

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 -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Electromécanique  
Spécialité : Electromécanique  
Thème

## **Caractéristique courant-tension d'un précipitateur électrostatique (PES) en configuration lame-plan**

Présenté Par :

SIDI IKHLEF Ben Amar  
SIDI YAKOUB Mohamed

Devant le jury composé de :

Dr BERRACHED	MCB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mme TOUHAMI	MAA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr AISSOU	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

**Année universitaire 2021/2022**

---



## ***Remerciement***

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

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

Nous voulons aussi remercier tous les étudiants pour notre promotion et

Nous souhaitons bonne chance à tous les étudiants pour terminer leurs études.

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

Enfin, nous avons le grand honneur de dédier ce modeste travail à :

Nos chers parents

Toute la famille **SIDI YAKOUB** et **SIDI IKHLEF**

À tous nos amis

À tous nos camarades du groupe de génie électrique

À tous les amis de l'étude

À tous les enseignants qui ont contribué

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

## Résumé :

De nombreux dangers menacent la santé et l'environnement à cause de pollution atmosphérique alors des chercheurs inventé et développé des machine pour purifié l'air parmi ces dernier sont les électro filtres C'est un système typiquement flou, où un grand nombre de facteurs affectent ses performances d'une manière compliquée.

Ce travail est constitué principalement de :

La premier phase est consacrée pour l'étude théorique de la décharge couronne dans un EPS.

La deuxième partie nous avons élargi notre recherche a des expériences sur la caractéristique courante tension pour choisir les matériaux et les tailles plus favorable ceci via plusieurs effets (effet de polarité, espace inter électrodes ...).

## الملخص:

تهدد العديد من الأخطار الصحة والبيئة بسبب تلوث الغلاف الجوي لذلك ابتكر الباحثون وطوروا آلات لتنقية الهواء من بين هذه الأخيرة هي المرشحات الكهربائية وهو نظام ضبابي نموذجي ، حيث يؤثر عدد كبير من العوامل على أدائه بطريقة معقدة.

يتكون هذا العمل بشكل أساسي من:

المرحلة الأولى مخصصة للدراسة النظرية لتصريف الإكليل في المرشح الإلكتروني

في الجزء الثاني ، قمنا بتوسيع نطاق بحثنا ليشمل تجارب على خاصية التيار الكهربائي لاختيار أفضل المواد وأحجامها من خلال عدة تأثيرات (تأثير القطبية ، الفضاء بين القطب الكهربائي ، إلخ).

## Abstract:

Many dangers threaten health and the environment because of atmospheric pollution so researchers invented and developed machines to purify the air among these are the electro filters it is a typically vague system, where a large number of factors affect its performance in a complicated way.

This work mainly consists of:

The first stage is devoted to the theoretical study of corona discharge in EPS.

In the second part, we extend our research to include experiments on electric current property to select the best materials and their sizes through several effects (polarity effect, inter-electrode space, etc.).

# **Nomenclature**

$a$  : distance inter-lames.

$d_p$  : Diamètre de la particule

$E$  : champ électrique.

$e$  : Charge élémentaire de l'électron

$Hr$  : humidité relative.

$h$  : distance inter-électrodes.

$I$  : courant moyen de la décharge.

$K$  : constante.

$M$  : Masse molaire

$m_i$  : Masse d'un ion

$qp$  : Charge de la particule

$q_p^s$  : Charge de saturation de la particule pour  $t \rightarrow \infty$  (charge limite)

$R$  : résistance d'amortissement.

$R_1, R_2$  : rayons des courbure des électrode active

$R_e$  : le rayon équivalent (loi de Cooperman).

$r_0$  : rayon de courbure de la lame.

$T$  : température.

$V_0$  : tension seuil de l'effet couronne.

$V$  : différence de potentiel appliquée entre deux électrodes.

$V_c$  : tension de claquage.

$v_i$  : la vitesse d'agitation thermique des ions

$\delta$  : densité relative du gaz.

$\rho$  : densité de la charge d'espace.

$\mu$  : mobilité électrique moyenne des ions.

$\mu^+$  : mobilité électrique moyenne des ions positifs.

$\mu^-$  : mobilité électrique moyenne des ions négatifs.

$\mu_g$  : Viscosité dynamique du gaz.

$\varepsilon$  : Taux de dissipation turbulente

$\varepsilon_0$  : permittivité électrique du vide ( $=8,85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ ).

$\varepsilon_r$  : Constante diélectrique relative de la particule

$\gamma_g$  : Libre parcours moyen des molécules

$\tau_p$  : Temps de relaxation des particules



*Liste des figures et des  
tableaux*

:

Figure I.1 : Principe de la précipitation électrostatique dans les électrofiltres.

Figure I.2 : Electrofiltre a un seul étage fil-cylindre a gauche, fil-plaque a droite.

Figure I.3 : Electrofiltre a deux étages fil-plaque.

Figure I.4 : électrofiltres humide.

Figure I.5 : mécanisme de charge de particules.

Figure I.6 : Représentation schématique d'une décharge couronne en géométrie fil-cylindre.

Figure I.7 : Effet de couronne en tension négative.

Figure I.8 : Effet de couronne en tension positive.

Figure I.9 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne.

Figure I.10 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes ( $d = 0.5\text{cm}$ ,  $\emptyset=125\mu\text{m}$ , et  $H_r = 5\%$ ).

Figure I.11 : Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression.

Figure II.1 : Source de Haute Tension modèle Glassman, séries LT.

Figure II.2 : MX135 - Ampèremètre de laboratoire – METRIX.

Figure II.3 : Thermo-hygrometer Testo 625.

Figure II.4 : Anémomètre avec sonde à hélice intégrée testo 417.

Figure II.5 : Autotransformateur.

Figure II.6 : Balances de précision KERN PLS.

Figure II.7 : Aspirateur Souffleur.

Figure II.8 : Constitution du dispositif expérimental.

Figure II.9 : Le système d'injection.

Figure II.10 : Le system d'ionisation.

:

Figure II.11 : Le system d'ionisation.

Figure II.12 : le principe de fonctionnement.

Figure III.1 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance Inter-électrodes en polarité négative.

Figure III.2 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance Inter-électrodes en polarité positive.

Figure III.3 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la polarité de la tension appliquée.

Figure III.4 : Tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour les deux polarités.

Figure III.5 : Dépendance du rapport courant / tension ( $I / V$ ) avec la différence de tension ( $V - V_0$ ).

Figure III.6 : Variation du  $K^-/K^+$  selon la distance inter-électrodes

Figure III.7 : Caractéristiques courant-tension pour deux rayons de courbure différents avec polarité négative

Figure III.8 : Caractéristiques courant-tension pour deux rayons de courbure différents avec polarité positive.

Figure III.9 : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre de lames négatives.

Figure III.10 : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre de lames positives.

Figure III.11 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives.

Figure III.13 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives.

Figure III.12 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames positive.

:

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

Tableau III.1: La différence entre la polarité positive et négative.

Tableau III.2 : Résultats de facteur K pour les couronnes négative et positive

# *Sommaire*

---

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

## **Chapitre I: Généralités sur la précipitation électrostatique**

I.1 Introduction.....	4
I.2 Les électrofiltre .....	4
I.2.1 Historique.....	4
I.2.2 Principes de l'électrofiltration.....	4
I.2.3 Différents types d'électrofiltres.....	6
I.2.3.1 Les électrofiltres à un seul étage .....	6
I.2.3.2 Les électrofiltres à double étage.....	7
I.2.3.3 Les électrofiltres humides .....	8
I.3 La décharge électrique .....	9
I.3.1 Un peu d'histoire.....	9
I.3.2 La charge des particules .....	10
I.3.2.1 Charge par champ .....	11
I.3.2.2 Charge par diffusion.....	13
I.4 La décharge couronne .....	14
I.4.1 Les différents modes de décharges couronne.....	15
I.4.1.1 Effet de couronne en tension négative .....	15
I.4.1.2 Effet de couronne en tension positive .....	16
I.4.2 Les facteurs influençant la décharge couronne .....	17
I.4.2.1 Facteurs géométriques.....	17
I.4.2.1.1 Rayon de la courbure .....	17
I.4.2.1.2 Distance inter-électrodes.....	18
I.4.2.1.3 La nature des électrodes .....	18
I.4.2.2 Les facteurs physico-chimiques .....	19
I.4.2.2.1 La température .....	19

I.4.2.2.2 L'humidité.....	19
I.4.2.2.3 La pression .....	20
I.4.2.2.4 La densité de l'air.....	20
I.4.2.3 Facteurs électriques.....	20
I.5 Discussions & Conclusion .....	21

## **Chapitre II: Description du modèle expérimenta**

II.1 Introduction .....	23
II.2 Matériel utilisé.....	23
II.2.1 Source de Haute Tension.....	23
II.2.2 Ampèremètre Analogiques .....	24
II.2.3 Thermo-hygromètre.....	25
II.2.4 Anémomètre thermique à hélice.....	25
II.2.5 Autotransformateur.....	26
II.2.6 Balance de laboratoire électronique.....	26
II.2.7 Souffleur aspirateur électrique.....	26
II.3 Description du dispositif expérimental.....	27
II.3.1 Système d'injection .....	27
II.3.2 Système d'ionisation et de collection .....	28
II.4 le principe de fonctionnement .....	29
II.5 Conclusion .....	31

## **Chapitre III: Résultats et discussions**

III.1 Introduction .....	33
III.2 Caractéristiques courant-tension : .....	33
III.2.1 Effet de la distance inter-électrodes sur la décharge couronne.....	33

III.2.2 Effet de la polarité .....	36
III.2.3 Facteur géométrique K en fonction de la distance inter-électrodes.....	38
III.3 Effet du rayon de courbure R de la lame sur la décharge couronne.....	40
III.4 Influence du nombre de lames sur la décharge couronne .....	42
III.5 Effet de la distance inter-lames sur la décharge couronne .....	43
III.6 conclusion.....	47
Conclusion générale .....	48
Références bibliographiques .....	50



## Introduction générale

Depuis la prise de conscience politique d'une nécessaire préservation de l'équilibre climatique mondial et de l'impact sur cet équilibre des émissions de gaz à effet de serre, les gaz polluants et les particules solides sont les deux acteurs principaux responsables de la pollution atmosphérique [1]. Ils représentent respectivement 90% et 10% des masses globales de polluants rejetés dans l'atmosphère. Toutefois, parmi les facteurs dont les actions contribuent au développement et à la croissance de la pollution, on retrouve entre autres le développement des industries, la multiplication des moyens de transports et des flux qui en résultent, l'activité des ménages et l'exploitation intensive des énergies fossiles [2].

Chaque individu respire environ 11500 litres d'air par jour. En milieu urbain, la pollution atmosphérique prend une dimension particulière du fait de la concentration des activités humaines et du nombre important de personnes exposées [3]. Les particules ont un effet néfaste aussi bien sur la nature que sur l'homme. Leur taille est par ailleurs un paramètre important. Plus fines elles sont, plus longtemps elles restent en suspension dans l'air. Il en est de même de leur temps de séjour dans les poumons. En effet, lorsqu'elles ont un diamètre supérieur à 10  $\mu\text{m}$ , elles peuvent être expulsées des voies respiratoires ; de 3 à 10  $\mu\text{m}$ , elles se déposent au niveau de la trachée et des bronches ; à moins de 3  $\mu\text{m}$ , elles atteignent les alvéoles pulmonaires et peuvent pénétrer dans le sang. Elles sont par ailleurs suspectées d'être à l'origine de toutes sortes de problèmes de santé : asthme, bronchites persistantes et cancer du poumon [4].

Parmi les moyens de filtration utilisés pour diminuer la quantité de produits libérés dans l'atmosphère, une place très importante revient aux précipitateurs (ou filtres, ou encore dépoussiéreurs) électrostatiques. Ces installations de filtration sont largement utilisées depuis le début du 20ème siècle pour retenir les particules présentes dans les gaz résultants, par exemple, dans l'industrie métallurgique, l'industrie chimique ou celle de ciment ainsi que pour épurer les gaz produits par les centrales électriques brûlant du charbon.

Dans sa forme la plus simple, un électrofiltre est constitué d'une électrode émissive connectée à une alimentation en tension et d'une électrode de collecte reliée à la masse entre lesquelles circule un gaz contenant des particules électriquement neutre [5]. Le principe de ce procédé est de créer un plasma dans le volume à traiter, puis de charger les particules pour qu'elles dérivent, sous l'action des forces électrostatiques, vers l'électrode de collecte.

L'objectif de notre travail consiste à étudier la technologie de l'électro filtre en configuration lame-plan. Ainsi, l'amélioration de la qualité de l'air à travers la filtration.

Dans le premier chapitre, nous introduisons la pollution atmosphérique, ces paramètres et conséquences proposent une solution. Ensuite, nous nous consacrons à l'étude des différents précipitateurs électrostatiques existants, de leurs principes de fonctionnement et de leurs performances.

Le deuxième chapitre décrit le dispositif expérimental, le principe de fonctionnement et les méthodes de mesure des paramètres.

Le troisième et dernier chapitre est consacré aux résultats et à la discussion du dispositif expérimental et de son efficacité de filtration. Aussi pour la modélisation numérique.

Enfin, nous concluons par une conclusion générale et quelques perspectives.

*Chapitre I - Généralités sur la  
Précipitation électrostatique*

## I.1 Introduction

La lutte contre la pollution atmosphérique est un enjeu majeur de ce siècle pour cela la technologie a développé plusieurs systèmes de filtration parmi eux il existe l'électro filtre.

Notre chapitre aborde les concepts de base des électro filtres.

## I.2 Les électrofiltre

L'électrofiltration est un procédé extrêmement efficace pour la séparation des particules d'un gaz. Les électrofiltres sont principalement utilisés dans l'industrie lourde telle que la sidérurgie, les unités d'incinération des déchets, les cimenteries, les unités de production d'énergie [6]. Ils peuvent également être utilisés pour des applications domestiques telles que l'épuration de l'air des locaux (fumées de tabac, ...) ou celle des ambiances de travail (brouillards d'huile, poussières de bois, ...). Leur efficacité est extrêmement élevée, notamment pour les particules microniques et submicroniques ou d'autres systèmes sont peu efficaces [6].

### I.2.1 Historique

Les phénomènes électrostatiques ont été observés par les philosophes grecs vers 600 av. JC. Ils ont remarqué l'attraction de petites particules par l'ambre jaune (résine fossile) frotte sur de la peau d'animal. Au début du 17ième siècle, William Gilbert a noté qu'un diélectrique frotte attire les particules de fumée produite par un feu éteint. Les relations quantitatives décrivant les forces électrostatiques ont été introduites par F. Coulomb au 18ième siècle.

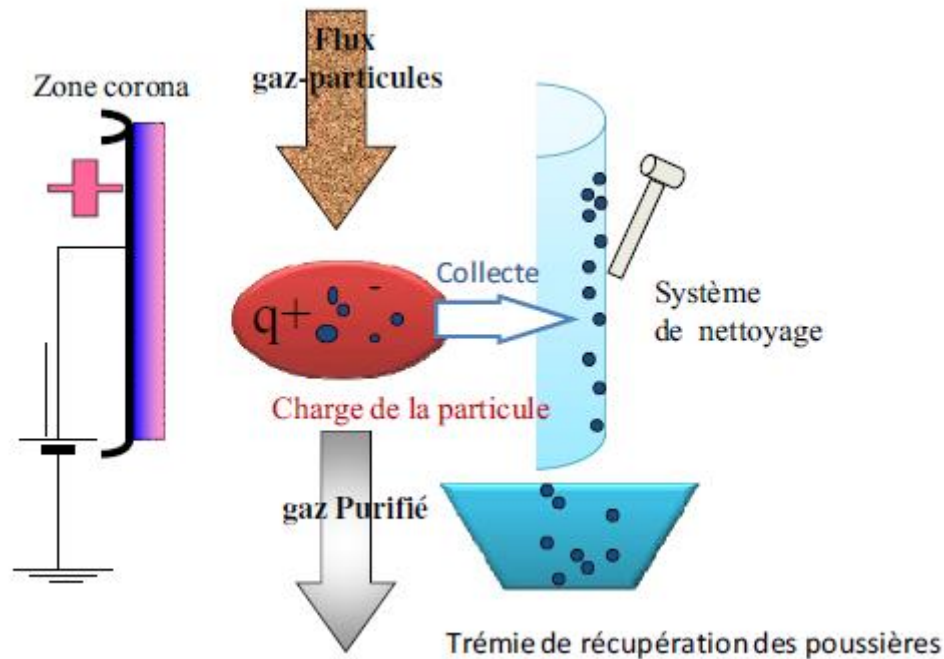
De nombreux rapports sur les effets électrostatiques voient le jour au début du 19ième siècle. Le premier appareil expérimental utilisant ces phénomènes est issu des travaux de Hochfelden [7]. Il a montré qu'une étincelle électrique pouvait dissiper la fumée contenue dans une bouteille. En 1850, Guitard [7] avait observé qu'une décharge couronne produisait les mêmes effets sur la fumée. En 1883, Lodge propose de purifier l'air dans les salles de fumeurs et dans les tunnels. Ce n'est qu'en 1907 que le premier électrofiltre conçu par Cottrell fonctionna de manière efficace [8]. Le premier precipitateur électrostatique est né et depuis, de nombreux travaux sont consacrés aux électrofiltres.

