

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'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Électrotechnique Filière : Électrotechnique Spécialité : Commande Électrique

Thème

conception et réalisation expérimental d'un nouveau dispositif de filtration électrostatique a deux étages

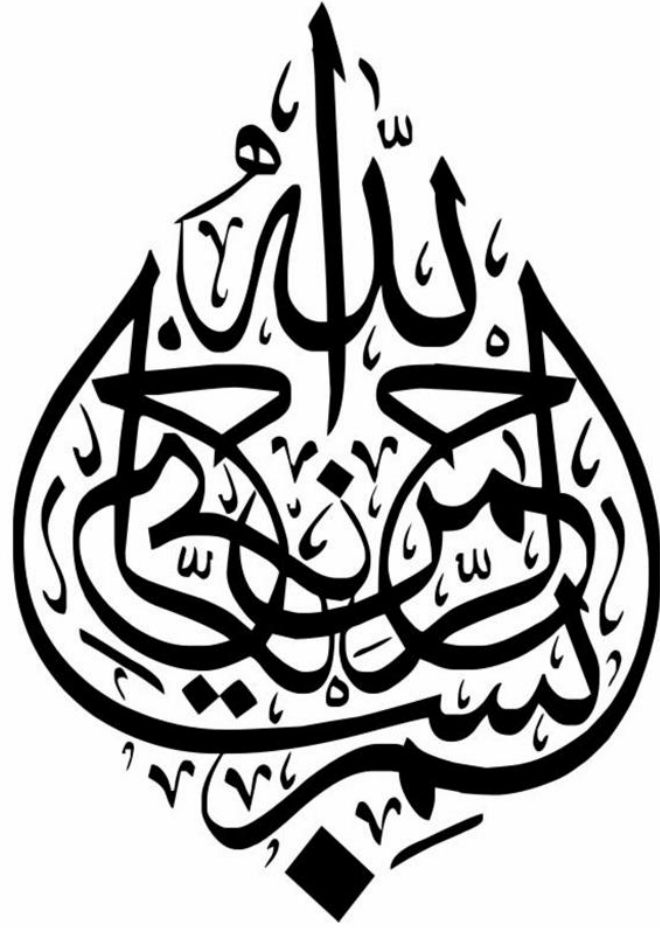
Présenté par :

- 1) Mr. BENSENOUSSI Abderrahmane
- 2) Melle. AMRI Ikram

Devant le jury :

YOUNES Mohamed	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
AISSOU Masinissa	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
AOUIMEUR Djillali	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année Universitaire 2024/2025



Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu tout puissant de m'avoir donnée le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

*Je tiens vivement à remercier mon encadrant **Mr Aouimer Djilali**. A travers ces lignes, je lui exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude de m'avoir toujours poussée à aller de l'avant, pour sa gentillesse, son soutien, ses conseils et orientations.*

Je tiens également à remercier infiniment au membre de jury, le président Pr Mohamed Younes ; aussi l'examineur Mr Aisso massinissa

*J'adresse aussi mes remerciements à mon binôme, **Bensenoussi Abderrahmane** qui a été impliqué avec moi dans ce mémoire.*

Ma gratitude va aussi à mes collègues de l'université Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent.

Mes derniers remerciements s'adressent aux membres de ma famille qui ont été présent avec moi tout au long de ce mémoire, je pense particulièrement à mes parents, mes sœurs, mon frère. J'espère l'honorer avec ce travail.

*Je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont, de près ou de loin, aidé à
rendre ce travail possible, que ce soit par des idées ou par des
encouragements.*

Merci à tous

AMRI Ikram

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

À mes très chers parents,

Pour votre amour inconditionnel et vos innombrables sacrifices,

Pour avoir cru en moi et m'avoir donné les ailes pour voler vers mes rêves,

Pour chaque prière, chaque encouragement, et chaque moment de soutien.

À mon frère Mohammed,

Pour ta présence réconfortante et ton soutien fraternel,

Pour tous ces moments de complicité qui ont égayé mon parcours,

Pour être le meilleur des frères qu'on puisse avoir.

À ma grande sœur Wafaa et son conjoint,

Pour votre bienveillance et vos précieux conseils,

Pour m'avoir montré le chemin et inspiré par votre exemple,

Pour votre soutien constant dans tous mes projets.

À ma petite sœur Ferial,

Pour ta joie de vivre contagieuse et ton enthousiasme,

Pour avoir été ma source de motivation et de sourires,

Pour tous ces moments de bonheur partagés ensemble.

À mon cher oncle Boucif,

Pour votre sagesse et vos conseils précieux,

Pour avoir toujours cru en mon potentiel,

Pour votre soutien et votre bienveillance constants.

À ma meilleure amie Aicha,

Pour ton amitié sincère et précieuse, Pour tous ces moments de joie, de rires et de confidences partagés, Pour avoir été présente dans les moments les plus importants de ce parcours.

À toute la famille AMRI et MOKRANE

À ma petite famille, mon plus grand trésor,

Pour avoir fait de moi la personne que je suis aujourd'hui,

Pour votre amour, votre patience et votre compréhension,

Ce mémoire vous est dédié avec tout mon amour et ma reconnaissance.

Avec ma plus profonde gratitude et mon amour éternel.

AMRI Ikram

Remerciement

Remerciement à Dieu-le tout puissant, qui nous donne la force, la patience et qui éclaire pour la réalisation de ce modeste travail.

*Je souhaite tout d'abord adresser mes sincères remerciements à mon encadrant, **Mr Aouimer Djilali** .pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de ce travail de recherche. Sa rigueur scientifique et son expertise ont été déterminantes dans l'aboutissement de ce projet.*

Je remercie également l'ensemble des membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer ce travail.

*Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à **Ikram Amri**, mon binôme tout au long de ce projet. Notre collaboration a été non seulement enrichissante professionnellement, mais elle a aussi donné naissance à une véritable amitié. Sa complémentarité, son soutien constant et son engagement ont été essentiels dans l'accomplissement de ce travail.*

Je souhaite exprimer ma plus profonde gratitude envers ma famille. À mes parents, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu inconditionnellement dans mes choix.

Leur amour, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible ont été ma plus grande source de motivation. À mes sœurs, pour leurs encouragements constants et leur présence réconfortante.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes amis pour leur soutien précieux lors de ma mémoire. Leur présence, leurs encouragements pour moi m'ont aidé à affronter cette étape importante avec sérénité. Leur soutien inconditionnel a été un véritable moteur dans la réussite de cet exercice académique. Merci infiniment pour votre soutien indéfectible et pour avoir été à mes côtés dans ces moments décisifs. Je suis reconnaissant(e) de vous avoir comme amis.

Bensenoussi Abderrahmane

Dédicace

Je dédie ce travail

Je consacre cette diplôme à ceux qui m'ont appris à être donné et à ceux qui ont fièrement leur nom, et j'espère que dieu prolongera votre vie jusqu'à ce que vous voyiez tamar

Il est temps de gagner après une longue attente, Mon cher père"

Et à mon ange de la vie, au sens de l'amour, de l'affection et de la sincérité, au sourire de la vie et au secret de l'existence, et à la supplication duquel était le secret de mon succès, mon cher amour, ma mère bien-aimée."

Et pour ceux qui ont un grand avantage dans mes encouragements et ma motivation, et qui ont appris leur persévérance et leur diligence, à ceux qui ont gagné en présence la vie mes sœurs"

Et pour ceux qui aimaient son frère et distinguaient la loyauté et le don, et pour ceux qui les ont accompagnés sur les chemins de la vie heureuse triste, et pour ceux qui étaient avec moi sur le chemin du succès et de la bonté, chers amis"

Bensenoussi Abderrahmane

Sommaire:

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

Chapitre 1: généralités sur les précipitateurs électrostatiques

I.1 Introduction.....	3
I.2 Filtration des particules en suspension.....	3
I.3 Précipitation électrostatique des particules	4
I.3.1 Principe de fonctionnement.....	4
I.3.2 Bilan des forces sur une particule.....	6
I.3.2.1 Force de coulomb.....	6
I.3.2.2 Force de traînée.....	6
I.3.3 mécanisme de charge des particules.....	8
I.3.3.1 charge naturelle par attachement.....	8
I.3.3.2 Triboélectrisation.....	8
I.3.3.3 Charge par charge d'espace ionique.....	9
a. Charge par champ.....	9
b. Charge par diffusion.....	11
c. Charge mixte.....	11
I.3.3.4 Autre modèles de charge.....	12
I.3.4 Vitesse de migration des particules chargées.....	13
I.3.5 Efficacité de collecte.....	16
I.3.6 Types d'électrofiltres.....	17
I.3.6.1 Electrofiltres à un seul étage.....	17
I.3.6.2 Electrofiltres à deux étages.....	18
I.3.6.3 Electrofiltres humides.....	19
I.3.7 Modèles du fonctionnement d'un électrofiltre.....	19
I.3.7.1 Modèle laminaire.....	19
I.3.7.2 Modèle de Deutsch.....	20
I.3.7.3 Autres modèles.....	22
I.4 Conclusion.....	23

Chapitre II: Matériel et technique de mesure

<u>II.1</u> Introduction.....	25
II.2 Dispositif expérimental de précipitateur électrostatique.....	25
II.2.1 Description de la partie d'admission de la poudre.....	26
II.2.2 Dispositif de filtration.....	28
II.2.3 Matériaux utilisés.....	29
a) Générateur haute tension.....	29
b) Micro-Ampèremètre.....	30
c) Thermo-hygromètre numérique.....	30
d) Anémomètre thermique à hélice.....	30

e) Balance de laboratoire électronique.....	31
f) Auto-transformateur.....	31
II.3 Protocole expérimentale.....	31
II.4 Conclusion.....	33
<u>Chapitre III : Etude expérimentale et analyse des performances</u>	
III. 1 INTRODUCTION.....	34
III.2 RÉSULTAT ET DISCUSSION.....	34
III.2.1 Caractéristique électrique.....	34
a) Premier étage.....	34
b) Deuxième étage.....	36
III.2.2 L'efficacité de collecte.....	38
a) Efficacité globale de collecte.....	38
b) Efficacité de collecte par étage.....	39
c) Influence de l'alimentation haute tension sur l'efficacité de collecte.....	40
d) Impact du diamètre des particules sur l'efficacité de collecte.....	41
III.3 CONCLUSION.....	43
<u>CONCLUSION GENERALE.et PERSPECTIVE</u>	
CONCLUSION GENERALE.et PERSPECTIVE.....	45
REFERENCE.....	47

Liste de figure:

Figure I.1 : Exemples de dispositifs industriels de filtration de l'air [13].....	4
Figure I.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique [17].....	5
Figure I.3 : Variations du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules ($\lambda_g = 66,1 \text{ n}$).....	8
Figure I.4 : Lignes de champ en direction de la surface d'une particule isolante soumise à un champ électrique uniforme [28].....	10
Figure I.5 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules ($T=293\text{K}$, $\lambda_g=66.1 \text{ nm}$, $\epsilon_r=4$).....	12
Figure I.6 : Schéma explicatif du mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles.....	13
Figure I.7 : Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules ($T=150^\circ\text{C}$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$).....	14
Figure I.8 : 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 $\epsilon_r \rightarrow \infty$, cas des particules conductrices).....	15
Figure I.9 : Variations de la vitesse de migration théorique w_{th} en fonction de la taille des particules ($T = 150^\circ\text{C}$, $\lambda_g= 0,101 \mu\text{m}$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$).....	16
Figure I.10 : Schéma simplifié d'un électrofiltre à un seul étage.....	18
Figure I.11 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique à deux étages.....	19
Figure I.12 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique humide [51].....	19
Figure I.13 : Illustration schématique du modèle laminaire.....	20
Figure I.14 : Modèle de Deutsch : schéma des couches laminaires et bilan massique de particules sur une longueur dx	21
Figure I.15 : Effets du coefficient de diffusivité turbulente D_t sur l'efficacité fractionnaire pour un précipitateur électrostatique [16].....	23
Figure II.1: Schéma de principe du dispositif expérimental.....	26
Figure II.2 : Photographie des microparticules de fumé de silice utilisé.....	27
Figure II.3: Évolution de la géométrie du premier étage d'ionisation : (a) un seul fil central ; (b) cinq fils, avec un fil central et quatre périphériques.....	28
Figure II.4 : Deuxième étage : système coaxial tubulaire pour la collecte des particules.....	29

Figure II.5 : photographie de source de haute tension SPELLMAN.....	29
Figure II.6 : photographie de micro Ampèremètre.....	30
Figure II.7 : photographie de thermo-hygromètre.....	30
Figure II.8 : photographie d'Anémomètre à hélice.....	31
Figure II.9 : Balance de laboratoire électronique.....	31
Figure II.10 : Balance de laboratoire électronique.....	32
Figure III.1: Évolution du courant de décharge en fonction de la tension appliquée (polarité négative) pour différentes configurations du fil corona.....	35
Figure III.2: Évolution du courant de décharge en fonction de la tension appliquée (polarité positive) pour différentes configurations du fil corona.....	36
Figure III.3: Évolution du courant de décharge en fonction de la tension appliquée pour deuxième étage.....	37
Figure III.4: Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.....	38
Figure III.5: Evolution de l'efficacité de collecte de l'ESP en fonction de la tension appliquée en premier étage et deuxième étage pour fil corona de diamètre 0.1mm et 0.3mm.....	39
Figure III.6: Evolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée.....	41
Figure III.7: Evolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée pour de fraction de diamètre de particules (40–63 μm et 63–80 μm).....	42
Figure III.8: Evolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée pour de fraction de diamètre de particules (40–63 μm et 63–80 μm).....	43

Introduction générale:

Introduction générale

Ces dernières années, la pollution atmosphérique due aux particules fines (PM) est devenue une préoccupation majeure en raison de ses impacts nocifs sur la santé humaine et l'environnement, exacerbée par le développement intensif des activités industrielles [1,2]. Parmi les technologies de traitement des émissions particulières, les précipitateurs électrostatiques (PES) figurent parmi les plus utilisés grâce à leur efficacité élevée en collecte massique, leur faible consommation énergétique, leur adaptabilité à différents débits d'air et leur coût d'entretien relativement bas [3].

Le précipitateur électrostatique à deux étages repose sur la séparation fonctionnelle de l'ionisation et de la collecte des particules. Contrairement aux PES à un étage, où les deux processus se produisent simultanément dans la même zone, cette configuration permet d'optimiser chaque fonction indépendamment. Le premier étage est dédié à l'ionisation des particules par décharge couronne, tandis que le second étage assure leur collecte sous l'effet d'un champ électrique sans génération d'ions supplémentaires. Cette séparation permet une meilleure maîtrise du processus de chargement, une réduction des pertes par recombinaison, et une amélioration de l'efficacité de collecte, notamment pour les particules submicroniques [4].

Au fil du temps, de nombreuses modifications géométriques et électriques ont permis d'adapter le précipitateur à deux étages à diverses applications industrielles, notamment dans les domaines de la filtration d'air, du traitement des fumées industrielles ou encore de la purification des flux gazeux [5–8].

Dans ce contexte, le présent travail propose une approche expérimentale visant à optimiser le processus d'ionisation tout en évitant la collecte des particules dans la zone d'ionisation. L'étude se concentre principalement sur l'effet du diamètre du fil corona dans un système fil-cylindre sur la densité de charge générée et l'efficacité de la collecte globale. Par ailleurs, différentes configurations d'alimentation électrique sont évaluées, incluant l'utilisation d'un seul générateur de haute tension pour alimenter les deux étages, afin de simplifier le système, réduire la consommation énergétique, limiter la production d'ozone et maintenir une performance de précipitation optimale. Cette approche vise à proposer une solution compacte, performante et économe en énergie pour des applications industrielles ou environnementales.

Le présent manuscrit est organisé en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur la précipitation électrostatique, considérée comme une technique efficace de dépollution de l'air. Ce chapitre aborde les principales sources de pollution particulaire ainsi que les différentes méthodes de

traitement de l'air, avant de se focaliser sur les principes de la précipitation électrostatique. Les processus mis en jeu avant, pendant et après la collecte électrostatique des particules y sont détaillés, en mettant en évidence les mécanismes de génération de charge et les interactions particules-champ électrique.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental, des composants utilisés et des protocoles de mesure mis en œuvre. Deux configurations géométriques du premier étage d'ionisation y sont examinées : une première configuration à cinq fils corona parallèles, et une seconde configuration à un seul fil corona, dont le diamètre est progressivement augmenté.

Enfin, le troisième chapitre est dédié à l'étude expérimentale du comportement électrique et du rendement massique du précipitateur électrostatique à deux étages, en fonction de différentes géométries et modalités d'alimentation. Deux modes d'alimentation sont comparés : un système à un seul générateur de haute tension négative connecté en série aux deux étages, et un système à deux générateurs indépendants (négatif pour l'ionisation et positif pour la collecte). Les essais sont réalisés avec deux fractions granulométriques de poudre de fumée de silice, comprises respectivement entre 40 μm et 63 μm , et entre 63 μm et 80 μm , afin d'évaluer l'influence de la taille des particules sur l'efficacité globale du système.

Nous terminons la mémoire avec des conclusions et quelques perspectives.

Chapitre I :

**Généralités sur les précipitateurs
électrostatiques**

I.1 Introduction

Dans le premier chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique sur la précipitation électrostatique comme un outil de dépollution de l'air et les applications des décharges pour la charge et la collecte des particules, en prenant soin de rappeler les vecteurs de pollution et les techniques de dépollution de l'air, avant d'aborder dans le détail ce qu'englobe la précipitation électrostatique en passant en revue les processus intervenant en amont, pendant et en aval du phénomène.

I.2 Filtration des particules en suspension

Les particules en suspension dans l'air, ou aérosols, sont constituées de substances solides et/ou liquides, présentant une vitesse de chute le plus souvent négligeable. La présence de particules en suspension dans l'air est principalement due à la pollution atmosphérique.

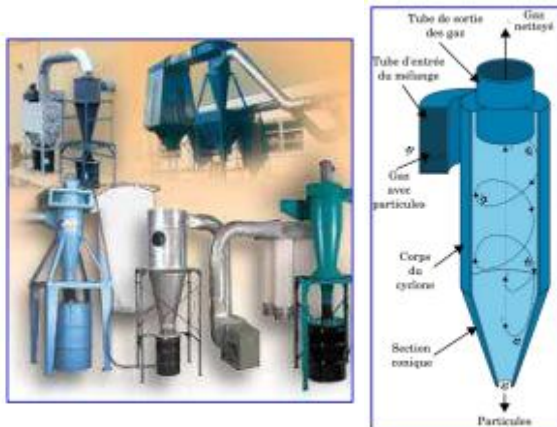
La pollution atmosphérique est due au fait que l'homme introduit, directement ou indirectement, dans l'atmosphère et les espaces clos, des substances ayant des conséquences préjudiciables de nature à mettre en danger la santé humaine, à nuire aux ressources biologiques et aux écosystèmes, à influencer sur les changements climatiques, à détériorer les biens matériels et à provoquer des nuisances olfactives excessives [9].

