

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane MIRA –Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Laboratoire de Haute Tension de Bejaia



En vue de l'obtention d'un diplôme de master II en Génie Electrique

Option : Réseaux Electrique

Thème

Influence de la migration des
aérosols sur la décharge couronne

Propose et dirige par :

Mr H. AIT SAID

Mr A. LAIFAOU

Présente par :

Melle MOKRANI Fatima

Melle ACHOURI Nawal

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier le bon Dieu qui nous a donné la santé, la patience et le courage, durant toutes ces années d'études, pour accomplir ce modeste travail.

Puis et avec beaucoup de bonheur que nous remercions vivement nos chères parents, frères et sœurs, pour leurs patience et soutien tout au long de notre parcours universitaire et autres, que nous ne saurions jamais exprimer nos gratitude, et à qui nous dédions exclusivement cette œuvre.

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de haute tension de l'université de Bejaia, sous la direction de Mr H. AIT SAID et Mr K. LAIFAOUI. Nous leurs exprimons toutes nos gratitude pour leurs remarques qui nous ont grandement permis d'améliorer la qualité scientifique de ce manuscrit et de le mener à bien.

Je remercie les membres du jury, de m'avoir honorée en acceptant d'évaluer ce travail : Mr R. BOUDISSA, Melle N. ROUHA.

Tout de même, nous devons remercier infiniment toute personne ayant contribué de près ou de loin à mettre à terme ce travail par leurs soutiens.

Enfin, nous ne pourrions terminer sans avoir à remercier particulièrement nos collègues de classe pour tous les bons moments passés ensemble.

Liste des figures

La liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphériques.....	6
Figure I.2 : Evolution des coefficients d'ionisation et d'attachement en fonction du champ électrique réduit dans l'air.....	8
Figure I.3: Différentes configurations de décharge couronne.....	10
Figure I.4: Schéma de différents types de décharges.....	11
Figure I.5 : Topographie de la décharge couronne volumique en configuration pointe- plan.....	12
Figure I.6 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive	13
Figure I.7: Schématisation d'une décharge couronne continue négative.....	14
Figure I.8 : Vent électrique en configuration Pointe – Plan.....	16

Chapitre II

Figure II.1 : Classification des aérosols par domaine et par taille.....	20
Figure II.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique.....	23
Figure II.3 : Lignes de champ en direction de la surface d'une particule isolante soumise à un champ électrique uniforme	26
Figure II.4 : Electrofiltre à un seul étage	28
Figure II.5 : Electrofiltre à deux étages fil-plaque.....	29
Figure II.6 : Electrofiltre humide.....	29
Figure II.7 : Effet de la résistivité apparente sur l'efficacité de collecte.....	30
Figure II.8 : Illustration du phénomène de réentraînement anormal des particules.....	31
Figure II 9 : Schémas explicatif pour le mouvement d'une particule chargée et les forces qui agissent sur elle entre deux plaques parallèles.	33
Figure II.10 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules ($\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$ et $\varepsilon_r \rightarrow \infty$ cas des particules conductrices).....	34
Figure II.11 : Variations de la vitesse de migration théorique en fonction de la taille des particules (libre parcours moyen des molécules du gaz $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$ et la viscosité dynamique du gaz $\eta_g = 1,85 \times 10^{-5} \text{kg/ms}$).....	35

Chapitre III

Figure III.1 : Dispositif expérimental.....	39
Figure III.2 : Vue de dispositif.....	40
Figure III.3 : Système d'électrode.....	40
Figure III.4 : Configuration de l'électrode haute tension.....	40
Figure III.5 :Equipements de l'installation haute tension utilisée.....	41
Figure III.6 : Schéma de la source de haute tension.....	42
Figure III.7 : Installation de haute tension du laboratoire de Bejaia.....	42
Figure III.8 : Source d'alimentation.....	44
Figure III.9 : Ventilateur.....	44
Figure III.10 : Un baromètre à mercure.....	45
Figure III.11 : Un hygromètre à cheveux.....	45
Figure III.12 : Déchée du bois.....	46
Figure III.13 : Chambre à air.....	46
Figure III.14 : Flanc de pneu (Apex).....	46
Figure III.15 : Détecteur multi gaz (IBRID MX6).....	46
Figure III.16 : Gant.....	47
Figure III.17 : La blouse.....	47
Figure III.18 :Masque anti-gaz.....	47

Chapitre IV

Figure. IV.1 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance inter-électrodes pour les deux polarités.....	49
Figure. IV.2 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance inter-électrodes pour les deux polarités.....	50
Figure IV.3 : Tension de claquage en fonction de la distance inter-électrodes pour les deux polarités.....	51
Figure. IV.4 : Dépendance du rapport courant/ tension(I/V)avec la tension($V-V_0$) pour les	

deux polarités.....	51
Figure IV.5 : Dépendance du courant(I)avec la différence de tension($V-V_0$) sur une échelle logarithmique (pour les deux polarités).....	53
Figure IV.6 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives (2lames).....	55
Figure VI.7 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives (3lames).....	55
Figure VI.8 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (1 lame).....	56
Figure VI.9 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (2 lames).....	56
Figure VI.10 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (3 lames)....	57
Figure VI.11 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (1 lame).....	58
Figure VI.12 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (2 lames).....	58
Figure VI.13 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (3 lames).....	59
Figure IV.14.a : Caractéristique courant-tension pour les deux polarités a 20% (1 lame)..	61
Figure IV.14.b : Photo représente le dépôt des particules sur le plan de mesure.....	61
Figure IV.15 : Dépendance du rapport courant/ tension (I/V) avec la différence de tension ($V-V_0$) pour les deux polarités.....	62
Figure IV.16.a : Photo de la fumée avant et après la filtration.....	64
Figure IV.16.b : Spectre représente la concentration des particules à la sortie de PES....	64
Figure IV.17.a : Caractéristique courant-tension en fonction de la vitesse de migration des particules.....	65
Figure IV.17.b : Photo montre l'effet de la vitesse de migration des particules sur l'efficacité de filtration.....	65

Figure IV.18.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour la vitesse faible (20%).....	66
Figure IV.18.b : Photos montrent l'influence de nombre de lames sur la filtration des particules pour vitesse faible (20%).....	67
Figure IV.19.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour la vitesse moyenne (30%).....	67
Figure IV.19.b : Photos montrent l'influence de nombre de lames sur la filtration des particules pour une vitesse moyenne (30%).....	68
Figure IV.20.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour la vitesse plus fortes (40%).....	68
Figure IV.20.b : Photos montrent l'influence de nombre de lames sur la filtration des particules pour une vitesse plus fortes (40%).....	69
Figure IV.21.a : Caractéristique courant-tension pour la polarité négative.....	70
Figure IV.21.b : Photos représente le dépôt des particules.....	70
Figure IV.22.a : Photos représentent la fumée de la combustion de chambre à air avant et après la filtration.....	71
Figure IV.22.b : Spectres représentent la concentration des particules à la sortie de PES.....	72
Figure IV.23.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour faible vitesse (20%).....	73
Figure IV.23.b : L'effet de nombre de lames sur l'efficacité de filtration.....	72
Figure IV.24.a : Caractéristique courant-tension en fonction de la vitesse de migration...	73
Figure IV.24.b : Photos montrent l'effet de la vitesse des particules sur l'efficacité de filtration.....	74
Figure IV.25 : Spectre représentent la concentration de SO ₂	74
Figure IV.26.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour faible vitesse (20%).....	75

Figure IV.26.b : l'influence du nombre de lames sur l'efficacité de filtration.....76

Liste des tableaux

La liste des tableaux

Tableau III.1 : La tension d'alimentation du variateur de vitesse.....45

Tableau IV.1 : Résultats de facteur K pour les couronnes négatives et positives.....52

Tableau IV.2: Résultats de l'exposant n pour la couronne négative et positive.....53

Tableau IV.3 : Le Facteur K pour les deux polarités.....62

Tableau IV.4 : Résultats de l'exposant n pour la couronne négative et positive.....63

Tableau IV.5 : Résultats de facteur K et de l'exposant n pour la polarité négative.....71

Nomenclature

Lettres latines

a : La distance moyenne entre deux lames (mm).

A : constante qui dépend principalement de la géométrie des électrodes.

B : constante.

C : condensateur de lissage (F).

h, d : la distance inter-électrodes (mm).

d : rayon équivalent (Cooperman)(mm).

d_p^3 : Le volume de la particule (mm^3).

d_p : Le diamètre de particule de charge électrique (μm).

e : charge élémentaire ($e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).

E : le champ électrique (V/m).

E_i : le champ électrique (V/m).

E_{pd} : Le champ disruptif de la couche de particule (V/m).

F_{DEP} : La Force diélectrophorétique.

\vec{F}_e : La force électrique (La force de Coulomb).

\vec{F}_f : La force de trainée.

Hr : humidité relative (%).

I: courant de décharge (μA).

I_0 : courant collecté par la sonde pour $V_b = 0$.

J_p : La densité du courant de décharge (A/m^2).

K : constante.

m_p : La masse de la particule (g).

m, p : exposant qui diffère d'un auteur à l'autre.

n_g : La viscosité dynamique du gaz (kg/ms).

n : puissance de la loi de Meng.

N : nombre d'électrons dans un plan d'abscisse x .

N_0 : nombre d'électrons initiaux au plan ($x=0$).

P : pression (Pa).

q_p : La charge électrique.

U_g : La vitesse d'écoulement de gaz.

r : le rayon de courbure de la pointe.

R : La résistance d'amortissement($k\Omega$).

R_u : La résistance basse tension ($k\Omega$).

R_0 : La résistance haute tension ($k\Omega$).

R_e : La résistance du voltmètre de crête MU11.($k\Omega$).

t : temps(s).

T : température ($^{\circ}C$).

U : La tension aux bornes de la résistance basse tension.

v : vitesse du vent en (m/s).

v_i : la vitesse des ions contenus dans le gaz (m/s).

V_c : Tension de claquage (kV)

V, V_a : tension appliquée (kV)

V_0 : Tension seuil (kV)

w_{th} : vitesse théorique de migration (m/s).

∇E^2 : gradient du champ électrique qui lui est appliqué

Lettres Grecques

α : le coefficient d'ionisation de Townsend

γ : le coefficient de Townsend

η : une probabilité d'attachement électronique

ϵ_s : Lapermittivité respective de la sphère diélectrique

ϵ_m : La permittivité du milieu

ϵ_0 : La permittivité électrique du vide ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} Fm^{-1}$)

λ_g : Libre parcours moyen des molécules du gaz μm

τ_p : Le temps de relaxation de la particule considérée

μ : La mobilité électrique moyenne des ions

μ^- : La mobilité électrique moyenne des ions négatifs

μ^+ : La mobilité électrique moyenne des ions positifs

ρ_p : La résistivité apparente des particules traitées (Ωcm)

ρ_g : Masse volumique du gaz

Sommaire

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

Chapitre I

Etude théorique de la décharge couronne

I.1 Introduction	3
I.2 Les décharges électriques dans les gaz	3
I.3 Mécanismes de formation des décharges électrique	4
I.3.1 Sources des électrons germe.....	4
I.3.2 Phénomènes de multiplications électroniques	4
I.3.2.1 Phénomènes de collision.....	4
I.4 Processus physiques des décharges électriques	4
I.5 Phénomènes dans les décharges à haute pression	7
I.5.1 Les avalanches	7
I.5.2 Les décharges par avalanches successives.....	8
I.5.3 Les ondes d'ionisation ou streamer.....	9
I.6 Décharge couronne	10
I.6.1 Mécanisme de la décharge couronne.....	11
I.6.2 Décharge couronne positive.....	12
I.6.3 Décharge couronne négative.....	13
I.6.3.1 Apparence lumineuse.....	14
I.7 Le vent ionique	14
I.8 Les facteurs influençant la décharge couronne	16
I.8.1 Facteurs géométriques.....	16
I.8.2 Facteurs physiques (physico-chimiques).....	16
I.8.3 Facteur électrique	17
I.9 Conclusion	17

Chapitre II

Précipitateurs électrostatiques d'aérosols

II.1 Introduction	19
II.2 Particules en suspension dans l'air et techniques de traitement	19
II.3 Précipitateurs électrostatique (PES)	21

II.3.1 Description des précipitateurs électrostatique.....	21
II.3.2 Principes de la précipitation électrostatique d'aérosols.....	22
II.4 Forces à l'origine de la migration des particules chargées.....	24
II.4.1 Force de Coulomb.....	24
II.4.2 Force diélectrophorétique (DEP).....	24
II.5 Mécanisme de charge des particules.....	25
II.5.1 La charge par champ.....	25
II.5.2 La charge par diffusion.....	26
II.5.3 La charge mixte.....	27
II.6 Les type des électrofiltres	27
II.6.1 - Les électrofiltres à un seul étage.....	27
II.6.2 Les électrofiltres à deux étages	28
II.6.3 Les électrofiltres humides	29
II.7 Phénomènes détériorant l'efficacité de collecte.....	30
II.7.1 Effet de la résistivité apparente sur les performances de l'électrofiltre.....	30
II.7.2 Le réentraînement de particules.....	31
II.7.3 Le back corona.....	31
II.7.4 La vitesse de migration des particules.....	32
II.7.5 Influence de la taille des particules.....	35
II.8 Rendement.....	35
II.9 Avantages et Inconvénients des précipitateurs électrostatiques.....	35
II.10 Applications des précipitateurs industriels.....	36
II.11 Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique.....	37
II.12 Conclusion.....	38

Chapitre III

Description du model expérimental

III.1 Introduction.....	39
III.2 Dispositif Expérimental.....	39
III.3 Système d'électrodes	40
III.4 Source de haute tension.....	41
III.5 Méthode de mesure	43
III.5.1 Mesure de la tension appliquée aux électrodes actives.....	43

III.5.2 Détermination de la tension seuil.....	43
III.5.3 Mesure du courant de décharge au plan collecteur.....	43
III.5.4 Mesure de la caractéristique courant-tension	44
III.5.5 Mesure la vitesse d'écoulement de l'air.....	44
III.5.6 Mesure des paramètres physiques de l'air.....	45
III.5.7 Résultat expérimentaux.....	45
III.6 Les matériaux utilisés	46
III.6.1 Matériaux utilisés pour la fumée.....	46
III.6.2 Détecteur multi gaz (IBRID MX6).....	46
III.6.3 Les habiles de protection utilisés.....	47
III.7 Conclusion.....	47

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction	48
IV.2 Caractérisation de la décharge couronne dans un PES à vide.....	48
IV.2.1 Effet de la distance inter-électrodes sur la décharge couronne.....	48
IV.2.2 Facteur géométrique K en fonction de la distance inter-électrodes.....	51
IV.2.3 Formule empirique générale des caractéristiques courant-tension.....	52
IV.2.4 Effet de la distance inter-lames sur la décharge couronne négative.....	54
IV.2.5 Influence d'écoulement de l'air sur la décharge couronne	56
IV.3 Effet de la migration des particules sur la décharge couronne dans un PES.....	59
IV.3.1 La migration des particules dégagée de la combustion du bois.....	60
IV.3.2 La migration des particules dégagée de la combustion de chambre à air.....	69
IV.3.3 La migration des particules dégagée de la combustion du flanc de pneu (Apex).....	73
IV.4.Conclusion	76
Conclusion générale	77
Référence bibliographique.....	80

Introduction générale

Introduction générale

Des applications industrielles de l'électrostatique pour manipuler des particules ou des gouttelettes en suspension sont actuellement utilisées dans de nombreux domaines : précipitation électrostatique (PES), séparation électrostatique de granules, guidage électrostatique de poudres (par rideaux électriques), peinture et poudrage électrostatiques, et pulvérisation électrique de liquides, etc. Dans tous ces cas, les particules ou gouttelettes en suspension doivent être électriquement chargées. Alors, sous l'effet du champ électrique, elles sont dirigées ou entraînées vers une cible, une zone de capture ou de séparation, etc.