### I.2.2 Principes de l'électrofiltration

L'électrofiltration ou précipitation électrostatique est basée sur trois étapes fondamentales (**Figure I.1**) :

- ❖ charger électriquement les particules en suspension dans les gaz a traité.

- ❖ collecter les particules chargées sous l'action d'un champ électrique.
- ❖ récupérer les particules collectées.



**Figure I.1** : Principe de la précipitation électrostatique dans les électrofiltres.

Le fonctionnement d'un électrofiltre est relativement simple, mais la description et la compréhension de tous les phénomènes entrant en jeu dans la filtration est encore un sujet d'étude largement traité. Le principe des précipitateurs électrostatiques repose sur le passage du gaz porteur de particules entre deux électrodes (fil- cylindre, fil- plan, ...) [9], où est appliquée une forte différence de potentiel. Due à la dissymétrie des électrodes, une décharge électrique est générée, utilisée comme source d'ions qui va permettre de charger les particules en suspension dans le gaz. Les particules chargées sont ensuite déviées par le champ électrique, et migrent vers la contre-électrode où elles sont collectées [9].

L'accumulation de particules sur l'électrode de collecte nuisant à l'efficacité du procédé, le nettoyage des plaques est effectuée régulièrement. Si les particules sont liquides, le liquide tombe de l'électrode par gravitation. Si les particules sont solides, la couche de poussière collectée sur l'électrode est périodiquement enlevée en frappant les électrodes. La décharge électrique utilisée dans les installations industrielles est souvent négative et donc les

particules sont chargées négativement. Ce choix est dû à la tension de passage à l'arc, plus grande, pour une géométrie donnée, en polarité négative qu'en polarité positive [10].

### I.2.3 Différents types d'électrofiltres.

Hormis la forme géométrique de l'électrode collectrice du filtre électrostatique qui peut être cylindrique ou sous la configuration de plaque, on distingue plusieurs types de précipitateurs :

- ❖ les électrofiltres à un seul étage,
- ❖ les électrofiltres à double étage,
- ❖ les électrofiltres humides.

#### I.2.3.1 Les électrofiltres à un seul étage

Les électrofiltres à un seul étage sont les plus utilisés dans les applications industrielles.

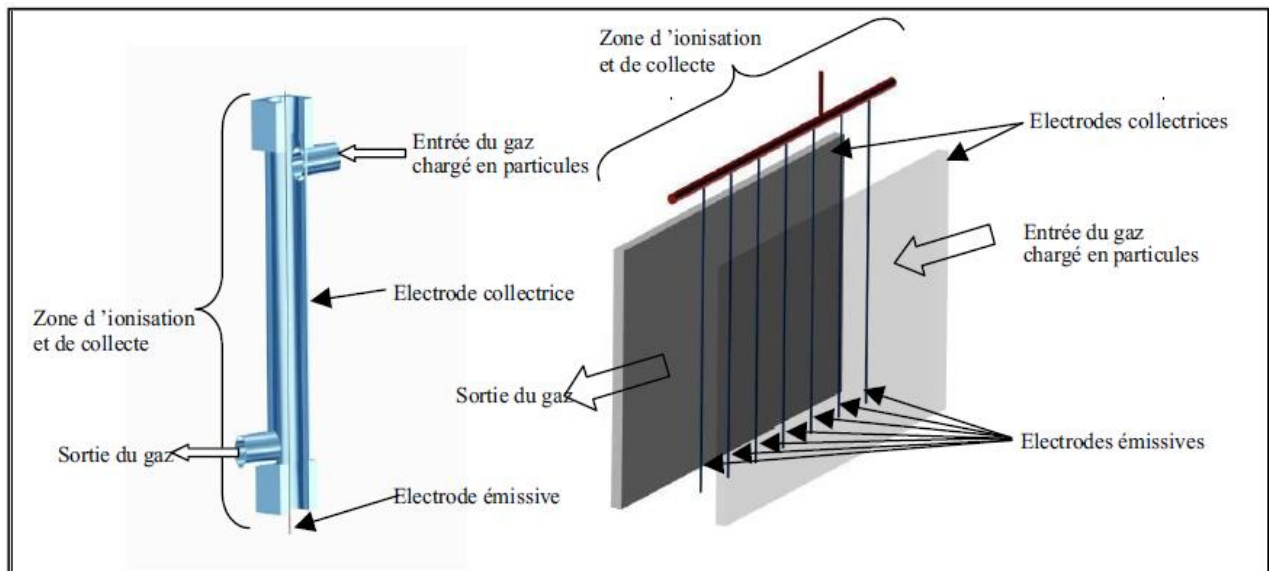
L'ionisation et la collecte des particules sont réalisées simultanément tout au long de l'électrofiltre (**Figure I.2**)

Les électrofiltres à un seul étage n'occasionnent que de faibles pertes de charge (50-100 Pa) et sont donc recommandés pour traiter les grands débits gazeux (80 000 m<sup>3</sup>/h par exemple). Le rendement d'épuration peut atteindre 99 % pour des particules fines de l'ordre du micromètre. Le minimum d'efficacité apparaît pour des poussières de diamètre égal à 0,2 µm.

Cependant le coût d'investissement est très élevé et la dépense électrique est de l'ordre de 1 W h/m<sup>3</sup> traité [11].

Les électrofiltres secs comportent les éléments suivants : un caisson, des électrodes émissives (fils ou grille) et collectrices (plaques), des systèmes de battage des électrodes et d'extraction des poussières (souvent un frappage périodique des électrodes par marteaux), un dispositif de répartition des gaz. Leur efficacité est maximale pour des vitesses d'écoulement de l'ordre 1 à 4 m/s (en général des grilles ou des chicanes placées en amont) et une alimentation haute tension (de 30 à 120 kV pour un courant de 20 à 600 mA) [11].

Un précipitateur électrostatique peut être alimenté par une haute tension de polarité positive ou négative. Cependant, pour une configuration d'électrofiltre donnée, la valeur électrique de l'amorçage de la décharge couronne, ainsi que celle de claquage entre les électrodes sont plus grandes en polarité négative qu'en polarité positive. C'est la raison pour laquelle la polarité négative est souvent utilisée dans les électrofiltres en un seul étage [12].



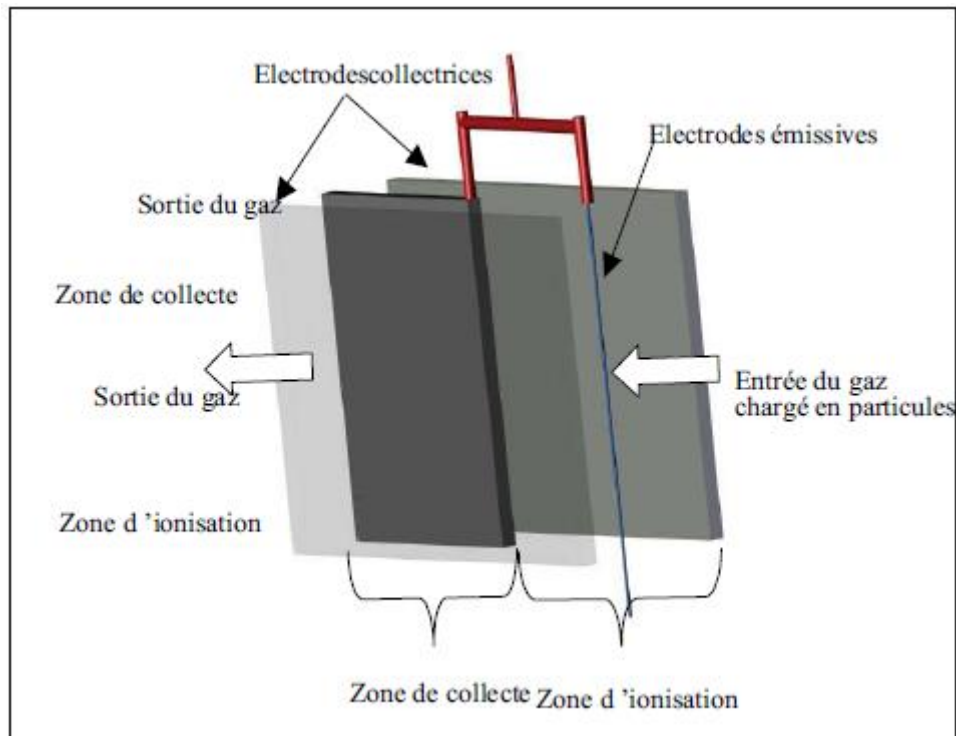
**Figure I.2 :** Electrofiltre à un seul étage fil-cylindre à gauche, fil-plaque à droite.

### I.2.3.2 Les électrofiltres à double étage

Les filtres électrostatiques à double étage sont équipés d'un premier étage ionisant dans lequel les particules sont chargées suivi d'un filtre électrostatique proprement dit. Ils ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement dans des installations de conditionnement d'air. Les deux étages d'un tel filtre sont alimentés séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de haute tension.

Le premier étage constitue la zone d'ionisation, comporte des électrodes de décharge en forme de fil ou de tube. Les électrodes de collecte peuvent être soit des plaques parallèles, soit des cylindres coaxiaux. La (figure I.3), présente une vue schématique d'un électrofiltre à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme de plaques. Ce type de précipitateur ne dispose pas de système de battage par frappe car le risque de réenvol des poussières est trop important. La récupération des particules se fait souvent par lavage des électrodes. Afin

d'avoir une production faible d'ozone, une haute tension de polarité positive est appliquée aux électrodes ionisantes [13].



**Figure I.3 :** Electrofiltre a deux étages fil-plaque.

### I.2.3.3 Les électrofiltres humides

Les électrofiltres peuvent être classifiés, selon le procédé qu'ils utilisent, en précipitateurs à sec et précipitateurs à liquide. Si les fines particules sont enlevées des électrodes de collecte seulement par grattage ou par vibration, on parle de précipitateur à sec. Si de l'eau ou un autre fluide est utilisé pour leur élimination, on parle de précipitateur à liquide. Le principe de base est montré sur la **figure I.4**.

La réalisation technique d'un électrofiltre humide est beaucoup plus compliquée car, dans ce cas, il est nécessaire d'ajouter un système de pompage et de distribution d'eau sur les électrodes de dépôt. En plus, l'effluent à traiter est au préalable saturé en vapeur d'eau ce qui demande une très bonne régulation du courant à travers l'espace inter-électrodes afin d'éviter des courts circuits. Tout ceci conduit à des coûts d'investissement et à des dépenses d'énergie très élevés par rapport aux filtres secs.



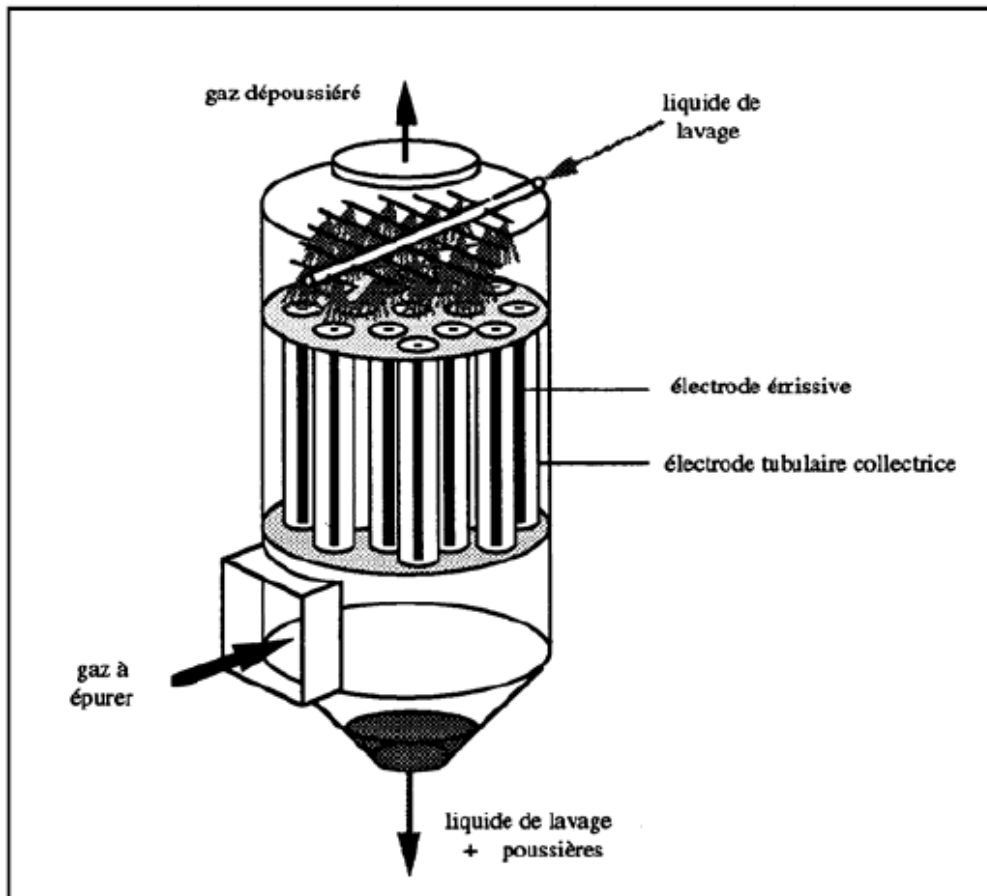


Figure I.4 : électrofiltres humide

Malgré tous les difficultés de construction, l'électrofiltre possède énormément d'avantage dans les applications industriel parmi lesquels les plus importantes sont :

- ❖ Les rendements de filtration sont supérieurs à ceux des électrofiltres secs.
- ❖ Le réentraînement des particules collectées est inexistant.
- ❖ Les performances de séparation sont indépendantes de la résistivité des poussières [14].

### I.3 La décharge électrique

#### I.3.1 Un peu d'histoire

Les recherches scientifiques sur les décharges électriques ont débuté au 18<sup>ème</sup> siècle avec l'étude d'étincelles obtenues par des générateurs électrostatiques. En 1803, V. V. Petrov a produit le premier arc électrique, qui fut ensuite étudié par H. Davy. Puis, entre 1831 et 1835, c'est M. Faraday qui découvre et étudie les décharges lumineuses à l'aide de tubes sous tension contenant des gaz sous pression [10].

A la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et début 20<sup>ème</sup> siècle, W. Crookes et Thomson font des progrès notoires dans le domaine de la physique atomique. Ils mettent en évidence l'importance des électrons dans la décharge électrique.

En 1900, Townsend, qui est un élève de Thomson, réalise la première modélisation d'une décharge luminescente en champ uniforme. La théorie de Townsend constitue le mécanisme de base de toute décharge électrique et décrit le principe de l'avalanche électronique [15].