On distingue ainsi selon la taille des particules en métrologie : les « PM₁₀ » (Particulate Matter), les « PM_{2.5} », les « PM₁ » ou les « PM_{0.1} ». Les PM₁₀ sont des particules dont le diamètre moyen est inférieur à 10 µm. Alors que les PM_{2.5}, PM₁ et PM_{0.1} sont respectivement des particules dont le diamètre n'excèdent pas 2.5 µm (appelées particules fines), 1 µm (particules très fines) et 0.1 µm (particules ultrafines ou nanoparticules). Il est important de noter que les particules d'un diamètre aérodynamique supérieur à 10 µm sont retenues par les voies aériennes supérieures (nez, bouche). Les PM₁₀ sont des particules dites « respirables » et incluent les particules fines, très fines puis ultrafines et elles peuvent donc pénétrer dans les bronches. Les PM_{2.5} incluent les particules très fines et ultrafines et pénètrent dans les alvéoles pulmonaires. Et enfin, les PM₁ incluent les particules ultrafines et peuvent passer la barrière alvéolo-capillaire [10-12].

Les particules ou poussières ne constituent pas un polluant ordinaire. Alors que pour toutes les autres substances, il suffit de mesurer le poids des émissions pour avoir une idée exacte sur la façon dont évolue la qualité de l'air, pour les particules le problème est plus complexe. En effet, leur toxicité n'est pas directement liée à leur poids. Au contraire, les particules les plus fines sont généralement considérées comme les plus dangereuses en raison de la difficulté à les piéger par des filtres, de leur capacité à pénétrer plus profondément dans l'appareil respiratoire et de leur plus long temps de suspension dans l'air.

De nombreuses techniques de filtration de l'air destinées à répondre au problème croissant de la pollution atmosphérique ont été mises au point, notamment pour le secteur industriel. On regroupe les dispositifs qui les utilisent en quatre catégories (Figure I.1) :

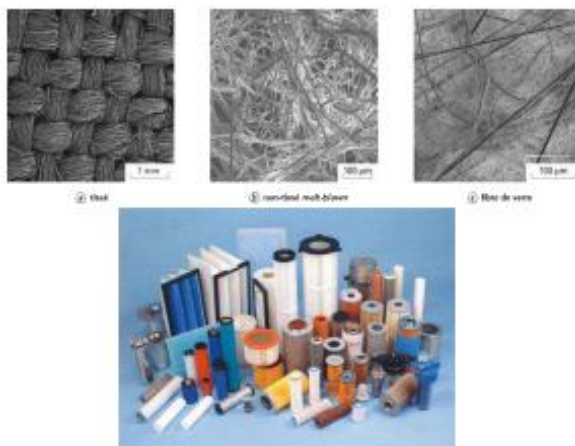
- les filtres mécaniques
- les filtres hydrauliques
- les filtres à couche filtrante
- les filtres électriques ou électrofiltres



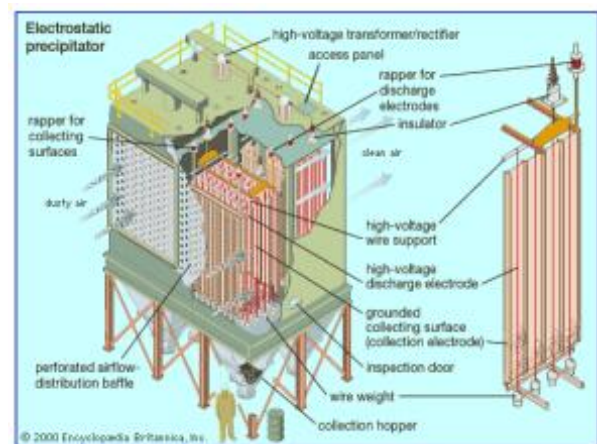
(a) filtres mécaniques



(b) filtres hydrauliques



(b) filtres à couche filtrante



(b) filtres électriques ou électrofiltres

Figure I.1 : Exemples de dispositifs industriels de filtration de l'air [13]

I.3 Précipitation électrostatique des particules

I.3.1 Principe de fonctionnement

Le filtre électrostatique est un dispositif dans lequel les forces électrostatiques piègent les particules contenues dans un gaz. Il est constitué d'un ensemble d'électrodes actives et d'électrodes de collecte et peut être de géométrie plane ou cylindrique. La décharge générée au sein de ce dispositif, souvent maintenue à un fort potentiel négatif, produit des ions, par attachement des électrons libres aux molécules du gaz. Lors de collisions de ces ions avec des particules, ces dernières se chargent, puis elles se dirigent vers les électrodes de collecte suivant la direction de champ électrique. Ce processus est appelé la précipitation électrostatique [14-16].

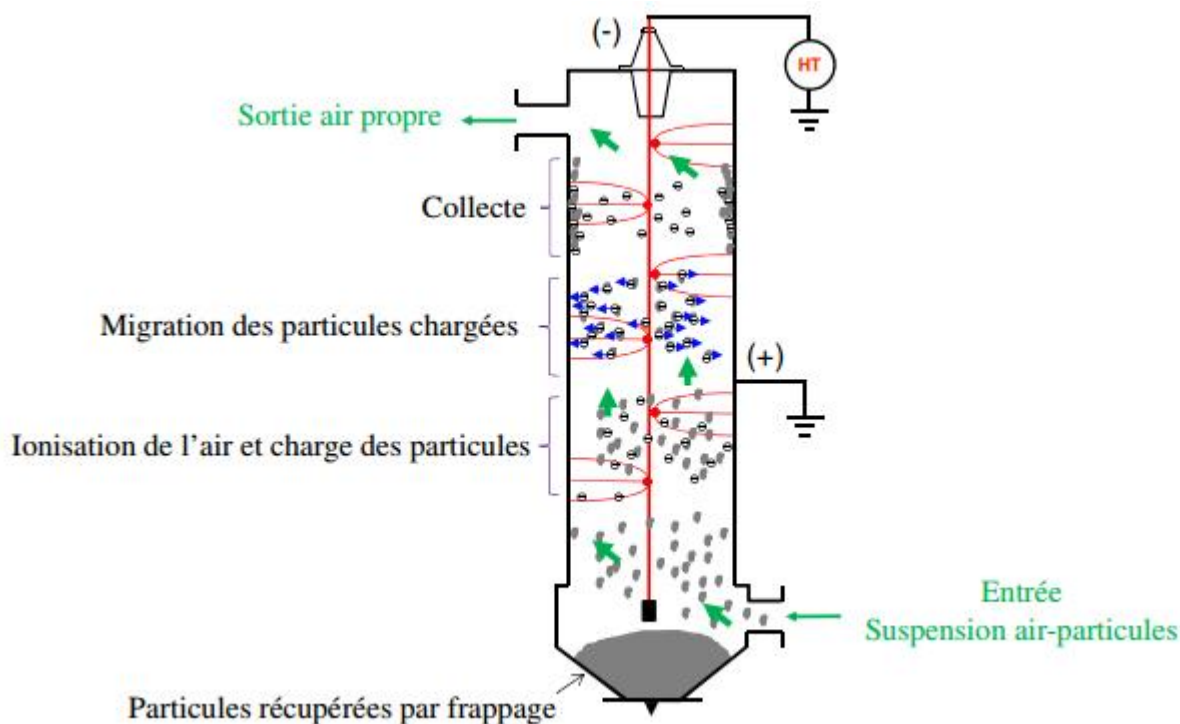


Figure I.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique [17]

Afin d'expliquer le principe de fonctionnement d'un électrofiltre, prenons l'exemple d'un précipitateur électrostatique industriel de géométrie cylindrique (Figure I.2). Il est constitué d'un cylindre métallique disposé verticalement (l'électrode de collecte) et d'un fil suspendu le long de l'axe central du cylindre (l'électrode active). L'électrode active est reliée à la haute tension continue tandis que l'électrode de collecte est reliée à la masse.

Lorsqu'on applique une tension au-delà d'un seuil (tension d'allumage de la décharge), une décharge couronne apparaît autour du fil. Elle apparaît soit sous la forme de spots lumineux (tension DC négative) répartis le long du fil et appelés « *Tufts* » ou sous la forme d'une « gaine lumineuse » (tension DC positive). Les phénomènes lumineux représentent localement les régions ionisées du gaz à partir desquelles des ions de même polarité que l'électrode active sont émis vers l'électrode de collecte. Ces ions traversent l'espace inter-électrodes sous l'action d'un champ électrique continu, en direction de l'électrode de collecte. Lorsqu'on introduit des gaz pollués par la partie basse de l'électrofiltre, ils traversent l'espace inter-électrodes en montant. Les particules qu'ils contiennent captent au passage des ions et se chargent fortement ; elles sont alors soumises à la force de Coulomb qui les dirigent vers la surface interne de l'électrofiltre où elles se déposent [14-16].

Les gaz sortent donc dépollués par la partie haute de l'électrofiltre tandis que les particules piégées s'accumulent sur sa surface interne en formant une couche de poussières. Par un procédé mécanique qui consiste à frapper les parois de l'électrofiltre à l'aide d'un marteau, on fait tomber les poussières dans le fond de l'électrofiltre où un dispositif prévu à cet effet permet de les évacuer.

I.3.2 Bilan des forces sur une particule

Dans un électrofiltre, les particules peuvent être soumises aux forces suivantes : la force de traînée (force moyenne + composantes stochastiques liées au mouvement brownien et à la turbulence), les forces centrifuges et gravitaires (négligées ici), les forces électrostatiques (forces image, force de Coulomb, force de dipôle) et les forces de Van der Waals à l'approche d'un substrat.

Dans la plupart des cas de résolution de la trajectoire des particules, seules les forces de Coulomb [18-19] et la force de traînée sont prises en compte. En effet, les forces gravitaires peuvent être considérées comme négligeables pour les particules submicroniques, étant donné les échelles de temps observées dans les électrofiltres (au plus quelques secondes de temps de séjour). De plus, les forces à courte portée comme la force de Van der Waals, la force image et la force de dipôle sont très faibles et influent très peu sur la trajectoire des particules dans l'espace inter-électrodes, qui est infiniment plus grand que l'ordre de grandeur de la portée de ces forces [20].

Dans cette rubrique, nous n'évoquerons que les deux forces mises en jeu, à savoir, la force de Coulomb et la force de traînée.

I.3.2.1 Force de Coulomb

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est relativement proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique \vec{E} , les particules ayant acquis une charge électrique q_p subissent la force de Coulomb \vec{F}_e proportionnelle à la charge, dont l'expression est :

$$\vec{F}_e = q_p \vec{E} \quad (I.1)$$

L'expression (I.1) est l'équation de base de la force électrostatique agissant sur les particules en suspension dans les filtres électrostatiques.

I.3.2.2 Force de traînée

La force de traînée est donnée par la relation suivante [16] :

$$\vec{F}_f = \frac{1}{2} C_f(Re_p) \cdot S_p \cdot \rho_g \cdot V_{rel} \cdot \vec{V}_{rel} \quad (I.2)$$

Dans la relation (I.2), S_p représente la section droite de la particule (la section de particule interceptée par le fluide), ρ_g est la densité du gaz porteur, \vec{V}_{rel} est la vitesse relative de la particule par rapport au gaz et $C_f(Re_p)$ est le coefficient de traînée.

Le coefficient de traînée dépend du nombre de Reynolds de la particule Re_p , qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les effets visqueux [21]:

$$Re_p = \frac{d_p \cdot |\vec{V}_{rel}|}{\nu_g} = \frac{d_p \cdot |\vec{U}_g - \vec{w}|}{\nu_g} \quad (I.3)$$

Où ν_g est la viscosité cinématique du gaz (à pression atmosphérique et température ambiante $\nu_g = 1,55 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), d_p est le diamètre de la particule, \vec{U}_g est la vitesse de l'écoulement et \vec{w} la vitesse de la particule. Si $Re_p \ll 1$, condition remplie dans le cas des électrofiltres [18, 20], lorsque les particules ont un diamètre inférieur à 20 μm , le coefficient de traînée a l'expression suivante :

$$C_f = \frac{24}{Re_p} \quad (I.4)$$

Dans cette situation, la force de frottement entre une particule sphérique et le gaz est donnée par la relation de Stokes [20] :

$$\vec{F}_f = 3\pi \cdot \eta_g \cdot d_p \cdot (\vec{U}_g - \vec{w}) \cdot \frac{1}{Cu(d_p \cdot \lambda_g)} \quad (I.5)$$

Où η_g est la viscosité dynamique du gaz. Si la dimension de la particule est comparable au libre parcours moyen λ_g des molécules du gaz, les particules vont se déplacer dans un milieu discontinu. Dans ce cas, l'équation (I.5) doit être corrigée par le facteur de Cunningham [15] :

$$Cu = 1 + 1,257 \frac{2\lambda_g}{d_p} + 0,4 \frac{2\lambda_g}{d_p} \exp\left(-1,1 \frac{d_p}{2\lambda_g}\right) \quad (I.6)$$

Le libre parcours moyen des molécules du gaz est donné par la relation:

$$\lambda_g = 6,61 \times 10^{-8} \left(\frac{T}{293}\right) \left(\frac{101,3 \times 10^3}{P}\right) \quad (I.7)$$

La figure I.3 montre la variation du facteur de Cunningham en fonction du diamètre des particules dans le cas de l'air à pression atmosphérique et température ambiante $\lambda_g = 66,1 \text{ nm}$.

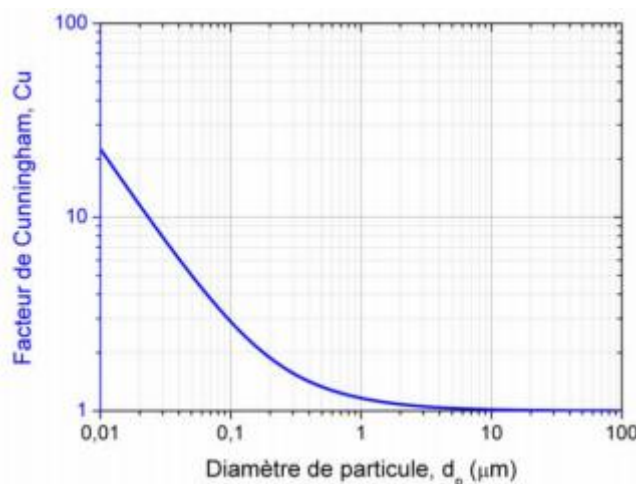


Figure I.3 : Variations du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules ($\lambda_g = 66,1 \text{ n}$)

I.3.3 Mécanismes de charge des particules

Les divers mécanismes de charge des particules et leur charge de saturation sont des phénomènes largement étudiés et de nombreux auteurs aboutissent à des solutions relativement réalistes pour des particules sphériques.

Dans cette section, nous allons présenter les principaux mécanismes de charge des particules en accordant un intérêt particulier au mécanisme de charge par charge d'espace ionique.

I.3.3.1 Charge naturelle par attachement

Dans l'atmosphère terrestre, il existe des ions positifs et négatifs générés sans interruption par l'action des radiations cosmiques et des gaz radioactifs émanant du sol. Comme présenté par Hinds [4], l'air contient environ 1000 ions/cm^3 avec en première approximation un nombre égal d'ions positifs et négatifs. Les particules d'aérosol qui sont initialement neutres, peuvent acquérir une charge par collision (due à leur mouvement thermique aléatoire) avec des ions. Mais, les particules chargées vont avoir tendance à perdre leur charge lentement en attirant des ions de signe opposé.

I.3.3.2 Triboélectrisation

La triboélectrisation regroupe deux causes d'électrisation : le frottement et le contact [22-25]. Dans la charge par frottement, c'est-à-dire quand deux particules différentes frottent l'une contre l'autre, il y a un transfert de charges (majoritairement des électrons) à partir de la surface d'une particule vers celle de l'autre. Ce processus utilise la différence de structure électronique des deux surfaces en fonction desquelles une des particules devient positivement chargée et l'autre négativement chargée. Ce phénomène fait que dans les nuages de particules entraînées par un flux d'air, une forte proportion des particules est chargée par contact avec les parois ou par collisions.

La charge par contact se produit pendant la séparation de particules sèches et non conductrices de surfaces solides [24]. Dans ce processus, quand une particule touche une surface, des charges sont transférées, si bien que la particule acquiert une charge nette positive ou négative quand elle se sépare de la surface. La polarité de la particule chargée et le nombre de charges sur celle-ci dépendent des matériaux et de leurs positions relatives dans les séries triboélectriques. Le frottement augmente le nombre de charges acquises. Parce qu'il requiert des surfaces sèches, le phénomène de charge par contact devient inefficace en conditions d'humidité relative plus grande que 65% environ.

I.3.3.3 Charge par charge d'espace ionique

Les divers mécanismes de charge des particules et leur charge de saturation sont des phénomènes largement étudiés et de nombreux auteurs aboutissent à des solutions relativement réalistes pour des particules sphériques. Dans cette section, nous allons présenter les principaux mécanismes de charge des particules en accordant un intérêt particulier au mécanisme de charge par charge d'espace ionique.

La principale cause de mise en mouvement des particules dans les filtres électrostatiques est la force de Coulomb. Cette dernière varie linéairement en fonction de la charge de particule. Par conséquent, une augmentation de la charge des particules est nécessaire afin d'assurer leur migration vers les électrodes collectrices du précipitateur [25]. Cela peut être provoqué par une forte densité de charges d'espace produites par une décharge électrique dans l'espace inter-électrodes. Ce mécanisme de décharge sera décrit par la suite. Le processus de charge des particules dépend alors de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la densité de charge ionique, l'intensité du champ électrique local, ainsi que la taille des particules [20, 25, 26]. De nombreuses études [16,27] ont montré que le procédé de charge peut être principalement attribué aux mécanismes suivants : la charge par champ, la charge par diffusion et la charge mixte.

a. Charge par champ :

Comme son nom l'indique, dans ce mécanisme de charge les ions sont apportés à la surface de la particule grâce à la force électrostatique causée par un champ électrique extérieur [25-26]. Cette force est équilibrée par la force de répulsion créée par la charge répartie à la surface de la particule. En effet, une particule présente dans un gaz provoque une distorsion locale du champ électrique, les lignes de champ aboutissent à la surface de celle-ci. Cette distorsion du champ dépend de la nature de la particule : lorsque la particule est conductrice, la distorsion du champ est maximale [25-26].