De nos jours, la pollution de l'air atmosphérique est devenue un enjeu environnemental majeur en raison de la croissance rapide du développement industriel et technologique qui nécessite une consommation énergétique importante, Un taux élevé de particules fines et ultrafines ($< 2,5 \mu\text{m}$) dans l'air est facteur de risques sanitaires (maladies cardio-vasculaires, altération des fonctions pulmonaires, cancer du poumon). Il a un effet direct sur la diminution de l'espérance de vie, Les particules de taille importante peuvent être éliminées par des techniques utilisant des principes mécaniques (cyclone, chambre de décantation...) alors que seuls des PES ou des filtres à manches sont capables d'éliminer les particules les plus fines.

Notre travail consiste à l'étude expérimentale de la migration des aérosols sur le comportement de la décharge couronne dans le précipitateur électrostatique (PES) de configuration lames-plan. Nous effectuerons des mesures des paramètres liés à ce dernier : courant de décharge, tension appliquée, tension seuil et la concentration des particules de la fumée à la sortie de PES (SO_2 ; NO et CO). Il faudrait mettre en évidence l'influence des facteurs géométriques tels que l'espace inter-électrodes et les paramètres physiques sur cette décharge.

Ce travail est composé de quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous présentons les connaissances de base concernant les décharges couronne et les décharges électriques dans les gaz, les mécanismes de charge des particules et leur mouvement sous l'effet du champ électrique, puis les principaux phénomènes intervenant dans les filtres électrostatiques, car elle est l'une des pionnières de base sur l'efficacité de PES. Nous présentons les processus physiques qui conduisent à la production des particules chargées pour des différents types de tension appliquées, et donner certains cas de son apparition, et pour éclairer l'influence de facteur géométrique et les paramètres physiques sur la décharge couronne.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des principaux éléments constituant les précipitateurs électrostatiques d'aérosols et décrire leur principe de fonctionnement ainsi que

leurs propriétés électriques et leur filtration électrostatique. Nous présentons les différents modèles des électrofiltres, les mécanismes de charge des particules, la vitesse de la migration, les forces à l'origine de la migration des particules chargées, et l'influence des tailles de ce dernier.

Le troisième chapitre sera dédié à la description du model expérimental. Le PES en lames-plan quia été réalisé au laboratoire de haute tension de l'Université de Bejaia et nous exposons la configuration géométrique des électrodes, les mesures électriques, le principe de fonctionnement, et les méthodes de mesures des paramètres de la décharge couronne tel que la tension d'apparition de l'effet couronne, en exposant aussi le matériel et les échantillons pour la combustion naturelle .

Ce dernier chapitre quand à lui sera consacré à l'analyse et discussion des résultats obtenus, et l'étude des phénomènes de la décharge couronne dans le PES en configuration lames-plan pour le but de distinguer l'influence de la migration des particules fines sur les paramètres de la décharge tels que les caractéristiques courant-tension et la mobilité des porteurs de charges.

Chapitre I

Etude théorique de la décharge couronne

I.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de faire une étude théorique sur la décharge couronne, Les phénomènes de décharge électrique ont fait l'objet de plusieurs études et cela depuis plus d'un siècle [1,2]. Les premières études décrivant leur évolution et proposant des mécanismes de décharge datent du début de XXème siècle [3,4]. En effet les premières publications sur l'effet couronne datent de 1915 avec des travaux effectués par F.PEEK, qui a établi par des essais expérimentaux une loi empirique exprimant le champ seuil d'apparition de l'effet couronne.

Si on établit une tension suffisante entre deux électrodes placées dans un gaz, ce dernier peut s'ioniser et laisser passer un courant : c'est ce que l'on appelle une décharge électrique. Les manifestations et caractéristiques des décharges dépendent de nombreux paramètres comme la nature du champ électrique, les paramètres physiques du gaz ou encore des distances caractéristiques (distance inter-électrodes) et la géométrie des électrodes (les géométries les plus fortement utilisées sont des géométries pointe-plan, fil-plan, plan ou fil-cylindre).

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans le cas des décharges couronne, les processus physiques qui conduisent à la production d'espèces et à leur dispersion. Ces phénomènes, qui ont largement été décrits pour des géométries pointe-plan, peuvent être généralisés à la configuration fil-cylindre, fil-plan et lame plan que nous avons utilisées dans notre étude.

I.2 Les décharges électriques dans les gaz

Si on établit une tension suffisante entre deux électrodes placées dans un gaz, ce dernier peut s'ioniser et laisser passer un courant : c'est ce que l'on appelle une décharge électrique. Les manifestations et caractéristiques des décharges dépendent de nombreux paramètres comme la nature du champ électrique (continu, alternatif), la nature et la pression du gaz [5] ou encore des distances caractéristiques (distance inter-électrodes). Au XIXe siècle, les expériences sur les décharges électriques dans les gaz raréfiés ont conduit à la découverte de l'électron et des rayons X. Dans ce cas, on parle aussi fréquemment d'arc électrique.

I.3 Mécanismes de formation des décharges électriques

I.3.1 Sources des électrons germes

La décharge électrique s'établissant dans un espace gazeux soumis à un potentiel, nécessite la présence de charges libres dans le milieu : électrons germes. Ces électrons libres

présents dans le milieu gazeux, gagneront de l'énergie sous l'action du champ électrique externe et en perdent sous l'effet des collisions élastiques et inélastiques avec les particules présentes dans le gaz. Nous allons maintenant donner quelques indications sur les sources possibles d'électrons germes, nécessaires à l'amorçage de décharge électrique [6].

- Rayonnement cosmiques ou radioactivité naturelle
- Détachement d'électrons des ions négatifs
- Contribution de la cathode

I.3.2 Phénomènes des multiplications électroniques

I.3.2.1 Phénomènes de collision

L'application d'un champ électrique suffisamment intense conduit à l'ionisation du gaz. Cette dernière se fait par le transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz, et dans ce cadre il existe deux types de collisions entre ces éléments [7].

- a) **Choc élastique** : dans ce cas les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. L'énergie du système reste inchangée.
- b) **Choc inélastique** : dans ce cas l'énergie interne des particules change. Les chocs inélastiques sont la source d'un nombre important de réactions physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz. On distingue alors les phénomènes ionisants :
 - Excitation
 - Ionisation
 - Recombinaison
 - Détachement

I.4 Processus physiques des décharges électriques

Un électron placé dans un champ électrique uniforme ($E = V/d$, où V est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes de distance d) est accéléré et peut ioniser des atomes ou des molécules, tel que $A + e^- \rightarrow A^+ + 2e^-$. L'ionisation d'une espèce conduit donc à la formation d'une particule chargée et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquérir une énergie suffisante pour ioniser une seconde particule. Ce mécanisme d'ionisation successive est connu sous le nom « d'avalanche électronique » ou « décharge de Townsend ».

Townsend a proposé en 1914 d'introduire un coefficient d'ionisation α (premier coefficient de Townsend) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation [8].

L'inverse de ce coefficient représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes et dépend du champ réduit E/N (N désignant le nombre d'électrons). Comme l'apparition d'un électron primaire à la cathode se traduit par l'arrivée de $e^{\alpha d}$ électrons à l'anode par avalanche électronique, la relation de Townsend s'écrit :

$I = I_0 e^{\alpha d}$ (I.1) En dehors de ce mécanisme de multiplication électronique, des électrons secondaires peuvent être émis par impact d'ions positifs sur la cathode ou par impact de photons sur la cathode ou les molécules proches. La probabilité de produire ainsi des électrons secondaires se traduit par l'introduction d'un second coefficient de Townsend γ :

$$I = I_0 \frac{\gamma e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (\text{I.2})$$

Le dénominateur de cette expression, qui peut être nul, explique la divergence du courant et donc le claquage du fluide. Cette divergence du courant n'a évidemment pas de réalité physique, dans la pratique, le courant est limité par la résistance du circuit électrique.

Le critère de claquage est alors exprimé par la relation suivante :

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0 \quad (\text{I.3})$$

D'autre part, il convient d'introduire une probabilité d'attachement électronique η :

$$I = I_0 e^{(\alpha - \eta)d} \quad (\text{I.4})$$

Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit alors :

$$\gamma(e^{(\alpha - \eta)d} - 1) = 1 \quad (\text{I.5})$$

Pour que la décharge soit auto-entretenu, il est nécessaire que tout électron qui quitte la zone d'ionisation soit remplacé. Chaque électron doit créer suffisamment d'ions positifs, de photons et d'espèces métastables pour qu'au moins l'un d'eux puisse produire un nouvel électron, appelé électron secondaire.

Sous l'influence du champ électrique appliqué, toutes les particules ainsi créées vont se déplacer dans l'espace inter-électrodes et générer un courant électrique, appelé également

courant de décharge. La **figure I.1** décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée [9]. La courbe permet de distinguer quatre régimes :

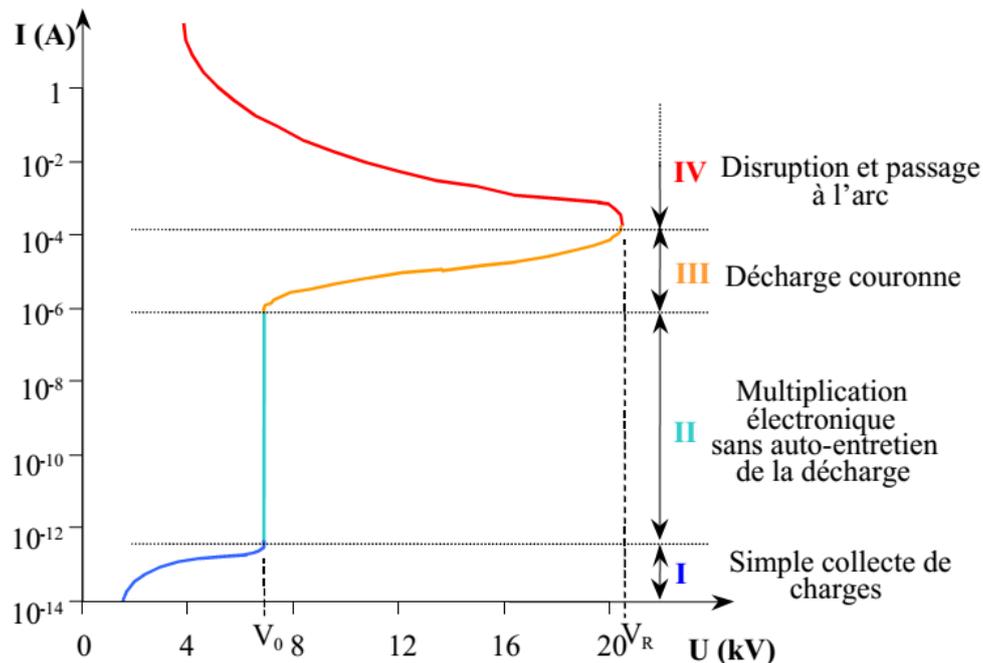


Figure I.1: Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphériques

- **Régime I-Collecte de charges:** le courant est très faible, dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou rayonnement cosmique. Dans ce cas, le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique.
- **Régime II-Régime impulsif:** lorsque la tension atteint une valeur seuil V_0 , le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule environnante. Le processus d'avalanche se déclenche alors sans que le critère d'auto-entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire : on parle de régime de Townsend non entretenu. Le courant reste faible.
- **Régime III-Régime luminescent:** ici la décharge ne s'éteint plus car la condition d'auto-entretien est atteinte. La composante continue (représentative de la charge d'espace) augmente avec la tension.
- **Régime IV-Régime disruptif:** les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrodes. C'est le régime des décharges disruptives tel que les arcs électriques.

I.5 Phénomènes dans les décharges à haute pression

Un travail expérimental important a été initié à partir des années 1930 par Loeb aux Etats-Unis [10] et Raether en Allemagne [11] pour expliquer la formation et analyser les caractéristiques des décharges formées sous haute pression. Il était tout naturel que les premiers travaux conduits sur les décharges sous haute pression se situent dans la continuité des travaux de Townsend et concernent plus particulièrement des systèmes capacitifs à électrodes parallèles.

Ces travaux expérimentaux ont en particulier permis de mettre en évidence et d'analyser trois types de phénomènes et mécanismes liés à la formation des décharges à haute pression:

I.5.1 Les avalanches

Ce phénomène avait déjà été mis en évidence dans les décharges basse pression par Townsend. Il s'agit de phénomènes couplés de dérive et de développement d'un électron germe dans un champ Laplacien. Le développement a lieu grâce à l'ionisation par impact d'électrons et à la diffusion radiale du nuage électronique en cours de formation. La croissance de l'avalanche est limitée par les réactions d'attachement ou de recombinaison dans le gaz. Au cours de son développement, une avalanche est caractérisée par sa taille géométrique, c'est-à-dire son diamètre en tête d'avalanche et le nombre d'ions qu'elle contient. Ces deux paramètres sont en fait couplés et ne dépendent pour un gaz donné que du temps écoulé depuis la naissance de l'électron germe à l'origine de l'avalanche et du champ électrique réduit E/N où E est le champ électrique (en $V.cm^{-1}$) et N le nombre d'électrons par unité de volume dans le gaz (en cm^{-3}). Le champ électrique réduit s'exprime en Townsend (Td), avec $1 Td = 1.10^{-17} V.cm^2$ [12]. La durée de vie de l'avalanche est conditionnée par les valeurs relatives des coefficients d'attachement et d'ionisation, qui dépendent fortement du champ électrique réduit. Leurs évolutions dans le cas de l'air sont représentées dans la **figure I.2** On y voit qu'un champ électrique de plus en plus fort a tendance à favoriser la cinétique d'ionisation par rapport à la cinétique d'attachement.