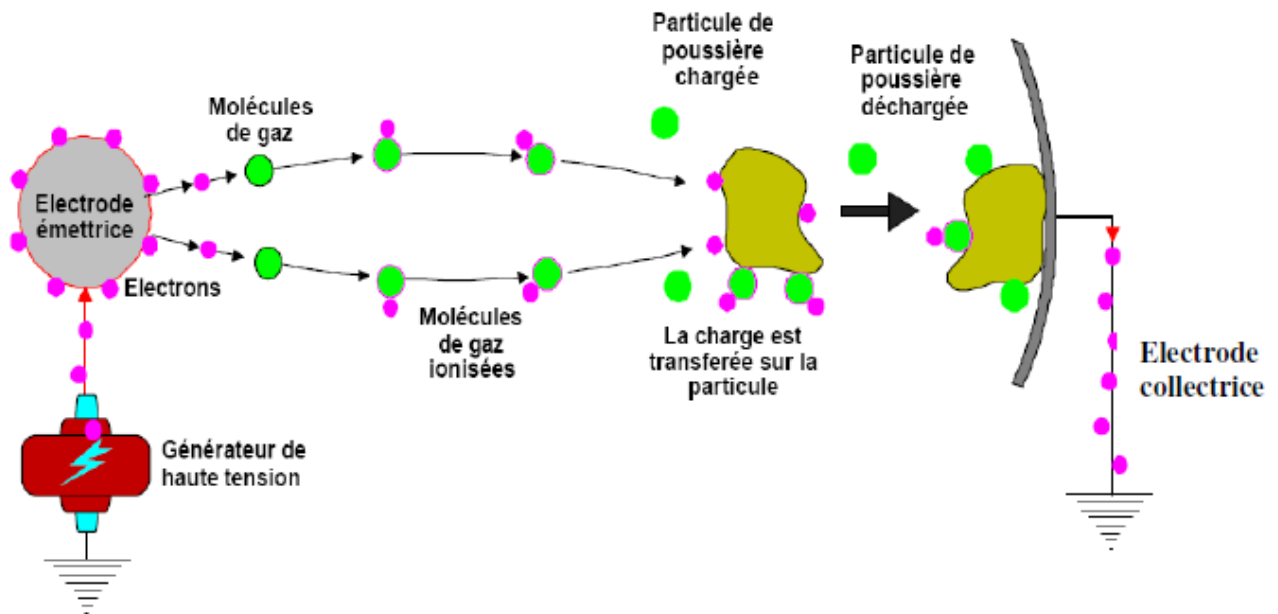
Langmuir et Tonks ont utilisé, en 1923, le terme d'origine grec « plasma » signifiant « former ». Un plasma est un gaz ionisé qui résulte de la création de charges dans le gaz. Un courant va donc circuler d'une électrode à l'autre, créant un canal plus ou moins conducteur dans le milieu isolant (gaz), appelé décharge électrique. La décharge dépend de nombreux paramètres liés notamment :

- aux électrodes : dimensions, forme, matériaux, distance inter-électrodes [16].
- au gaz : pression, composition, température, humidité,
- au potentiel: polarité, valeur, forme (continu, pulsé, alternatif).

### I.3.2 La charge des particules

Les poussières dispersées naturellement dans un gaz sont porteuses de charges électriques acquises soit par frottement, soit par effet thermique, soit sous l'effet des rayonnements naturels. Toutefois ces charges sont trop faibles pour qu'un champ électrique puisse exercer sur ces particules une force capable de modifier leur trajectoire pour provoquer leur collecte. Ainsi, une action efficace du champ d'un électrofiltre exige que les poussières reçoivent une charge de signe unique aussi élevée que possible. Cette charge ne peut leur être communiquée que par une ionisation intense due à un champ porteur (**Figure I.5**).

Une fois le champ électrique et le courant établis, l'ionisation des particules peut alors s'opérer.



**Figure I.5** : mécanisme de charge de particules

La modélisation du fonctionnement des électrofiltres nécessite le calcul de la charge accumulée par les particules le long de leur trajectoire. Ceci demande donc des modèles physiques capables de décrire le plus fidèlement possible le processus de charge en tenant compte des conditions spécifiques présentes dans les précipitateurs électrostatiques.

De nombreuses études [12,17] ont montré que la charge des particules peut être principalement attribuée à deux mécanismes :

- ❖ la charge par champ
- ❖ la charge par diffusion.

Quel que soit le mécanisme, la charge électrique acquise par une particule est le résultat des interactions entre celle-ci et les ions résultant de la décharge couronne. Les deux mécanismes de charge interviennent ensemble et leur importance relative est déterminée principalement par les dimensions des particules et l'intensité du champ électrique.

### I.3.2.1 Charge par champ

Le champ électrique constitue dans ce cas le facteur déterminant pour le processus de charge. 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 locale du champ dépend de la nature de la particule : lorsque la particule est conductrice la distorsion du champ est maximale. Pour une particule non-conductrice (isolante), la perturbation 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 se déplacent le long des lignes de champ électrique, et peuvent atteindre la surface de la particule. Chaque ion qui atteint la particule change la distribution locale du champ électrique. Tant que le champ électrique créé par la charge de la particule est inférieur au champ électrique maximum qui existe à la surface de la particule lorsqu'elle n'est pas chargée, les ions continuent d'atteindre la surface de celle-ci. 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  $q_p^S$  [18,21].

Pauthenier [19] a montré qu'à cause du phénomène de répulsion électrostatique, seule une partie réduite de la surface des particules est atteinte par les ions. D'après McDonald [20], ce mécanisme de charge est prépondérant tant que la taille des particules est supérieure à environ 0,5  $\mu\text{m}$ . La quantité de charge acquise par les particules dépend de leur diamètre, du champ électrique, de la densité d'ions présents, du temps de présence des particules dans le champ électrique, de la mobilité des ions et de la constante diélectrique des particules. Le calcul de la charge limite des particules est principalement basé sur la théorie développée par Pauthenier. [19] L'évolution temporelle de la charge pour une particule située dans un champ électrique  $E$ , est décrite par l'expression suivante donnée par White [12]:

$$\frac{dq_p}{dt} = \frac{\rho \cdot \mu \cdot q_p^S}{4 \cdot \varepsilon_0} \cdot \left(1 - \frac{q_p}{q_p^S}\right) \quad \text{Pour} \quad q_p < q_p^S \quad (\text{I.1})$$

Dans laquelle  $\rho$  représente la densité d'ions et  $\mu$  est la mobilité ionique. La charge limite par champ est donnée par l'expression suivante [12] :

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

Où  $\varepsilon_r$  est la permittivité relative des particules. Nous observons dans l'équation 2 que la charge limite par champ est une fonction de l'intensité du champ électrique local, de la permittivité relative  $\varepsilon_r$  des particules ;  $q_p$  est obtenue par l'intégration dans le temps de l'équation (I.1). Dans le cas particulier où les répartitions du champ électrique et de la charge d'espace ionique sont uniformes, l'intégration de (I.2) conduit à :

$$\begin{cases} q_p(t) = q_p^s \cdot \left( \frac{t}{t+\tau_p} \right) \\ \tau_p = \frac{4 \cdot \varepsilon_0}{\rho \cdot \mu} \end{cases} \quad (\text{I.3})$$

Ou  $\tau_p$  est le temps caractéristique de charge par champ et représente la durée au bout de laquelle la charge de la particule atteint la moitié de la charge limite. Dans le cas des filtres électrostatiques, l'intensité du champ électrique et la densité d'ions varient dans l'espace inter-électrodes ; la valeur de la charge limite sera donc spécifique pour chaque position des particules.

En partant de la théorie de Pauthenier, Cochet [22] a proposé en 1961 une expression simple qui permet le calcul de la charge limite pour les fines particules de taille comparable au libre parcours moyen des ions. Cette relation (I.4) qui fait intervenir le rapport  $\lambda_g/d_p$ , représente un moyen simple de calcul de la charge de saturation, en offrant toutefois une bonne précision pour les particules d'un diamètre supérieur à 0,1  $\mu\text{m}$  [17].

$$q_p^s = \left[ \left( 1 + \frac{2 \cdot \lambda_g}{d_p} \right)^2 + \left( \frac{2}{1 + 2 \cdot \lambda_g / d_p} \right) \cdot \left( \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right) \right] \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (\text{I.4})$$

Avec  $\lambda_g$  est libre parcours moyen des molécules de gaz peut être estimé par :

$$\lambda_g = \frac{\mu_g}{0.499 \cdot \rho_g} \sqrt{\frac{\pi \cdot M}{8 \cdot R \cdot T}} \quad (\text{I.5})$$

Avec  $M$  masse molaire,  $R$  constante universelle des gaz parfaits (8,31 J/K.mol) et Température absolue. Dans des conditions normales de température et de pression, le libre parcours moyen des ions vaut :  $\lambda_g = 6,53 \cdot 10^{-8} (m)$ .

### I.3.2.2 Charge par diffusion

Le concept de charge par diffusion décrit la charge des particules lorsque le champ électrique appliqué est faible ou même nul et lorsque la taille des particules est suffisamment petite (quelques libres parcours moyens). Il est alors nécessaire de prendre en compte le phénomène de diffusion des ions dans le processus de charge [12,17,23]. Ce mécanisme dépend de la probabilité de collision entre les particules et les ions animés d'un mouvement aléatoire d'agitation thermique. Dans une zone où le champ électrique appliqué est nul, les ions ont une répartition uniforme autour des particules. 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. Ce mécanisme de charge par diffusion concerne les particules très fines, de diamètres inférieurs à  $0,2 \mu\text{m}$  [12]. 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, du temps de présence des particules au sein du champ.

White [12] montre que l'évolution au cours du temps de la charge acquise par une particule sous l'effet du processus de diffusion est :

$$\begin{cases} \frac{dq_p}{dt} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot v_i \cdot \rho \cdot \exp\left(-\frac{q_p \cdot e}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot M \cdot T}\right) \\ v_i = \sqrt{\frac{3 \cdot k_B \cdot T}{m_i}} \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

Où  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  représente la constante de Boltzmann,  $v_i$  est la vitesse d'agitation thermique des ions et avec  $m_i$  la masse de l'ion. En considérant une densité d'ions  $\rho$  uniforme, l'expression (I.6) après intégration conduit à :

$$q_p(t) = q^* \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_d}\right) \quad (\text{I.7})$$

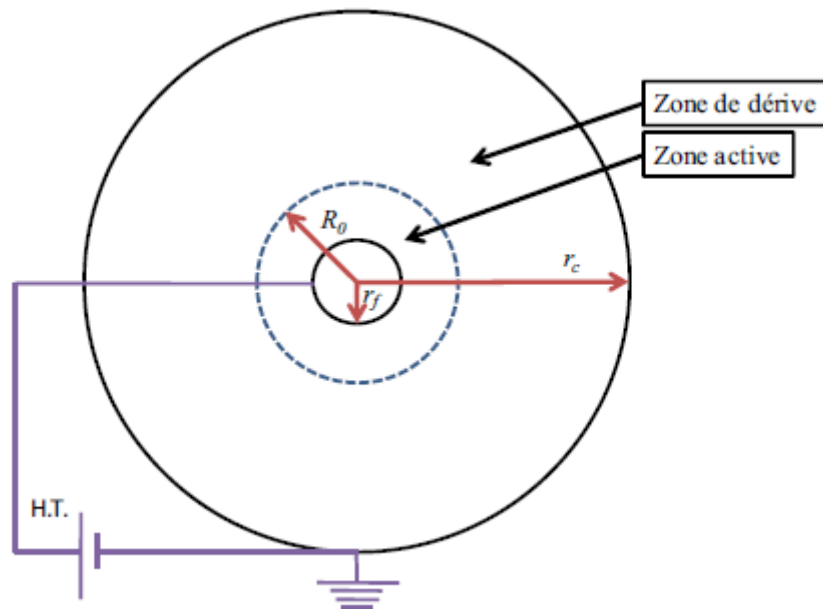
Avec  $q^* = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot k_B \cdot T / e$  représente la constante de charge par diffusion et  $\tau_d = 8 \cdot \epsilon_0 \cdot k_B \cdot T / d_p \cdot v_i \cdot \rho \cdot e$  est le temps caractéristique de charge par diffusion. Nous observons que l'équation (I.7) ne conduit pas à une limite de charge pour  $t \rightarrow \infty$ . Cependant, l'expression (I.6) montre que le processus de charge par diffusion est influencé d'une façon continue par la charge déjà acquise par la particule.

#### I.4 La décharge couronne

La décharge couronne est une décharge non-homogène en milieu gazeux, à pression atmosphérique et en champ non-uniforme. Cette décharge se produit pour un champ électrique élevé, mais non-disruptif et se caractérise par une gaine lumineuse qui a donné lieu à l'expression d'effet couronne [10]. Elle se développe, en général, depuis une électrode ayant un faible rayon de courbure. Les géométries les plus courantes sont : pointe / plan, fil /

cylindre, fil / plan, sphère / plan, etc... L'espace inter-électrodes est divisible en deux zones [24] :

- une zone active d'ionisation où les charges sont créés et le champ électrique est élevé,
- une zone d'attachement et de recombinaison des électrons dans laquelle les charges dérivent dans un champ électrique plus faible que dans la zone active.



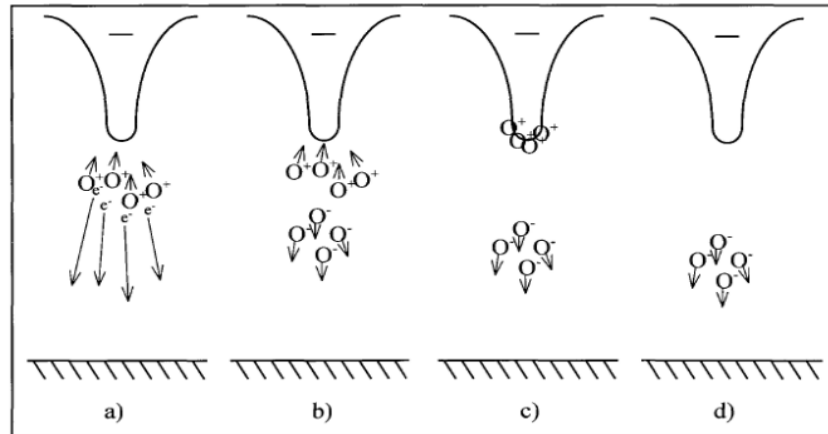
**Figure I.6 :** Représentation schématique d'une décharge couronne en géométrie fil-cylindre.

#### I.4.1 Les différents modes de décharges couronne

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

##### I.4.1.1 Effet de couronne en tension négative

Les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques sont repoussés par la cathode vers la zone de champ électrique plus faible tel qu'illustré à la Figure (Figure I.7.a). Ceux-ci se recombinent rapidement avec les molécules neutres et forment des ions négatifs (Figure I.7.b). Pendant ce temps, les ions positifs créés lors des avalanches électroniques s'approchent de la cathode dans la zone de champ intense (Figure I.7.c). Ils sont captés avant que les ions négatifs ne s'éloignent suffisamment de la cathode pour ne plus modifier le champ électrique dans la zone active. Les ions négatifs forment alors la charge d'espace négative [25] (Figure I.7.d).

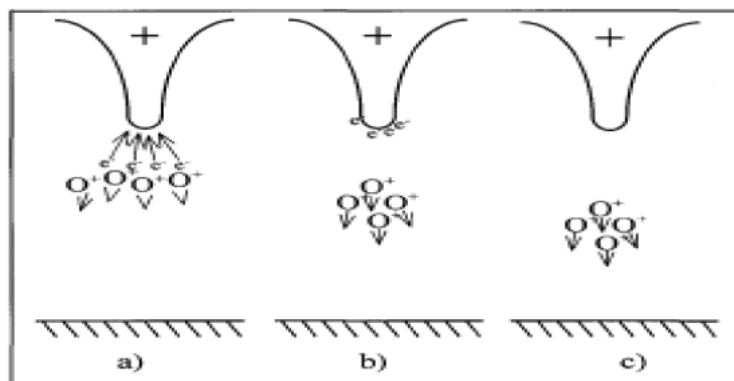


**Figure I.7 :** Effet de couronne en tension négative.

En fonction du gradient de tension, on note trois types de décharges. Premièrement, les impulsions de Trichel apparaissent dès que le gradient critique est atteint. Le champ électrique dans la zone active est diminué par la charge d'espace négative, ce qui provoque une chute momentanée du courant de décharge. De ce fait, ce mode prend la forme d'impulsions régulières dont la fréquence augmente avec la tension appliquée. Au-delà d'une certaine fréquence, les impulsions disparaissent et sont remplacées par une décharge continue appelée lueur négative. Celle-ci se produit lorsque les nuages d'ions négatifs ne sont plus capables de stopper la propagation des impulsions de Trichel. En augmentant encore plus la tension, on atteint l'effluve négatif. Cette décharge survient juste avant le claquage [25].

#### I.4.1.2 Effet de couronne en tension positive

En tension positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense tel qu'illustré à la (Figure I.8.a).



**Figure I.8 :** Effet de couronne en tension positive



Ils sont rapidement captés par l'anode, ce qui a pour effet de laisser dans l'espace entre les électrodes les ions positifs, autre produit des avalanches électroniques (**Figure I.8.b**). Les ions positifs sont plus lourds et, par le fait même, plus lents que les électrons. Ces ions positifs forment la charge d'espace positive qui se déplace vers la cathode, où le champ électrique est moins intense [25] (**Figure I.8.c**).

On note aussi trois modes de décharge en tension positive. Cependant, les ions fuyant l'anode diminuent le champ électrique pendant une période de temps plus longue qu'en tension négative. Cela implique que pour une tension donnée, les décharges sont en général moins puissantes en tension positive qu'en tension négative.