Pour une particule isolante (non conductrice), la distorsion du champ dépend de sa permittivité. Ainsi, l'intensité du champ électrique augmente à la surface de la particule. Dans ce cas, les ions présents dans le gaz et se déplaçant le long des lignes de champ, peuvent atteindre la surface de la particule [25-26]. Chaque ion qui atteint la surface de la particule modifie la distribution locale du champ électrique. Cependant, tant que le champ électrique

créé par la charge de la particule est inférieur au champ maximum qui existe à la surface de la particule lorsqu'elle n'est pas chargée, les ions continuent à atteindre la surface de celle-ci [25-26]. Lorsque la charge acquise est suffisante, les lignes de champ contournent la particule ; on dit que la particule a acquis « la charge de saturation par champ » notée q_{ps} (Figure I.4).

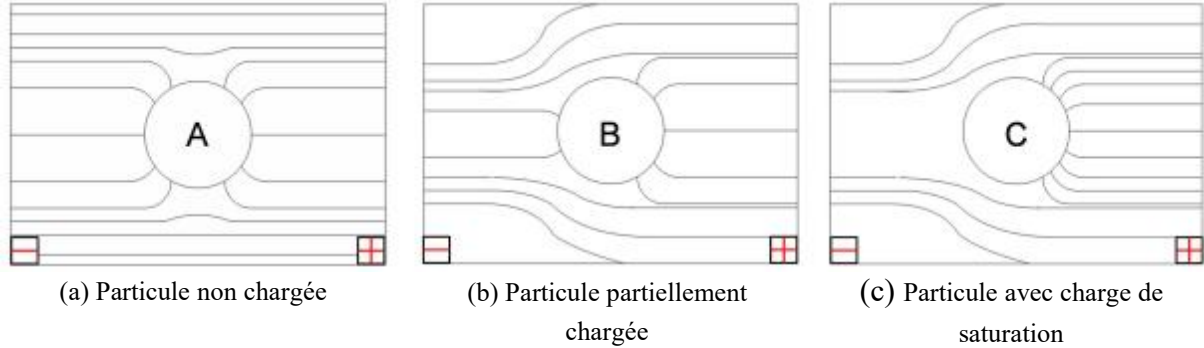


Figure I.4 : Lignes de champ en direction de la surface d'une particule isolante soumise à un champ électrique uniforme [28]

Rohmann a développé une première théorie concernant la charge par champ en 1923 [29], complétée par Pauthenier en 1932 [30-31]. Ces auteurs montrent que les ions arrivent à la surface d'une particule tant que la charge de celle-ci n'est pas suffisante pour les repousser. Pauthenier a montré qu'en raison du phénomène de répulsion électrostatique, seule une partie réduite de la surface des particules est atteinte par les ions. Continuant dans le même sens, d'autres auteurs ont apporté leurs contributions [32- 34]. La charge d'une particule sphérique est donnée par l'équation de la charge par champ de Pauthenier [31] :

$$q_p(t) = q_p^s \frac{t}{t + \tau} \quad (I.8)$$

Avec

$$q_p^s = \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{3\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \cdot d_p^2 \cdot E \quad (I.9)$$

Et

$$\tau = 4 \cdot \frac{\varepsilon_0}{\rho_i \cdot \mu_i} = 4 \cdot \frac{\varepsilon_0}{e \cdot n_i \cdot \mu_i} = 4 \cdot \frac{\varepsilon_0 E}{J} \quad (I.10)$$

Où q_p^s est la charge de saturation (C), t le temps de charge (s), τ la constante de temps de charge par champ (s), ε_0 la permittivité du vide ($\approx 8,85 \times 10^{-12} F/m$), ε_r la permittivité relative de la matière constituant la particule, d_p le diamètre de la particule (m), E le champ électrique (V/m), J la densité de courant (A/m^2), ρ_i la densité de charge (C/m^3), μ_i la mobilité ionique ($m^2/V.s$), e la charge électronique ($\approx 1,602 \times 10^{-19} C$) et n_i la concentration des ion dans l'espace (m^{-3}). Pour une particule conductrice $\varepsilon_r \rightarrow \infty$, l'équation I.9 devient :

$$q_p^s = 3\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (I.11)$$

Pour les grosses particules ($d_p \geq 1\mu m$), c'est le mécanisme de charge par champ qui est dominant. Pour les petites particules ($d_p \leq 0,1\mu m$), la diffusion thermique devient dominante et la charge par diffusion devient importante [31, 35- 37].

b. Charge par diffusion :

Dans un nuage d'ions et en absence de champ électrique, les particules sont chargées grâce au mouvement brownien entre les ions et les particules : ce mécanisme est appelé mécanisme de charge par diffusion et ne requière pas un champ électrique externe [26]. Ce mécanisme met en jeu la probabilité de collision entre les particules et les ions animés d'un mouvement aléatoire d'agitation thermique [25]. Dans ces conditions, tous les éléments de surface d'une particule ont la même probabilité de choc avec les ions et la particule peut accumuler une certaine charge électrique [25-26]. Ce mécanisme de charge par diffusion a une importance plus grande pour les particules très fines, d'un diamètre inférieur à $0,1 \mu m$ [14,16]. Dans la charge par diffusion, la quantité de charge accumulée dépend de la taille des particules, de la densité des ions, de la vitesse moyenne d'agitation thermique des ions, de la constante diélectrique de la particule, de la température absolue du gaz, et du temps de présence des particules au sein du champ. Dans la littérature, plusieurs modèles de mécanisme de charge par diffusion ont été développés [38-40]. L'expression de la charge par diffusion $q_p(t)$ d'une particule donnée par White [40] est:

$$q_p(t) = q^* \ln \left(1 + \frac{t}{\tau^*} \right) \quad (I.12)$$

Avec

$$q^* = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p \cdot \frac{k_B \cdot T}{e} \quad (I.13)$$

Et

$$\tau^* = \frac{8 \cdot \varepsilon_0 k_B \cdot T}{d_p \cdot C_i \cdot n_i \cdot e^2} = 8\varepsilon_0 \sqrt{\frac{m_i \cdot k_B \cdot T}{3}} \cdot \frac{\mu_i \cdot E}{d_p \cdot J \cdot e} \quad (I.14)$$

Où q^* est la constante de charge (C), τ^* la constante de temps de charge par diffusion (s), k_B la constante de Boltzmann ($\approx 1,38 \times 10^{-23} J/K$), T la température (K), e la charge électronique ($\approx 1,602 \times 10^{-19} C$), C_i la vitesse thermique de l'ion (m/s), n_i la concentration des ions dans l'espace (m^{-3}), m_i la masse d'un ion (kg) et μ_i la mobilité d'un ion ($m^2/V.s$).

c. Charge mixte :

Les deux mécanismes précédents opèrent simultanément pour les particules dont la taille est comprise entre $0,1$ et $1 \mu m$ [37]. La charge totale acquise par une particule à l'issue du processus n'est cependant pas la somme des charges apportées par chacun des deux mécanismes. Plusieurs travaux ont été réalisés sur la charge mixte, en particulier par Lawless et Altman [41-43] qui ont modifié des modèles préexistants et ont abouti à des relations assez

simples qui prennent en compte les interactions des deux mécanismes de charge. Smith et McDonald [44] ont développé aussi une formule qui combine les deux mécanismes de charge. Dans cette partie, nous allons focaliser sur la théorie de charge donnée par Cochet [45] car c'est celle qu'on va utiliser dans notre modèle.

Lorsque le libre parcours moyen des ions devient du même ordre de grandeur que celui des particules, il est possible de faire l'hypothèse que tous les ions entraînés à l'intérieur du tube de force dont l'enveloppe passe à une distance égale au libre parcours moyen des ions et dont le centre est celui de la particule sont captés [20]. Cochet propose donc une relation combinée permettant de calculer la charge limite d'une particule par effet de champ et par diffusion vers sa surface. La charge de saturation d'une particule de diamètre d_p est donnée par la relation :

$$q_p^s = \left[\left(1 + \frac{2\lambda_g}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda_g}{d_p}} \right) \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right] \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (I.15)$$

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

Cette relation est la plus utilisée actuellement, car elle couvre la charge limite des particules dans un très grand domaine de taille et de conditions opératoires [20]. La figure I.5 montre les variations de la charge limite en fonction du diamètre des particules en considérant deux valeurs de l'intensité du champ électrique E.

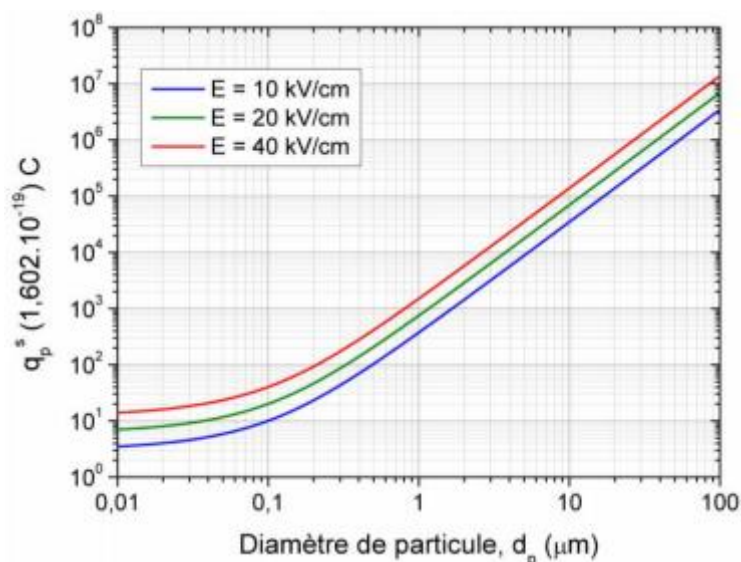


Figure I.5 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules ($T=293K$, $\lambda_g=66.1 \text{ nm}$, $\epsilon_r=4$)

I.3.3.4 Autre modèles de charge

Dans la littérature, d'autres modèles de charge des particules ont été élaborés. Ils sont basés sur le nombre de Knudsen, généralement noté K_n , qui est un nombre adimensionnel permettant de déterminer le régime d'écoulement en termes de continuité du milieu et non en

termes de turbulence d'un fluide. On le définit comme étant le rapport du libre parcours moyen λ et du rayon de la particule r_p [46] :

$$K_n = \frac{\lambda}{r_p} \quad (I.16)$$

En fonction du nombre de Knudsen K_n , on distingue trois régimes d'écoulement : Régime de molécule libre ($K_n \gg 10$), régime de transition ($0,1 \leq K_n \leq 10$) et régime continu ($K_n \leq 0,1$).

Il en ressort que pour les grosses particules plongées dans un fort champ électrique, la charge par effet de champ est prépondérante, alors que pour les petites particules plongées dans un champ faible la charge par diffusion est majoritaire [47]. Les deux mécanismes de charge interviennent ensemble pour fournir aux particules, une charge globale dont l'importance relative est principalement déterminée par leurs dimensions et l'intensité du champ électrique.

Les particules présentes à l'intérieur d'un électrofiltre, une fois chargées par ces différents mécanismes, subissent la force de Coulomb lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique. Cette force électrostatique est responsable de leur mouvement vers les électrodes collectrices. C'est ce processus appelé « la migration » que nous étudierons à présent.

I.3.4 Vitesse de migration des particules chargées

Soit une particule solide sphérique de diamètre d_p , de charge électrique q_p et de vitesse \vec{w} se trouvant dans un écoulement de gaz laminaire de vitesse \vec{U}_g , soumise à un champ électrique supposé uniforme et constant \vec{E} (figure I.6). Son mouvement à l'intérieur du précipitateur est régi par la relation fondamentale de la dynamique :

$$m_p \cdot \frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_f \quad (I.17)$$

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.

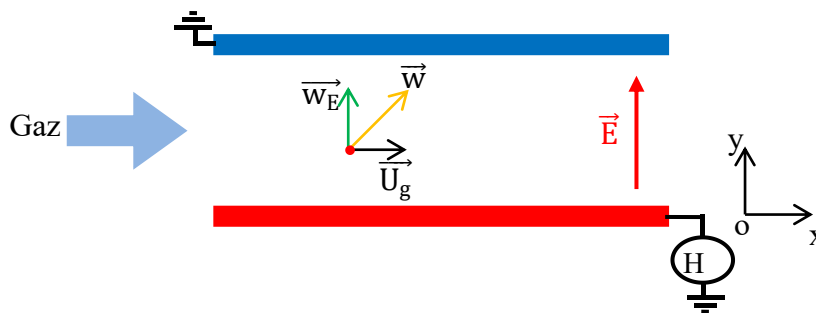


Figure I.6 : Schéma explicatif du mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles.

En remplaçant dans la relation I.17 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 :

$$\frac{dw_E}{dt} + \frac{3\pi \cdot \eta_g \cdot d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot w_E = \frac{q_p}{m_p} \cdot E \quad (I.18)$$

Où w_E est la composante de la vitesse d'une particule dans la direction normale aux plaques, qu'on appelle « vitesse effective de migration ». Si on considère qu'au moment initial $t = 0$, la vitesse w_E de la particule est nulle, la solution de l'équation I.18 donne l'évolution suivante au cours du temps :

$$w_E(t) = w_{th} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right] \quad (I.19)$$

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

$$w_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3\pi \cdot \eta_g \cdot d_p} Cu \quad (I.20)$$

Dans la relation I.19, 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 :

$$\tau_p = \frac{m_p}{3\pi \cdot \eta_g \cdot d_p} \cdot Cu = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta_g} \cdot Cu \quad (I.21)$$

Où ρ_p est la masse volumique des particules. Le temps τ_p caractérise le comportement transitoire de la particule jusqu'au moment où elle se déplace à la vitesse constante w_{th} . On remarque que le temps de relaxation est indépendant des conditions électriques à l'intérieur du filtre. La figure I.7 montre les variations de τ_p en fonction du diamètre des particules. Il faut noter que pour les fines particules ($d_p \leq 1 \mu m$), ce temps est très faible ($\tau_p \leq 10 \mu s$).

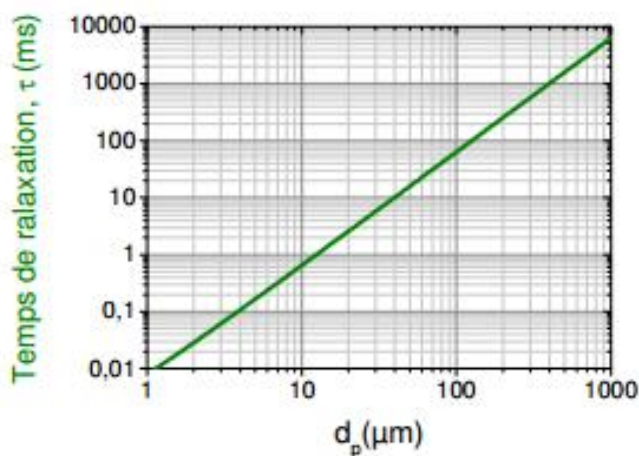


Figure I.7 : Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules ($T=150^{\circ}C$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$)

La vitesse de migration théorique (relation I.20) représente, dans cette approche, la valeur stationnaire de la vitesse des particules dans la direction du champ électrique (perpendiculaire aux plaques collectrices) ; elle caractérise le processus de migration des particules à l'intérieur de l'électrofiltre. L'ensemble des modèles analytiques est basé sur ce concept.

Une étude de la vitesse théorique de migration nécessite la connaissance de la charge électrique des particules en fonction de leur taille. Pour montrer la variation de w_{th} en fonction de la taille des particules, on utilise généralement une relation simple de calcul de la charge, établie par Cochet [45]. Cette relation donne la charge limite par champ d'une particule qui se trouve dans un champ électrique d'intensité E . Elle offre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux pour $d_p > 0.3 \mu m$ [45] :

$$q_p^s = \left[\left(1 + \frac{2\lambda_g}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + 2\lambda_g/d_p} \right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right) \right] \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (I.22)$$

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

La figure I.8 montre les variations de la charge limite en fonction du diamètre des particules en considérant deux valeurs de l'intensité du champ électrique E .

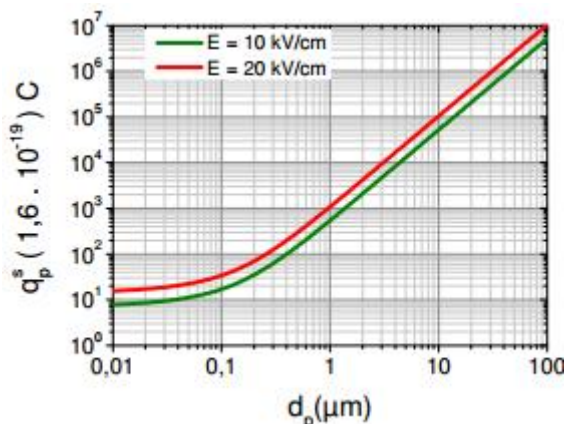


Figure I.8 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules ($T = 150^\circ C$, $\lambda_g = 0.101 \mu m$ et $\varepsilon_r \rightarrow \infty$, cas des particules conductrices)

En utilisant les résultats de la figure I.8 sur la charge électrique des particules, on peut évaluer les valeurs de la vitesse théorique w_{th} (Figure I.9). La variation de la vitesse w_{th} en fonction du diamètre des particules passe par une valeur minimale pour $w_{th} \cong 0.25 \mu m$.

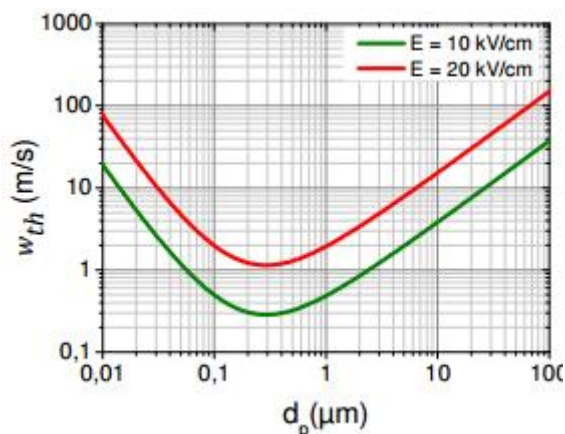


Figure I.9 : Variations de la vitesse de migration théorique w_{th} en fonction de la taille des particules ($T = 150^\circ C$, $\lambda_g = 0,101 \mu m$, $\eta_g = 2.37 \times 10^{-5} kg/m.s$)

Une faible vitesse de migration diminue le transport des particules vers les plaques collectrices et par conséquent l'efficacité de collecte. Ainsi donc, la vitesse de migration des particules étant à son plus bas niveau pour les tailles de particules comprises entre 0,1 et 1 μm , il en est de même en ce qui concerne l'efficacité de collecte.