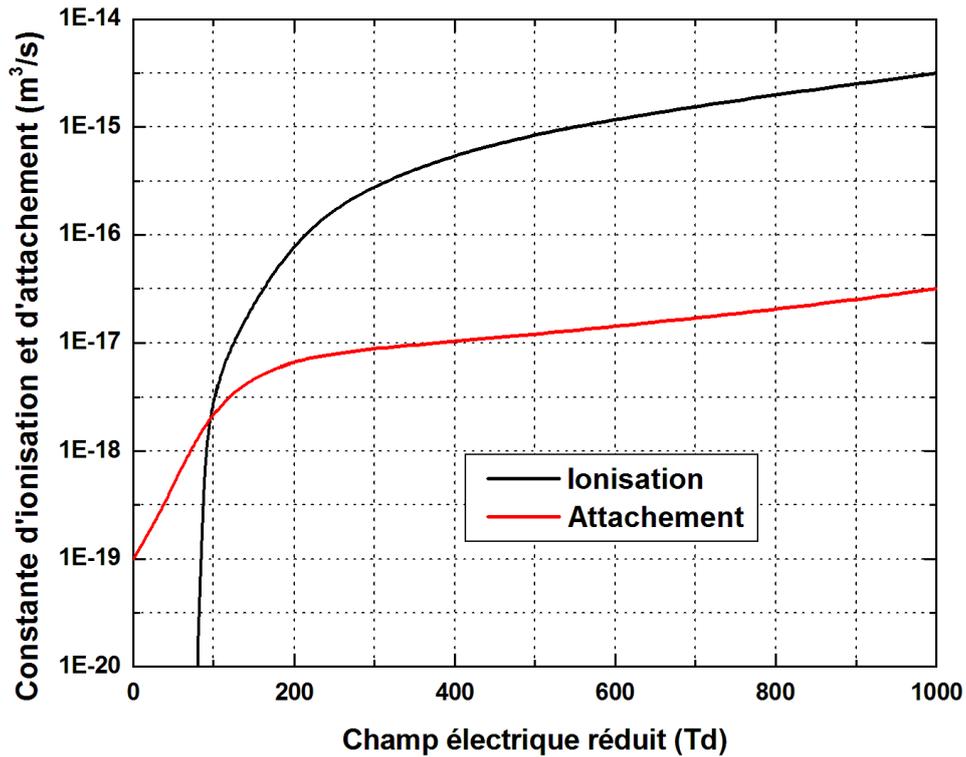


Figure I.2 : Evolution des coefficients d'ionisation et d'attachement en fonction du champ électrique réduit dans l'air [13]

Quel que soit le mécanisme de claquage à l'origine de la formation d'une décharge sous haute pression, c'est toujours l'initiation et le développement d'une avalanche qui constitue l'étape première du mécanisme.

I.5.2 Les décharges par avalanches successives

Ce mécanisme stipule que le claquage à haute pression peut avoir lieu grâce à l'établissement d'un champ électrique intense provenant d'une charge d'espace importante qui se construit à l'issue du passage de plusieurs avalanches successives. La grande différence de mobilité entre les électrons et les ions est implicitement exploitée ici. En effet, pendant le développement d'avalanches, les ions produits restent quasiment immobiles dans l'espace inter-électrodes, alors que les électrons dérivent rapidement jusqu'à l'anode où ils sont collectés. Il faut noter que ce mécanisme d'avalanches successives ne peut s'appliquer que dans le cas d'un champ Laplacien relativement important dans tout l'espace inter-électrodes. Bien que ce scénario ait été mis en évidence par Raether par simulation numérique, il ne peut à lui seul expliquer toutes les situations de claquage. Un mécanisme utilisant un autre concept, celui de propagation d'onde d'ionisation également connue sous le nom de propagation de streamer a donc été envisagé pour la formation des décharges haute pression.

I.5.3 Les ondes d'ionisation ou streamer

La décharge de Townsend fait intervenir tout l'espace inter-électrodes. Cette théorie perd sa validité pour des pressions élevées telle que la pression atmosphérique. Les travaux de Fletcher [14] ont montré qu'à des pressions élevées le temps de formation de la décharge est très inférieur au temps de transit des ions positifs entre les électrodes. Ceci permet donc d'écarter le processus γ (coefficient d'ionisation secondaire associé aux différents phénomènes secondaires) dû à la cathode. Cependant, cette théorie garde sa validité pour des valeurs du produit $P \times d$ inférieures à 200 Torr.cm [15]. L'insuffisance de la théorie de Townsend, pour les hautes pressions, a conduit à la formulation d'une nouvelle théorie, dite des étincelles et des éclairs, qui est fondée sur la notion du streamer.

L'expérience a montré que, pour des pressions élevées, la tension de claquage ne dépend pas beaucoup de la nature de la cathode, et que le courant de décharge atteint des valeurs notables avant même que la première avalanche ne soit écoulé. En outre, la décharge n'est plus diffusée comme celle de Townsend mais prend l'aspect d'un filament se propageant entre les électrodes. Pour expliquer ce phénomène, il n'est plus possible de se contenter du processus de Townsend car il existe une source supplémentaire d'électrons en plus des processus d'ionisation primaire α et d'ionisation secondaire, c'est la photo-ionisation du gaz. Le streamer peut être défini comme étant une série continue d'avalanche qui prend naissance entre les électrodes. Si la tension appliquée est très grande devant la tension de claquage, le champ dû à la charge d'espace formée par les ions positifs en tête de l'avalanche primaire atteint une valeur comparable au champ électrostatique initial avant que l'avalanche n'atteigne l'anode. Le streamer commence à se développer à partir de ce point. Un électron libre se trouvant dans ce champ conduit à une avalanche. Les électrons en tête de celle-ci tendent à neutraliser la charge positive concentrée à la tête du filament en même temps qu'ils excitent les atomes du gaz. Ces derniers vont en particulier émettre des radiations photo-ionisantes. La situation initiale se retrouvera légèrement décalé en raison de la lenteur des ions qui forment une nouvelle charge d'espace à l'endroit où se trouvent les nouveaux électrons primaires créés par photo-ionisation. Le streamer va donc se développer pas à pas jusqu'à ce qu'un canal de plasma soit établi entre l'anode et la cathode.

Des critères de formation du streamer ont été proposés par Meek [16] et Raether [17]. Le premier suggère que la transition de l'avalanche en streamer se fait quand le champ de la charge d'espace, à la tête de l'avalanche, devient du même ordre de grandeur que le champ appliqué. Le deuxième propose un critère exprimant que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer. Ce phénomène du streamer se développe

en des temps de l'ordre de $10^{-8}s$, alors que la théorie de Townsend nécessite des temps de l'ordre de $10^{-5}s$ pour entraîner le claquage.

I.6 Décharge couronne

Les décharges couronne sont caractérisées par une dissymétrie géométrique des électrodes. Les configurations courantes utilisées dans les expériences sont de type pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre et lame-plan, représentées dans la **figure I.3**. Lors de l'application d'une haute tension au niveau de l'électrode ayant le plus petit rayon de courbure, le champ électrique produit dans l'espace inter-électrodes est fortement inhomogène. Il a une valeur élevée au voisinage de cette électrode puis décroît rapidement au fur et à mesure qu'on s'approche de l'électrode plane. A proximité de l'électrode haute tension, l'amplitude importante du champ électrique permet de générer des électrons avec des énergies suffisantes pour ioniser le gaz. C'est une zone où se développent les avalanches électroniques, ce qui permet rapidement l'accumulation d'une charge d'espace à l'origine de la propagation de la décharge.

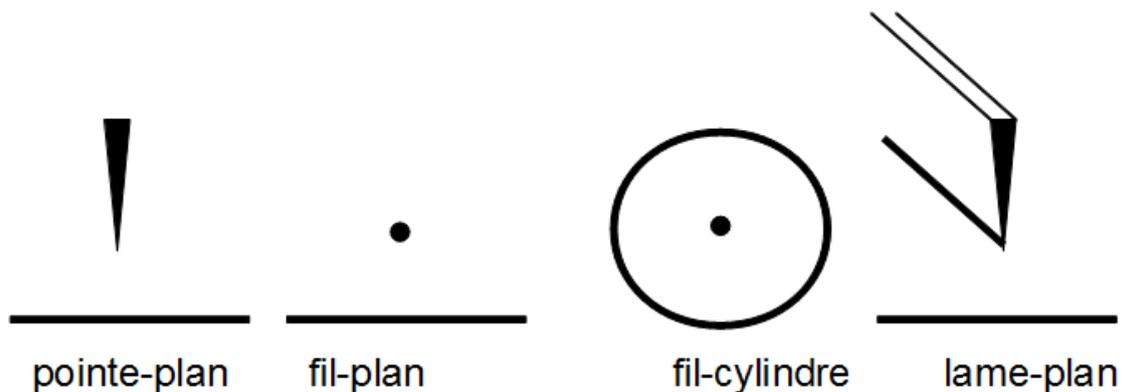


Figure I.3: Différentes configurations de décharge couronne

Naturellement dans cette zone proche de l'électrode active les processus d'ionisation prédominent sur les processus d'attachement des électrons. En revanche, si on s'éloigne de l'électrode active, le champ électrique devient plus faible. L'avantage de la décharge couronne est de pouvoir fonctionner avec tous les types d'alimentation électrique.

La difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition vers l'arc électrique. Cette transition est accompagnée par une forte augmentation de courant circulant dans la décharge et d'une hausse température de gaz. Par conséquent le plasma généré est

proche de l'équilibre thermodynamique et la puissance injectée dans le gaz est majoritairement dissipée par effet de Joule.

Dans la majorité des applications électrostatiques en utilisant des décharges couronnes [18], on cherche à éviter le passage à l'arc pour ne pas détériorer les électrodes et pour optimiser les processus de formation d'espèces actives en fonction de l'énergie injectée. La **figure I.4**, issue de la référence [19] montre les différentes phases des décharges couronnes positive et négative en partant des premières avalanches primaires jusqu'au « spark » (étincelle ou claquage).

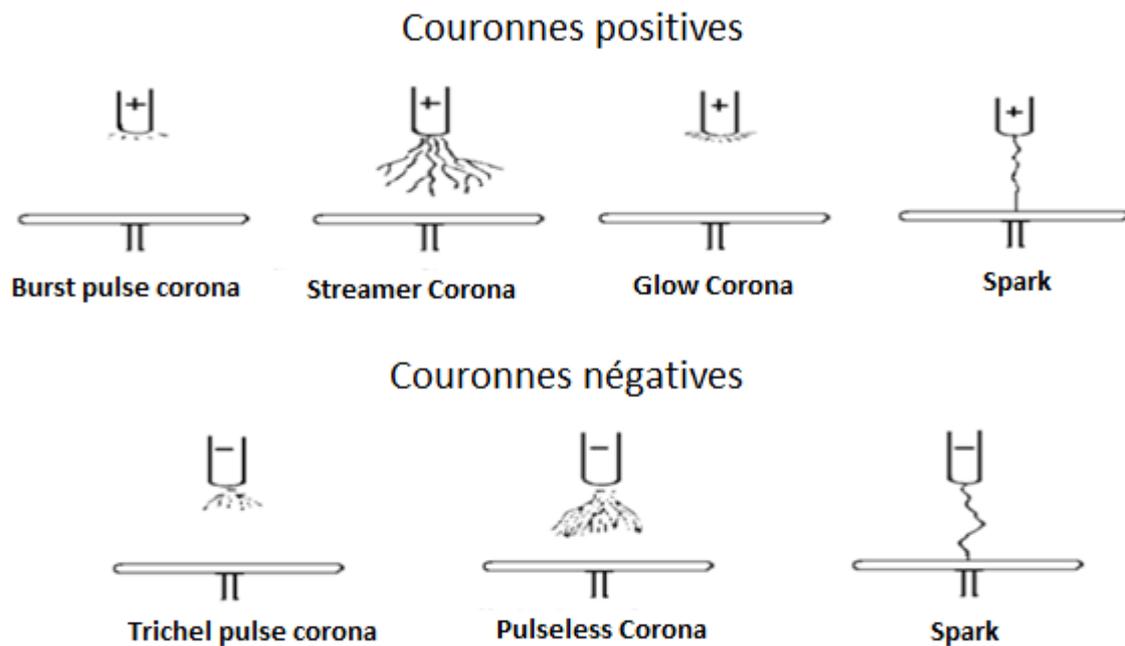


Figure I.4: Schéma de différents types de décharges [19]

On observe dans la plupart des configurations, trois principaux modes de décharge à l'électrode active. Il est à remarquer qu'au début du phénomène, dans certaines configurations d'électrodes de couronne positive, on peut observer des impulsions plus faibles que les impulsions au seuil, appelées en anglais "corona burst". Ces impulsions proviennent des effluves latéraux dont la lueur forme une couche mince très proche de l'électrode active.

I.6.1 Mécanisme de la décharge couronne

Les décharges couronnes se situent dans le régime III de la **figure I.1**. La décharge est classiquement établie entre une électrode active et une électrode passive (électrode reliée à la terre). L'électrode active est une pointe (ou un fil de petit diamètre) à laquelle on applique un

haut potentiel électrique tandis que l'électrode passive est une plaque ou une grille (**figure I.5**). On obtient alors une décharge couronne volumique. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. En l'absence de charge d'espace, Hartmann [20] a établi une expression du champ électrique E en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie x :

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \cdot \ln\left(\frac{2d+r}{r}\right)} \quad (\text{I.6})$$

Avec : V le potentiel, d la distance inter-électrodes, r le rayon de courbure de la pointe et x l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine $x = 0$.

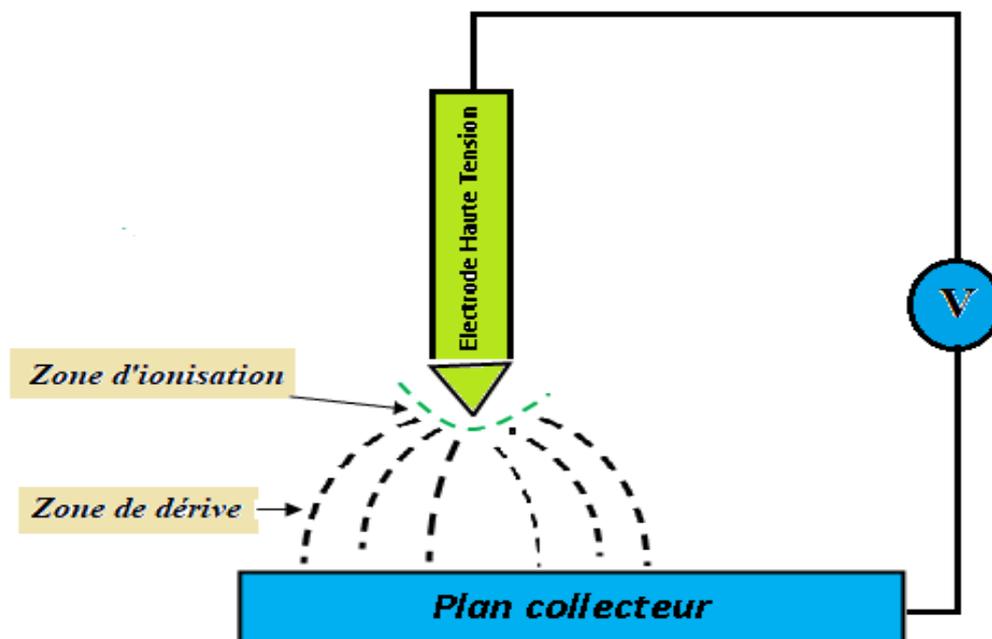


Figure I.5 : Topographie de la décharge couronne volumique en configuration pointe-plan

Dans une configuration fil-plan, Lacoste et al. [21] ont utilisé :

$$E(x) = E_i \frac{r}{x} \quad (\text{I.7})$$

Avec E_i le champ électrique à la surface du fil que l'on peut déterminer par la formule empirique de Peek.