Le premier mode de décharge en tension positive est aussi composé d'impulsions. Les décharges se forment principalement autour d'un canal principal avec de multiples dérivations. Les photons sont impliqués dans la propagation de la décharge. La fréquence des impulsions augmente avec la tension appliquée jusqu'à une valeur critique.

Le mode suivant est appelé lueur de Hermstein. La décharge dans ce mode est principalement continue avec quelques impulsions dans certaines configurations géométriques des électrodes. En augmentant encore la tension, juste avant la disruptive totale de l'air, des effluves plus puissants se forment (effluves positifs) [24,25].

## **I.4.2 Les facteurs influençant la décharge couronne**

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [26]. on distingue trois facteurs essentiels :

Facteurs géométriques.

Facteurs physico-chimiques.

Facteurs électriques.

### **I.4.2.1 Facteurs géométriques**

#### **I.4.2.1.1 Rayon de la courbure**

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

#### I.4.2.1.2 Distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la (Figure I.9). Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites [27,28].

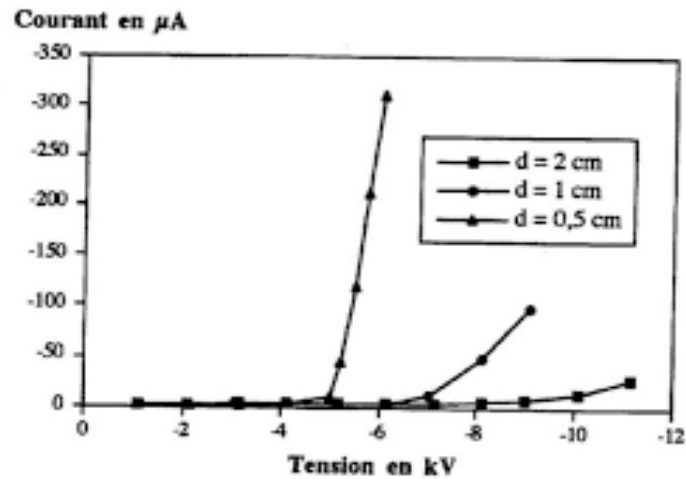


Figure I.9 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [27,28].

#### I.4.2.1.3 La nature des électrodes

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium, et acier) sur la (Figure I.10).

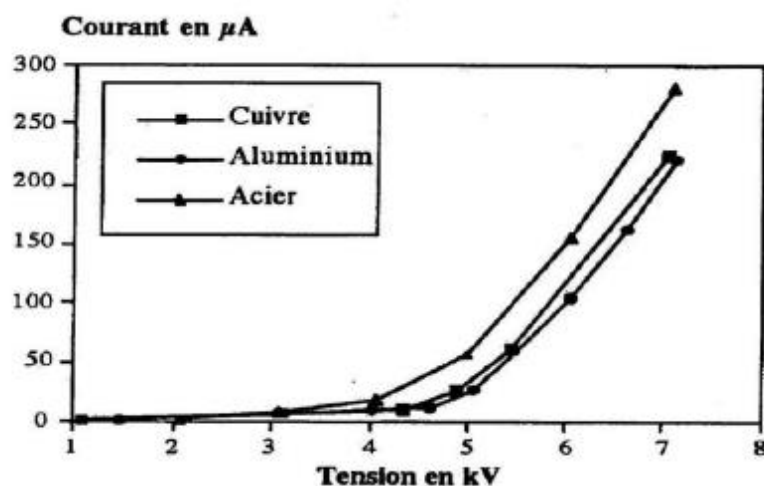


Figure I.10 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes ( $d = 0.5\text{cm}$ ,  $\varnothing = 125\mu\text{m}$ , et  $H_r = 5\%$ ) [27,28].

La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique comme le montre le tableau I.1.

<b>Tension positive</b>	<b><math>\mu</math>: en [<math>m^2.V^{-1}.S^{-1}</math>] à <math>d=0.5cm</math></b>
Électrode en cuivre	$8.10^{-5}$
Électrode en aluminium	$7,4.10^{-5}$
Électrode en acier	$12.10^{-5}$
<b>Tension négative</b>	<b><math>\mu</math>: en [<math>m^2.V^{-1}.S^{-1}</math>] à <math>d=0.5cm</math></b>
Électrode en acier	$4.10^{-4}$
Électrode en aluminium	$2,9.10^{-4}$
Électrode en cuivre	$4,5.10^{-4}$

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

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

#### I.4.2.2 Les facteurs physico-chimiques

##### I.4.2.2.1 La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [27,29]. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit «pd» [27,30].

##### I.4.2.2.2 L'humidité

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau

dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo ionisation [27,29]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [27,29]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

#### I.4.2.2.3 La pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La (Figure I.11) montre l'effet de la pression sur la décharge.

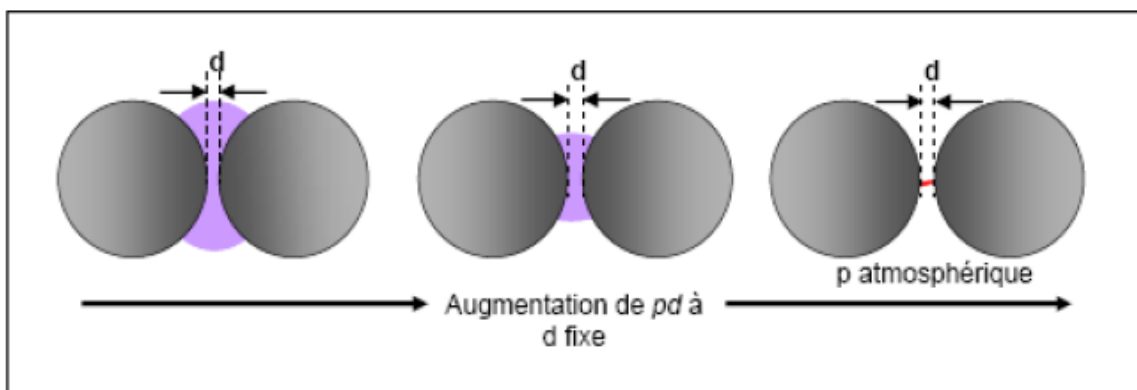


Figure I.11 : Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [24,27].

#### I.4.2.2.4 La densité de l'air

Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

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

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

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

$\frac{K_h}{\delta}$  : Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

#### I.4.2.3 Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative. Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que

l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente.

## **I.5 Discussions & Conclusion**

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur l'évolution de la qualité de l'air dans le monde et les principaux polluants gazeux. en effet on a cité les décharges électriques dans le cas général et nous sommes intéressés particulièrement aux décharges couronne générées entre deux électrodes par l'application d'un champ électrique. Nous avons décrit les différents mécanismes à l'origine de la formation et de la propagation de ce type de décharge. L'ensemble de ces phénomènes intervient dans le fonctionnement des filtres électrostatiques.

L'objectif de ce chapitre était de donner une meilleure compréhension sur les notions générales des précipitateurs électrostatiques, les différents types de précipitateurs existants, la charge des particules et la vitesse de migration des particules.

*Chapitre II - Description du  
modèle expérimental*

## II.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés au sein du Laboratoire Haute Tension de l'université Belhadj BOUCHAIB Ain T'émouchent.

Dans ce chapitre nous exposons le dispositif expérimental ainsi que la méthodologie d'essais, et voir l'influence des paramètres physiques et géométriques sur les paramètres de la décharge couronne dans un PES en lames-plan.

Ce travail a été mené après des longues observations et une étude approfondie sur les sources de tension qui ont été disponibles dans le laboratoire, et on a vérifié, examiné et testé les qualités et les performances des matériaux utilisés pour cette expérience à savoir :

- Sources de tension électrique
- Plan métallique,
- Les fils conducteurs,
- Outils de mesures : l'Ampèremètre, Anémomètre et le Thermo-Hygromètre.

## II.2 Matériel utilisé

Dans le cadre de ce projet, une panoplie des appareils du laboratoire a été mis à la disposition du groupe pour les mesures. Un encadreur a accompagné l'équipe du projet pour une meilleure utilisation, et manipulation de ces appareillages dans les conditions de sécurité optimales pour le groupe et la protection de ces appareils spéciaux.

Cet ensemble des équipements se composent de générateurs (Sources HT) et appareils de mesure, en bon état de fonctionnement qui ont permis une bonne conduite de toutes les expériences sans aucune rupture ou arrêt, et par conséquent un travail encourageant avec des résultats satisfaisants.

### II.2.1 Source de Haute Tension

Glassman High Voltage DC séries WR, ce modèle génère un courant variable entre 0 et 30 mA et de tension variable entre 0 et 85 kV et supporte le court-circuit en cas de décharge du courant (tension de claquage) dans l'expérience [31].



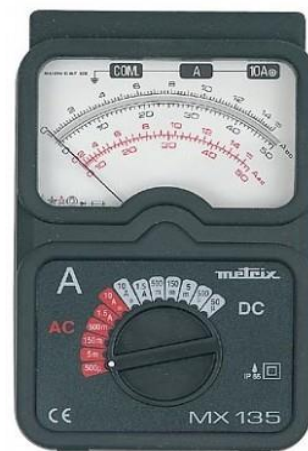
**Figure II.1** : Source de Haute Tension modèle Glassman, séries LT [31].

## II.2.2 Ampèremètre Analogiques

Conçus pour résister aux chocs mécaniques, protégés par des fusibles à haut pouvoir de coupure, ce modèle permet à l'utilisateur de tester, mesurer et de lire à plusieurs échelles.

Il est équipé d'un galvanomètre à cadre mobile:

- Sécurité : IEC61010 - 600 V CAT III
- Indice de protection : IP65



**Figure II.2** : MX135 - Ampèremètre de laboratoire – METRIX [32].



### II.2.3 Thermo-hygromètre

Appareil compact pour la mesure de l'Humidité relative et de la Température. Le capteur est mobile (Wireless) il peut être déporté de l'appareil en insérant un cordon de liaison intermédiaire. L'humidité et la température.



**Figure II.3 :** Thermo-hygromètre

Testo 625 [33].

### II.2.4 Anémomètre thermique à hélice

Les anémomètres à hélice sont des appareils de mesure du vent classiques désormais volontiers utilisés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Leur manipulation aisée permet de mesurer la vitesse du vent ou de l'air possible en minimum de temps, sa gamme de mesure : 0.3...20 m/s, avec précision :  $\pm 0.1$  m/s ou  $\pm 1.5$  % vm .



**Figure II.4 :** Anémomètre avec sonde à hélice intégrée testo 417 [34].

### II.2.5 Autotransformateur

L'autotransformateur nous permet de réguler la vitesse du souffleur en variant la valeur de sa tension. La variation de la vitesse d'écoulement  $v$  est obtenue en modifiant la tension d'alimentation du ventilateur (Val).



**Figure II.5 :** Autotransformateur.

### II.2.6 Balance de laboratoire électronique

Cet équipement permet de mesurer la quantité de poussière qui sera injectée dans le filtre, ainsi que la poussière récupérée à la sortie, sa capacité de pesée Max : 2100 g. Lecture d : 0.01



**Figure II.6 :** Balances de précision KERN PLS [35].

### II.2.7 Souffleur aspirateur électrique

L'outil suivant est utilisé pour créer un flux d'air et souffler la poussière Pression d'air 560mm, volume d'air 2.8m / min, puissance 600W 220V-50/60Hz.

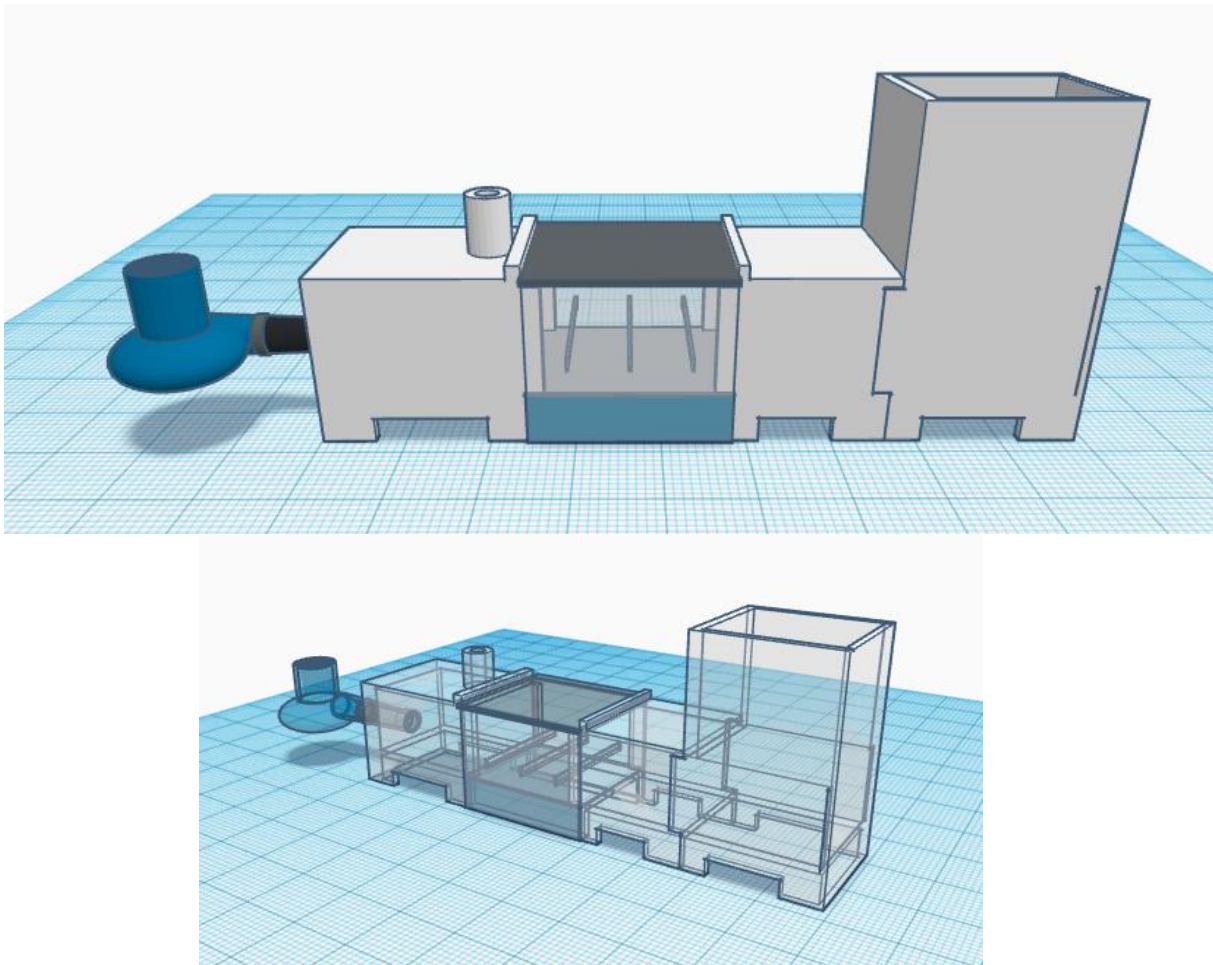


**Figure II.7 :** Aspirateur Souffleur

### II.3 Description du dispositif expérimental

Le dispositif d'essai est représenté sur la figure (II.8), est constitué de deux parties essentielles :

- Un système d'injection.
- Un système d'ionisation et de collection.



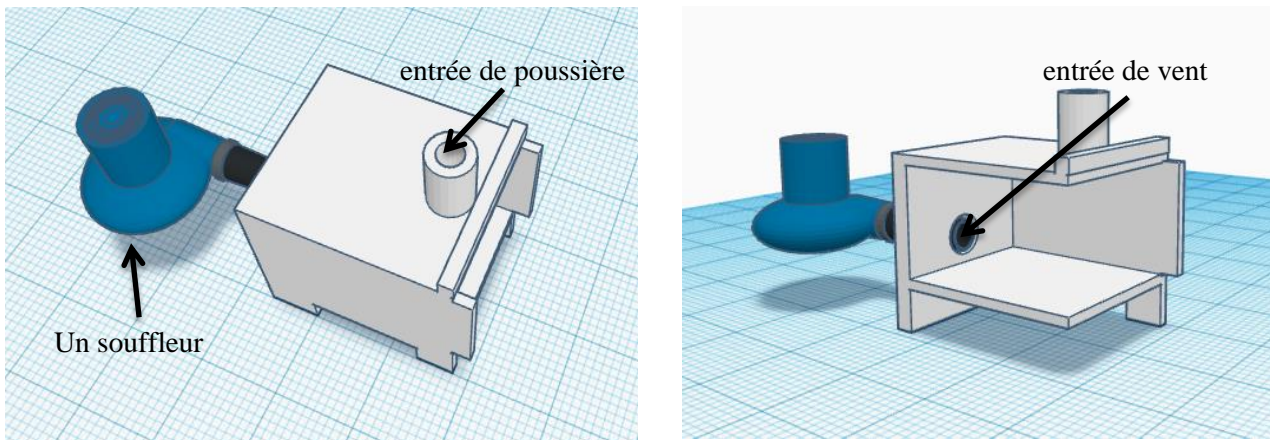
**Figure II.8 :** Constitution du dispositif expérimental [36].