I.3.5 Efficacité de collecte

À l'instar de tout dispositif électrique, nous avons besoin d'estimer le rendement d'un électrofiltre afin d'évaluer son efficacité. Pour exprimer l'efficacité d'un filtre vis à vis d'un aérosol donné, nous considérons trois quantités : la quantité d'aérosols en amont du filtre (q_{am}), la quantité d'aérosols en aval du filtre q_{av} et la quantité d'aérosols retenue par le filtre ($q_{am} - q_{av}$). À partir de ces trois quantités, nous pouvons exprimer trois rapports :

- Le rendement η_E qui est le rapport de la quantité d'aérosols retenue par le filtre sur la quantité d'aérosols en amont :

$$\eta_E(\%) = \frac{q_{am} - q_{av}}{q_{am}} \cdot 100 \quad (I.23)$$

La perméance P_E qui est le rapport de la quantité d'aérosols en aval sur la quantité d'aérosols en amont :

$$P_E(\%) = \frac{q_{av}}{q_{am}} \cdot 100 \quad (I.24)$$

Le coefficient d'épuration C_E qui est le rapport de la quantité d'aérosols en amont sur la quantité d'aérosols en aval :

$$C_E(\%) = \frac{q_{am}}{q_{av}} \cdot 100 \quad (I.25)$$

Il existe différentes méthodes de mesure de l'efficacité d'un filtre ; chaque méthode est caractérisée par un aérosol d'essai et par le procédé de mesure des quantités d'aérosols. L'association européenne des constructeurs de matériel aéronautique (EUROVENT), puis l'organisation internationale de normalisation (ISO) ont normalisé quelques-unes des

méthodes de mesure. Nous distinguons trois grandes familles de méthodes de mesures. Les deux premières comprennent les filtres dits filtres de ventilation générale, avec une famille pour les filtres dits à moyenne efficacité et une autre pour les filtres dits à haute efficacité ; les filtres de la troisième famille dits à très haute efficacité captent les particules submicroniques.

L'efficacité de collecte globale η_t de tout système de traitement de gaz, en dépit de son type peut être déterminée grâce à la formule ci-après :

$$\eta_t = 1 - \frac{n_s}{n_e} \cdot 100 \quad (I.26)$$

Où n_e et n_s représentent respectivement, la concentration globale de particules à l'entrée et à la sortie du filtre. L'efficacité de collecte peut également être déterminée à partir du nombre et de la masse de particules.

En raison de la distribution granulométrique très diversifiée des particules, il peut être intéressant d'exprimer l'efficacité de collecte par classes de taille de particules. Chaque classe correspondant à un diamètre moyen d_p , cette efficacité appelée efficacité fractionnaire, est définie par la relation suivante pour la classe i de taille de particules :

$$\eta_f^i = 1 - \frac{m_s(d_p^i)}{m_e(d_p^i)} = 1 - \frac{C_s(d_p^i)}{C_e(d_p^i)} \quad (I.27)$$

Où $m_e(d_p^i)$ et $m_s(d_p^i)$ sont les masses de particules de la classe i à l'entrée et à la sortie du précipitateur. L'efficacité fractionnaire peut également être exprimée en termes de concentrations, dans l'expression I.27, $C_e(d_p^i)$ et $C_s(d_p^i)$ étant les concentrations moyennes des particules de la classe i à l'entrée et à la sortie du filtre. Lorsque l'efficacité de collecte est proche de l'unité, les performances d'un précipitateur peuvent être mieux caractérisées par la pénétration Pn_t qui s'exprime comme suit :

$$Pn_t = 1 - \eta_t = 1 - \frac{n_s}{n_e} \quad (I.28)$$

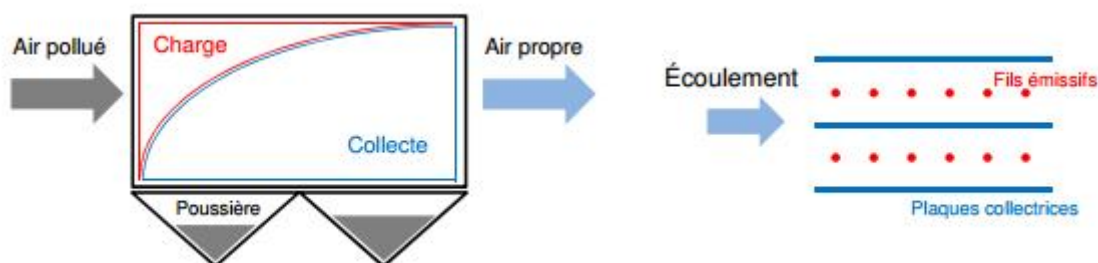
Ainsi, l'utilisation de la pénétration pour représenter les performances d'un électrofiltre permet de mieux suivre leurs variations lorsque les dites performances culminent à plus de 99%. Ceci étant, les performances d'un électrofiltre dépendent de sa typologie. On distingue différents types de filtres électrostatiques selon l'application à laquelle ils sont destinés. En effet, ils sont classés comme étant de type cylindrique ou de type plan (forme des électrodes de collecte), de type vertical ou horizontal (direction de l'effluent gazeux), de type à un seul étage ou à deux étages (géométrie des électrodes) et de type sec ou humide (avec ou sans utilisation de liquide).

I.3.6 Types d'électrofiltres

I.3.6.1 Electrofiltres à un seul étage

Ce sont les plus utilisés dans les applications industrielles pour les avantages qu'ils présentent, à savoir entre autres, une simplicité de conception et une robustesse en fonctionnement. Dans cette architecture, la charge et le piégeage des particules sont réalisés simultanément sur toute la longueur du filtre (Figure I.10 (a)).

Parmi les électrofiltres à un seul étage, la géométrie plane est la plus répandue. Dans cette configuration, les électrodes de dépôt sont des plaques parallèles et équidistantes et le gaz est ionisé à partir d'électrodes ionisantes situées dans les plans verticaux à mi-distance entre les plaques (Figure I.10 (b)). En général, les électrodes de collecte sont périodiquement secouées, ce qui permet de décoller les agrégats et de les recueillir dans une trémie située dans la partie inférieure du filtre.



(a) Principe d'un électrofiltre à un seul étage

(b) Electrofiltre de type Fil-Plaques (vue de dessus)

Figure I.10 : Schéma simplifié d'un électrofiltre à un seul étage

Dans la configuration cylindrique, l'électrode ionisante est tendue le long de l'axe central du cylindre disposé verticalement (Figure I.2). Classiquement, le dépôt de particules sur la face intérieure du cylindre est nettoyé grâce à un film liquide qui détache les agglomérats et les emporte sous l'effet de la gravité afin de les déposer dans la trémie.

I.3.6.2 Electrofiltres à deux étages

Ces électrofiltres séparent les aspects charge et collecte des particules (Figure I.11 (a)). Le premier étage constitue le module d'ionisation composé d'électrodes en forme de tube ou de fil. Le second étage, le module de collecte, est constitué d'une alternance de plaques, les unes sont portées à un fort potentiel et les autres à la terre (Figure I.11 (b)).

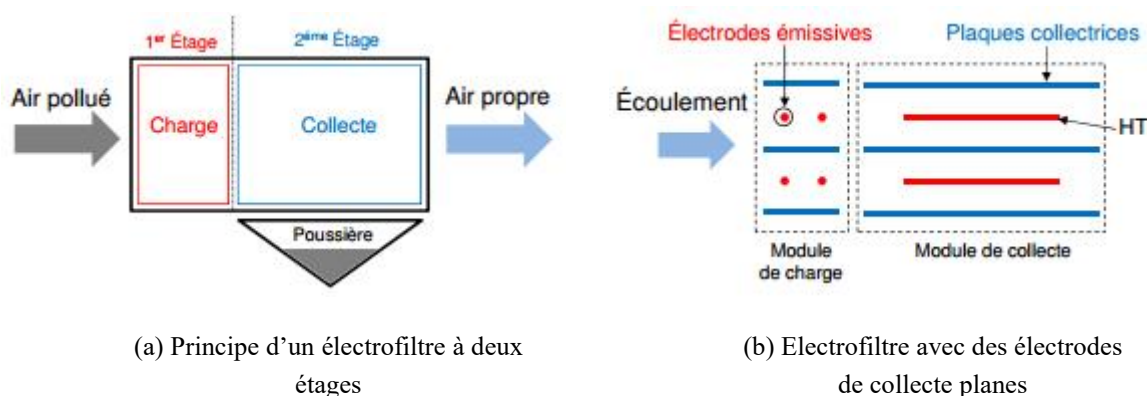


Figure I.11 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique à deux étages

Le système de frappage des poussières ne peut être utilisé pour cette architecture, car il provoquerait le ré-envoi des poussières non chargées. Le lavage des électrodes est donc adopté. Ces systèmes sont dédiés à l'épuration de l'air ambiant, de fumées faiblement chargées, de brume ou de particules adhésives. Les électrofiltres à un étage suppriment mieux le phénomène de réentraînement tandis que dans les électrofiltres à deux étages, la surface de l'électrode de collecte peut être augmentée en réduisant l'espace inter-électrodes. On peut également réduire la taille de l'électrofiltre dans sa globalité.

I.3.6.3 Electrofiltres humides

Pour les précipitateurs électrostatiques classiques, il existe une valeur de la résistivité des particules au-delà de laquelle les performances de séparation sont notablement dégradées [49-50]. Une alternative à ce problème consiste alors à utiliser des électrofiltres dits humides. Comparativement aux électrofiltres classiques, ils utilisent un film d'eau pour nettoyer le dépôt sur les surfaces des électrodes de collecte (Figure I.12).

Les électrofiltres humides présentent des inconvénients imputables à la présence d'eau en leur sein, mais également des avantages tels que l'amélioration du rendement de filtration, la suppression du phénomène de réentraînement des particules collectées et l'affranchissement des performances de séparation vis-à-vis de la résistivité des particules.



Figure I.12 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique humide [51]

En résumé, l'efficacité de collecte d'un électrofiltre dépend de sa typologie et peut être prédite par divers modèles analytiques allant du plus simple (écoulement laminaire) au plus complexe (écoulement turbulent).

I.3.7 Modèles du fonctionnement d'un électrofiltre

I.3.7.1 Modèle laminaire

C'est le modèle analytique le plus simple du fonctionnement d'un électrofiltre. Il considère un écoulement laminaire du gaz avec un profil de vitesse de Poiseuille, entre deux plaques parallèles portées à des potentiels électriques différents. Nous admettons que les particules en suspension dans le gaz ont toutes la même charge électrique. Elles se déplacent dans la direction axiale avec la vitesse moyenne de l'écoulement et subissent l'action du champ électrique uniforme. Les trajectoires sont donc des lignes droites déterminées par les vitesses U_g et w_{th} (Figure I.13) [14, 16].

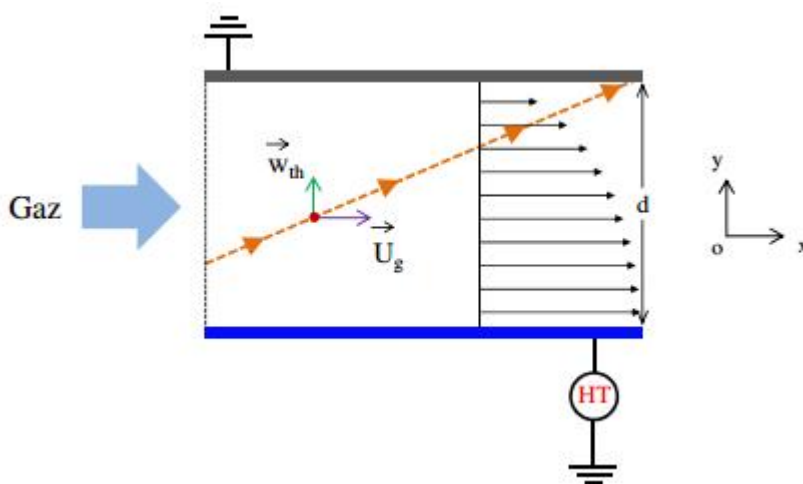


Figure I.13 : Illustration schématique du modèle laminaire

Une particule chargée qui entre dans la zone du champ, à une distance d de la plaque collectrice, sera collectée au bout d'un temps $t = \frac{d}{w_{th}}$. Pendant ce temps, la particule se déplaçant dans la direction d'écoulement du gaz aura parcouru une distance :

$$L_D = \overline{U}_g \cdot \frac{d}{w_{th}} \quad (I.29)$$

Où \overline{U}_g est la vitesse moyenne du gaz. Donc toutes les particules de même taille, identiquement chargées, seront collectées à une distance égale ou inférieure à L_D . L'efficacité fractionnaire η_f de collection peut être alors calculée par la relation suivante :

$$\eta_f(d_p) = \min \left[\frac{w_{th}(d_p, E, q_p) \cdot L}{\overline{U}_g \cdot d} \right] \quad (I.30)$$

Ce schéma est très éloigné de la réalité. Tout d'abord, les conditions électriques réelles peuvent être très différentes de ce schéma de particules chargées instantanément se déplaçant

dans une zone de champ électrique uniforme. Cependant, l'hypothèse la plus forte est celle d'un écoulement laminaire du gaz. Malgré tout, dans le cas de certains précipitateurs à double étage, ce modèle peut constituer le point de départ de l'étude sur la collection des particules.

I.3.7.2 Modèle de Deutsch

Dans les précipitateurs électrostatiques industriels, l'écoulement du gaz est toujours turbulent. Le mouvement des particules est essentiellement déterminé par la présence simultanée des tourbillons et des forces électriques qui s'exercent sur elles. Ainsi, les trajectoires des particules sont très compliquées et ne peuvent pas, en général, être déterminées par des expressions analytiques. Deutsch [52], suite à une analyse théorique, a établi une dépendance entre l'efficacité de collecte et les dimensions du précipitateur. Dans son modèle, il distingue deux zones dans le filtre électrostatique :

- Le cœur du précipitateur, où la concentration des particules est considérée comme uniforme dans la section transversale. La vitesse moyenne d'écoulement est supposée constante.
- Les couches limites d'épaisseur δ situées au voisinage des plaques collectrices, où l'écoulement du gaz est considéré comme uniforme (Figure I.14).

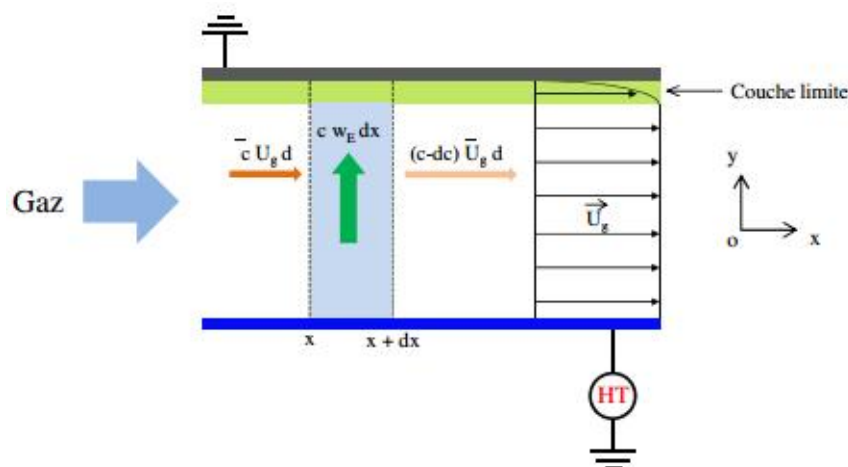


Figure I.14 : Modèle de Deutsch : schéma des couches laminaires et bilan massique de particules sur une longueur dx

Considérer une concentration de particules comme uniforme dans toute la section transversale du filtre revient à supposer qu'il existe un mélange parfait de suspension gaz-particules. Ceci revient en fait à considérer une turbulence infinie dans le cœur du précipitateur. Une particule ne peut être collectée que si elle se trouve dans la couche laminaire située près de chaque paroi, là où les forces de Coulomb dominent les forces visqueuses. Dans cette zone, le champ électrique est supposé uniforme et la vitesse des particules dans la direction perpendiculaire aux plaques est supposée constante et de valeur calculée en utilisant l'équation I.20.

Considérons deux sections transversales situées à une distance dx l'une de l'autre, dans la direction d'écoulement du gaz (Figure I.14). Dans le volume ($dx \cdot h \cdot d$), où h représente la hauteur des plaques, on distingue :

- $c \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d$: le flux des particules qui entrent par la section situé à l'abscisse x .
- $(c - dc) \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d$: le flux des particules non collecté sortant par la section situé à l'abscisse $x + dx$.
- $c \cdot w_E \cdot h \cdot d \cdot dx$: le flux des particules captées sur la longueur dx .

Par un bilan massique, on trouve :

$$c \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d = (c - dc) \cdot \overline{U}_g \cdot h \cdot d + c \cdot w_E \cdot h \cdot d \cdot dx \quad (I.31)$$

En intégrant sur toute la longueur L du filtre, on obtient la relation entre la concentration des particules à l'entrée et celle à la sortie du précipitateur :

$$c_s(d_p) = c_e(d_p) \cdot \exp \left[- \frac{w_E(d_p) \cdot L}{d \cdot \overline{U}_g} \right] \quad (I.32)$$

Ce qui conduit à la formule de Deutsch-Anderson [41] :

$$\eta_f(d_p) = 1 - \exp \left[- \frac{w_E(d_p) \cdot L}{d \cdot \overline{U}_g} \right] = 1 - \exp \left[w_E(d_p) \cdot \frac{S}{D_g} \right] \quad (I.33)$$

Où S est la surface totale des électrodes collectrices et D_g est le débit volumique du gaz.

Le modèle de Deutsch ignore tous les phénomènes qui peuvent diminuer le rendement de collecte, comme le réentraînement des particules collectées par le flux gazeux et l'influence de la charge d'espace des particules sur la décharge, entre autres.

I.3.7.3 Autres modèles

L'efficacité globale de filtration peut être calculée à partir de l'équation de diffusion des particules :

$$D_{p,y} \frac{\partial^2 c_p}{\partial y^2} + D_{p,x} \frac{\partial^2 c_p}{\partial x^2} + v_e \frac{\partial c_p}{\partial y} - v_m \frac{\partial c_p}{\partial x} = 0 \quad (I.34)$$

Où x est dans le sens de l'écoulement, sens longitudinal, y perpendiculaire à la paroi de l'électrofiltre, sens transversal, $D_{p,i}$ coefficient de dispersion dans la direction considérée et c_p est la concentration des particules (m^{-3}).