I.6.2 Décharge couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand le fil est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone du champ intense autour du fil, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l’anode (le fil). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone pointillées de la **figure I.7**. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l’anode, sous l’effet des forces de Coulomb, jusqu’à une distance de fil (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ($< 30 \text{ kV/cm}$ dans l’air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d’ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers le plan mis à la terre. Cette zone unipolaire, puisqu’il n’y a que des ions positifs [21], est appelée région de « dérive » (**figure I.6**)

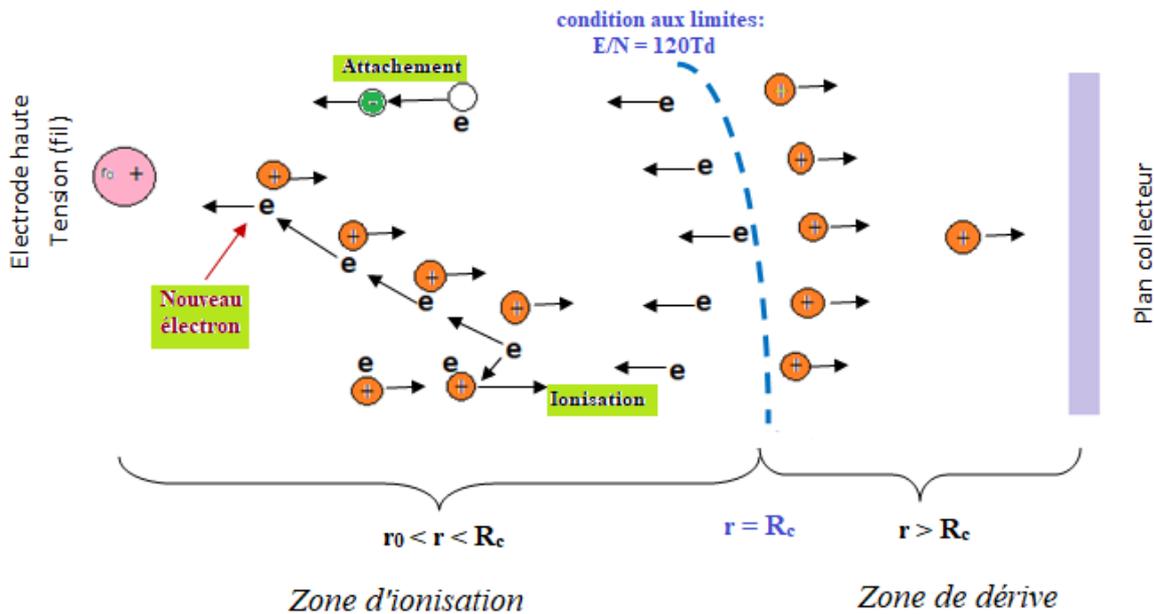


Figure I.6 : Schématisation d'une décharge couronne continue positive

I.6.3 Décharge couronne négative

Dans le cas où le fil est porté à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour du fil. Goldman et Sigmond [22], expliquent que les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (**figure I.7**). Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers l'électrode plane mise à la terre. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc.

Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée [23]. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode.

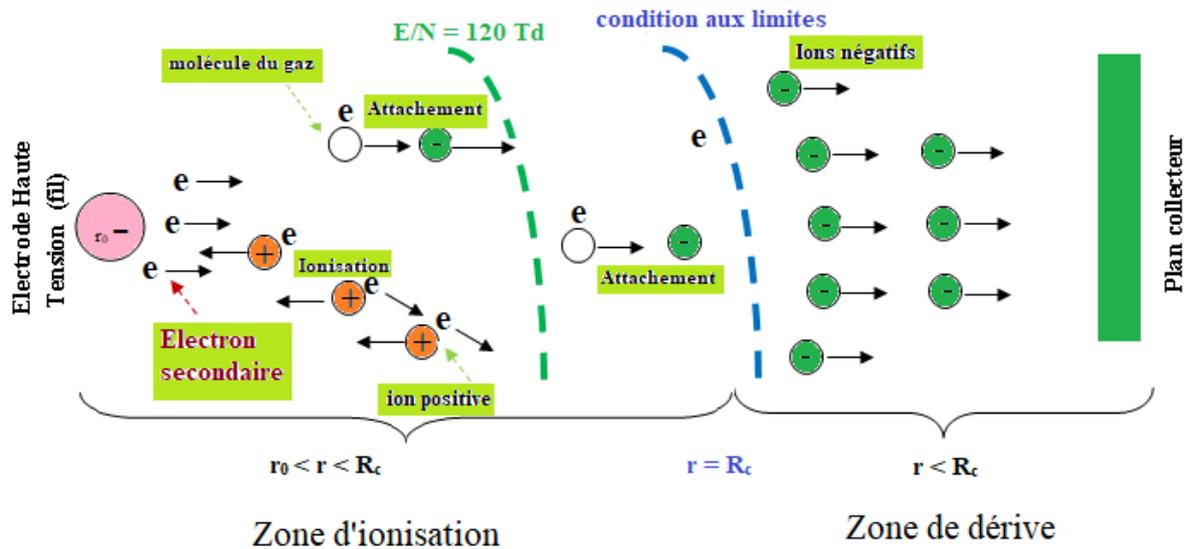


Figure I.7: Schématisation d'une décharge couronne continue négative

I.6.3.1 Apparence lumineuse

Un courant de particules négatives part de l'électrode active (pointe) vers l'électrode passive, il atteint 1 à 100 μA . On obtient (avec une pointe) une zone lumineuse en forme de champignon qui a la couleur bleue violacée dans l'air [24]. Cette couleur est due au spectre de l'azote et des composants oxygénés. Dans le cas d'un fil, celui-ci est bordé de petits champignons. Une gaine sera formée autour du fil quand on augmente la tension.

I.7 Le vent ionique

Le vent électrique résulte d'un transfert de quantité de mouvement entre les particules chargées et les particules neutres du gaz, les particules chargées étant mises en mouvement par les forces de Coulomb (champ électrique). Cette définition fournie par Faraday en 1838, complète celle donnée par Tiberius Cavallo en 1777. Dans le cas d'une décharge Pointe-Plan, c'est le mouvement du gaz induit par les collisions ions-molécules dans la région proche de la pointe. Ce vent se propage en cône de la pointe au plan quelle que soit la polarité de la

décharge. Le phénomène est particulièrement spectaculaire d'un point de vue visuel, lorsque le plan est un lit d'azote liquide contenu dans un récipient ouvert [25].

En 1961, Robinson [26] a établi pour la première fois la relation liant la vitesse du vent électrique au courant moyen de décharge, dans des champs électriques unidimensionnels. Son expression est :

$$v = A \cdot \sqrt{\frac{I}{\rho_g \cdot \mu}} \quad (\text{I.8})$$

Avec :

v : vitesse du vent en $m.s^{-1}$;

I : courant moyen de décharge ;

A : constante dépendant principalement de la géométrie des électrodes ;

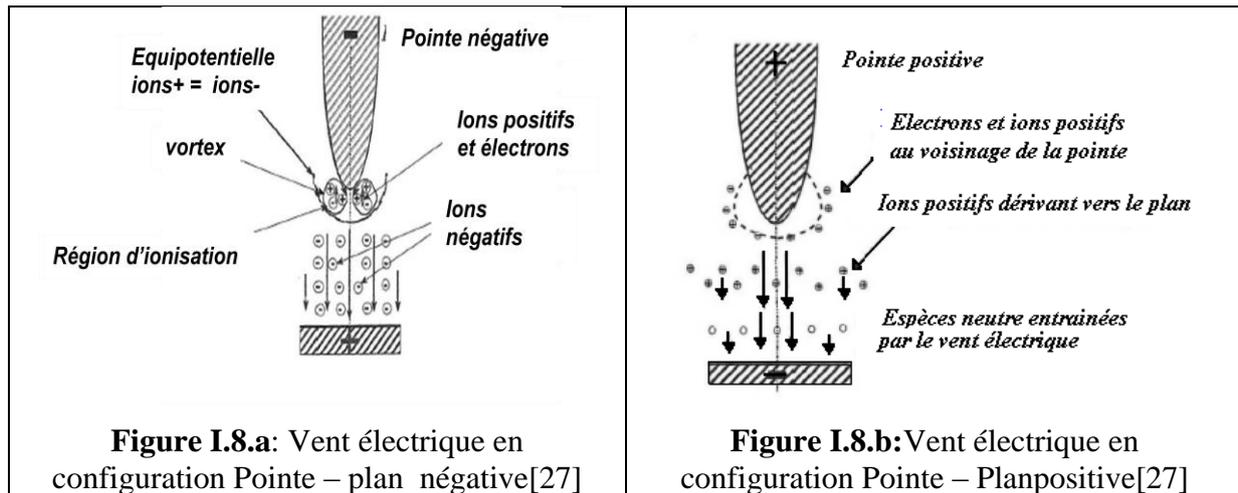
ρ_g : masse volumique du gaz ;

μ : mobilité moyenne des ions.

Cette expression montre que la vitesse du vent électrique varie avec la racine carrée du courant moyen de décharge. Il est par ailleurs important de différencier la vitesse v du gaz, donnée par cette relation expérimentale, de la vitesse v_i des ions contenus dans le gaz, qui s'exprime : $v_i = \mu \cdot E$ (E est le champ électrique). En effet, la vitesse du vent électrique dans l'air est de l'ordre de quelques m/s (sans écoulement extérieur), tandis que la vitesse des ions, elle peut varier de plusieurs milliers de m/s dans la zone d'ionisation à quelques dizaines de m/s dans la zone de dérive.

Dans une décharge couronne de type pointe-plan, les mécanismes sont similaires quelque soit la polarité (positif ou négatif). Les particules chargées portent une charge de même signe que la polarité de l'électrode active (la pointe).

Lorsqu'il s'agit d'une décharge positive (**figure I.8.b**), les ions positifs dominent en nombre. Dans cette décharge, les mouvements des électrons et des ions négatifs vers la pointe restent limités à la zone d'une épaisseur, de l'ordre du dixième du mm, directement en contact avec la pointe. Les ions négatifs qui quittent le plan perdent leurs électrons excédentaires dans la zone proche du plan et deviennent des espèces neutres renvoyées vers le plan par le vent électrique. Dans le cas de la décharge négative (**figure I.8.a**), le mouvement des électrons est englobé dans celui des ions négatifs majoritaires qui vont de la pointe vers le plan. Les ions positifs minoritaires induisent un mouvement qui reste localisé à la zone proche de la pointe, ceux qui sont au-delà de cette zone sont très minoritaires par rapport aux ions négatifs et le trajet global va toujours de la pointe vers le plan.



I.8 Les facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne, on distingue trois facteurs essentiels :

- Facteurs géométriques.
- Facteurs physique (physico-chimiques)
- Facteurs électriques

I.8.1 Facteurs géométriques

a) Rayon de courbure

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne [28].

b) Distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est 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 [29].

I.8.2 Facteurs physiques (physico-chimiques)

a) 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 [30]. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit «p.d».

b) 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 tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photoionisation. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [31]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge.

c) Pression

L'influence de la pression sur le courant de décharge fourni par la source d'ions est très marquée. Dans le domaine 0,1-1 bar, [32] a trouvé que l'effet de la pression sur le seuil est équivalent à celui de la distance inter-électrodes. D'après la loi de Paschen, plus la pression augmente, plus le nombre de particules dans l'espace inter-électrode n'augmente et les libres parcours moyens des particules chargées diminuent. Par conséquent, l'ionisation de l'air est réduite. Le seuil d'apparition de la décharge couronne augmente avec la pression, par contre la mobilité des porteurs de charges diminue.

I.8.3 Facteur électrique :

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.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les phénomènes liés aux décharges électriques. L'étude de ces décharges dans des intervalles d'air présente un intérêt de vue technologique. Cette étude des mécanismes de la décharge électrique a montré que le phénomène était d'une très grande complexité. Malgré les grandes avancées effectuées dans les applications,

beaucoup de processus physiques fondamentaux sont toujours sujets à des investigations. Les mécanismes de développement de l'avalanche électronique et de propagation des décharges ont été décrits. Les électrons accélérés par le champ électrique entrent en collision avec les molécules neutres présentes dans l'espace inter-électrodes et conduisent à l'excitation et à l'ionisation du gaz. Nous pouvons considérer que ces mécanismes, qui ont surtout été décrits dans la littérature pour des configurations pointe-plan, peuvent être étendus à la géométrie lame-plan que nous avons adoptée.

La décharge couronne est une décharge non homogène, générée à pression atmosphérique dans un système d'électrodes fortement dissymétriques. En effet, lors de la décharge, l'électrode de faible rayon de courbure soumise à une haute tension est le siège d'un fort champ électrique, qui constitue le facteur clé dans l'ionisation des espèces neutres présentes dans le gaz. Les phénomènes d'ionisation et d'attachement se sont révélés être d'intérêt particulier car étant les principaux phénomènes contrôlant la décharge. Donc l'étude des phénomènes physiques fondamentaux de la décharge couronne nous permet de définir les paramètres essentiels influençant la décharge tel que l'air environnant le conducteur, le diamètre de conducteur, la tension appliquée, la distance entre les électrodes, ... etc.

Le chapitre suivant, est consacré à la l'étude bibliographique sur les précipitateurs électrostatiques d'aérosols en général.

Chapitre II

Précipitateurs électrostatiques d'aérosols

II.1 Introduction

Le premier appareil expérimental utilisant ces phénomènes est issu des travaux de Hohlfeld [1]. Il a montré qu'une étincelle électrique pouvait dissiper la fumée contenue dans une bouteille. En 1850, Guitard 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. Le premier filtre électrostatique est né et depuis, de nombreux travaux sont consacrés aux électrofiltres.