#### II.3.1 Système d'injection

Le système d'injection est composé de :

- Un autotransformateur
- Un souffleur électrique

- Une entrée de poussière



**Figure II.9 :** Le système d'injection.

Le système d'injection utilisé dans cette expérience est celui de l'ensemble des matériaux décrit précédemment.

Il est composé de deux paramètres physiques principaux, le vent et la poussière, ces paramètres vont créer un écoulement de vents poussiéreux dans le circuit rectangulaire qui le vent affecté.

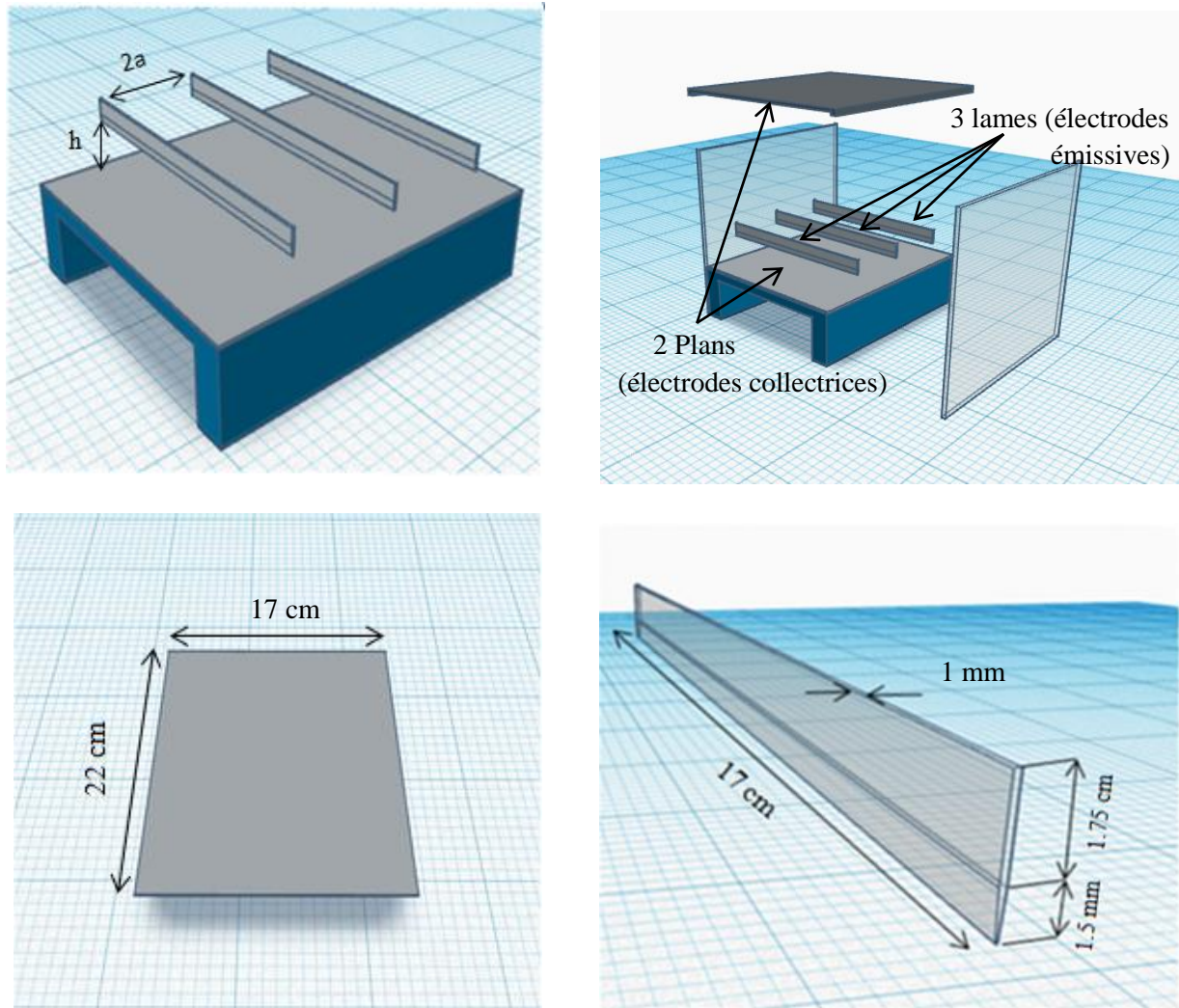
Un flux d'air pollué a été créé pour atteindre la zone d'ionisation.

### II.3.2 Système d'ionisation et de collection

Le système d'ionisation et de collection se compose de :

- Enceinte en plexiglas d'épaisseur 5 mm
- lames en acier inoxydable (électrodes émissives) de longueur 17 cm , et un rayon de courbure très fine.
- 2 Plans rectangulaire en acier inoxydable (électrodes collectrices) de longueur 22 cm et de largeur 17 cm.





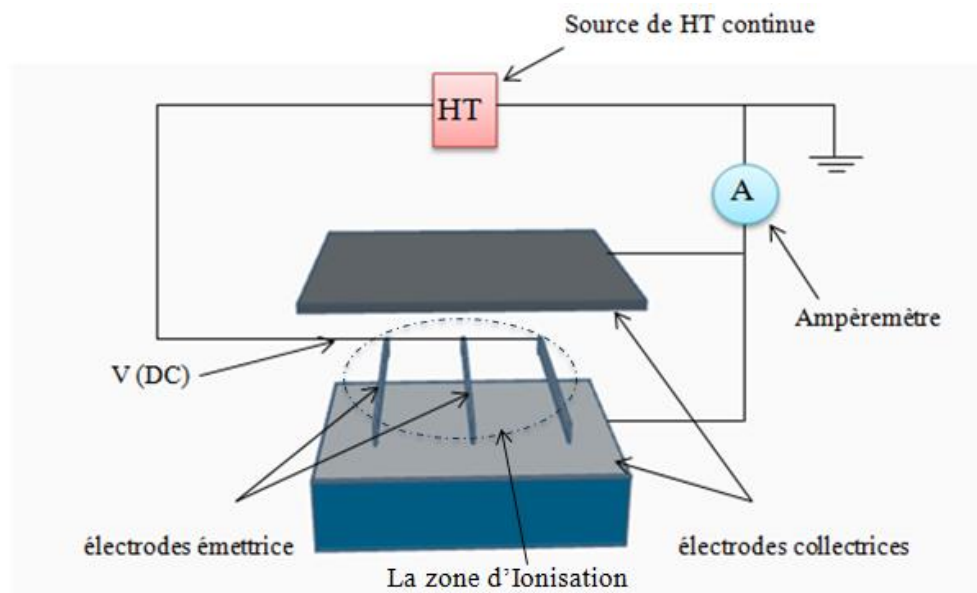
**Figure II.10 :** Le system d'ionisation.

#### II.4 le principe de fonctionnement

Le dispositif d'essai est représenté sur la figure (II.11).

L'assemblage de deux systèmes « Ionisation, Injection » il donne un prototype qui permet de filtrer l'air pollué qui le traverse, Le système d'ionisation composé de lames à faible rayon de courbure entre deux plans avec des supports isolants en plexiglas, ce mode permet la création du champ magnétique, après l'alimentation des lames par une source haute tension continue délivrant une tension allant de 0 à 80 kV, ces lames sont désignés autant que des électrodes actives ou appelés aussi l'électrode émetteur, ce phénomène définit l'effet couronne.

les électrodes actives sont tendues par des supports isolants en plexiglas à une distance  $h$  du plans et d'une distance entre lames  $2a$ .



**Figure II.11 :** Le system d'ionisation.

Les deux plans qui sont mis à la terre, et ionisés par le courant de décharge (ou le champ électrique) qui est distribué par les électrodes sur la surface des plans, ce dernier sera mesuré par un ampèremètre relié en série avec la surface de ces deux plans.

Le système d'injection va créer un flux d'air pollué, d'après l'injection d'une quantité de poussière qui transporté par l'air injecté par le souffleur jusqu'à la zone d'ionisation.

Le passage de la poussière injectée est assuré par un souffleur de vitesse variable à l'aide d'un autotransformateur.

La poussière pénètre à l'intérieure de l'espace entre les électrodes par effet couronne, par conséquent une ionisation du gaz autour du lames, ce qui résulte la création des ions et des électrons. Ces particules micro-niques vont bombarder les molécules de poussière qui se chargent d'électricité et vont être dérivées vers la surface des plaques sous l'effet du champ électrique. En outre, la poussière non collectée va être récupérée dans une enceinte de récupération.

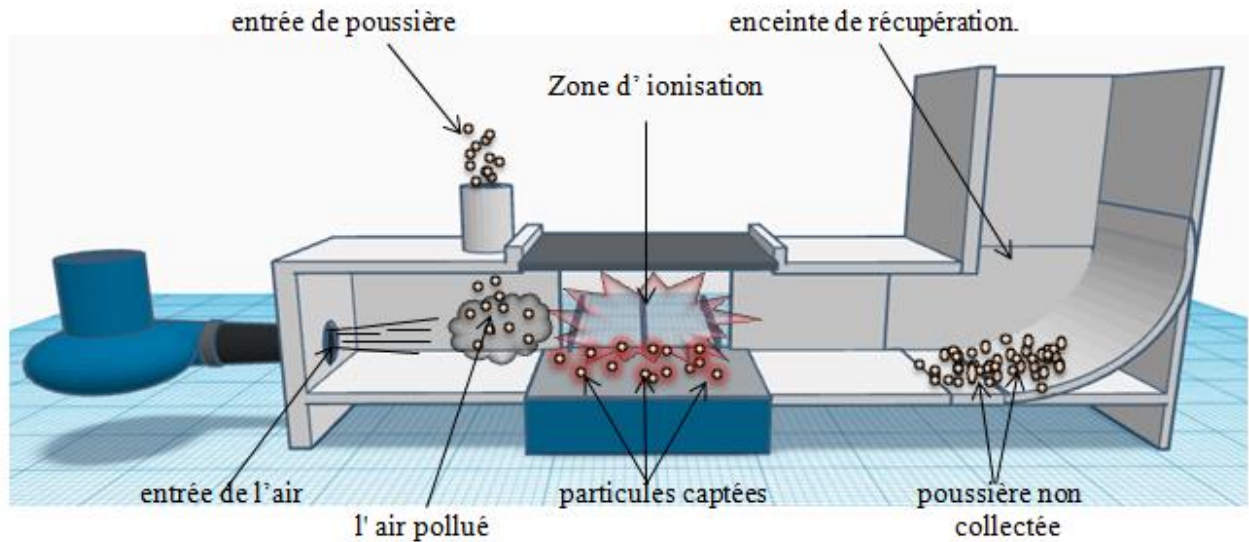


Figure II.12 : le principe de fonctionnement.

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une description détaillée du dispositif expérimental et aussi tous les moyens expérimentaux mis en œuvre lors de ce travail et les différents types des particules utilisées, ainsi le principe de fonctionnement de notre prototype réalisé.

Dans le chapitre qui suit, nous avons élaboré à l'interprétation de l'étude expérimentale de la décharge couronne dans le précipitateur électrostatique en lame-plan.

Nous passerons à l'étude d'analyse et d'interprétation en fonction des différents résultats obtenus au niveau de laboratoire, au but de prouver la conformité de notre précipitateur électrostatique aux contraintes posées.

*Chapitre III - Résultats et  
Discussions*



### III.1 Introduction

Ce chapitre, a pour objectif de présenter les résultats expérimentaux obtenus de la précipitation électrostatique dans l'électrofiltre en configuration lames-plan.

Le but de ce travail est d'étudier un ensemble de facteurs qui peuvent influencer sur le processus de la filtration, cette étude sera divisée en deux parties essentielles.

Le premier volet : il est nécessaire de déterminer les caractéristiques courant-tension sous plusieurs paramètres (effet de distance entre les électrodes, effet de polarité, etc.), ainsi que l'efficacité de filtrage du filtre électrostatique.

Le deuxième volet : est consacré à l'étude des différents facteurs qui influent sur l'efficacité de l'électrofiltre.

### III.2 Caractéristiques courant-tension :

Nous avons étudié les caractéristiques courant-tension en fonction des paramètres suivants: Distance inter-électrodes  $h$ , nombre de lames, distance inter-lames ( $2a$ ) et la nature de la tension appliquée  $V+$ ,  $V-$ .

Les différents essais effectués portent sur la mesure des paramètres suivants :

1. La tension appliquée à la lame  $V$ .
2. Le courant  $I$  collecté par la surface de plan.
3. Les paramètres physiques de l'air (la pression, la température et l'humidité).

#### III.2.1 Effet de la distance inter-électrodes sur la décharge couronne

Les résultats des études expérimentales sur l'influence de la distance entre les électrodes du filtre électrostatique sur la décharge couronne de deux polarités sont présentés sur les figures (III.1) et (III.2).

La spécificité de la décharge DC positive ou négative est l'existence d'une zone de dérive des ions qui agit comme une impédance en série avec la zone d'ionisation et donne aux décharges couronne leur stabilité. Dans le cas d'une décharge négative, les ions positifs créés par ionisation peuvent revenir à la cathode assez rapidement, alors que les ions négatifs créés par attachement d'électrons migrent dans la zone de dérive où le champ est plus faible.

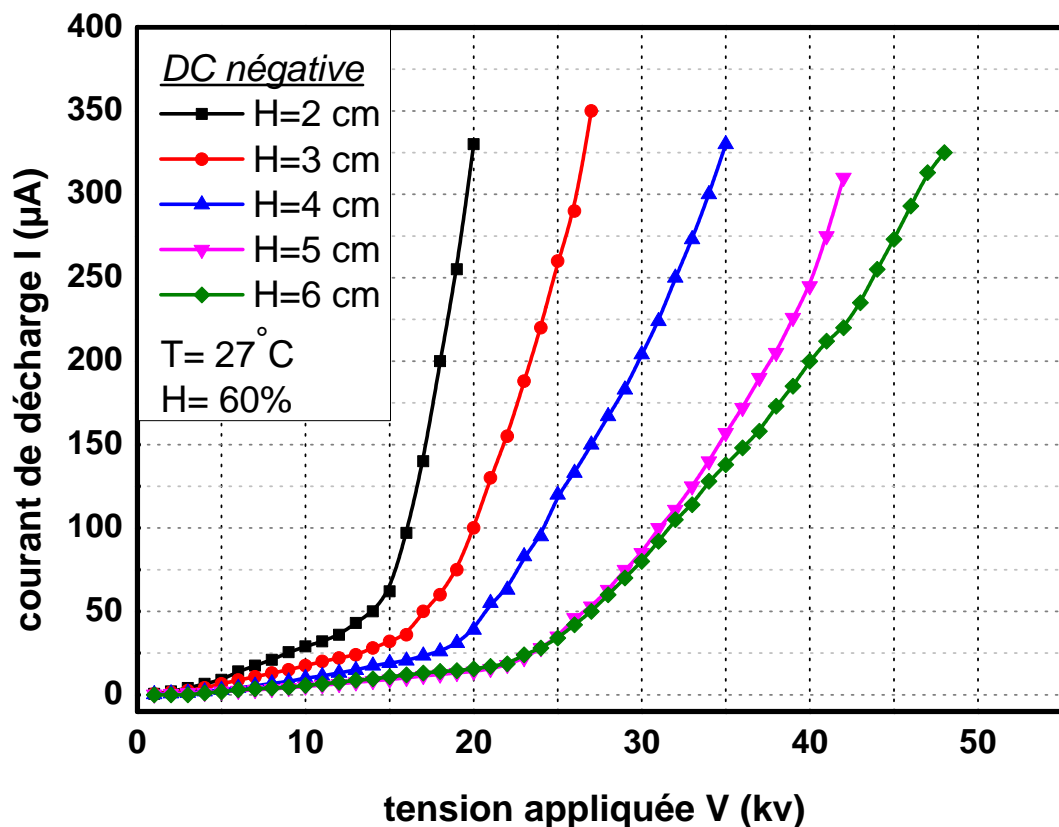
Avec une décharge positive, les ions positifs sont directement créés dans la région d'ionisation et migrent ensuite dans tout l'espace inter-électrodes.

Les figures (III.1) et (III.2) montrent les allures des caractéristiques courant/tension pour les deux types de décharge.