Les différents modèles d'efficacités théoriques sont des solutions analytiques plus au moins simplifiées de l'équation de diffusion des particules. Par exemple, La figure I.15 présente l'effet du coefficient de diffusion turbulente D_t sur l'efficacité fractionnaire pour un précipitateur électrostatique. Ainsi, la théorie de Deutsch correspond à $D_t = \infty$ tandis que le cas laminaire correspond à $D_t = 0$. Lorsque $0 < D_t < \infty$, cela correspond au modèle de Leonard, Mitchner et Self [53].

À l'inverse de Deutsch, où la répartition des particules est considérée uniforme dans chaque section transversale, ce qui est contestable, le modèle de Leonard *et al.* Consiste à résoudre dans la géométrie donnée l'équation de conservation pour les particules de

concentration C_p [14]. Il propose une relation permettant de prédire l'efficacité de collecte à partir des vitesses de migration et du coefficient de diffusion turbulente. En pratique, quand la valeur D_t est finie, pour l'efficacité fractionnaire on a : $(\eta_f)_{Leonard} > (\eta_f)_{Deutsch}$.

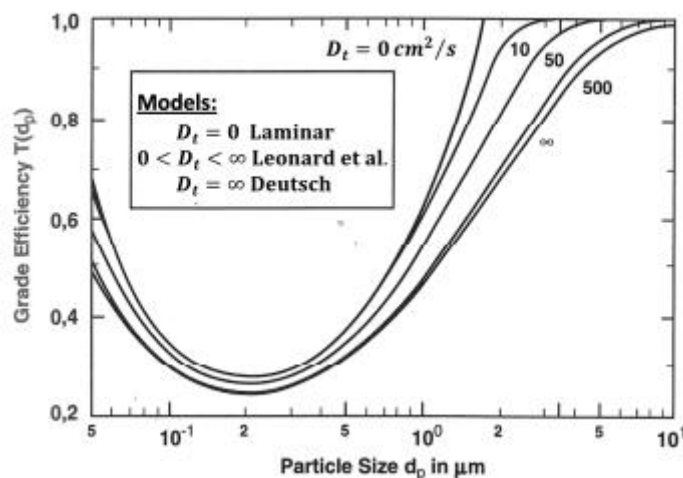


Figure I.15 : Effets du coefficient de diffusivité turbulente D_t sur l'efficacité fractionnaire pour un précipitateur électrostatique [16]

Compte tenu des différences entre le modèle Laminaire et le modèle de Deutsch qui ne correspondent ni l'un ni l'autre à la réalité, compte tenu de la complexité des équations, les modèles de diffusivité finie ne sont pas recommandés pour la modélisation de cas pratiques (la simulation de l'efficacité de collecte à partir d'une équation analytique du type I.30 contient des contradictions lorsque le caractère local du champ électrique est considéré). Pour les numériciens, certains de ces modèles constituent de bons outils de prédiction de l'efficacité de collecte. Cependant dans la pratique, de nombreux phénomènes peuvent considérablement la détériorer à savoir la résistivité apparente des particules traitées [15, 54], le phénomène de réentraînement [50, 55], le phénomène de « *back corona* » [56-57], et l'extinction de la décharge par la charge d'espace [58].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques notions générales sur les précipitateurs électrostatiques, leur principe de fonctionnement et leur bilan des forces appliqués sur la particule, leur mécanisme de charge et leur mouvement des particules, leur efficacité ainsi que les différents types de précipitateurs.

Le principe de la précipitation électrostatique consiste à charger les particules en injectant des charges électriques dans l'air puis les piéger sous l'influence des forces électrostatiques dues au champ électrique présent dans l'espace inter-électrodes de l'électrofiltre. De ce point de vue, nous avons créé une nouvelle technique de surveillance et de contrôle l'évolution de l'écoulement des particules qui sont en suspension dans le filtre. Par ailleurs un nouveau système de captation électrique permettant de mesurer le rendement par mesure de charge électrique des particules.

Généralement les précipitateurs électrostatiques industriels utilisent une décharge volumique à pression atmosphérique. La plus répandue est la couronne volumique dont les avantages ne sont plus à démontrer. Néanmoins, et sont cité certains inconvénients de cette décharge, plusieurs chercheurs s'intéresse actuellement aux applications à la décharge à barrière diélectrique.

Après ce premier chapitre d'introduction de la précipitation électrostatique, nous présenterons une description du dispositif expérimental, des composants utilisés et des protocoles de mesure mis en œuvre.

Chapitre II :

Matériel et technique de mesure

II.1 Introduction

Ces dernières années, la pollution par les particules fines (PM), principalement générées par la combustion de combustibles fossiles, les activités industrielles, le secteur de la construction et le trafic routier, est devenue une problématique environnementale et sanitaire majeure [59–61]. Parmi les différentes techniques de traitement des PM, la précipitation électrostatique s'est imposée comme une solution particulièrement efficace, en raison de son taux de capture élevé, de sa capacité à traiter de grands volumes d'air, de ses coûts d'exploitation relativement faibles et de sa maintenance aisée [62–64].

Dans ce chapitre, le présent travail porte sur l'optimisation de l'ionisation dans un précipitateur électrostatique à deux étages, en vue d'éviter la collecte indésirable des particules dans la zone d'ionisation. La première configuration étudiée repose sur un système fil-cylindre avec cinq fils parallèles, disposés de manière à augmenter la densité d'ions et à améliorer l'efficacité de charge. Cette configuration permet une forte ionisation, mais peut conduire à une accumulation de particules dans le premier étage. Pour limiter ce phénomène, une seconde série d'expériences a été menée avec un seul fil corona, dont le diamètre a été progressivement augmenté. L'objectif est de réduire localement le champ électrique, retarder l'apparition de la décharge couronne, et ainsi diminuer la probabilité de collecte dans l'étage d'ionisation, tout en permettant l'application de tensions plus élevées dans le second étage de collecte, connecté en série au même générateur.

Ce travail a été mené après de longues observations et une étude approfondie des sources de tension disponibles dans le laboratoire pédagogie d'électrotechnique de l'Université Belhadj BOUCHAÏB d'Aïn Témouchent.

II.2 Dispositif expérimental de précipitateur électrostatique

Le schéma du dispositif expérimental est illustré à la figure II.1.. Le système expérimental se composait de trois parties : l'admission et le transport de particules submicroniques, les modules ESP à deux étages et leurs composants de contrôle, ainsi que les instruments de mesure.

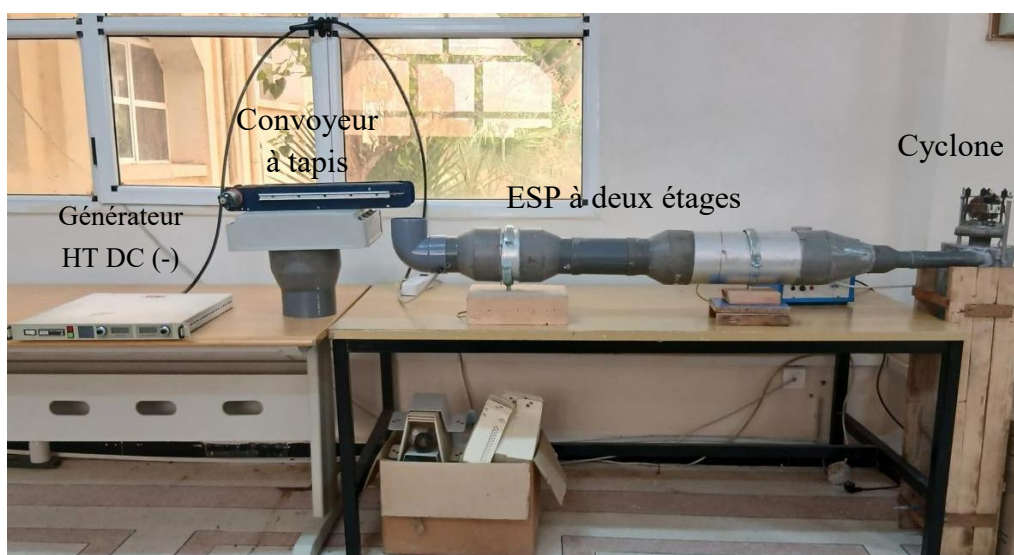
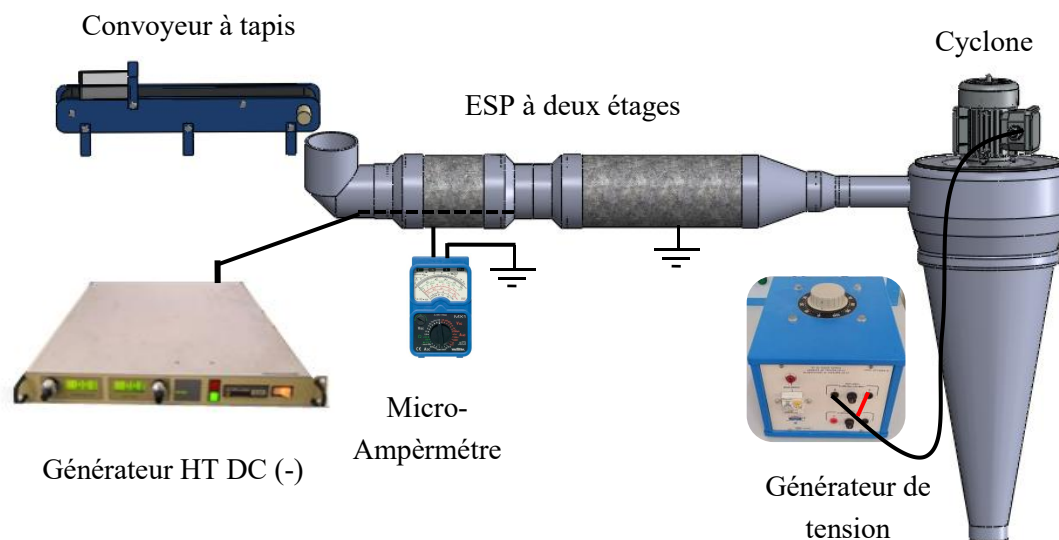


Figure II.1: Schéma de principe du dispositif expérimental

II.2.1 Description de la partie d'admission de la poudre :

L'alimentation en particules du précipitateur électrostatique (ESP) est assurée à l'aide d'un convoyeur à tapis, permettant l'introduction contrôlée des particules dans le système. Pour cette étude, deux fractions granulométriques de poudre de fumée de silice ont été utilisées : la première comprise entre $40\ \mu\text{m}$ et $63\ \mu\text{m}$, et la seconde entre $63\ \mu\text{m}$ et $80\ \mu\text{m}$.

Le choix de la poudre employée dans cette étude a été effectué de manière ciblée afin de garantir des conditions expérimentales représentatives de particules ultrafines réelles. Il s'agit de la fumée de silice, également connue sous le nom de microsilice, un sous-produit issu de la production industrielle du silicium ou du ferrosilicium dans les fours à arc électrique.

Ce matériau est constitué de particules sphériques ultrafines d'oxyde de silicium

amorphe (SiO_2), dont la taille moyenne est de l'ordre de $0,15 \mu\text{m}$, soit environ 100 fois plus fines que les particules de ciment. Sa grande surface spécifique et sa faible granulométrie en font un excellent candidat pour simuler des aérosols submicroniques dans le cadre de l'évaluation des performances de précipitateurs électrostatiques.

La fumée de silice utilisée présente une pureté généralement supérieure à 85 % en SiO_2 , et elle est produite par réduction thermique du quartz dans des conditions de haute température. En plus de son intérêt en tant que matériau modèle pour l'étude du comportement des particules ultrafines dans des dispositifs de filtration, elle est également largement exploitée dans le secteur du génie civil comme additif pour le béton en raison de ses nombreuses propriétés bénéfiques :

- Amélioration de la résistance mécanique ;
- Renforcement de la durabilité, en particulier face au gel-dégel et à la corrosion ;
- Réduction de la perméabilité du béton, augmentant sa résistance aux agents chimiques et à l'humidité ;
- Optimisation des propriétés rhéologiques du béton frais.

Dans cette étude, l'utilisation de la fumée de silice micronisée permet de reproduire un environnement chargé en particules submicroniques tout en garantissant une bonne reproductibilité expérimentale (Figure II.2)



Figure II.2 : Photographie des microparticules de fumé de silice utilisé.

La vitesse d'écoulement du produit à l'intérieur de l'ESP a été contrôlée par un dépoussiéreur cyclonique (vitesse maximal $v_{\text{asp}} = 40 \text{ m/s}$) placé en aval du dispositif de filtration, qui permet de récupérer aussi la poudre non filtrée ; la variation de la vitesse est assurée grâce au variateur de tension. Le rendement de filtration est estimé en utilisant l'équation classique suivante :

$$\eta (\%) = \left[1 - \frac{m_s}{m_{\text{int}}} \right] \times 100 \quad (\text{II. 1})$$

Où m_s et m_{int} sont la masse sortante non filtrée et la masse totale introduite, respectivement.

II.2.2 Dispositif de filtration

Le dispositif expérimental est un précipitateur électrostatique à deux étages, conçu pour séparer les fonctions d'ionisation et de collecte des particules. Le premier étage, dédié à l'ionisation, repose sur une configuration fil-cylindre : un ou plusieurs fils corona, reliés à une haute tension négative, sont tendus à l'intérieur d'un cylindre galvanisé de 200 mm de longueur et de 150 mm de diamètre, lui-même relié à la terre. Deux configurations ont été étudiées pour ce premier étage : une première avec un seul fil corona placé sur l'axe central du cylindre, avec des diamètres variant de 0,1 mm à 0,3 mm, correspondant à une distance inter-électrodes de 75 mm ; une seconde configuration dite « multi-fils » intègre quatre fils supplémentaires disposés de façon symétrique autour du fil central, à 25 mm de distance radiale, réduisant ainsi la distance inter-électrodes à 50 mm. Cette disposition accroît l'intensité du champ électrique local et renforce la densité de charge générée dans la zone d'ionisation.

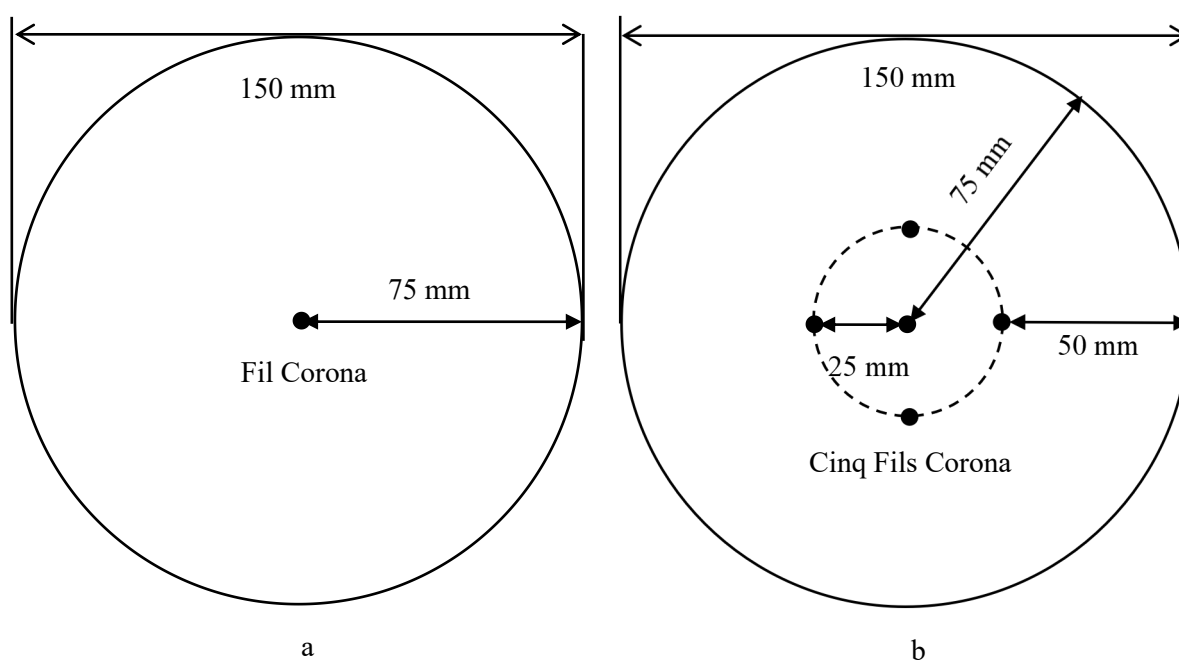


Figure II.3: Évolution de la géométrie du premier étage d'ionisation : (a) un seul fil central ; (b) cinq fils, avec un fil central et quatre périphériques.

Le second étage du précipitateur est dédié à la collecte des particules préalablement ionisées. Il adopte une configuration coaxiale tubulaire, dans laquelle un cylindre interne en aluminium de 10 mm de diamètre et 450 mm de longueur est centré à l'intérieur d'un cylindre externe galvanisé de 150 mm de diamètre et 400 mm de longueur. Le cylindre interne est relié à la haute tension, tandis que le cylindre externe est mis à la terre. Cette configuration génère un champ électrique radial uniforme entre les deux électrodes, déviant efficacement les

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 connectant les deux étages en série, soit par deux générateurs distincts, permettant un contrôle indépendant des tensions appliquées à chaque étage.

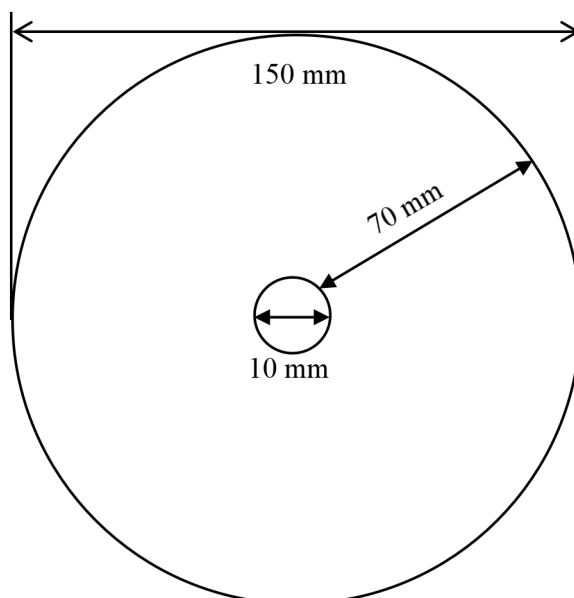


Figure II.4 : Deuxième étage : système coaxial tubulaire pour la collecte des particules.