Un précipitateur électrostatique (PES), ou assainisseur d'air électrostatique est un dispositif de collecte des particules qui ont été éliminé d'un gaz écoulant (tels que l'air) à l'aide de la force d'une charge électrostatique induite; Ceux sont des dispositifs de filtration très efficace que minimalement font obstacle à l'écoulement des gaz par l'intermédiaire de l'appareil et peuvent facilement enlever les particules fines, comme la poussière et la fumée provenant du flux d'air.

Le système possède deux électrodes, isolées l'une de l'autre et portées à des potentiels différents. Quand un gaz chargé d'aérosols traverse l'espace inter électrodes, en se chargeant en électricité ces aérosols se lancent vers les plaques de collectes.

Nous allons présenter dans ce chapitre 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.

II.2 Particules en suspension dans l'air et techniques de traitement

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, selon l'article sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie [2], 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. La pollution résulte de la présence dans l'atmosphère de polluants très variés qu'on peut rassembler selon deux typologies. La plus simple, physique, consiste à distinguer les polluants gazeux des polluants solides, poussières et

particules. La seconde s'appuie sur l'origine des polluants et oppose les polluants primaires et les polluants secondaires.

Les polluants secondaires sont des substances dont la présence dans l'atmosphère résulte de transformations chimiques liées à la présence de composés dits précurseurs. C'est le cas par exemple de l'acide sulfurique, de l'acide nitrique et surtout de l'ozone atmosphérique. Les aérosols font partie des polluants primaires, qu'on définit comme étant des substances présentes dans l'atmosphère telles qu'elles ont été émises. La taille des particules est le paramètre le plus important pour caractériser le comportement des aérosols. Il existe presque toutes les formes et tailles de particules suivant leur nature et selon qu'elles proviennent d'agrégats de matière solide ou liquide en suspension dans l'air [3] (**figure II.1**).

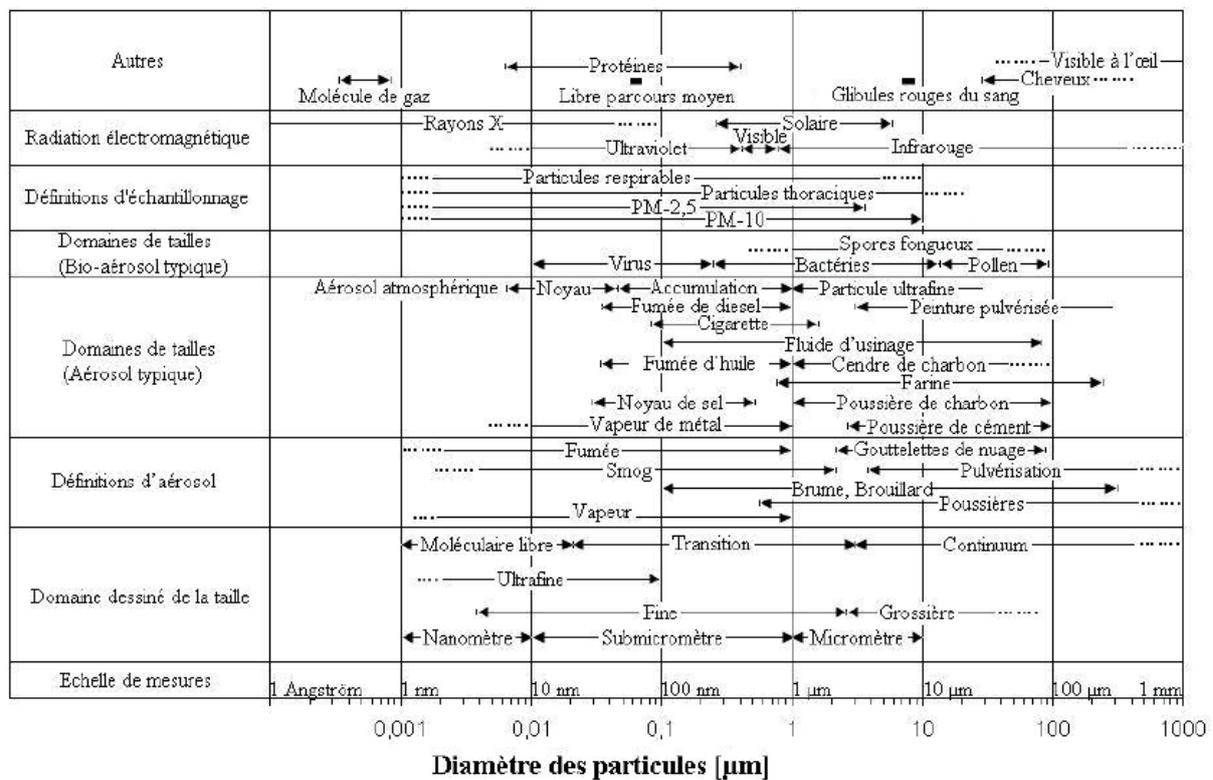


Figure II.1 : Classification des aérosols par domaine et par taille [4]

On distingue ainsi classiquement deux types des particules : les PM₁₀ (Particulate Matter) qui sont celles dont le diamètre moyen n'excède pas 10 µm et qui proviennent principalement des véhicules (en particulier de ceux équipés d'un moteur diesel) et les PM₂₅ dont le diamètre moyen est inférieur à 25 µm et qui sont majoritairement émises par des sources fixes.

Les particules les plus petites, de diamètre inférieur à 10 μm , sont «respirables». Elles sont aussi les plus légères et peuvent rester en suspension plus longtemps. Elles proviennent de transformations gaz-solide dans l'atmosphère et notamment de phénomènes de condensation et de coagulation et sont susceptibles de pénétrer le plus profondément dans l'appareil broncho-pulmonaire. Les particules les plus grosses, de diamètre inférieur à 25 μm , sont «non respirables». Elles sont principalement produites par des phénomènes de frottement. On trouve également parmi elles des particules biologiques telles que les pollens. D'un point de vue sanitaire, les particules méritent une attention particulière.

En effet, elles sont susceptibles de servir de vecteurs à d'autres substances, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) cancérigènes, ce qui est particulièrement préoccupant compte tenu de la capacité des particules les plus fines à se déposer dans les alvéoles pulmonaires, voire à pénétrer dans le sang.

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 :

- ❖ Les séparateurs mécaniques
- ❖ Les séparateurs hydrauliques
- ❖ Les séparateurs à couche filtrante
- ❖ Les séparateurs électriques ou électrofiltres

II.3 Précipitateurs électrostatiques (PES)

II.3.1 Description des précipitateurs électrostatiques

Ils sont composés de six éléments principaux :

- ❖ Une source de haute tension ;
- ❖ Des électrodes de décharge et électrodes de collecte ;
- ❖ Entrée et sortie pour le gaz ;

- ❖ récipient pour l'élimination des substances collectées ;
- ❖ Un système électronique de nettoyage ;
- ❖ Un boîtier extérieur pour enfermer les électrodes (carcasse du précipitateur).

Les gaz peuvent être ou non prétraités avant d'entrer dans le précipitateur. Le prétraitement peut consister en l'enlèvement de grosses particules par des procédés mécaniques ou en additionnant des produits chimiques au gaz pour changer les propriétés physiques du gaz dans le but d'améliorer l'action du précipitateur.

Le système de collecte comprend des surfaces de collecte où les fines particules se déposent. De plus, un dispositif de grattage ou de vibration des surfaces de collecte est installé de telle manière que les particules déposées puissent être enlevées.

Le système haut tension englobe l'électrode de décharge et les isolateurs. L'isolation électrique est nécessaire pour des raisons de sécurité.

Le récipient fait partie intégrante de la carcasse du précipitateur, sa fonction est de collecter la matière précipitée pour l'élimination finale.

Les précipitateurs électrostatiques nécessitent une source de courant continu à haute tension obtenu à partir d'un transformateur via un redresseur.

II.3.2 Principes de la précipitation électrostatique d'aérosols

Le principe de fonctionnement d'un électrofiltre peut être décomposé en trois phases :

- ❖ l'ionisation de l'air par effet couronne ;
- ❖ la charge des particules par interaction avec les ions créés, puis leur précipitation sous l'action du champ inter électrodes vers les électrodes collectrices ;
- ❖ le nettoyage des surfaces de collecte.

Le précipitateur 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 en électricité.

Afin d'expliquer le principe de fonctionnement d'un précipitateur électrostatique d'aérosols (ou électrofiltre), prenons l'exemple de celui de forme cylindrique utilisé dans l'industrie. 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). Cette dernière est reliée à la haute tension continue, tandis que l'électrode de collecte est reliée à la masse comme l'indique la **figure II.2**.

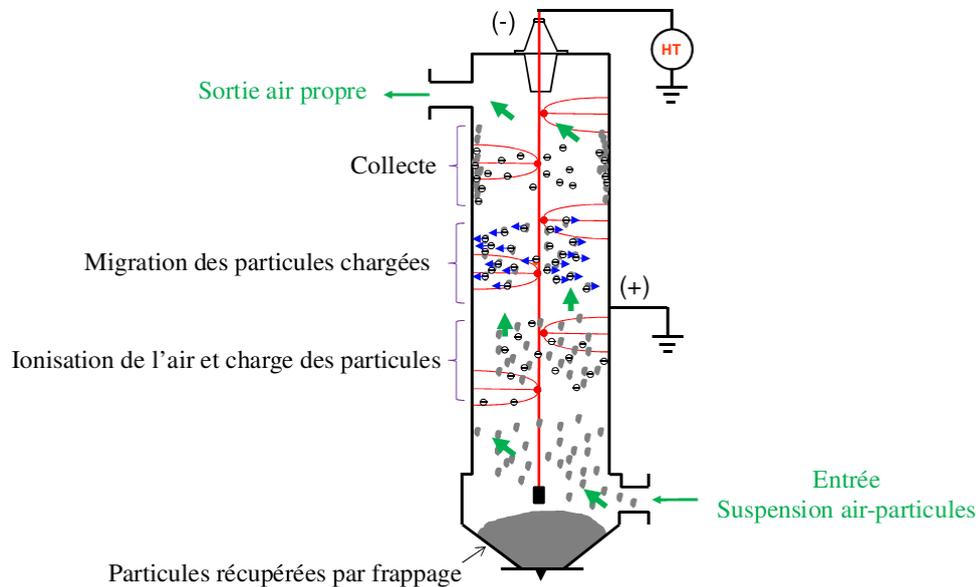


Figure II.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique[5]

Lorsqu'on applique une tension au-delà de la tension seuil d'apparition de la décharge couronne, une zone lumineuse apparaît soit sous forme de points lumineux localisés le long du fil soit forme d'une gaine lumineuse autour du fil. 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 dirige vers la surface interne de l'électrofiltre où elles se déposent.

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.

Afin d'obtenir des tensions élevés sans création d'arcs électriques lors du dimensionnement d'un électrofiltre, de nombreux paramètres sont pris en considération :

- ❖ la résistivité, la granulométrie, la nature et la concentration des poussières ;
- ❖ la vitesse, la température et la composition de l'effluent gazeux ;
- ❖ la tension appliquée aux fils.

A partir de ces principes simples de fonctionnement, plusieurs types d'électrofiltres ont vu le jour.

II.4 Forces à l'origine de la migration des particules chargées

Dans la nature, les particules peuvent être soumises à diverses forces : les forces de volume (Force de flottabilité, force électrique, force magnétique, par exemple) et les forces de surface (force diélectrophorétique, force de traînée, par exemple). Dans cette rubrique, nous n'évoquerons que les deux forces électriques mises en jeu, à savoir, la force de Coulomb et la force diélectrophorétique.

II.4.1 Force de Coulomb

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est 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, de laquelle la formule est :

$$\vec{F}_e = q_p \cdot \vec{E} \quad (\text{II.1})$$

La formule (II.1) est l'équation de base de la force électrostatique agissant sur les particules en suspension dans les précipitateurs électrostatiques.

II.4.2 Force diélectrophorétique (DEP) :

De nombreux travaux ont été effectués sur la force diélectrophorétique agissant sur des particules allant des poussières aux cellules biologiques. Cette force s'exerce sur une particule non chargée dans un gradient de champ électrique. Elle est proportionnelle au volume de la particule (d_p^3) et au gradient du champ électrique qui lui est appliqué (∇E^2) [6]. Pour une sphère diélectrique de diamètre d_p , l'expression est :

$$F_{DEP} = \frac{\pi}{4} \varepsilon_m d_p^3 K (\nabla E^2) \quad (\text{II.2})$$

La constante K est définie par :

$$K = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_m}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_m} \text{ (II.3)}$$

Où ε_s et ε_m sont les permittivités respectives de la sphère diélectrique et du milieu.

II.5 Mécanisme de charge des particules

Nous présentons dans cette section la phénoménologie de la charge des particules dans un champ électrique affecté par une charge d'espace ionique. Les mécanismes de charge sont expliqués et on présente, d'une manière critique, les modèles théoriques de charge les plus souvent utilisés dans l'étude de la précipitation électrostatique.

Précédemment, nous avons dit que la force de Coulomb qui s'exerce principalement sur les particules chargées, est la principale cause de mise en mouvement des particules dans les filtres électrostatiques. Une augmentation de la charge des particules est donc nécessaire afin de produire leur migration vers les électrodes collectrices du précipitateur. Cela peut être provoqué par une forte densité d'ions due à une décharge couronne dans l'espace inter-électrodes.

Ce mécanisme de décharge sera décrit par la suite. Le processus de charge dépend alors de plusieurs facteurs parmi lesquels les plus importants sont la densité de charge ionique, l'intensité du champ électrique local, ainsi que la taille des particules [7]. De nombreuses études ont montré que le procédé de charge peut être principalement attribué à deux mécanismes. Ces deux mécanismes peuvent agir séparément ou de façon combinée, on parle alors de charge mixte. Au total, on distingue [8] :

1. La charge par champ;
2. La charge par diffusion;
3. La charge mixte.

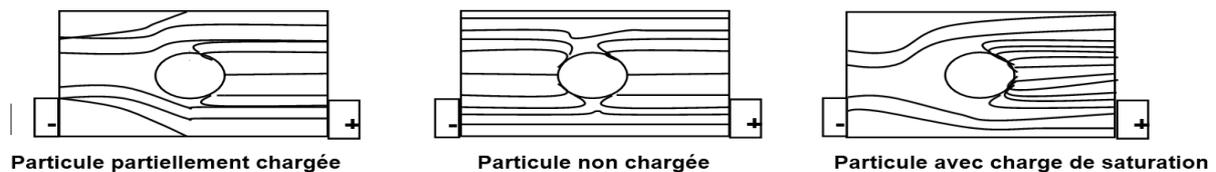
Quel que soit le mécanisme, la charge électrique acquise par une particule est le résultat des interactions entre celle-ci et les ions résultant de la décharge couronne. Les deux mécanismes de charge interviennent ensemble et leur importance relative est déterminée principalement par les dimensions des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

II.5.1 La charge par champ

Comme l'indique son nom, 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. 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. 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. 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. 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(II.3)**)



FigureII. 3: Lignes de champ en direction de la surface d'une particule isolante soumise à un champ électrique uniforme [8]

II.5.2 La charge par diffusion

La charge par diffusion est due à l'énergie cinétique des ions qui bombardent la particule indépendamment du champ électrique. Ce processus de charge par diffusion a été imaginé pour expliquer la charge des particules lorsque le champ électrique appliqué est faible (ou 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 [9]. Ce mécanisme met en jeu 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.