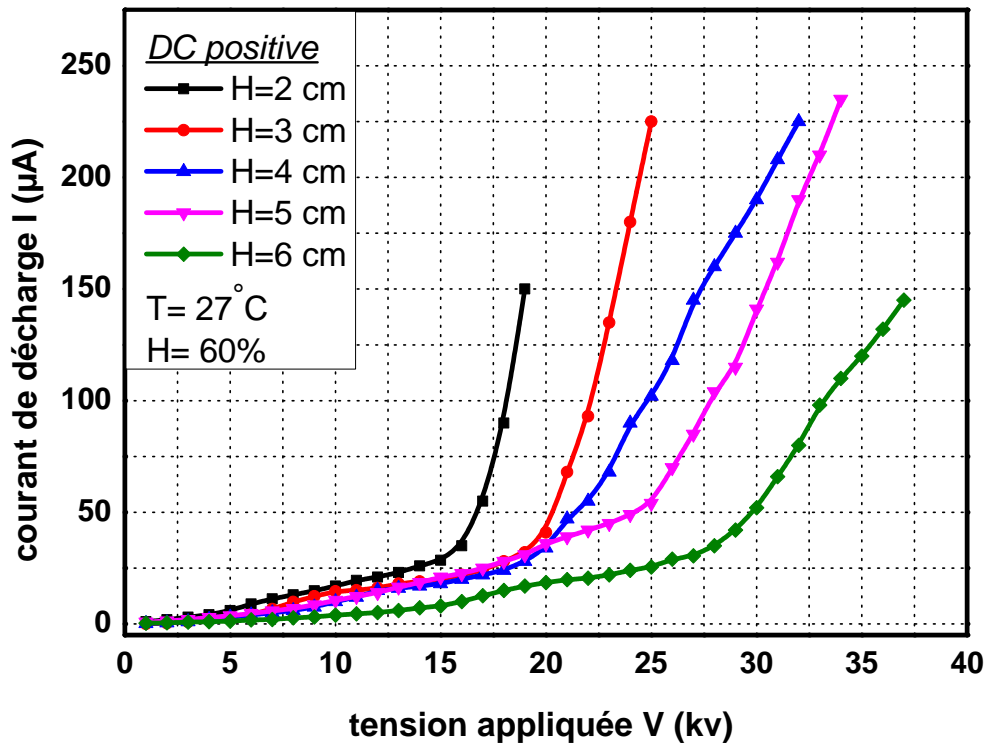
Le courant augmente graduellement avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse une certaine valeur ( $V_0$ ) et ce jusqu'au claquage. Le courant continu qui traverse l'espace inter-électrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée.

Il existe une relation empirique classique simple appelée loi de courant-tension de Townsend qui est utilisée pour expliquer les phénomènes complexes de la décharge couronne cette formule est donnée [37].

$$I = KV \cdot (V - V_0) \quad (\text{III.1})$$



**Figure III.1 :** Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance Inter-électrodes en polarité négative.



**Figure III.2 :** Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance Inter-électrodes en polarité positive.

Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faible distance inter électrodes.

Pour l'électrode active négative, où les électrons se fixent très rapidement sur les atomes ou molécules neutres, des ions négatifs sont formés et tout se passe comme si des ions de même polarité que l'émetteur était émis au plan de collecte sous l'effet de l'ionisation, c'est pour ça dans la majorité des cas, on utilise la décharge couronne négative ce qui nous emmène à faire une comparaison entre la décharge couronne négative et la décharge couronne positive.

### III.2.2 Effet de la polarité

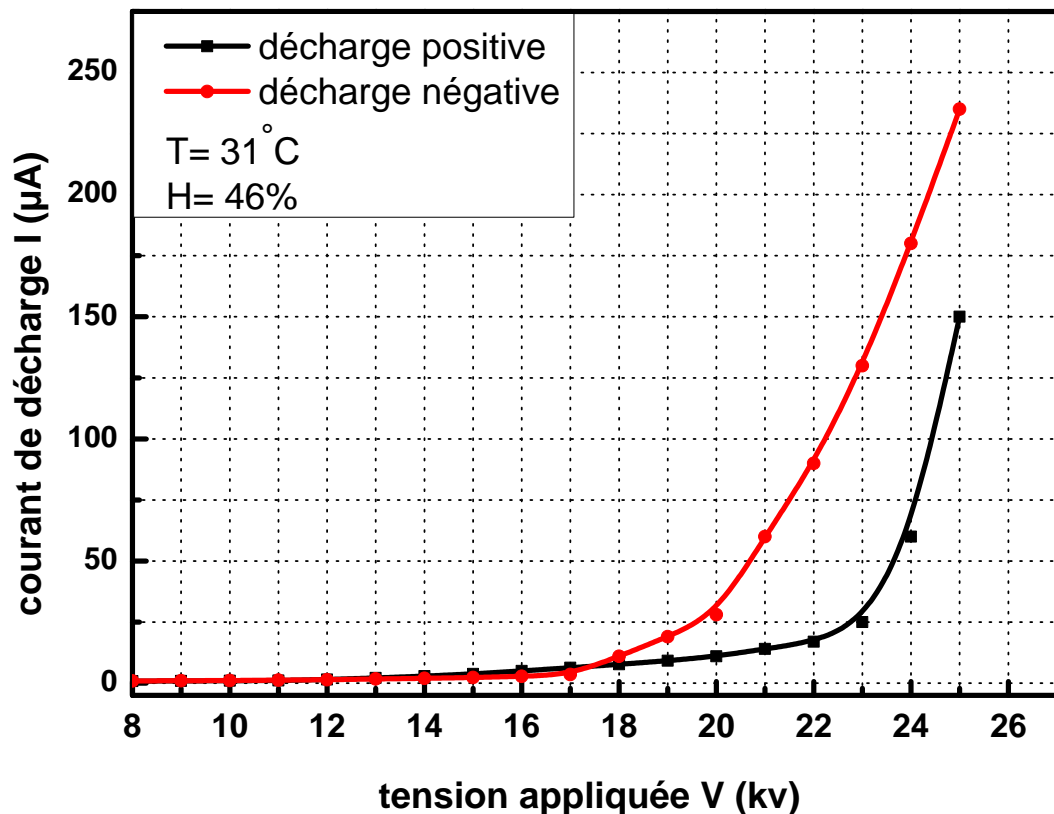
Cette section examine l'influence de la polarité de la tension appliquée, comme indiqué sur la figure (III.3).

La figure montre le taux de variation presque linéaire du courant avec l'augmentation de la tension. Le courant augmente progressivement avec la tension appliquée jusqu'à une valeur proche du claquage.

Le courant de la polarité positive est plus petit que le courant produit par la polarité négative, car la mobilité des porteurs de charge se déplace légèrement dans la polarité négative (C- $\rightarrow$  C+). De plus, la tension de décharge couronne positive est généralement plus forte que la tension de décharge négative (V - <V +).

Polarité positive	Polarité négative
Décharge silencieuse	Décharge sonore
Moins de production d'ozone	Production d'ozone élevé
Courant de décharge plus faible	Courant de décharge plus élevé

**Tableau III.1:** La différence entre la polarité positive et négative.

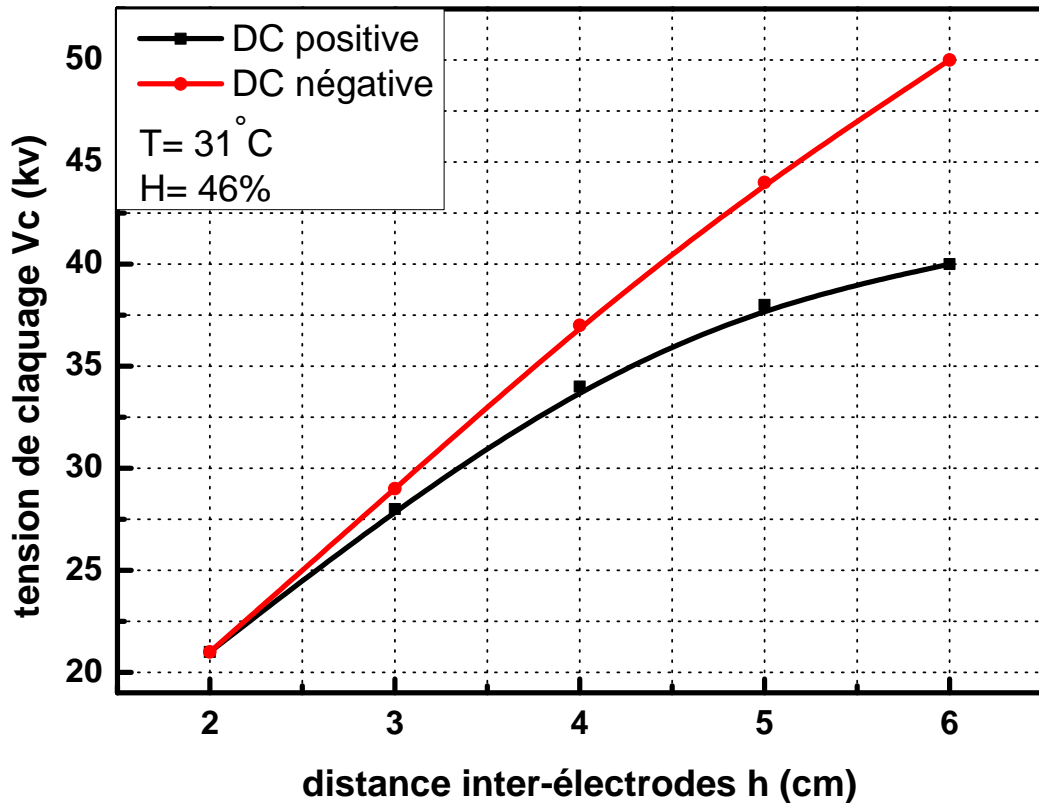


**Figure III.3 :** Caractéristiques courant – tension en fonction de la polarité de la tension appliquée.

Il apparaît clairement que le courant de décharge est plus important lors de la polarité négative sur la lame, exemple pour une tension appliquée constante  $V = 25$  kV, le courant de décharge  $I = 235$   $\mu$ A pour la polarité négative, et  $I = 150$   $\mu$ A pour la polarité positive. Pour obtenir une efficacité de dépoussiérage optimale, il faut que la concentration d'ions dans le gaz soit maximale, c'est-à-dire que le courant est maximal, sans arc électrique. Par conséquent, la tension de fonctionnement est prise légèrement inférieure à la tension d'arc en quelques kV.

À partir d'une certaine tension  $V_c$  (tension de claquage), nous entrons dans le domaine des décharges disruptives avec la présence des étincelles ou éventuellement d'un arc électrique. La figure (III.4) montre que la tension de claquage pour les deux polarités est identique pour des distances inter-électrodes très faibles. À partir de distance inter-électrodes  $h = 2$  cm les deux courbes s'éloignent pour atteindre une tension de claquage  $V_c = 50$  kV à une distance inter-électrodes  $h = 6$  cm en polarité négative, et avec la même distance on

atteint une tension de claquage  $V_c = 42$  kV en polarité positive. Cette tension est plus élevée dans une décharge négative ce qui nous favorise à travailler avec cette dernière.



**Figure III.4 :** Tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour les deux polarités.

### III.2.3 Facteur géométrique K en fonction de la distance inter-électrodes

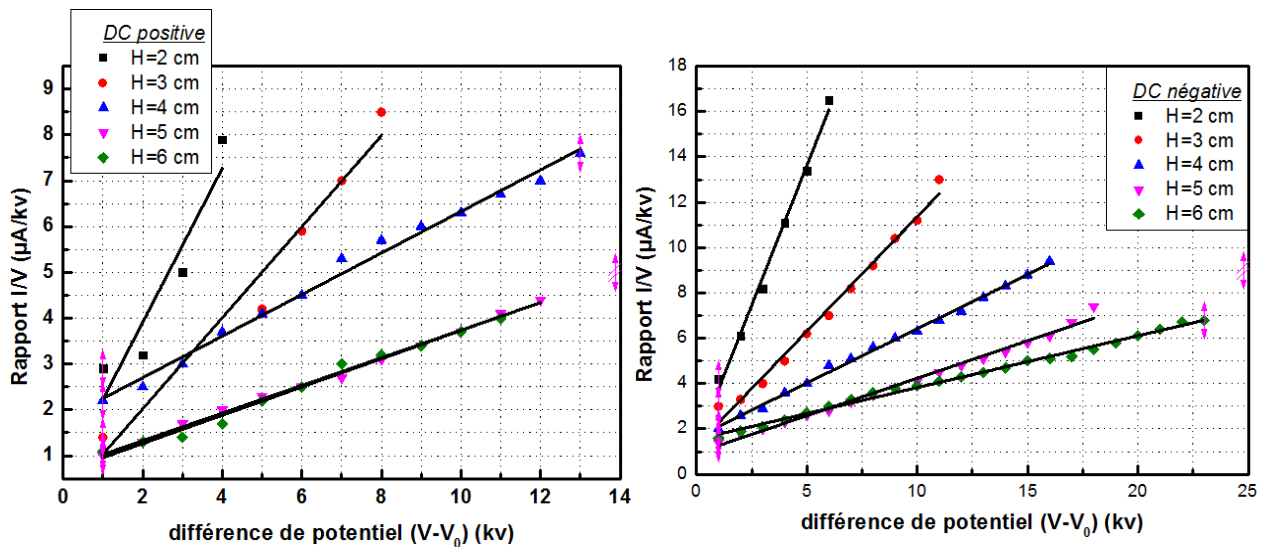
On peut écrire La formule (III.1) sous la forme :

$$\frac{I}{V} = K \cdot (V - V_0) \quad (\text{III.2})$$

Où K est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la mobilité des porteurs de charges, de la température, de la pression et de l'humidité.  $V_0$  représente la tension seuil de l'effet couronne.

La dépendance du rapport courant / tension en fonction de la différence de potentiel peut être exprimée par l'équation (IV.2). Pour des distances inter-électrodes données, les

paramètres  $K^-$  et  $K^+$  peuvent être déterminés par les pentes des droites représentées sur la figure (III.5).

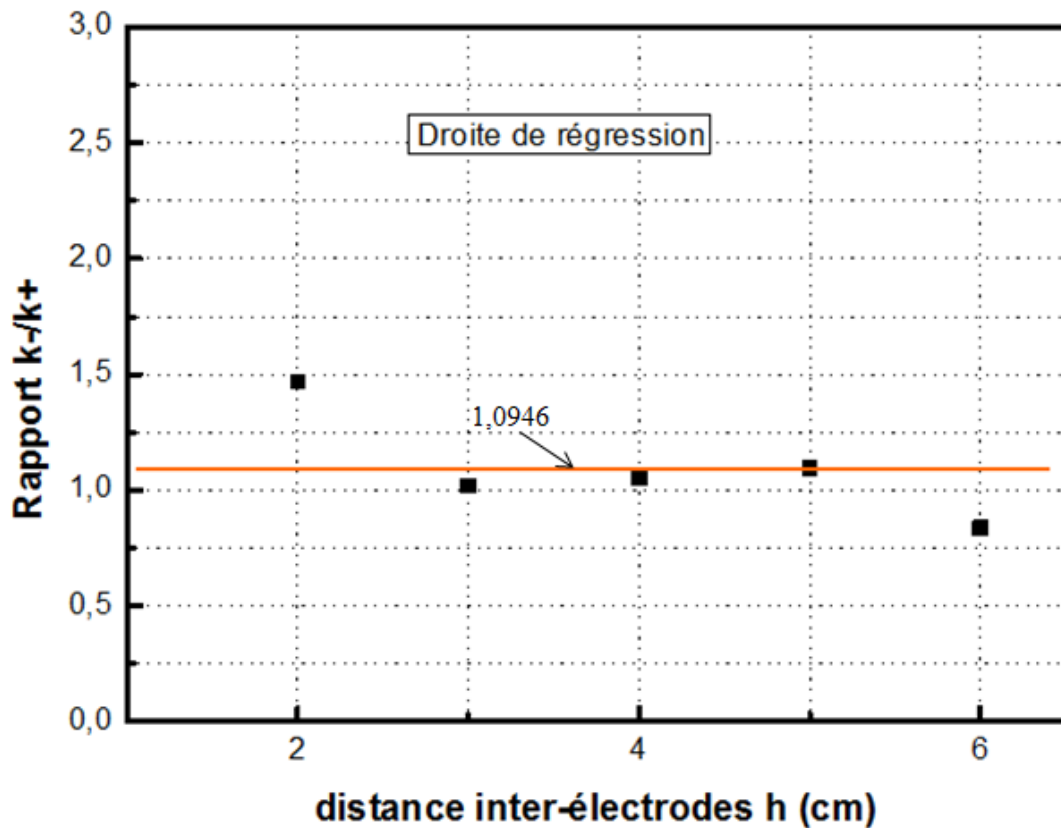


**Figure III.5 :** Dépendance du rapport courant / tension ( $I / V$ ) avec la différence de tension ( $V-V_0$ ).

La valeur du rapport ( $K^-/K^+$ ) donne le rapport de la mobilité des ions négatifs sur la mobilité des ions positifs ( $\mu^-/\mu^+$ ).