II.2.3 Matériaux utilisés

a) Générateur haute tension

Les deux électrodes de séparateur sont reliées à deux sources de haute tension l'une positive et l'autre négative de 0 - 60 KV (Figure 4.8). Le champ généré par les deux électrodes grâce aux deux sources est d'une grande importance pour séparer les particules de signe de charge opposé.

Le système d'alimentation utilisée pour nos expérience est constitué générateur haute tension continue de polarité négative et positive de marque SPELLMAN, série SL 300 (± 40 kV ; ± 7.5 mA) ayant une précision de 0,1 kV.



Figure II.5 : photographie de source de haute tension SPELLMAN

b) Micro-Ampèremètre :

Micro Ampèremètre est un instrument de mesure utilise pour mesure le courant de la décharge couronne.



Figure II.6 : photographie de micro Ampèremetre

c) Thermo-hygromètre numérique :

Mesure de la valeur de l'humidité relative (RH%) et de la température. est prise avant chaque série d'expériences on utilise un thermo-hygromètre numérique (Figure 3.11), de marque TESTO. Qui permet aussi de mesurer la température.



Figure II.7 : photographie de thermo-hygromètre

d) Anémomètre thermique à hélice :

Les anémomètres à hélice sont des instruments de mesure du vent traditionnels, largement utilisés aussi bien en intérieur qu'en extérieur. Leur utilisation simple permet une mesure rapide de la vitesse du vent ou de l'air. De nombreux modèles offrent également la

possibilité de mesurer le débit volumétrique et la température, ce qui facilite l'évaluation et la comparaison des données.



Figure II.8 : photographie de Anémomètre à hélice

e) Balance de laboratoire électronique :

Une balance numérique est utilisée pour mesurer la quantité de poussière récupérée par le cyclone ainsi que celle collectée à l'intérieur du précipitateur électrostatique (ESP). Elle a une capacité maximale de 2400 g et une résolution de 0,1 g.



Figure II.9 : Balance de laboratoire électronique

f) Auto-transformateur :

La régulation de la vitesse d'aspiration du cyclone est assurée par un auto-transformateur. En ajustant la tension d'alimentation du ventilateur couplé au cyclone, il est possible de faire varier le débit d'air circulant dans le système. Cette variation permet de contrôler la quantité de particules aspirées et d'optimiser le fonctionnement du dispositif de collecte. L'utilisation de l'auto-transformateur offre ainsi une flexibilité dans les conditions expérimentales, en facilitant l'étude de l'influence du débit sur l'efficacité globale de séparation des particules.



Figure II.10 : Balance de laboratoire électronique

II.4 Protocole expérimentale

L'étude expérimentale a été conçue pour comparer deux configurations géométriques du premier étage d'ionisation dans un précipitateur électrostatique à deux étages, en s'appuyant principalement sur la mesure de la masse des particules collectées au niveau du second étage, ainsi que sur la détection éventuelle de dépôts indésirables dans le premier étage.

Dans un premier temps, une caractérisation électrique à vide (sans particules) est réalisée 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 tensions proches du claquage. L'alimentation est assurée par un générateur unique de haute tension négative, connecté aux deux étages. Grâce à la configuration coaxiale tubulaire du deuxième étage, aucun phénomène de décharge couronne n'apparaît dans cette zone, même à haute tension, garantissant que l'ionisation reste confinée au premier étage.

Dans la seconde phase, des particules solides (fumée de silice) sont introduites par un écoulement d'air caractérisé par une vitesse moyenne $v = 24$ m/s et un débit massique $Q = 1$ g/s. Deux configurations géométriques du premier étage sont comparées :

Configuration à cinq fils : un fil central entouré de quatre fils périphériques placés à 25 mm du centre, soit une distance inter-électrodes réduite à 50 mm pour les fils périphériques. Cette disposition augmente localement l'intensité du champ électrique, favorisant une ionisation plus intense.

Configuration à un seul fil : un fil corona central unique placé dans un cylindre de 150 mm, offrant une distance inter-électrodes de 75 mm.

Pour chaque configuration, la masse totale des particules collectées au niveau du second étage est mesurée. En parallèle, le premier étage est inspecté visuellement après chaque essai afin de détecter tout dépôt indésirable de particules sur les parois internes, signe d'une

collecte non souhaitée dans la zone d'ionisation. Ce critère est déterminant pour évaluer la capacité du système à ioniser efficacement les particules sans provoquer leur dépôt prématuré.

Enfin, les tests sont reproduits selon deux modes d'alimentation électrique :

avec un seul générateur de haute tension négative alimentant les deux étages en série ;

puis avec deux générateurs distincts : l'un négatif pour l'ionisation dans le premier étage (décharge couronne), et l'autre positif pour la collecte dans le deuxième étage (champ de collection).

Ce protocole permet ainsi de comparer les performances des deux géométries du premier étage (un fil vs cinq fils), en lien avec les différents modes d'alimentation (mono- ou bi-générateur), afin d'identifier la configuration optimale maximisant l'efficacité d'ionisation tout en évitant la collecte dans le premier étage.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description détaillée des différents bancs expérimentaux mis en œuvre pour l'étude du précipitateur électrostatique à deux étages. Le premier étage, dédié à l'ionisation, a été configuré selon deux géométries distinctes : une configuration multi-fils (cinq fils corona répartis autour d'un fil central) et une configuration à fil unique, dont le diamètre a été progressivement modifié afin d'évaluer son influence sur la densité de charge et la maîtrise de la décharge couronne. Le second étage, destiné à la collecte, adopte une structure coaxiale tubulaire permettant de générer un champ électrique radial uniforme.

Les différents composants du dispositif ont été décrits, de même que les sources de haute tension et les modes d'alimentation possibles : soit un seul générateur alimentant les deux étages en série, soit deux générateurs indépendants pour un meilleur contrôle des champs électriques. Enfin, les protocoles de mesure, incluant à la fois les essais à vide (caractérisation électrique I–V) et les expériences en présence de particules, ont été clairement définis.

Ce chapitre constitue ainsi la base expérimentale nécessaire pour analyser, dans le chapitre suivant, les performances comparées des différentes configurations, en termes de comportement électrique, de densité de charge, et d'efficacité de collecte.

Chapitre03:

Étude expérimentale et analyse des
performances

III.1 INTRODUCTION

Le précipitateur électrostatique à deux étages, basé sur la séparation fonctionnelle entre ionisation et collecte, offre une solution efficace pour améliorer le rendement de précipitation tout en évitant certains inconvénients classiques tels que la back-corona, la collecte prématurée dans la zone d'ionisation ou la production excessive d'ozone. En concentrant la décharge corona dans le premier étage et en maintenant un champ électrique pur dans le second, cette configuration permet une meilleure maîtrise de la charge injectée et une optimisation des conditions de collecte.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus à partir des configurations étudiées précédemment. L'analyse porte à la fois sur les caractéristiques électriques (courbes I-V), les observations qualitatives (présence ou absence de dépôts dans le premier étage), ainsi que sur les performances de collecte évaluées par la masse de particules récupérées. Cette étude vise à identifier la configuration géométrique et les conditions de polarisation les plus efficaces pour une ionisation sans capture, assurant ainsi un fonctionnement optimisé du système global.

III.2 RÉSULTAT ET DISCUSSION

Dans les sections suivantes, les caractéristiques de la décharge couronne, l'efficacité de collecte de l'ESP ainsi que celles de chaque étage sont présentées et analysées séparément.

Les expériences ont été réalisées dans des conditions ambiantes relativement stables, avec une température moyenne de 27,8 °C ($\pm 1,5$ °C) et une humidité relative de 48,5 % ($\pm 2,5$ %).

III.2.1 Caractéristique électrique

a) Premier étage

Dans le premier étage du précipitateur électrostatique (ESP), plusieurs variables électriques peuvent être ajustées afin de contrôler le processus de décharge couronne. Ce contrôle est rendu possible grâce à différentes configurations de l'électrode corona, incluant une disposition à cinq fils ainsi qu'une disposition à un seul fil, chacun testé avec deux diamètres différents (0,1 mm et 0,3 mm).

● Polarité négative

Le premier étage de l'ESP a été initialement conçu avec cinq fils coronas de 0,1 mm de diamètre, avant d'être modifié pour adopter successivement une configuration à un seul fil de 0,1 mm, puis de 0,3 mm de diamètre. La figure III.1 présente les courbes courant-tension (I-V) obtenues pour ces différentes configurations, sous polarité négative.

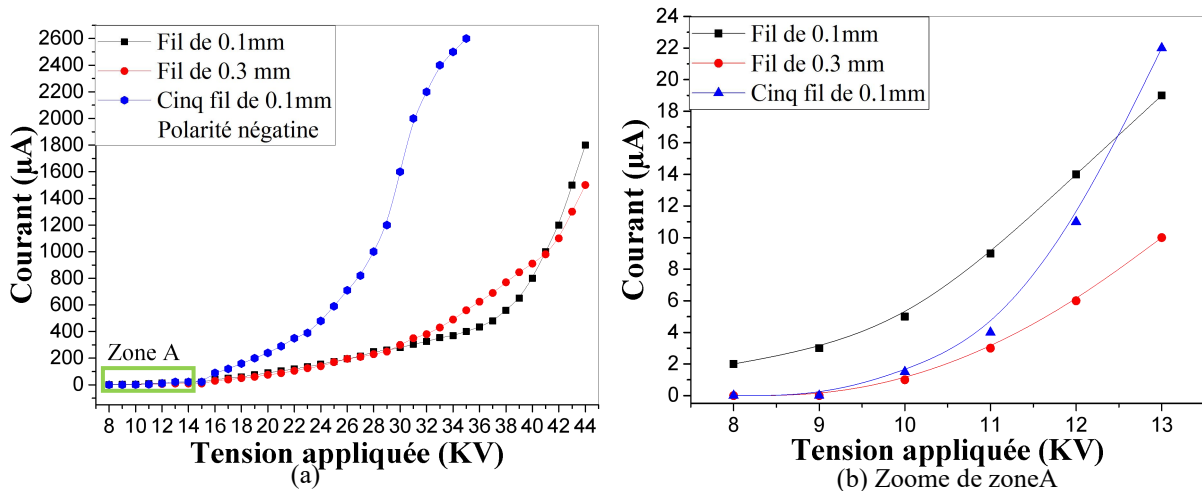


Figure III.1: Évolution du courant de décharge en fonction de la tension appliquée (polarité négative) pour différentes configurations du fil corona.

On observe que, dans la configuration à cinq fils coronas de 0,1 mm de diamètre, la décharge couronne apparaît plus précocement et le courant de décharge augmente plus rapidement avec la tension appliquée. La tension de claquage intervient également plus tôt que dans les configurations à un seul fil (environ 38 kV). Ce comportement s'explique par l'effet de superposition des champs électriques générés par les différents fils, qui renforce le champ total dans la zone inter-électrodes, favorisant ainsi un déclenchement plus rapide de la décharge et une ionisation plus efficace du gaz.

En comparaison, dans le cas d'un seul fil corona de 0,3 mm, la décharge apparaît plus tardivement, à partir d'environ 9 kV, et le courant de décharge reste inférieur à celui mesurée avec un fil de 0,1 mm. Ce phénomène s'explique par la diminution du champ électrique à la surface du fil lorsque son diamètre augmente, ce qui retarde l'apparition de la couronne et limite l'efficacité du processus d'ionisation.

Ces résultats mettent en évidence l'influence significative de la géométrie de l'électrode corona sur le comportement de la décharge couronne. Les fils plus fins permettent de générer localement des champs plus intenses, ce qui favorise un déclenchement précoce. Par ailleurs, l'utilisation de plusieurs fils accroît la surface d'émission et améliore l'uniformité spatiale de la décharge, ce qui optimise le chargement des particules dans le premier étage du précipitateur.

● Polarité positive

La figure III.2 présente les courbes courant-tension (I-V) obtenues pour ces différentes configurations, sous polarité positive.

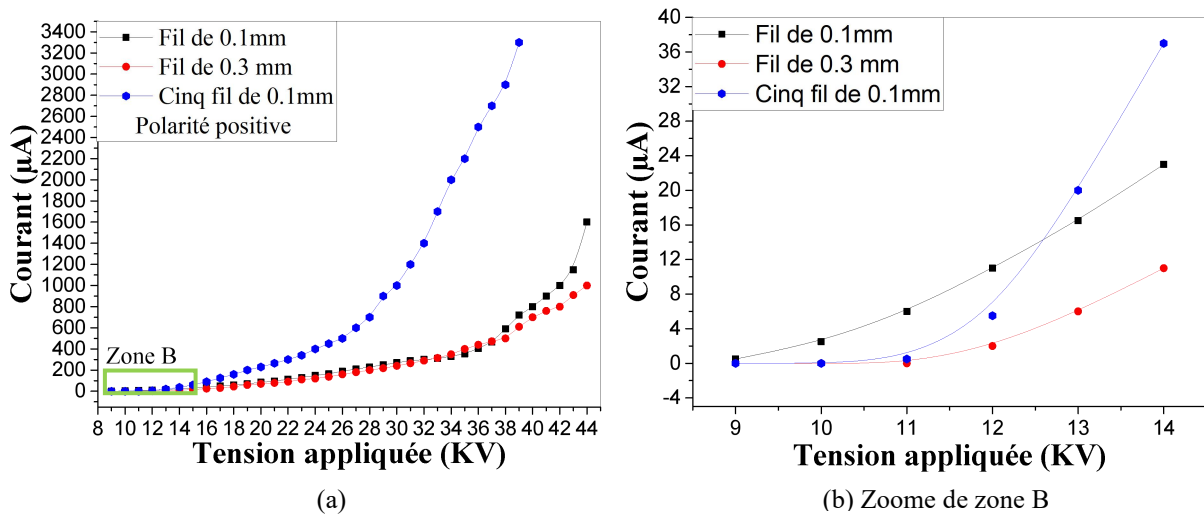


Figure III.2: Évolution du courant de décharge en fonction de la tension appliquée (polarité positive) pour différentes configurations du fil corona.

Une tendance similaire est observée lorsque la polarité de la haute tension est inversée, c'est-à-dire en polarité positive. Toutefois, il est important de noter que, pour une même géométrie, le courant de la décharge en polarité positive sont généralement supérieures à celles observées en polarité négative. Cette différence s'explique par la physique même du mécanisme de formation de la décharge couronne : en polarité négative, les électrons libres sont rapidement accélérés et déclenchent plus facilement le processus d'avalanche électronique, alors qu'en polarité positive, ce sont les ions positifs plus lourds qui dominent initialement le processus, nécessitant une tension plus élevée pour initier et maintenir la décharge.

b) Deuxième étage

La figure III.3 montre l'évolution du courant de la décharge en fonction de la tension appliquée en deuxième étage pour pour les deux polarité négative et positive

et un seul fil de 0.3). Le courant de la décharge augmente progressivement avec la tension appliquée, lorsqu'il dépasse la tension de seuil de l'effet couronne (environ - 8 kV). De plus.

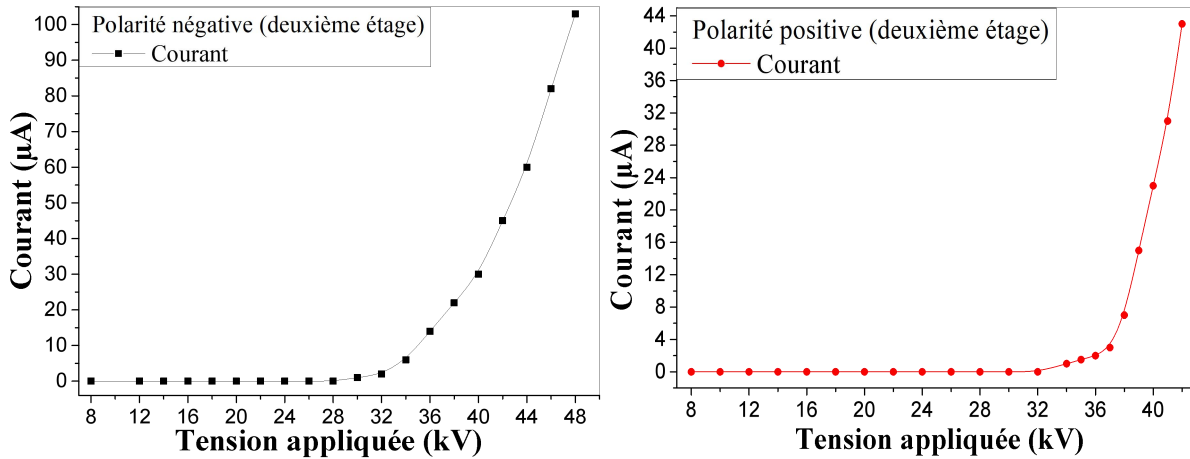


Figure III.3: Évolution du courant de décharge en fonction de la tension appliquée pour deuxième étage.

On constate que le courant mesuré dans le second étage reste très faible, ce qui confirme l'absence de décharge couronne dans cette zone. Cela indique que seul un champ électrique est présent, suffisant pour assurer la collecte des particules chargées issues du premier étage. Cette observation valide l'efficacité du second étage en tant que zone de collecte pure, sans génération supplémentaire d'ions ni de sous-produits indésirables comme l'ozone.

La configuration utilisée repose sur une géométrie coaxiale tubulaire, avec un cylindre collecteur de 10 mm de diamètre placé à l'intérieur d'un cylindre externe de 150 mm relié à la terre. Cette disposition permet d'établir un champ électrique radial relativement uniforme, capable de guider efficacement les particules chargées vers la paroi collectrice, tout en évitant l'apparition d'une décharge couronne, même à des tensions élevées.

Par ailleurs, une différence de comportement est observée entre les deux polarités : le claquage intervient plus tôt en polarité positive qu'en polarité négative, bien que le courant de décharge mesuré en négatif soit plus important. Ce phénomène est typique des décharges dans les gaz, où la polarité positive favorise des mécanismes de claquage plus précoces en raison de la dynamique des ions positifs et des effets de champ au voisinage des électrodes. Ce constat **justifie le choix d'une polarité négative pour l'alimentation haute tension**, car elle permet une montée en tension plus progressive et plus sûre, limitant le risque de claquage prématuré et assurant une plus grande stabilité de fonctionnement.

Enfin, les résultats montrent que l'augmentation du diamètre du fil corona diminue significativement l'intensité de la décharge électrique. En effet, **un fil plus épais** génère un **champ électrique maximal plus faible** à sa surface, ce qui retarde l'apparition de la décharge couronne. Cette propriété est particulièrement avantageuse pour le contrôle du champ dans le système global, notamment lorsqu'un seul générateur alimente à la fois l'étage d'ionisation et celui de collecte. Cela permet d'éviter une décharge parasite dans le second étage, tout en assurant un champ suffisant pour attirer les particules chargées.