II.5.3 La charge mixte

Les deux mécanismes opèrent simultanément pour les particules dont la taille est comprise entre 0,5 et 1 μm . 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. Des travaux [10] ont été réalisés sur la charge mixte, en particulier par Lawlesset altmanqui ont modifié des modèles préexistants et ont abouti à des relations assez simples qui prennent en compte les interactions des deux mécanismes de charge.

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.

II.6 Les type des électrofiltres :

II.6.1 - 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 II.4**). Ils n'occasionnent que de faibles pertes de charge (50 – 100 Pa) et sont donc recommandés pour traiter les grands débits gazeux (80 000 m^3/h par exemple). Le rendement d'épuration peut atteindre 99 % pour des particules fines de l'ordre du micromètre [11]. 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 Wh/m^3 traité [9].

Les électrofiltres secs comportent les éléments suivants : un caisson, des électrodes émissives (fil ou grille) et collectrices (plaque), 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 et une alimentation haute tension (de 30 à 120 kV pour un courant de 20 à 600 mA).

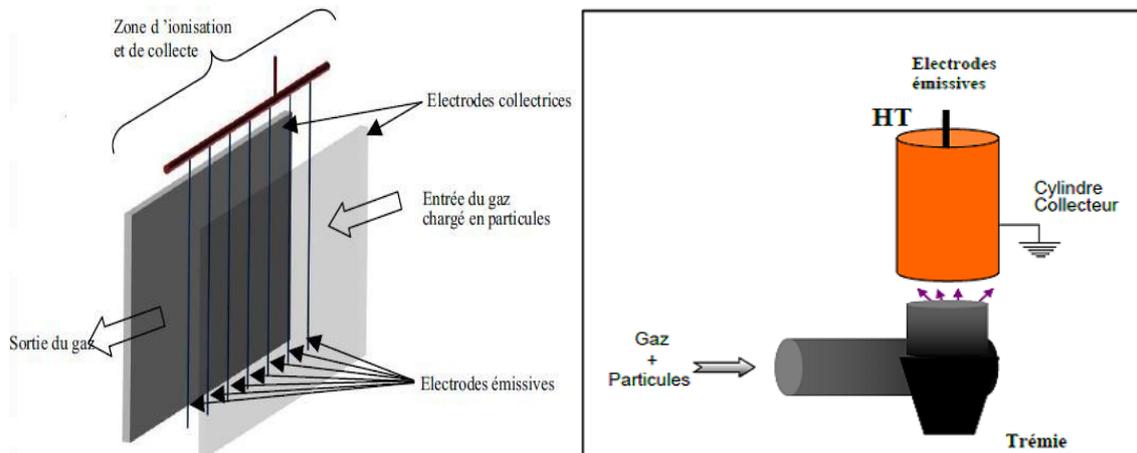


Figure II.4: Electrofiltre à un seul étage

A: fil-plaque à gauche [12]

B : fil-cylindre à droite[13]

II.6.2 Les électrofiltres à deux étages :

Ces électrofiltres séparent les aspects charge et collecte des particules (**figure II.5**). 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.

Le système de frappe des poussières ne peut être utilisé pour cette architecture, car il provoquerait le ré-entrainement 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.

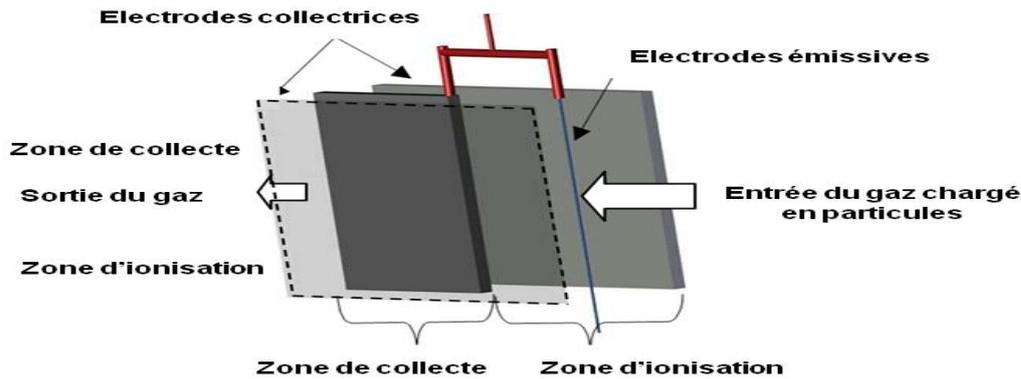


Figure II.5 : Electrofiltre à deux étages fil-plaque [12]

II.6.3 Les électrofiltres humides :

Le principe de base (figure II.5) est identique à celui des électrofiltres secs. La différence provient de la présence d'un film humide ruisselant sur l'électrode collectrice.

L'effluent à traiter est saturé en vapeur d'eau qui permet, par l'intermédiaire de la condensation d'augmenter la taille des particules [14].

Ce procédé autorise une efficacité de collection moins sensible aux caractéristiques électriques de la particule et permet l'épuration d'effluents chargés en particules, difficilement réalisable avec un électrofiltre sec. Cette procédure limite l'effet de contre-émission pour les particules dont la résistivité est trop forte ainsi que le phénomène de réentraînement pour celles dont la résistivité est trop faible.

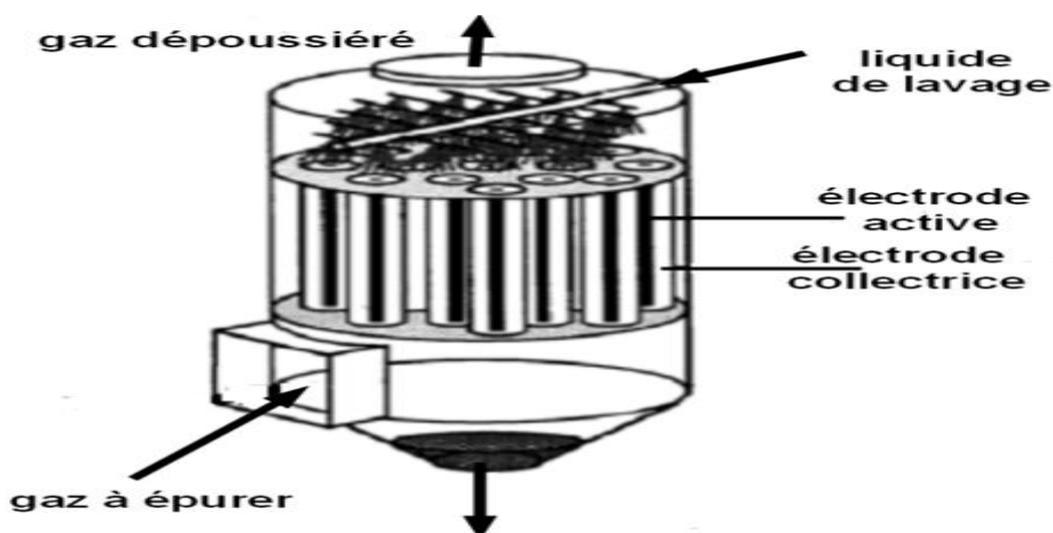


Figure II.6 : Electrofiltre humide [15]

II.7 Phénomènes détériorant l'efficacité de collecte

La performance initiale des électrofiltres peut, le plus souvent, décroître à cause de divers phénomènes apparaissant au cours du processus de filtration. Par conséquent, ces facteurs doivent être pris en compte lors de la conception et du fonctionnement d'un électrofiltre afin de pouvoir faire face à d'éventuels problèmes [16].

II.7.1 Effet de la résistivité apparente sur les performances de l'électrofiltre

L'efficacité de collecte d'un électrofiltre dépend de la résistivité apparente ρ_p des particules traitées. La mesure ρ_p est donc importante pour une bonne estimation de l'efficacité de collecte. La résistivité des particules dépend elle-même de la température du gaz porteur, de son taux d'humidité et de sa composition. La présence de SO_3 par exemple, diminue la résistivité [17].

L'effet de ρ_p sur l'efficacité de collecte est montré sur la (**figure II.7**) On y voit également les évolutions du courant et de la tension. Pour les valeurs de ρ_p comprises entre 10^2 et $5 \times 10^8 \Omega\text{cm}$, un électrofiltre de type sec est dans les conditions optimales de fonctionnement [18]. Le phénomène de réentraînement des particules, à l'origine des faibles valeurs de rendement, survient lorsque $\rho_p < 10^2 \Omega\text{cm}$, tandis que le "back corona" conduit à une chute de l'efficacité de collecte lorsque $\rho_p \geq 5 \times 10^8 \Omega\text{cm}$.

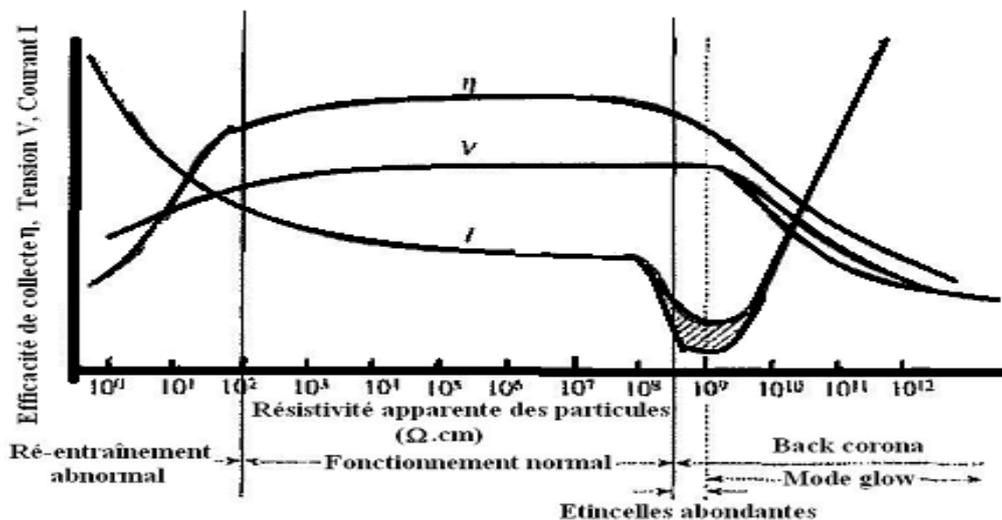


Figure II.7 : Effet de la résistivité apparente sur l'efficacité de collecte [18]

II.7.2 Le réentraînement des particules

Le phénomène de réentraînement des particules consiste à la réintroduction des particules collectées dans l'espace inter-électrodes [19]. Dans un électrofiltre en fonctionnement normal, le réentraînement de particules survient pendant l'opération de frappe de l'électrode de collecte ou du fait de la vitesse élevée du gaz près de celle-ci. Lorsque la résistivité des particules devient inférieure à $10^2 \Omega\text{cm}$, l'adhésion est faible et une importante contre-émission se produit.

Par conséquent, l'efficacité de collecte diminue. La (**figure II.8**) illustre le phénomène. En effet, les particules conductrices perdent leurs charges lorsqu'elles sont collectées, puis elles acquièrent des charges de signe opposé par induction. Ces particules sont alors ramenées dans l'espace inter-électrodes par la force due au champ électrique et sont à nouveau chargées par la décharge couronne. Elles font ainsi des sauts à la surface de l'électrode de collecte et parviennent à sortir de l'électrofiltre sans être captées. Le réentraînement peut être supprimé par les mesures suivantes [17] :

- l'injection d'agents adhésifs tels que l'ammoniaque, le sulfate d'ammonium ou les brunes 2d'huile ;
- l'utilisation de filtre de type humide ;
- le nettoyage périodique de l'électrode de collecte par frappe ou brossage [20].

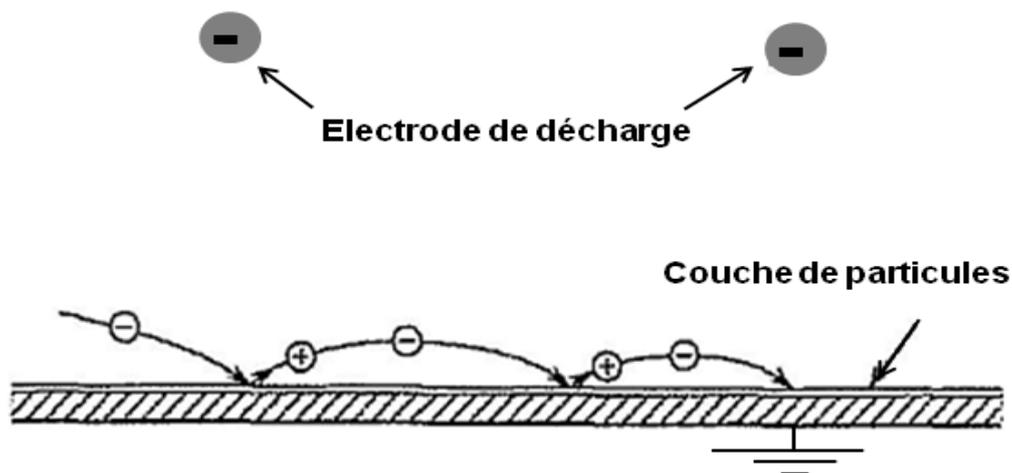


Figure II.8 : Illustration du phénomène de réentraînement anormal des particules [21]

II.7.3 Le back corona

Le dépôt de particules sur l'électrode de collecte se comporte comme une couche diélectrique lorsque sa résistivité ρ_p dépasse une valeur seuil comparable à la valeur de la

résistivité du gaz dans l'espace inter-électrodes. La tension à travers la couche de particules devient alors assez élevée pour causer localement des claquages, aux endroits les plus vulnérables de la couche. Les points de claquage émettent des ions de signe opposé vers l'électrode de décharge, ce qui dégrade l'efficacité de collecte. C'est ce phénomène qui est appelé back corona. C'est l'un des plus complexes au sein des électrofiltres [22]. Le back corona survient lorsque $\rho_p \geq 5 \times 10^8 \Omega \text{cm}$. A l'intérieur de la couche de particules déposées sur l'électrode de collecte, un champ électrique E_p s'établit à cause du courant de décharge. Son expression est [23] :

$$E_p = \rho_p \times J_p \leq E_{pd} \quad (\text{II.4})$$

Où J_p est la densité du courant de décharge (A/m^2), E_{pd} le champ disruptif de la couche de particule (V/m).

