1999.
- [37] Abidjan Deal.net/aspirateurs/souffleur-electrique.
- [38] photo prise au sein du laboratoire.
- [39] PARKER K.R., Electrostatic precipitation, Chapman & hall, 1997, pp. 1-24.
- [40] CHAN-YEUNG, M. et MALO, J.-L. – Tables of major inducers of occupational asthma. – Chap. 35. In : Bernstein, D. et al., Asthma in the workplace. 2nd ed. New York : Marcel Dekker, pp. 683-720. 1999.

[41] COCHET R. – Lois de charges des fines particules (submicroniques) – La physique des forces électrostatiques et leurs applications, Edition CNRS, pp. 331–338, 1961.