III.2.2 L'efficacité de collecte

a) Efficacité globale de collecte

Figure III.4 présente l'évolution de l'efficacité de collecte de l'ESP en fonction de la tension appliquée, pour une masse d'aérosol de 5 g injectée à un débit massique $Q = 1 \text{ g/s}$ et une vitesse moyenne d'écoulement $v = 24 \text{ m/s}$

Les tailles de particules étudiées varient de 63 à 80 μm . L'efficacité de collecte la sortie de l'ESP augmente avec l'augmentation de la tension appliquée.

L'efficacité de collecte être définie à l'aide de l'équation suivante :

$$\eta (\%) = \left[1 - \frac{m_s}{m_{\text{int}}} \right] \times 100 \quad (\text{III. 1})$$

Où m_s et m_{int} sont la masse sortante non filtrée et la masse totale introduite, respectivement.

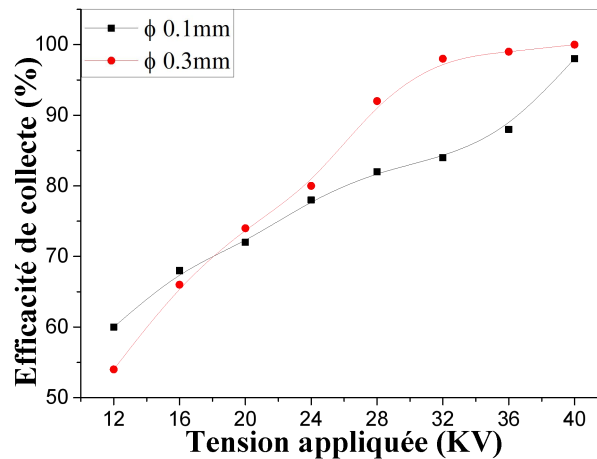


Figure III.4: Évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée

On observe que l'efficacité de collecte augmente globalement avec la tension appliquée, ce qui est attendu en raison de l'amélioration du niveau de chargement des particules dans le premier étage. À partir de 24 kV, l'ESP équipé d'un fil corona de 0,3 mm de diamètre dans le premier étage présente de meilleures performances de collecte que celui utilisant un fil de 0,1 mm. Ce comportement s'explique par le fait qu'un fil de plus grand diamètre limite l'intensité de la décharge couronne dans le premier étage, tout en permettant une ionisation suffisante des particules. Bien que certaines particules ne soient pas collectées dans ce premier étage, elles sont efficacement récupérées dans le deuxième étage, grâce à la présence d'un champ électrique radial uniforme généré par la géométrie coaxiale tube-cylindre (10 mm – 150 mm), utilisée dans toutes les configurations.

Ainsi, bien que le fil de 0,3 mm produise un champ électrique moins intense localement, il contribue à un meilleur équilibre entre ionisation contrôlée et stabilité du champ dans l'ensemble du dispositif, en particulier à haute tension. Ces résultats soulignent l'importance de choisir une géométrie d'électrode adaptée à une architecture à deux étages, où l'ionisation

et la collecte sont physiquement séparées.

b) Efficacité de collecte par étage

Figure III.5 présente l'évolution de l'efficacité de collecte de l'ESP en fonction de la tension appliquée en premier étage et deuxième étage.

L'efficacité de collecte être définie à l'aide de l'équation suivante :

$$\eta (\%) = \left[\frac{m_{\text{collectée}}}{m_{\text{totale}}} \right] \times 100 \quad (\text{III. 2})$$

Où $m_{\text{collectée}}$ représente la masse des particules collectées, soit au niveau du premier étage, du deuxième étage, ou des deux, et m_{totale} la masse totale de particules introduite dans le système

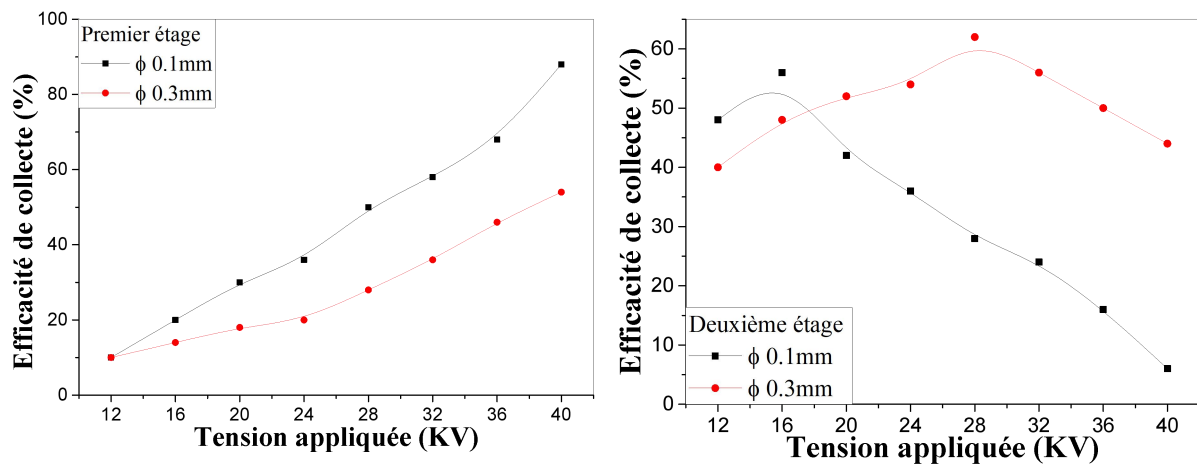


Figure III.5 : Evolution de l'efficacité de collecte de l'ESP en fonction de la tension appliquée en premier étage et deuxième étage pour fil corona de diamètre 0.1mm et 0.3mm

La figure relative au premier étage montre que l'efficacité de collecte augmente avec la tension appliquée, et qu'elle varie significativement selon le diamètre du fil corona. En effet, la configuration avec un fil de 0,1 mm de diamètre permet une collecte plus efficace que celle avec un fil de 0,3 mm. Ce comportement s'explique par un champ électrique plus intense autour du fil plus fin, favorisant une ionisation et une capture simultanées des particules dans le premier étage.

Par exemple, pour une tension de 40 kV, environ 90 % des particules sont collectées dans le premier étage avec un fil de 0,1 mm, contre 54 % seulement avec un fil de 0,3 mm. Cela montre que, dans le cas du fil fin, la majorité des particules sont à la fois ionisées et immédiatement collectées dans le premier étage.

Concernant le deuxième étage, la figure montre que pour la configuration à fil de 0,1 mm, l'efficacité de collecte diminue avec l'augmentation de la tension. Cela est dû au fait que la majorité des particules ont déjà été collectées en amont, laissant peu de particules résiduelles à capturer. À 40 kV, par exemple, l'efficacité du premier étage atteint $\eta_1 = 89 \%$, tandis que celle du second est réduite à $\eta_2 = 7 \%$.

À l'inverse, pour le fil de 0,3 mm, l'efficacité du deuxième étage est plus élevée,

notamment à tension modérée. Pour une tension de 28 kV, l'efficacité atteint $\eta_1 = 28 \%$ dans le premier étage et $\eta_2 = 62 \%$ dans le second, ce qui représente un équilibre optimal entre ionisation suffisante et collecte efficace. Cependant, au-delà de 28 kV, l'augmentation du courant de décharge dans le premier étage semble entraîner une légère chute d'efficacité dans le second, probablement en raison d'un phénomène de saturation ou d'une recombinaison partielle des charges.

Ainsi, dans le cas du fil de 0,3 mm, la tension de 28 kV apparaît comme un compromis optimal, permettant de maximiser la collecte dans le deuxième étage tout en maintenant un niveau de chargement adéquat dans le premier.

● Synthèse des résultats

Ces résultats suggèrent qu'il est possible d'optimiser davantage le fonctionnement de l'ESP à deux étages en ajustant le diamètre du fil corona dans le premier étage. En effet, en augmentant le diamètre du fil, il devient possible de générer un champ électrique suffisamment intense pour assurer une ionisation efficace des particules, tout en limitant leur collecte prématurée dans le premier étage. Cette configuration permettrait d'appliquer des tensions plus élevées sans atteindre le seuil de claquage, ce qui améliore le niveau de chargement des particules avant leur transfert vers le deuxième étage.

Ainsi, le deuxième étage, basé sur une géométrie coaxiale stable (tube-cylindre 10 mm – 150 mm), peut assurer une collecte optimale des particules déjà ionisées, sans apparition de décharge corona ni perturbation du champ électrique. Cette approche permet une séparation claire des fonctions : ionisation contrôlée dans le premier étage, et collecte efficace dans le second, tout en minimisant les pertes dues à la recombinaison ou à la déviation des particules.

c) Influence de l'alimentation haute tension sur l'efficacité de collecte

Dans cette section, deux configurations d'alimentation ont été étudiées pour le précipitateur électrostatique à deux étages : l'une avec un seul générateur haute tension négative pour l'ensemble du système, et l'autre avec deux générateurs distincts, l'un négatif pour l'ionisation (premier étage) et l'autre positif pour la collecte (deuxième étage)

La Figure III.6 illustre l'évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée, en comparant ces deux modes d'alimentation. Cette comparaison permet de mettre en évidence l'impact de la polarité et de la configuration de l'alimentation sur les performances globales du système.

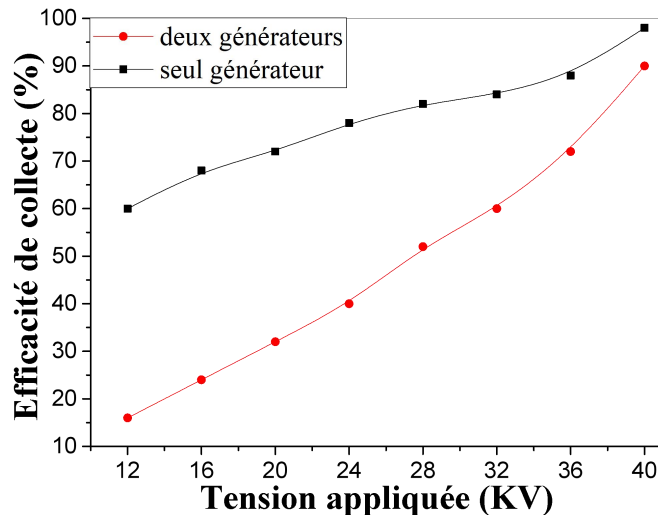


Figure III.6: Evolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée

On constate que l'efficacité de collecte est globalement plus faible dans le cas d'une alimentation par deux générateurs (tensions opposées) que dans le cas d'un seul générateur haute tension négative. Ce comportement s'explique par la dynamique des forces électrostatiques dans le second étage.

Lorsque le deuxième étage est alimenté par une tension positive, tandis que les particules ont été préalablement chargées négativement dans le premier étage, le champ électrique dans le deuxième étage est orienté de l'électrode centrale (positive) vers la masse (cylindre externe relié à la terre). Ainsi, la force électrostatique exercée sur les particules est dirigée vers l'électrode centrale, ce qui s'oppose à leur mouvement radial naturel vers les parois collectrices, réduisant leur probabilité de collecte efficace.

De plus, dans cette configuration, une partie des particules peut être piégée ou déviée prématurément dans le premier étage, où le champ est fort, provoquant une ionisation suivie d'une collecte immédiate, ce qui déséquilibre la répartition souhaitée entre les deux étages.

En revanche, l'alimentation par un seul générateur négatif crée un champ unidirectionnel cohérent dans tout le système, favorisant une charge optimale dans le premier étage, suivie d'une collecte efficace dans le second, sans inversion de la force électrostatique.

d) Impact du diamètre des particules sur l'efficacité de collecte

Dans cette partie, une comparaison de l'efficacité de collecte à la sortie de l'ESP est réalisée entre deux classes granulométriques de particules :

les particules de diamètre compris entre 63 et 80 μm , et celles de diamètre compris entre 40 et 63 μm .

L'objectif est d'analyser l'impact de la taille des particules sur le rendement global du précipitateur électrostatique, en tenant compte de la variation du comportement de chargement et de déviation électrostatique en fonction du diamètre.

● Cas de la géométrie avec fil corona de 0,1 mm

Figure III.7:représente l'évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée pour de fraction de diamètre de particules (40–63 μm et 63–80 μm),dans le cas de fil corona 0.1mm

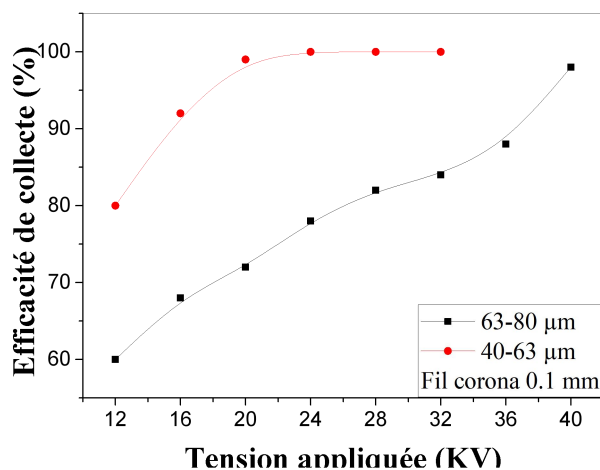


Figure III.7: Evolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée pour de fraction de diamètre de particules (40–63 μm et 63–80 μm).

Dans le cas où le premier étage de l'ESP est équipé d'un fil corona de 0,1 mm de diamètre, les résultats montrent que l'efficacité de collecte est plus élevée pour les particules de diamètre compris entre 40 et 63 μm , atteignant 100 % à une tension de 24 kV, contre 78 % seulement pour les particules de 63 à 80 μm .

les particules (40–63 μm) sont plus facilement ionisées en raison de leur faible masse, et sont plus sensibles aux forces électrostatiques, ce qui facilite leur déviation vers l'électrode de masse.

De plus, la présence d'un champ électrique intense autour du fil fin (0,1 mm) favorise une ionisation rapide et efficace, permettant la collecte majoritaire des particules dans le premier étage, avant qu'elles n'atteignent le second étage.

● Cas de la géométrie avec fil corona de 0,3 mm

Figure III.8:représente l'évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée pour de fraction de diamètre de particules (40–63 μm et 63–80 μm),dans le cas de fil corona 0.3mm

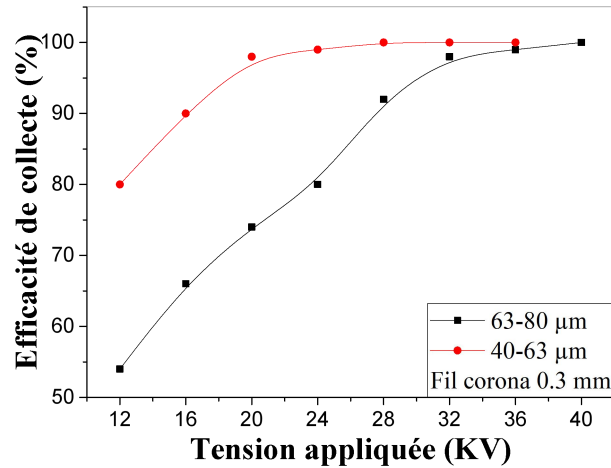


Figure III.8: Evolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée pour de fraction de diamètre de particules (40–63 µm et 63–80 µm).

Dans le cas où le premier étage du précipitateur est équipé d'un fil corona de 0,3 mm de diamètre, les résultats montrent que l'efficacité de collecte est maximale pour les particules de diamètre compris entre 40 et 63 µm, atteignant 100 % à une tension de 28 kV. En comparaison, pour les particules plus grosses (63–80 µm), l'efficacité reste inférieure, de l'ordre de 92 % à la même tension.

De plus, le fil corona de 0,3 mm génère un champ électrique modéré mais suffisamment uniforme, permettant une ionisation efficace sans établissement d'une décharge incontrôlée, et favorisant ainsi une collecte progressive et efficace dans le premier étage, en particulier pour les particules de faible diamètre.

III.3 CONCLUSION

Les résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre mettent en évidence l'influence déterminante des paramètres électriques (tension appliquée, polarité, mode d'alimentation) et de la géométrie du système (diamètre du fil corona, nombre de fils, disposition des étages) sur le comportement de la décharge couronne et sur l'efficacité globale de collecte des particules.

L'analyse des courbes courant-tension a montré que l'apparition et le développement de la décharge couronne sont fortement influencés par le diamètre du fil corona. Les fils plus fins (0,1 mm) génèrent des champs électriques localement plus intenses, favorisant une ionisation précoce, tandis que les fils plus épais (0,3 mm) retardent l'établissement de la décharge mais permettent un fonctionnement plus stable à tension plus élevée.

Les performances de collecte ont également révélé une dépendance à la taille des particules. En configuration horizontale, les particules plus petites (40–63 µm) sont plus facilement déviées vers les électrodes collectrices en raison de leur faible inertie, ce qui favorise leur capture efficace, notamment dans le cas du fil de 0,3 mm à 28 kV.

Par ailleurs, l'étude a comparé deux modes d'alimentation : un seul générateur haute tension négative, et deux générateurs de polarités opposées. Les résultats ont clairement montré que l'alimentation à partir d'un seul générateur négatif constitue la meilleure configuration, car elle évite les inversions de la force électrostatique entre les étages et réduit le risque de claquage. Ce mode garantit un fonctionnement plus stable et cohérent du dispositif.

Cependant, il a également été observé qu'une collecte excessive des particules dans le premier étage — en particulier avec un fil corona fin — peut réduire l'efficacité du deuxième étage. Ainsi, pour une architecture à deux étages, où l'ionisation et la collecte sont séparées, il est crucial de choisir une géométrie d'électrode permettant une ionisation efficace sans favoriser la collecte prématurée.

En conclusion, cette étude met en évidence l'importance d'une conception optimisée alliant un seul générateur haute tension, un diamètre de fil corona adapté, et une gestion contrôlée de la distribution du champ électrique entre les deux étages, afin de maximiser la performance globale de l'ESP tout en minimisant les pertes de collecte.

Conclusion générale:

Conclusion général

Ce travail expérimental a permis de démontrer l'intérêt d'une architecture à deux étages dans les précipitateurs électrostatiques, reposant sur la séparation des fonctions d'ionisation et de collecte. L'objectif principal était d'optimiser le processus d'ionisation sans engendrer de collecte prématurée dans le premier étage, afin de maximiser l'efficacité globale du système.