II.7.4 La vitesse de migration des particules

En présence du champ électrique, les particules chargées présentes à l'intérieur d'un électrofiltre subissent une force proportionnelle à la charge électrique ; c'est la force de coulomb. La présence de cette force à comme résultat un mouvement des particules vers les plaques collectrices, ce processus appelé migration des particules. Dans un premier temps, nous nous proposons de caractériser ce processus de migration, dans le cas simple correspondant aux hypothèses suivantes[13] :

- Les particules sont sphériques, solides et indéformable ; il n'y a aucune interaction entre elles ;
- L'écoulement du gaz laminaire et plan, donc la composante de vitesse de gaz dans la direction perpendiculaire aux plaques est nul ;
- La répartition spatiale du champ électrique à l'intérieur du filtre est uniforme ;

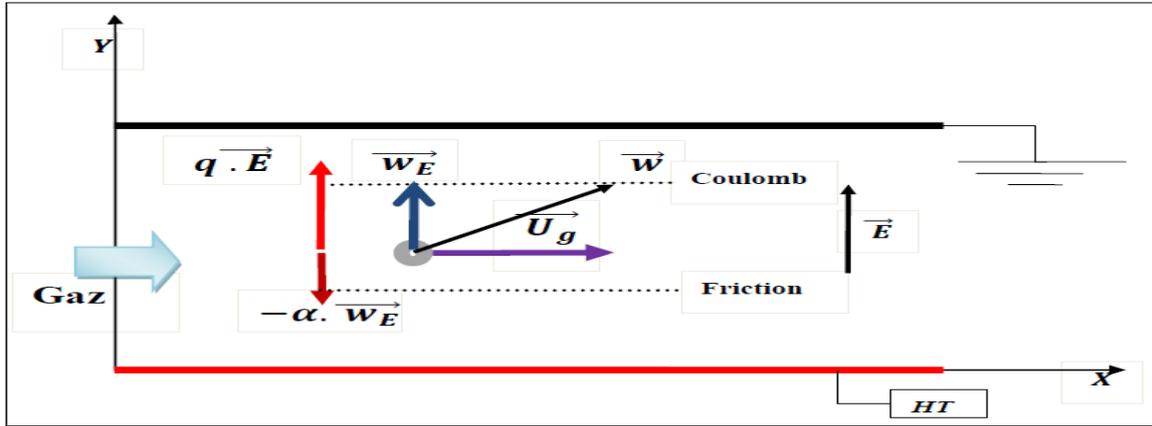


Figure II.9: Schémas explicatif pour le mouvement d'une particule chargée et les forces qui agissent sur elle entre deux plaques parallèles.[13]

Soit une particule de diamètre d_p de charge électrique q_p et de vitesse w , se trouvant dans un écoulement de gaz de vitesse \mathbf{U}_g , soumise à un champ électrique supposé uniforme et constant \vec{E} (**Figure II.9**). Le déplacement de celle-ci à l'intérieur du précipitateurs est donné par la relation d'équilibre mécanique :

$$m_p \cdot \frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_f \quad (\text{II.5})$$

Ou :

m_p :La masse de la particule ;

\vec{F}_e : La force électrique donnée par la relation $\vec{F}_e = q_p \cdot \vec{E}$

\vec{F}_f : La force de trainée donnée par la relation $\vec{F}_f = \frac{3\pi\eta_s d_p}{cu} \cdot w_E$

En remplaçant dans la relation (II.5) l'expression de chaque force, la migration de la particule vers l'électrode de collecte suivant l'axe (OY) est caractérisé par la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dw_E}{dt} + \frac{3\pi\eta_s d_p}{m_p cu} \cdot w_E - \frac{q_p}{m_p} \cdot E = 0 \quad (\text{II. 6})$$

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 II.7 donne l'évolution suivante au cours du temps

$$w_E(t) = w_{th} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right) \quad (II.7)$$

Où

τ_p : Le temps de relaxation de la particule considérée

w_{th} : vitesse théorique de migration et a pour l'expression : $w_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3\pi\eta_g d_p} \cdot cu$

En utilisant les résultats de la **figure II.10** sur la charge électrique des particules, on peut évaluer les valeurs de la vitesse théorique (**figure II.11**).

La variation de la vitesse w_{th} en fonction du diamètre des particules passe par une valeur minimale pour $d_p \cong 0,25\mu m$. 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 $0,1\mu m$ et $1\mu m$, il en est de même en ce qui concerne l'efficacité de collecte.

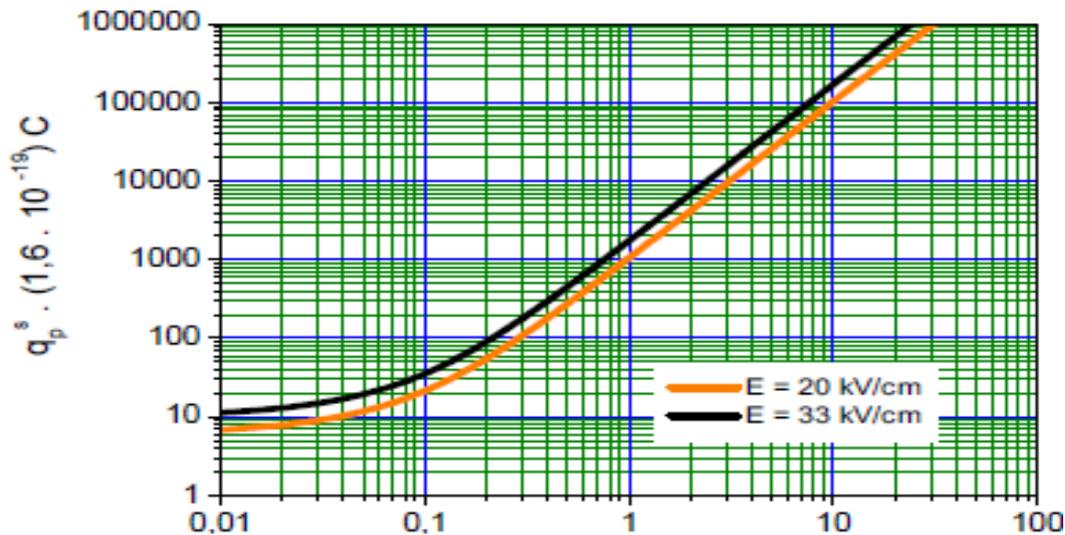


Figure II.10 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de Cochet en fonction du diamètre des particules ($\lambda_g = 0,065\mu m$ et $\epsilon_r \rightarrow \infty$ cas des particules conductrices)[13]

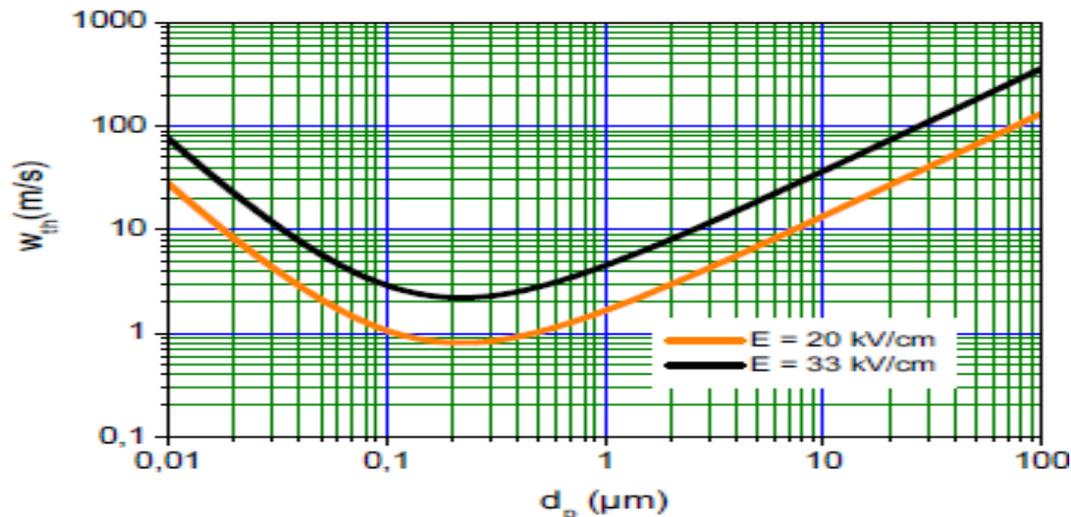


Figure II.11 : Variations de la vitesse de migration théorique en fonction de la taille des particules (libre parcours moyen des molécules du gaz $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$ et la viscosité dynamique du gaz $\eta_g = 1,85 \times 10^{-5} \text{kg/ms}$) [13]

II.7.5 Influence de la taille des particules

Comme montre la **figure II.11**, la vitesse de migration des particules w_{th} devient minimale pour les tailles de particules comprise entre 0,1 et 1 μm , entraînant la diminution de la collecte des particules situées dans cette gamme de tailles. Par ailleurs, les grosses particules de taille supérieure à 10 μm sont faciles à collecter mais, elles semblent les plus vulnérables au réentraînement lors des opérations de frappe [16].

II.8 Rendement

Généralement, le rendement de collecte du précipitateur électrostatique est haut, approchant les 100 %. Plusieurs installations ont des rendements de 98 % et de 99 %. Quelques matières se chargent plus facilement que d'autres et sont ainsi plus appropriés pour l'élimination par précipitation électrostatique. Pour les brumes d'acide et les unités de récupération catalyses, les rendements dépassent souvent 99 %; pour le carbone noir, le rendement normal de collecte est inférieur à 35 %, à cause de sa tendance de s'agglomérer. Cependant, par une combinaison adéquate d'un précipitateur électrostatique avec un collecteur cyclonique, on peut obtenir de hauts rendements pour cette matière.

II.9 Avantages et inconvénients des précipitateurs électrostatiques

- ❖ Haut rendement de collecte ;

- ❖ Les particules aussi petites que $0,1 \mu\text{m}$ peut être éliminées ;
- ❖ Faible coûts de maintenance et de fonctionnement ;
- ❖ Faible chute de pression (0,25 à 1,25 cm d'eau) ;
- ❖ Manipulation satisfaisante d'un large volume de gaz à haute température ;
- ❖ Le temps de traitement est négligeable (0,1 – 10 s) ;
- ❖ Nettoyage facile en mettant hors service certaines unités du précipiteur ;
- ❖ Aucune restriction en ce qui concerne l'utilisation de produits chimiques solides, liquides ou corrosifs.
- ❖ Hauts coûts d'installation ;
- ❖ Haut besoin en espace, dû aux dimensions larges de l'équipement ;
- ❖ Risque d'explosions pendant la collecte de gaz combustibles ou de fines particules ;
- ❖ Pendant l'exploitation, des mesures de sécurité sont nécessaires. La distribution appropriée du flux de gaz, la résistivité du gaz, la conductivité de fines particules, et le taux d'ignition du corona doivent être maintenus avec soin ;
- ❖ Pendant l'ionisation du gaz, de l'ozone (gaz toxique) est produite par les électrodes de décharge à charge négative.

II.10 Applications des précipitateurs industriels

Les applications importantes des précipitateurs électrostatiques dans les industries sont énumérées ci-dessous :

1. Cimenteries

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

2. Moulins à pulpe et à papier

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

3. Aciéries

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

4. Industrie de métaux non ferreux

- Récupération des matières valorisables des gaz d'échappement ;
- Collecte de la brume acide ;

5. Industrie chimique

- Collecte des brumes d'acides sulfurique et phosphorique ;

- Nettoyage de divers types de gaz, tels que l'hydrogène, le CO₂ et le SO₂ ;
- Elimination des fines particules du phosphore élémentaire en état vapeur ;
- 6. Industrie pétrolière - Récupération des fines particules des catalyseurs ;
- 7. Industrie du carbone noir - Agglomération et collecte du carbone noir ;
- 8. Centrales électriques - Collecte des cendres volantes des chaudières chauffées à la houille.

II.11 Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique

Lorsqu'il s'agit de choisir un système de précipitation électrostatique pour éliminer la pollution en suspension dans un courant gazeux, il est important de tenir compte des éléments suivants :

- ❖ Caractéristiques des particules :
 - Dimension, forme réelles et densité des particules ;
 - Propriétés physico-chimiques : adhésivité, hygroscopie, tendance à l'agglomération, fluidité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicité, etc.
- ❖ Caractéristiques du gaz porteur :
 - Température, pression et humidité ;
 - Propriétés physique : densité, point de rosée des composés condensables, viscosité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicités, etc.
- ❖ Caractéristique du procédé :
 - Flux de gaz constant ou variable ;
 - Débit volumique gazeux ;
 - Concentration des particules ;
 - Rendement de captation exigé ;
 - Perte de charge permise ;
 - Qualité exigée pour les produits.
- ❖ Caractéristique de fonctionnement :
 - Entretien et continuité du fonctionnement ;
 - Sécurité et protection sanitaire ;
 - Utilisation finale des substances recueillies.

I.12 conclusion

Les précipitateurs électrostatiques continuent à être d'excellents dispositifs pour la commande de beaucoup d'émissions particulaires industrielles, et tout ce phénomène est basé sur l'action du champ électrique sur les charges ou les particules chargées. La force électrique agit directement sur les particules chargées à retenir ; donc ces forces sont des forces séparatrices. Ce phénomène de précipitation électrostatique se retrouve largement dans les filtres électrostatiques (appelés également dépoussiéreurs électrostatiques). La charge des particules résulte d'un phénomène appelé « l'effet couronne » qui apparaît lorsque nous appliquons une différence de potentiel entre deux conducteurs aux configurations géométriques appropriées (lame-plandans notre étude).

Chapitre III

*Description du modèle
expérimental*

III.1 Introduction

Les travaux présentés dans ce chapitre ont été réalisés au sein du Laboratoire Haute Tension de l'université A. Mira de Bejaia en collaboration avec le Hall de Technologie.

Ce travail consiste à faire une étude expérimentale sur la migration des aérosols et son comportement sur la décharge couronne dans le précipitateur électrostatique de configuration lame-plan. Nous devons effectuer des mesures des paramètres liés à ce dernier : courant de décharge, tension appliquée, tension de seuil, et les différents matériaux utilisés pour la fumée. Il faudrait mettre en évidence l'influence des paramètres physiques sur cette décharge.

III.2 Dispositif Expérimental

L'ensemble du dispositif expérimental pour la géométrie lame-plan réalisé est représenté sur la **figure III.1**. Le système d'électrodes et les éléments mis sous haute tension sont isolés par une grille séparatrice (cage de Faraday) (9) du manipulateur et des autres appareils de mesure basse tension. L'électrode active (1), tendue à une hauteur h par des supports isolants en plexiglas (2), est reliée à l'installation haute tension continue V_a . Cette installation haute tension est composée principalement d'un générateur de basse tension, puis à l'aide d'un transformateur élévateur et d'un circuit redresseur, on génère une haute tension continue qui sera de l'ordre de kilovolts (kV). Pour mesurer le courant de décharge, un pico-ampèremètre et micro-ampèremètre (μA) est connecté au plan (E) de mesure.