La valeur ainsi obtenue peut être considérée comme une constante entre  $20 \text{ mm} \leq h \leq 50 \text{ mm}$ , figure (IV.6). Le rapport entre les facteurs  $K^-/K^+$  doit être indépendante de la distance inter-électrodes et on peut dire que  $(K^-/K^+) \approx (\mu^-/\mu^+) \approx 1,097$ .

$h$ (cm)	2	3	4	5	6
$K$ ( $\mu\text{A}/\text{kV}^2$ )					
DC positive ( $K^+$ )	1,68	0,9931	0,4533	0,3014	0,3081
DC négative ( $K^-$ )	2,46571	1,01091	0,47824	0,33013	0,258
$K^-/K^+$	1,468	1,018	1,055	1,095	0,837

**Tableau III.2 :** Résultats de facteur K pour les couronnes négative et positive**Figure III.6 :** Variation du K-/K+ selon la distance inter-électrodes

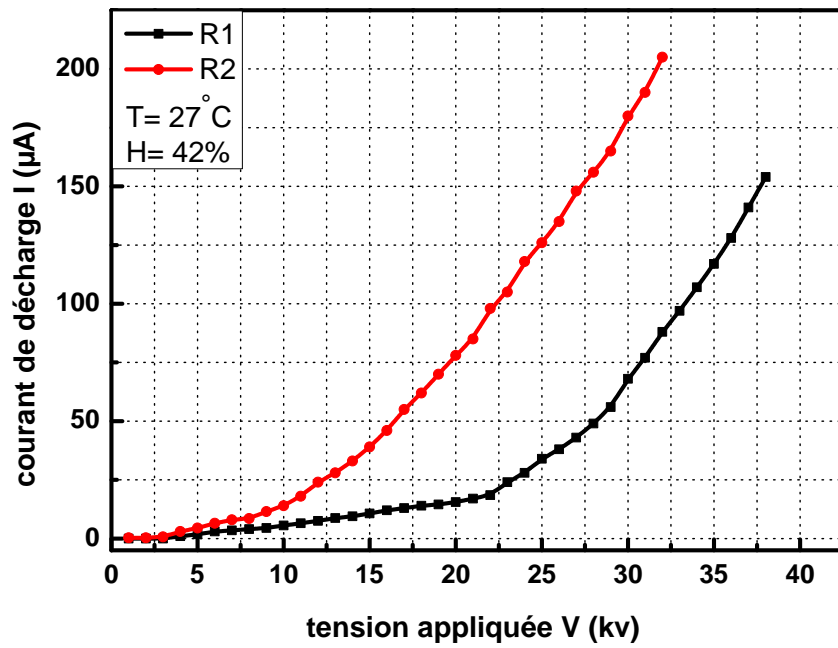
### III.3 Effet du rayon de courbure R de la lame sur la décharge couronne

Les figures (III.7) (III.8) montrent l'effet du rayon de courbure de la lame sur la décharge électrique des deux polarités.

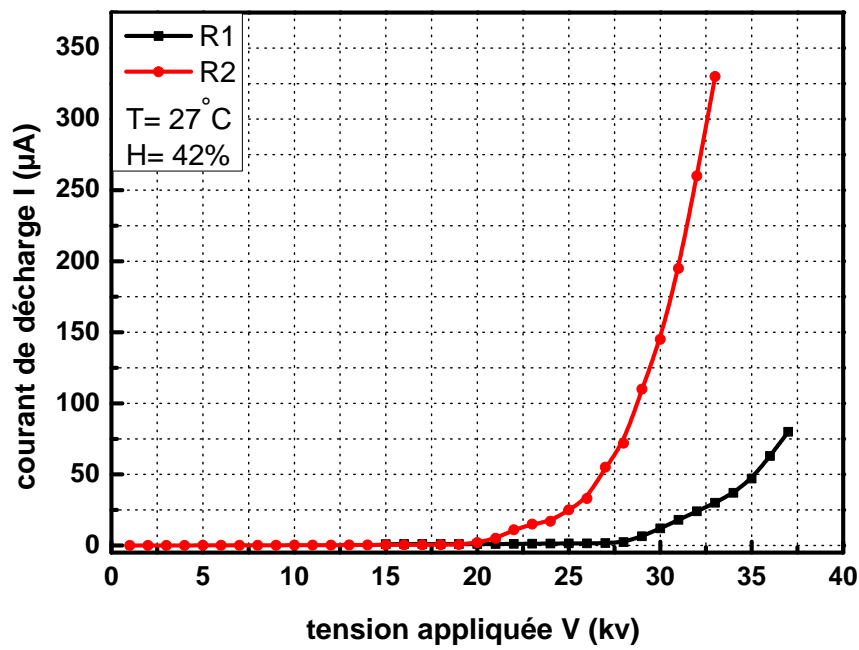
Il apparaît clairement que le rayon de courbure de la lame est inversement proportionnel à la décharge couronne. Ceci est tout à fait normal, car le champ électrique sur la lame est inversement proportionnel au rayon de courbure  $E = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot R}$ .

Nota :  $R_2$  est plus fin que  $R_1$  : ( $R_2 \ll R_1$ ).





**Figure III.7 :** Caractéristiques courant-tension pour deux rayon de courbure différents avec polarité négative



**Figure III.8 :** Caractéristiques courant-tension pour deux rayon de courbure différents avec polarité positive.

### III.4 Influence du nombre de lames sur la décharge couronne

Les résultats d'étude expérimentale sur l'influence du nombre de lames formant l'électrode active sur la décharge couronne sont rapportés sur les figures (III.9, III.10).

Nous avons constaté que, l'augmentation de courant de décharge est proportionnel au nombre de lames pour des tensions appliquées très élevées, lorsqu'on utilise trois lames avec une tension appliquée  $V = 27$  kV, le courant de décharge augmente pour atteindre  $I = 350$   $\mu$ A pour la polarité négative qu'est plus important par rapport à la polarité positive  $I = 115$   $\mu$ A, car lorsque nous appliquons une tension  $V$  à trois conducteurs, trois régions d'ionisation seront créées dans les trois conducteur alors un champ électrique inter électrode qu'est très intense aux voisinages des trois lames, donc le champ résultant fournira plus de courant. Ce résultat confirme la théorie de P. Cooperman et G. Cooperman [38], largement répandue dans l'étude des PES en configuration lames plan. L'influence du nombre de lames du précipitateur électrostatique sur la tension seuil de l'effet couronne a été étudiée. Nous constatons que pour les trois lames, le seuil de l'effet couronne est stable quelle que soit la polarité de la tension appliquée. La tension seuil en polarité négative est légèrement supérieure à celle de la polarité positive.

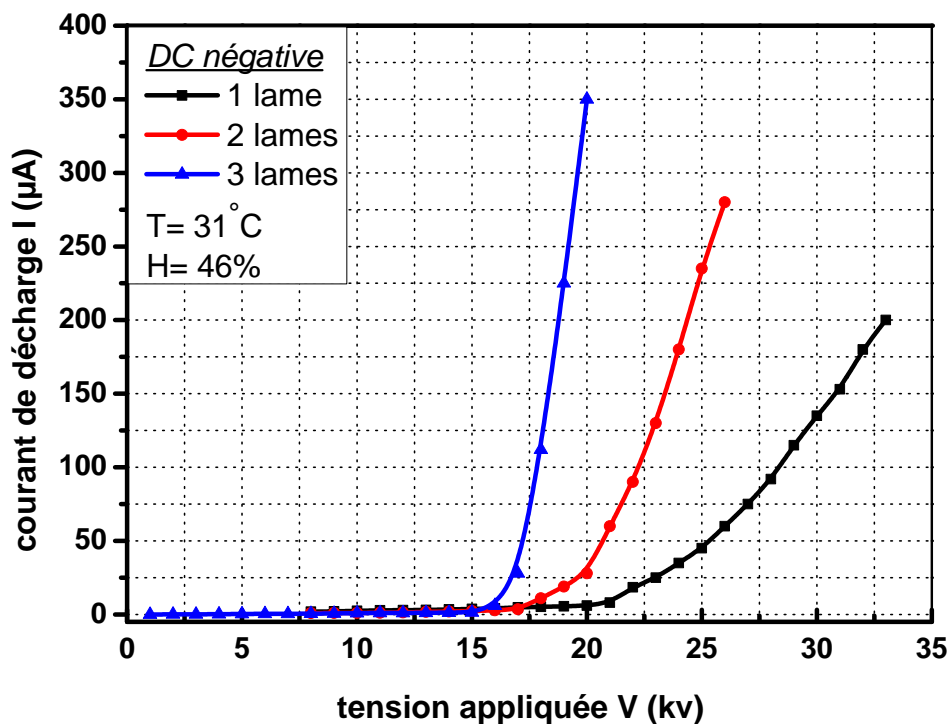


Figure III.9 : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre de lames négatives.

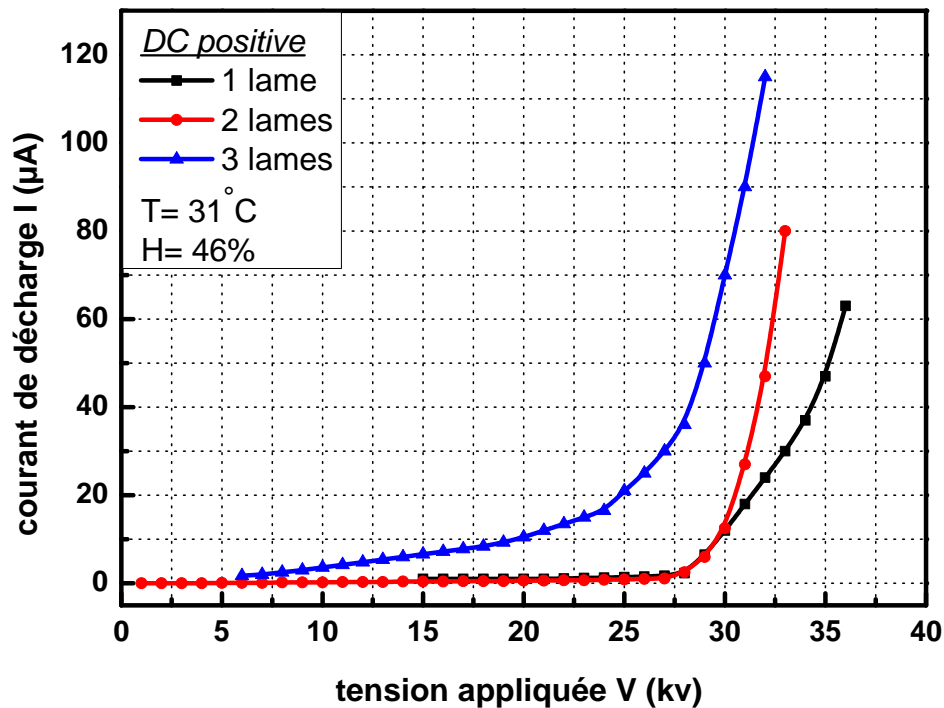


Figure III.10 : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre de lames positives.

### III.5 Effet de la distance inter-lames sur la décharge couronne

La configuration lames-plan est soumise à l'étude théorique et expérimentale. P. Cooperman et G. Cooperman [38], ont été des pionniers qui ont établi la loi pour la création de couronne en PES. Il donne la loi de la caractéristique courant-tension, identique à la loi de Townsend, sous la forme suivante

$$\frac{I}{V} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \mu}{h^2 \cdot \log\left(\frac{R_e}{r_0}\right)} \cdot (V - V_0) \tag{III.3}$$

$$\text{Ou } K = \frac{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \mu}{h^2 \cdot \log\left(\frac{R_e}{r_0}\right)} \tag{III.4}$$

$$\text{Pour } \frac{h}{a} \geq 2 \quad R_e = \frac{a}{\pi} e^{\frac{\pi h}{2a}} \tag{III.5}$$

$$\text{Pour } \frac{h}{a} \leq 0.6 \quad R_e = \frac{4h}{a\pi} \tag{III.6}$$

Où  $h$  est la distance entre lames et plan,  $a$  est la moitié d'espace entre les lames,  $r_0$  est le

rayon de courbure de lame,  $Re$  est le rayon équivalent,  $\mu$  est la mobilité des porteurs de charges.

Sur les figures (III.11), (III.12), la distance inter-lames  $2a$  à différentes valeurs, 5 cm, 4 cm, 3 cm et 2 cm pour  $h = 5$  cm fixe.

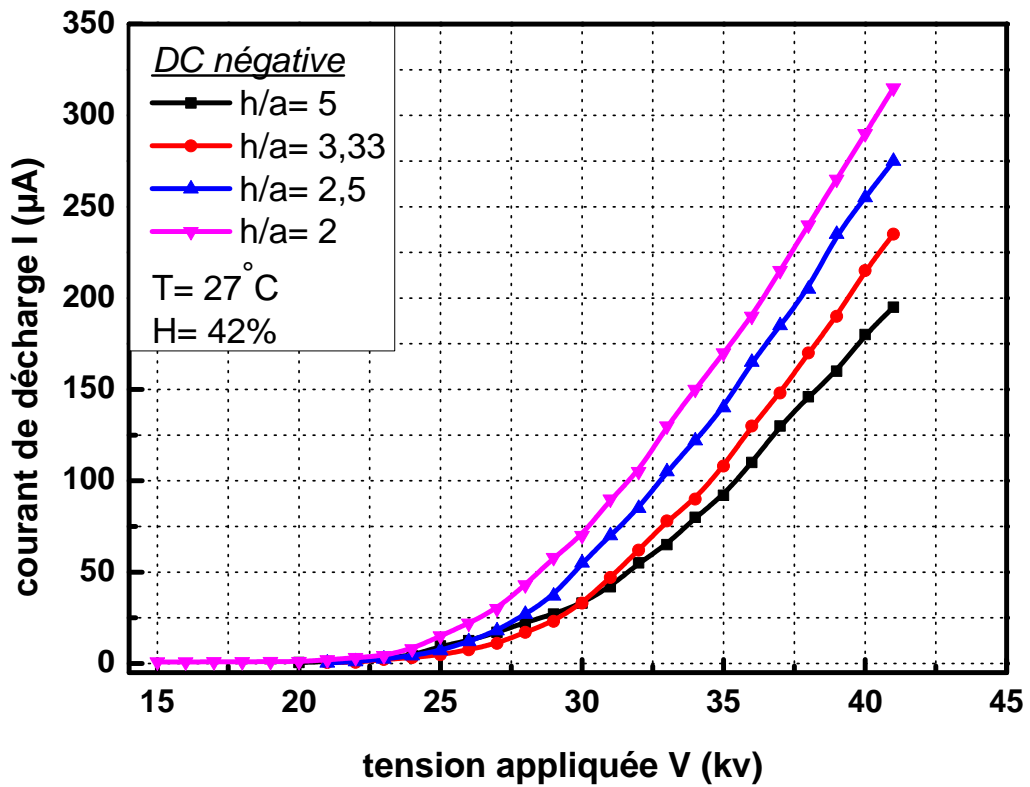
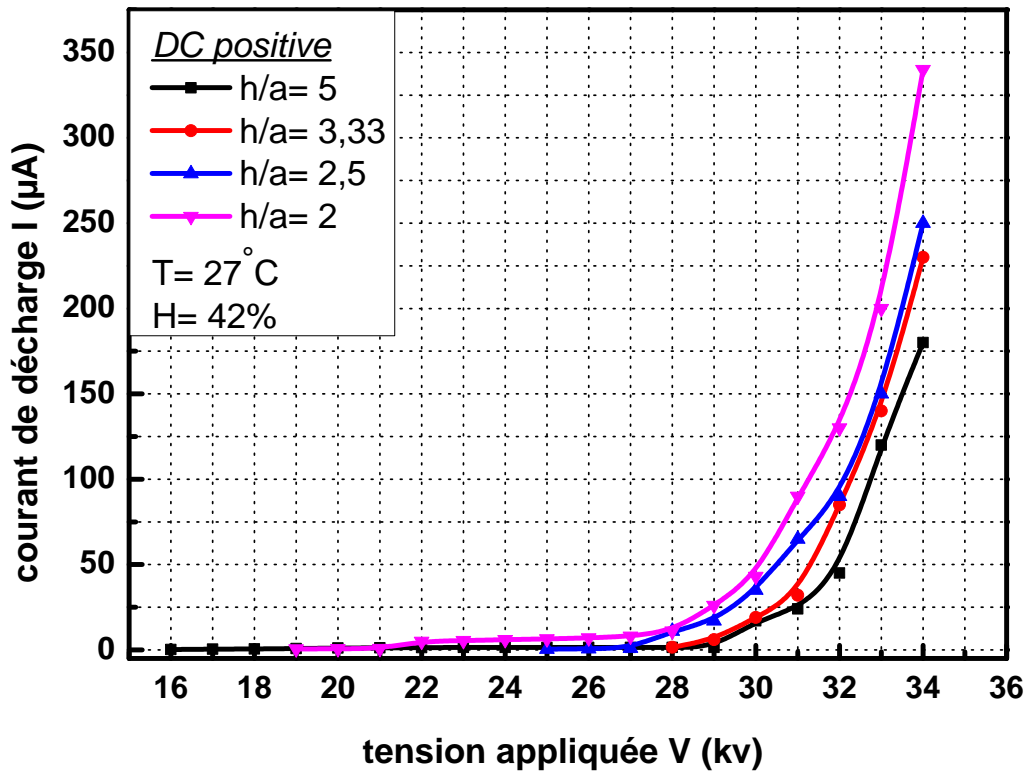


Figure III.11 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives.