L'étude a montré que le **diamètre du fil corona** joue un rôle essentiel dans le **comportement électrique** de premier étage. Les fils plus fins favorisent une apparition plus précoce de la décharge, mais peuvent entraîner une collecte non souhaitée dans la zone d'ionisation. À l'inverse, l'utilisation d'un fil de diamètre plus élevé (0,3 mm) permet d'atteindre une **ionisation contrôlée**, sans décharge incontrôlée, et donc sans dépôt indésirable dans le premier étage, tout en autorisant une tension plus élevée. Ce compromis s'est révélé favorable à une **meilleure collecte en aval**, dans le deuxième étage.

Les tests ont également mis en évidence l'intérêt d'une **alimentation par un seul générateur haute tension négative** : cette configuration permet un fonctionnement plus stable, simplifie le système et réduit le risque d'inversion du champ électrique entre les étages. À travers des essais avec différentes tailles de particules (40–63 μm et 63–80 μm), l'efficacité de collecte a été évaluée dans diverses conditions. Les résultats ont validé l'approche expérimentale adoptée et ont confirmé l'importance de la conception géométrique et électrique du système pour maîtriser la distribution des charges et le déplacement des particules.

Perspectives

Plusieurs pistes peuvent être explorées pour prolonger ce travail :

- ✓ **Étudier d'autres diamètres de fil corona** (par exemple 0,6 mm, 0,1 mm, 1.2 mm) afin d'identifier le compromis optimal entre champ électrique, stabilité de l'ionisation et prévention de la collecte au premier étage.
- ✓ **Faire varier la longueur du premier étage (zone d'ionisation)** pour évaluer l'effet de la distance d'ionisation sur la charge acquise par les particules et leur trajectoire avant collecte.
- ✓ **Approfondir l'analyse théorique** du champ électrique généré par différentes configurations d'électrodes en utilisant la **loi de Peek**, afin de prédire les tensions critiques d'apparition de la décharge couronne selon les géométries et les conditions ambiantes.
- ✓ **Développer une modélisation numérique sous MATLAB** couplant le champ électrique, la charge des particules (via la loi de Pauthenier ou de Lawless) et leur trajectoire, dans une géométrie 2D ou 3D, pour simuler plus précisément le comportement du système avant expérimentation.
- ✓ **Appliquer cette approche à d'autres types d'aérosols** (fumées industrielles, nanoparticules, brouillards liquides) afin de valider la robustesse et la polyvalence du dispositif dans des environnements réels.

REFERENCE:

Références Bibliographiques

- [1] .I. Davidson, R.F. Phalen, P.A. Solomon, Airborne particulate matter and human health: a 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] H. J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation," Addison-Wesley, Reading, MA, 1963. Ch. 6.
- [5] Hakim Ait Said, Massinissa Aissou, Haval Nouri, Y. Zebboudj, «Effect of wires number on corona discharge of an electrostatic precipitators», *Journal of Electrical Systems*, vol.10, no.4, pp.392-4051, January 2014.
- [6] Berkane Krachai CharifaRemaoun sidi mohammedFarid MilouaNoureddine Zouzou, «Experimental modelling of wire-to-multicylinder Electrostatic Precipitator», *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol.96, no.10, pp.179-183, November 2020.
- [7] N. Zouzou, A. Zouaghi, F. Kherbouche, L. Dascalescu, C. MayerLaigle, and X. Rouau, "Study of two-stage-type electrostatic precipitator in axisymmetric configuration applied to finely ground lignocellulosic materials", in *Proc. 2017 Annu. Meeting IEEE Ind. Appl. Soc.*, Cincinnati, OH, USA, 1-5 October 2017, DOI: 10.1109/IAS.2017.8101688.
- [8] Noureddine Zouzou, Claire Mayer-Laigle, Xavier Rouau, Ayyoub Zouaghi, Fouad Kherbouche, Lucian Dascalescu, "Study of Two-Stage-Type Electrostatic Precipitator in Axisymmetric Configuration Applied to Finely Ground Lignocellulosic Materials", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.55, no.3, pp.3114-3121, 2019.
- [9] COMMISSION DE LA PRODUCTION ET DES ÉCHANGES, "La pollution de l'air", Technical report, Rapport d'Information N°3088 de l'Assemblée Nationale, 23 Mai 2001, <http://www.assemblee-nationale.fr/rap-info/i3088.asp>, 2001
- [10] A. D. Kappos et al., "Health effects of particles in ambient air", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol. 207, pp. 399-407, 2004.
- [11] I. M. Kennedy, "The health effects of combustion-generated aerosols", *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 2757-2770, 2007.
- [12] C. S. Tang, L. T. Chang, L. C. Lee, and C. C. Chan, "Effects of personal particulate matter on peak expiratory flow rate of asthmatic children", *Science of the Total Environment*, vol. 382, pp. 43-51, 2007.
- [13] R. Gouri, "Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré application aux particules submicroniques", Poitiers, France: Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2012

- [14] H. J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation", Wesley Publishing Company, Inc, 1963.
- [15] A. Mizuno, "Electrostatic precipitation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 5, pp. 615–624, 2000.
- [16] K. R. Parker, "Electrostatic precipitation", Chapman & Hall, 1997.
- [17] J.S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley, "Handbook of Electrostatic Processes" Marcel Dekker, New York, 1995.
- [18] T. J. Krinke, K. Deppert, M. H. Magnusson, F. Schmidt, H. Fissan, "Microscopic aspects of the deposition of nanoparticles from the gas phase", Journal of Aerosol Science, Vol. 33, No. 10, pp. 1341–1359, 2002.
- [19] C. U. Böttner, "The role of the space charge density in particulate processes in the example of the electrostatic precipitator", Powder Technology, Vol. 135–136, pp. 285–294, 2003.
- [20] R. Boichot, "Filtration des particules issues des moteurs diesel par matrices fibreuses plongées dans un champ électrique", Thèse de Doctorat de l'Université de Savoie, 2005.
- [21] C. Riehle, Basic and theoretical operation of ESPs. London: Electrostatic precipitation. Chapman & Hall, 1997.
- [22] G. Artana, G. Touchard, M.F. Morin, "Contribution to the analysis of the flow electrification process of powders in pneumatic conveyers", Journal of Electrostatics, Vol. 40–41, pp. 277–282, 1997.
- [23] G.O Touchard, S. Sammartino, G. Artana, F. Putier, S. Watanabe, "Technologie des pulvérulents dans les IAA - Chapitre 5 : Caractérisation électrique des milieux granulaires", Editions Tec & Doc, Paris, pp. 119-153, 2003.
- [24] Z. Sternovsky, A. Sickafoose, J. Colwell, S. Robertson, M. Horányi, "Contact charging of Lunar and Martian dust simulants", Journal of Geophysical Research, Vol. 72, No. 11, pp. 5105, 2002.
- [25] H. Pang, "Dépoussiérage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (terre) et rarifiée (planète Mars)". Grenoble, France: Thèse de Doctorat, Université Joseph FOURIER-Grenoble 1, 2006.
- [26] A. Bouarouri, "Développement d'un chargeur à décharge couronne pour la mesure à 10 Hz de la concentration d'aérosol atmosphérique", Paris, France: Thèse de Doctorat, Université PARIS-SUD, 2014.
- [27] P. Tochon, "Étude numérique et expérimentale d'électrofiltres industriels", Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, 1997.
- [28] J. A. Cross, "Electrostatics, principles, problems and applications", Edition Adam Hilger, Bristol, 1987.
- [29] H. Rohmann, "Methode zur messung der gröÙe von schwebeteilchen", Zeitung der Physik, vol. 17, pp. 253-265, 1923.

- [30] M. Pauthenier and R. Guillien, “Étude électromécanique de la charge limite d’une sphère conductrice dans un champ électrique ionisé”, C.R.A.S. Paris, vol. 195, 1932.
- [31] M. Pauthenier and M. Moreau-Hanot, “La charge des particules sphériques dans un champ ionisé”, Journal de Physique et le Radium, vol. 3, pp. 590-613, 1932.
- [32] J. R. Brock, “Non continuum unipolar charging of aerosol: the role of external electric field”, Journal of Applied Physics, vol. 41, pp. 1940-1944, 1970.
- [33] J. R. Brock and M. Wu, “Field charging of aerosol particles”, Journal of Colloid and Interface Science, vol. 45, pp. 106-114, 1973.
- [34] B. H. Y. Liu and D. H. Y. Pui, “On polar diffusion charging of aerosol in the continuum regime”, Journal of Colloid and Interface Science, vol. 58, No. 1, pp. 142–149, 1977.
- [35] A. Mizuno, “Contact-type electric curtain for electrodynamic control of charged dust particles”, in Proc. 1st International Conference on Electrostatic Precipitation, 1981.
- [36] J. R. MacDonald, “A mathematical model for calculating electric conditions in wire duct electrostatic precipitation”, Journal of Applied Physics, vol. 48, No. 6, pp. 2231- 2243, 1978.
- [37] J. P. Borra, “Nucleation and aerosol processing in atmospheric pressure electrical discharges: powders production, coatings and filtration”, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 39, pp. R19-R54, 2006.
- [38] N. A. Fuchs, “The charges on the particles of aerocolloids”, Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Geograficheskaya, vol. 11, p. 341, 1947.
- [39] N. A. Fuchs, “On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere”, Geofisica Pura e Applicata, vol. 56, p. 185, 1963.
- [40] H. J. White, “Particle charging in electrostatic precipitation”, AIEE Transactions, vol. 70, pp. 1186–1191, 1951.
- [41] P. A. Lawless and E. J. Shaughnessy, “Laser doppler anemometer measurements of particle velocity in a laboratory precipitator”, in IEEE Industry Applications (IAS) Annual Meeting, p. 1124, 1981.
- [42] P. A. Lawless, “Particles charging bounds, symmetry relations and analytic charging rate model for continuum regime”, Journal of Aerosol Science, vol. 27, pp. 191-215, 1996.
- [43] P. A. Lawless and R. F. Altman, “Espm: an advanced electrostatic precipitator model”, in 29th IEEE Industry Applications (IAS) Annual Meeting, Denver, 1994.
- [44] W. B. Smith and J. R. McDonald, “Development of a theory for the charging of particles by unipolar ions”, Journal of Aerosol Science, vol. 7, pp. 151-166, 1976.
- [45] 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.
- [46] D. Brocilo, J. S. Chang, and R. D. Findlay, “Modeling of electrode geometry effects on dust collection of wire-plate electrostatic precipitators”, in 8th International Conference on Electrostatic Precipitation ICESP, Birmingham, Alabama, USA, 2001.

- [47] B. J. Yoon, “Continuum theory for ionic field charging of spheroidal aerosols in nonuniform electric field”, *Chemical Engineering Science*, vol. 55, pp. 5485-5495, 2000.
- [48] S. Oglesby and G.B. Nichols, *Electrostatic Precipitation*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1978.
- [49] S. Masuda, A. Mizuno, “Initiation condition and mode of back discharge”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 4, pp. 35-52, 1977.
- [50] S. Masuda, J. D. Moon, “High intensity charging device for carbon soot particles”, In *Proc. 2nd International Conference on Electrostatic Precipitation*, p. 871, 1984.
- [51] Cours de Précipitateurs électrostatiques - concepts et théories - Master Génie Électrique, Université de Poitiers, 2012.
- [52] W. Deutsch, “Bewegung und ladung der elektrizitatstrager im zylinderkondensator”, *Annals of Physics*, Vol. 68, pp. 335–344, 1922.
- [53] G. L. Leonard, M. Mitchner, S. A. Self, “Particle Transport in Electrostatic Precipitators”, *Atmospheric Environment*, Vol. 14, pp. 1289-1299, 1980.
- [54] N. Tachibana, H. Fujishima, “Application of electrostatic precipitation with intermittent energization”, In *Proc. International Conference on Modern Electrostatics*, p. 14, 1988.
- [55] T. Yamamoto, M. Mieno, K. Shibata, and K. Sakai, “Studies on rapping reentrainment from electrostatic precipitators”, in *Proc. 7th International Conference on Electrostatic Precipitation ICESP*, pp. 163–170, 1998.
- [56] S. Masuda, A. Mizuno, “Light measurement of back discharge”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 2, pp. 375-396, 1977.
- [57] S. Masuda, A. Mizuno, “Flashover measurement of back discharge”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 4, pp. 215, 1978.
- [58] S. Masuda, T. Itagaki, J. Z. Wang, “Role of dust space charge in electrostatic precipitation and its measuring method”, In *Proc. 3rd International Conference on Electrostatic Precipitation*, p. 519, 1987.
- [59] K. Azuma, K. Ikeda, N. Kagi, U. Yanagi, H. Osawa, Physicochemical risk factors for building-related symptoms in air-conditioned office buildings: Ambient particles and combined exposure to indoor air pollutants, *Sci. Total Environ.* 616–617 (2018) 1649–1655.
- [60] L. Chen, E. Gonze, M. Ondarts, J. Outin, Y. Gonthier, Electrostatic precipitator for fine and ultrafine particle removal from indoor air environments, *Sep. Purif. Technol.* 247 (2020), 116964.
- [61] T. Zadi, M. Azizi, N. Nasrallah, A. Bouzaza, R. Maachi, D. Wolbert, S. Rtimi, A. A. Assadi, Indoor air treatment of refrigerated food chambers with synergetic association between cold plasma and photocatalysis: Process performance and photocatalytic poisoning, *Chem. Eng. J.* 382 (2020), 122951.
- [62] M. Ni, G. Yang, S. Wang, X. Wang, G. Xiao, C. Zheng, X. Gao, 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, 2017.

[63] X. Wang, J. Chang, C. Xu, J. Zhang, P. Wang, C. Ma, Collection and charging characteristics of particles in an electrostatic precipitator with a wet membrane collecting electrode, *J. Electrostat.* 83 (2016) 28–34.

[64] F. Xu, Z. Luo, W. Bo, L. Zhao, X. Gao, M. Fang, K. Cen, Experimental investigation on charging characteristics and penetration efficiency of PM_{2.5} emitted from coal combustion enhanced by positive corona pulsed ESP, *J. Electrostat.* 67 (2009) 799–806.

Résumé-Ce travail présente une étude expérimentale sur un précipitateur électrostatique à deux étages, conçu pour maximiser l'ionisation des particules tout en évitant leur collecte dans le premier étage. L'objectif principal est d'évaluer l'impact du diamètre du fil corona sur l'efficacité d'ionisation et la performance de collecte du système. L'enjeu est de garantir une forte densité de charge transférée aux particules sans dépôt prématuré dans le premier étage, afin d'optimiser la collecte dans le second.

Une première série d'expériences est menée à vide pour établir les caractéristiques courant-tension (I-V) et identifier la tension de seuil de décharge. Ensuite, des mesures sont réalisées en présence d'aérosols, à l'aide d'un seul générateur de haute tension négative alimentant successivement les deux étages, puis avec deux générateurs distincts (polarité négative pour l'ionisation, positive pour la collecte). Pour chaque diamètre de fil corona étudié, on vérifie l'absence de collecte dans le premier étage, tout en mesurant la masse de particules récupérées en sortie du système.

L'augmentation du diamètre du fil permet de retarder l'apparition de la décharge couronne, ce qui élève la tension seuil de décharge et offre ainsi une meilleure maîtrise de l'ionisation sans capture. Cette stratégie géométrique s'avère particulièrement efficace pour appliquer une tension plus élevée sans induire de collecte dans l'étage d'ionisation, et favorise ainsi une meilleure efficacité de collecte dans le deuxième étage. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence cruciale du diamètre du fil corona sur la répartition du champ électrique, la qualité de l'ionisation et la performance globale du précipitateur.

Abstract-This work presents an experimental study on a two-stage electrostatic precipitator (ESP) designed to maximize particle ionization while avoiding their collection in the first stage. The main objective is to evaluate the effect of the corona wire diameter on ionization efficiency and overall collection performance. The goal is to ensure high charge transfer to the particles without premature deposition inside the ionization zone, thus optimizing downstream collection.

An initial series of experiments was conducted without aerosols to establish the current-voltage (I-V) characteristics and determine the corona onset voltage. Subsequent tests were carried out with aerosols, first using a single negative high-voltage power supply connected to both stages, and then with two separate power supplies: a negative voltage for ionization and a positive voltage for collection. For each wire diameter, the absence of particle deposition in the first stage was verified, and the mass of particles collected in the second stage was measured.

Increasing the wire diameter delays the onset of corona discharge, thereby raising the threshold voltage and enabling better control of ionization without undesired collection. This geometrical approach allows the application of higher voltages while preserving particle transport toward the second stage, leading to enhanced collection efficiency. The results highlight the critical role of wire diameter in shaping the electric field, governing ionization dynamics, and determining the global efficiency of the ESP system.

ملخص يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لمرسب كهروستاتيكي ذو مرحلتين، تم تصميمه من أجل تعزيز عملية تأيين الجسيمات مع تجنب جمعها داخل المرحلة الأولى. الهدف الأساسي هو تقييم تأثير قطر سلك الكورونا

على كفاءة التأيين والأداء العام لعملية الجمع. الغاية هي ضمان شحن فعّال للجسيمات دون ترسيبها مبكرًا داخل منطقة التأيين، مما يسمح بجمعها بكفاءة في المرحلة الثانية.

تم إجراء سلسلة أولى من التجارب في حالة الفراغ (دون جسيمات) لدراسة العلاقة بين التيار والجهد وتحديد جهد بداية تفريغ الكورونا. بعد ذلك، تم إدخال الجسيمات في النظام، حيث أجريت القياسات (I–V) باستخدام مولد واحد عالي التوتر سالب يغذي المرحلتين، ثم باستخدام مولدين منفصلين: واحد للتأيين بجهد سالب، وآخر للجمع بجهد موجب. لكل قطر من أقطار أسلاك الكورونا المدروسة، تم التحقق من غياب ترسيب الجسيمات في المرحلة الأولى وقياس الكتلة المجمعة في المرحلة الثانية.

إن زيادة قطر السلك تؤدي إلى تأخير ظهور تفريغ الكورونا، مما يرفع جهد العتبة للتفريغ ويسمح بتحكم أفضل في عملية التأيين دون تجمع غير مرغوب فيه. تسمح هذه الاستراتيجية الهندسية بتطبيق جهود كهربائية أكبر دون التأثير على انتقال الجسيمات نحو المرحلة الثانية، وبالتالي تحسين كفاءة الجمع. وتبرز النتائج الدور الحاسم لقطر سلك الكورونا في تحديد توزيع المجال الكهربائي، والتحكم في ديناميكية التأيين، وتحقيق الأداء العام الأمثل لنظام المرسب الكهربائي.