**Figure III.12 :** Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames positive.

On voit clairement que le courant de décharge augmente en augmentant la distance inter-lames avec une diminution de tension seuil, ce qui est dû à la propagation du champ sur toute la surface inter-électrodes ce qui permet l'ionisation de tout le gaz et l'orientation vers le plan de collecte (il n'y a pas de lignes de fuites), pour obtenir une valeur maximale du courant, les électrodes lames doivent être éloignées entre elles de  $2a \leq h$ . Donc, on peut dire que la loi de Cooperman est vérifiée sous l'équation (III.5).

D'après les figures (III.13), (III.14), on observe que la distance inter-lames n'a aucune influence sur la caractéristique  $I=f(V)$ , car le facteur  $K$  est indépendant de l'espace inter-lames  $2a$ .

La distance inter-lames  $2a$  à différentes valeurs, 10 cm, 11 cm, 12 cm et 13 cm pour  $h = 3$  cm fixe.

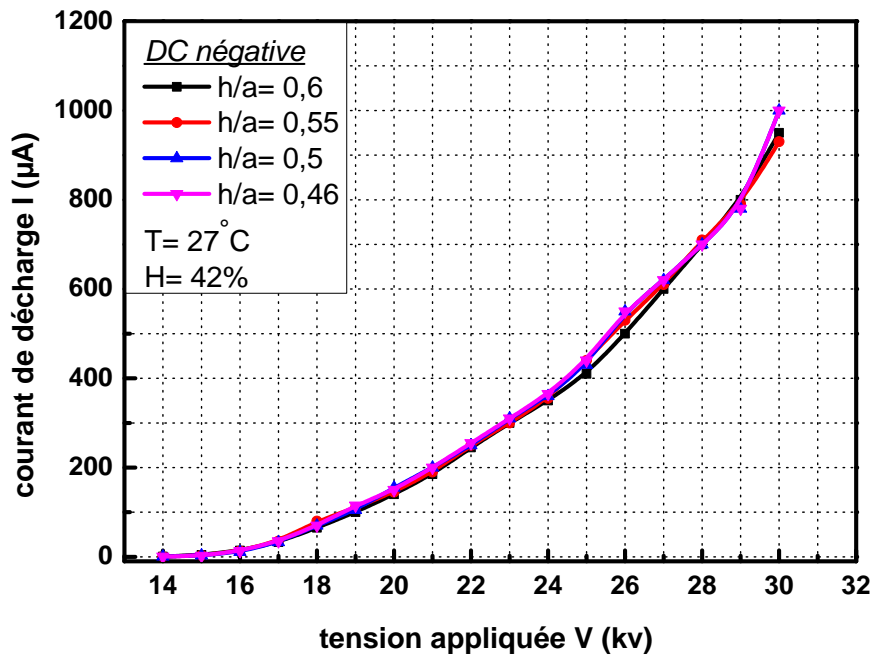


Figure III.13 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives.

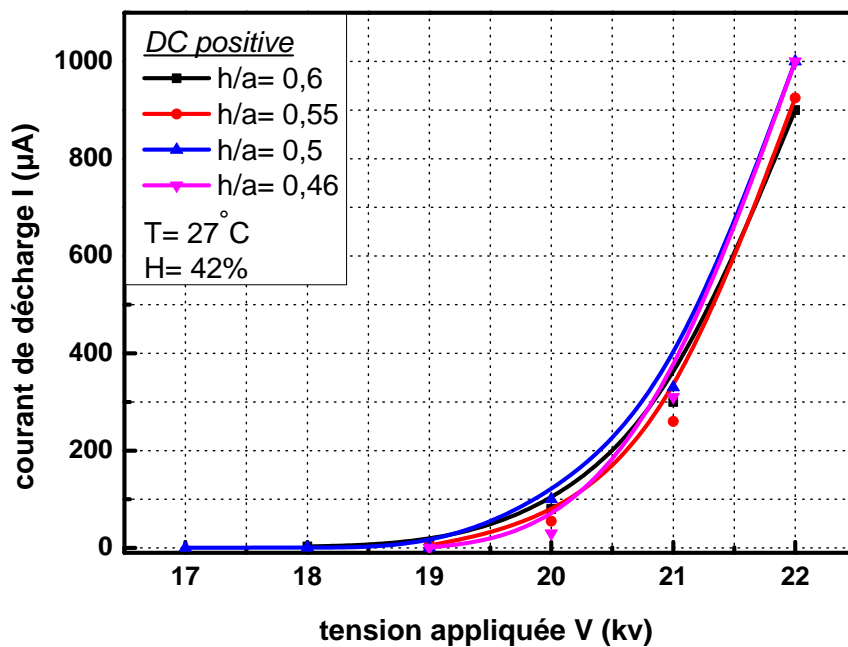


Figure III.14 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames positive.

On voit clairement que le courant de décharge est identique quel que soit la distance inter-lames (même caractéristique pour des différents espaces inter-lames), ce qui confirme la loi de Cooperman, sous la condition de l'équation (III.6). Donc pour obtenir une valeur constante du courant, les électrodes lames doivent être suffisamment éloignées entre elles de  $2a \gg h$ .

Pour les valeurs de  $\frac{h}{a}$  qui se retrouvent dans l'intervalle  $0.6 < \frac{h}{a} < 2$ , selon P. Cooperman [38], la décharge recouvre les deux phénomènes.

### III.6 conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté les résultats expérimentaux liés à plusieurs paramètres qui caractérisent la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique en configuration lame-plan, (le courant de décharge, la densité de courant, la tension de claquage, la tension appliquée, la tension seuil, etc.) et leurs rendements.

Cette expérience que nous avons développée, a permis de mettre en évidence :

L'influence de plusieurs paramètres sur la décharge couronne dans un dispositif de lame-plan. La variation de la hauteur et le nombre des lames sont influencés sur le courant de décharge et la quantité de champ électrique, et montre l'importance de la décharge couronne avec la polarité négative, par contre dans la décharge couronne avec la polarité positive avait un faible impact, ce phénomène explique que l'efficacité de collecte est meilleure dans la décharge couronne négative.

La taille des particules est un paramètre important pour influencer la trajectoire d'une particule.

Nous pouvons dire que les résultats obtenus sont satisfaisants et en accord avec plusieurs théories, déjà prédites (Townsend, Cooperman, ...).

## Conclusion générale

La filtration des particules et des fumées qui constituent la pollution visible a été le premier objet du traitement de l'air sur le plan technologique, il est acquis que l'utilisation des électrofiltres permet d'obtenir des résultats très satisfaisants en matière de filtration des poussières et des suies car ils sont capables d'atteindre un rendement supérieur à 95% et même d'un rendement meilleur. Ils pourront donc satisfaire aux futures prescriptions légales imposant une teneur résiduelle en poussières encore plus faible.

L'objectif de notre travail est de développer une étude expérimentale de la décharge couronne en déterminant les paramètres électriques essentiels à l'intérieur du précipitateur électrostatique en configuration lame-plan, tenant compte des paramètres géométriques (distance inter électrodes et inter-lames le rayon de courbure) et de voir le comportement des paramètres de la décharge couronne.

Notre étude expérimentale de l'effet couronne dans un précipitateur d'électrostatique en configuration lame-plan permet de formuler les conclusions suivantes :

- L'intensité de courant de décharge augmente avec la croissance de la tension appliquée, et les valeurs négatives de courant de décharge  $I$  sont plus élevées que celles positives pour la même tension appliquée. Ce courant continu qui traverse l'espace inter-électrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée. La caractéristique  $I = f(V)$  a une forme quadratique et elle confirme la loi de Townsend.
- Pour le même gaz et les mêmes conditions extérieures, la valeur de la tension de claquage est nettement inférieure en polarité positive. La tension nécessaire pour maintenir le même courant de décharge est plus élevée avec une polarité positive. C'est pour ça dans la majorité des cas, on utilise la décharge couronne négative, car les électrons s'attachent très rapidement aux atomes ou molécules neutres, des ions négatifs sont formés et tout se passe comme si des ions de même polarité que l'émetteur étaient émis au plan de collecte sous l'effet de l'ionisation, et un champ électrique suffisamment intense ainsi que pour limiter autant que possible les claquages.



- L'augmentation de courant de décharge est proportionnelle au nombre d'électrodes actives pour des tensions appliquées très élevées cela due à l'augmentation de champ électrique inter-électrodes qu'est très intense aux voisinages des fils (émissives).
- La constante géométrique K est proportionnelle à la mobilité apparente des porteurs de charge et plus élevée dans le cas d'une polarité négative. En outre, il semble que la mobilité apparente augmente avec la distance inter-électrodes pour les deux polarités. Le rapport entre les facteurs  $(K-/K+) \approx (\mu-/μ+)$  est indépendante de la distance inter-électrodes.
- le courant de décharge augmente en augmentant la distance inter-lames avec une diminution de tension seuil, ce la due à la propagation du champ sur toute la surface inter-électrodes ce qui permis l'ionisation de tout le gaz et l'orientation vers le plan de collecte (pas de fuite des particules), sous condition que  $\frac{h}{a} \geq 2$  ; donc, on peut dire que la loi de Cooperman est vérifiée pour des intervalles bien précis, car pour des rapports  $\frac{h}{a} \leq 0.6$ . ya aucune influence sur le courant de décharge, car la loi du Cooperman et indépendante d'espace inter-lames dans cet intervalle.

## Références bibliographiques

- [1] Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), (2008), « pollution olfactive, origine, législation, analyse du nord », ADEME, Paris.
- [2] C. Boutron, K. Rosman, C. Barbante, M. Bolshov, F. Adams, S. Hong et C. Ferrari, L'archivage des activités humaines par les neiges et les glaces polaires, C. R. Geoscience, **336**, pp 847-867 (2004).
- [3] « CITEPA Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique - CITEPA ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.citepa.org/fr/>. [Consulté le: 06-juill-2015].
- [4] K. Cho, Y. J. Cho, D. K. Shrivastava, et S. S. Kapre, « Acute Lung Disease After Exposure to Fly Ash », Chest, vol. 106, no 1, p. 309-311, juill. 1994.
- [5] P. F. DeCarlo, J. G. Slowik, D. G. Worsnop, P. Davidovits et J. L. Jimenez, Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: Theory, Aerosol Science and Technology, **38**, pp 1185-1205 (2004).
- [6] Zouzou, N., Moreau, E., & Touchard, G. (2006). Précipitation électrostatique dans une configuration pointe-plan. Journal of electrostatics, 64(7-9), 537-542.
- [7] ZHONGYI G., ROBERT A. & SCHILL J., Novel quasi-electrostatic air filter: a single particle study. Journal of Electrostatics Vol. 39, pages 203-230, 1997.
- [8] Blanchard, D. (2001). Collecte des fines particules et caractérisation des couches de poussière dans un précipitateur électrostatique (Doctoral dissertation, Grenoble 1).
- [9] James H. Turner, Phil A. Lawless, Toshiaki Yamamoto, David W. Coy, 68 pages, September 1999.
- [10] Souakri, S. (2016). Optimisation des performances d'un procédé industriel d'électrofiltration alimenté par hautes puissances pulsées (Doctoral dissertation, Pau).
- [11] KHALIJ M. - Caractérisation et modélisation de l'efficacité de filtration d'un électrofiltre de type Cottrell - Thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2001.
- [12] H. J. WHITE, « Industrial electrostatic precipitation », Addison Wesley Publishing Company, New York, 1963.

- [13] P.A. Lawless & R.F Altman 'ESPM :an advanced electrostatic precipitator model' IEEE Ind . Appl.Conf.29th IAS Annual Meeting Denver,PP.1519-1526,2-5oct,1994.
- [14] STRAUSS W. - Industrial gas cleaning - Pergamon Press, Paris, 1976.
- [15] Belbenoit, P. (1970). Comportement alimentaire et décharge électrique associée chez *Torpedo marmorata* (Selachii, Pisces). *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 67(2), 205-216.
- [16] H. Ait Said, H. Nouri, et Y. Zebboudj, « Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator », *J. Electrostat.*, vol. 73, p. 19-25, févr. 2015.
- [17] PARKER K.R., *Electrostatic precipitation*, Chapman & hall, 1997, pp. 1-24.
- [18] BROCK J.R., – Non continuum unipolar charging of aerosol: the role of external electric field. – *Journal applied Physics*, Vol. 41, 5, pp. 1940-1944, 1970.
- [19] PAUTHENIER M.M., MOREAU M., HANOT – La charge des particules spheriques dans un champ ionise – *Journal de physique et radium*, 3, 590-613, 1932.
- [20] SMITH W.B., MCDONALD J.R. – Development of theory for the charging of particle by unipolar ions – *Journal of aerosol science* 7, pp. 473-477, 1976.
- [21] CHAN-YEUNG, M. et MALO, J.-L. – Tables of major inducers of occupational asthma. – Chap. 35. In : Bernstein, D. et al., *Asthma in the workplace*. 2nd ed. New York : Marcel Dekker, pp. 683-720. 1999.
- [22] COCHET R. – Lois de charges des fines particules (submicroniques) – *La physique des forces electrostatiques et leurs applications*, Edition CNRS, pp. 331–338, 1961.
- [23] BLANCHARD D. – *Collection des fines particules et caracterisation des couches de poussiere dans un precipitateur electrostatique*– These, Universite Joseph Fourier, Grenoble 2001.
- [24] A. C. Mermigkas, I. V. Timoshkin, S. J. MacGregor, M. J. Given, M. P. Wilson, et T. Wang, « Removal of Fine and Ultrafine Particles From Air by Microelectrostatic Precipitation », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, no 10, p. 2842-2850, oct. 2013.
- [25] ELEZAAR. A (2017) *Contribution à l'étude d'un filtre d'air électrostatique*. These, Universite de Mascara. 2017.

- [26] Rezzouga M, Tilmatine A, Gouri R, Medles K, Dascalescu L «Experimental modiling of high-voltage corona discharge using design of experiments». *Front. Electr. Electron. Eng.*, 2(2): 139-143. China 2007.
- [27] SAAD Djedjiga « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques » Thèse : de magister en Electrotechnique, Option : Machines électriques.L' Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 21 décembre 2011.
- [28] Brahim. Benamar «La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [29] Hailong PANG « dépoussiérage électrostatique pour les particules submicronique en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète mars) ». thèse de doctorat l'université, JOSEPH FOURIER 18 Décembre 2006.
- [30] Flavien. Koliatene «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.
- [31] vicomtrade.cz/Regulated High Voltage DC Power Supplies GLASSMAN HIGH VOLTAGE INC. Designing Solutions for High Voltage Power Supply Applications.
- [32] chauvinarnoux.fr/ catalogue-metrix-2018
- [33] static-int.testo.com/ testo-625-Fiche-technique.
- [34] static-int.testo.com/ testo-417\_BE\_FR.
- [35] kern-sohn.com/z-cb-fr-kp.
- [36] Tinkercad.com/Autodesk .
- [37] B. L. Henson, « A space-charge region model for microscopic steady coronas from points », *J. Appl. Phys.*52, pp, 709–15, 1981.
- [38] Y. Zebboudj, G. Hartmann, « Current and electric field measurements in coaxial system during the positive DC corona in humid air », *Eur. Phys. J. AP* 7, pp, 167-176, 1999.