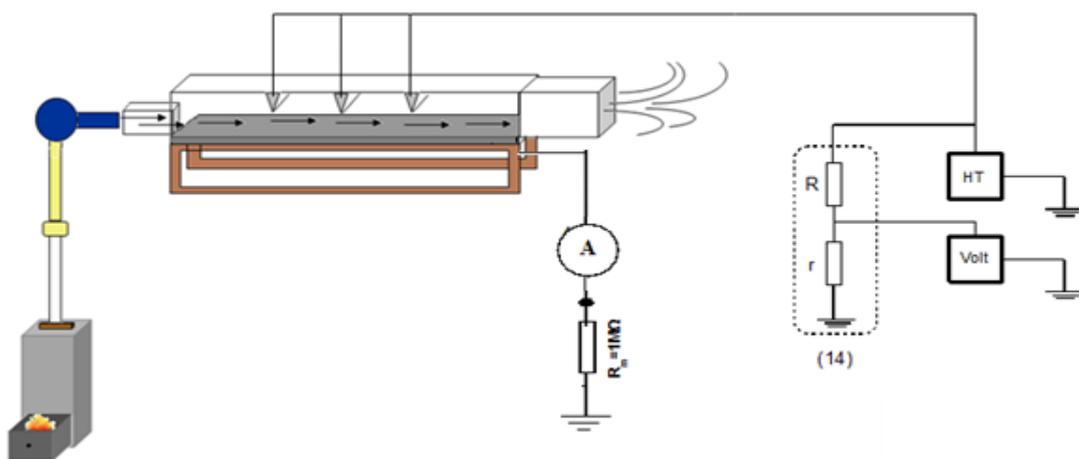


Figure III.1 : Dispositif expérimental

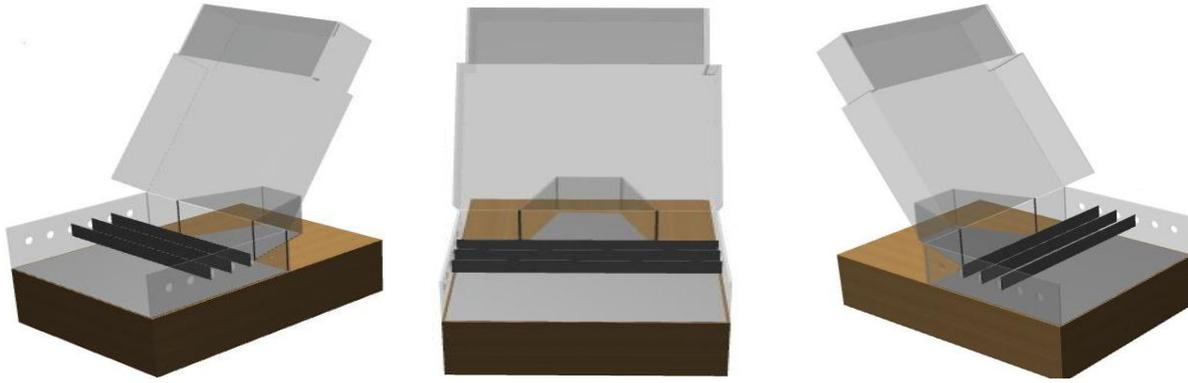


Figure III.2: Vue de dispositif

III.3 Système d'électrodes

Le système d'électrodes utilisé dans notre étude est celui de la géométrie lame-plan. Il est composé de deux électrodes principales. L'une constitue la lame qui est l'électrode active (1) à faible rayon de courbure et l'autre est plane qui représente le plan de mesure (E). Et d'un ensemble de surfaces côtières qui représentent les plans de garde (G) qui sont mis à la terre (figure III.3). L'électrode active (une lame) (1) en aluminium de 400 mm de longueur, et un rayon de courbure très fine (figure III.4), qu'est fixé aux extrémités des supports en plexiglas (2) à une hauteur h du plan de mesure. L'une des électrodes (lame) est portée au potentiel V_a . Les plans de mesure (G) entourent la plaque de polarisation (E) formant avec celle-ci des intervalles d'air très réduits pour assurer la continuité de la distribution du champ. Cette dernière étant fixe, la mesure du champ en différents points du plan se fait par le déplacement des électrodes actives (lames).

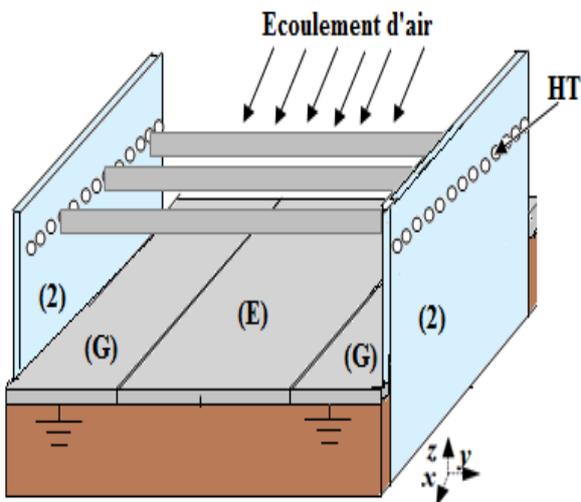


Figure III.3 : système d'électrode

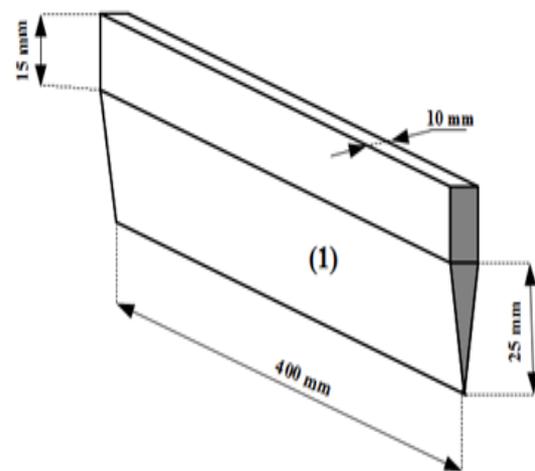


Figure III.4 : configuration de l'électrode haute tension [1]

III.4 Source de haute tension

Afin de mesurer les paramètres de la décharge couronne en configuration lame-plan, nous avons besoin d'une source de tension continue de polarité positive ou négative. Pour cela, nous avons utilisé une installation haute tension présente au laboratoire de haute tension de l'université Abderahmane Mira de Bejaia, qui délivre des tensions variant de **0 à ± 140 kV**, continue ou alternative, de polarité positive ou négative, (**figure III.6,III.7**). Cette installation est composée :

- D'une source basse tension SG1 ;
- D'un transformateur de haute tension T100, alimenté par la source SG1 ;
- D'une diode à haute tension G270 au silicium ;
- D'un condensateur de lissage C10 ;
- D'une résistance d'amortissement pour protéger la diode des surintensités.



Figure III.5 : Equipements de l'installation haute tension utilisés

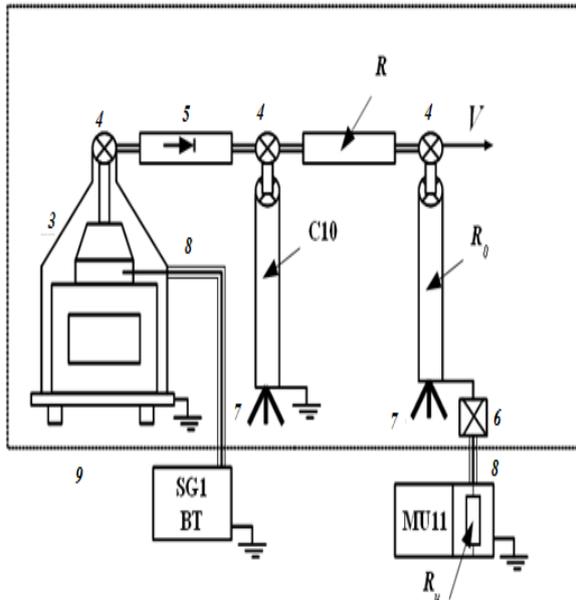


Figure III.6 : Schéma de la source de haute tension



Figure III.7 : Installation de haute tension du laboratoire de Bejaia

3 Transformateur haute tension (T100). **4** Nœuds de liaison. **5** Diode haute tension (G270). **6** Boîte de connexion. **7** Support d'éléments. **8** Câble coaxial. **SG1** Alimentation basse tension. **MU11** Voltmètre de crête. **C10** Condensateur de lissage. **R** Résistance d'amortissement. **R₀** Résistance haute tension. **R_u** Résistance basse tension. **9** Grille de protection.

L'enroulement primaire du transformateur élévateur **T100** (3) utilisé dans cette installation est alimenté par une source basse tension variable (**SG1**) via un câble. Nous avons associé à ce transformateur un redresseur mono-alternance afin d'obtenir une haute tension continue.

Ce redresseur est constitué d'une diode haute tension (5) à base de silicium pouvant supporter une tension de **270kV** et d'un condensateur de lissage **C10** de capacité de **10nF**. Une résistance d'amortissement **R** de **106 kΩ** relie le condensateur au système d'électrodes. Son rôle est d'amortir le courant, protégeant ainsi la diode des surintensités.

La tension alternative d'origine est générée par amplificateur d'une basse tension variable appliquée au primaire d'un transformateur élévateur dont le secondaire est relié à la diode.

Pour la mesure de la haute tension continue **V_a**, nous disposons d'un diviseur de tension résistif composé d'une résistance haute tension **R₀** de **250MΩ** et d'une résistance

basse tension **R_u** de **501 kΩ** incorporée dans le voltmètre de crête **MU11**. Ces deux résistances sont reliées par un câble coaxial (8) blindé.

Le précipitateur électrostatique d'aérosols de type lame-plan est réalisé au laboratoire de haute tension à l'université A/Mira de Bejaia, où la pression **p**, la température **T** et l'humidité relative **Hr** sont systématiquement relevées.

III.5 méthode de mesure

III.5.1 Mesure de la tension appliquée aux électrodes actives

La mesure de la tension **V_a** aux électrodes actives s'effectue à l'aide du voltmètre de crête **MU11** du diviseur résistif décrit précédemment. Ce dernier est composé d'une résistance haute tension **R₀** de 250 MΩ et d'une résistance basse tension **R_u** de valeur 501 kΩ à laquelle il faut associer en parallèle la résistance du voltmètre de crête MU11 de valeur **R_e** = 4.24 MΩ. Le voltmètre de crête (MU11) mesure la tension **U** aux bornes de la résistance basse tension **R_u** et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée **V_a** = **k.U**, où **k** est le rapport du diviseur.

$$k = \left(\frac{R_0 + (R_e // R_u)}{R_e // R_u} \right) = \frac{R_0 R_e + R_0 R_u + R_u R_e}{R_u R_e} = 555.96$$

III.5.2 Détermination de la tension seuil

La tension de seuil **V₀** de l'effet couronne est obtenue en traçant la caractéristique courant-tension. On peut aussi déterminer le seuil de la décharge par la méthode théorique, en traçant la caractéristique **I/V=f(V)** [2,3], qu'est tirée de la formule de Townsend dite (loi de Townsend) est généralement utilisée [4,5].

III.5.3 Mesure du courant de décharge au plan collecteur

Pour mesurer le courant de décharge (**I**), le plan (**E**) est relié au micro-ampèremètre à l'aide d'un câble de connexion. La précision des mesures dépend au premier lieu de la bonne connexion du matériel, puis de la position de la lame par rapport au plan et du courant de fuite causé par l'accumulation de poussière entre ce dernier et l'électrode active. Avant toute mesure de courant, on fait d'abord nettoyer le plan de la poussière suivie du réglage de la position de la lame filetée par rapport au plan de polarisation.

III.5.4 Mesure de la caractéristique courant-tension

Pour réaliser la caractéristique I-V, nous avons mené la tâche en prélevant les valeurs de la tension appliquée, indiquées dans les appareils numériques, et celles du courant mesurer, au même temps où la décharge se manifeste et évolue. Quant à la variation de la tension d'application V , on a élevé progressivement cette tension d'une valeur V_1 à une valeur V_2 telle que $V_1 < V_0 < V_2$, où V_0 est la tension de début de la décharge couronne et V_2 largement inférieure à la tension de claquage V_c .

L'acquisition d'un grand nombre de caractéristiques et la facilité du traitement mathématique des données feront preuve d'une fiabilité des résultats.

III.5.5 Mesure la vitesse d'écoulement de l'air

Nous avons utilisé un ventilateur pour écouler de l'air à l'intérieur du PES perpendiculairement au sens de la transition des charges électriques. La variation de la vitesse d'écoulement se fait par variation de la tension d'alimentation du ventilateur.

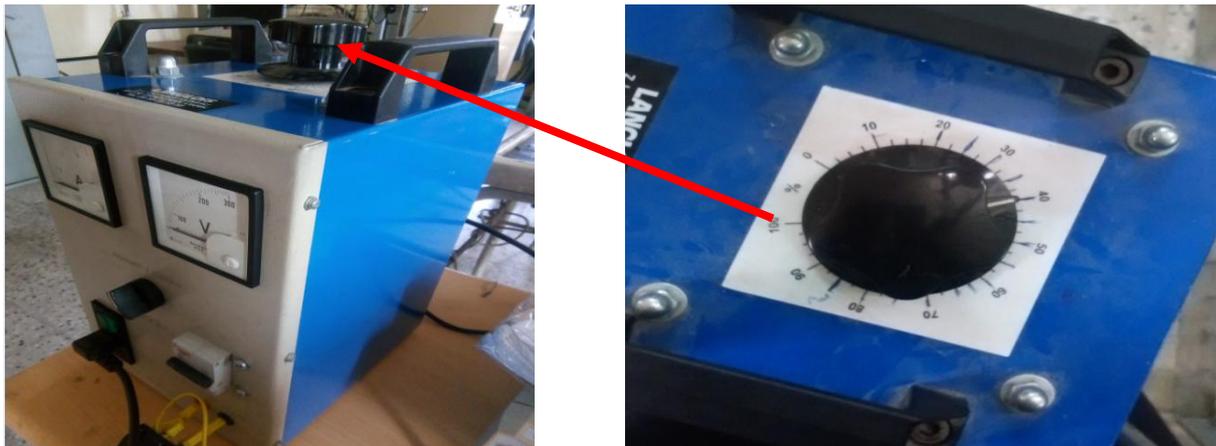


Figure III.8 : Source d'alimentation



Figure III.9 : Ventilateur

Les tensions d'alimentations du variateur de vitesse de ventilateur sont présentées dans le tableau suivant :

Écoulement	10%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%
Tension(V)	25.88	51.76	64.7	77.64	90.58	103.52	116.47	129.41	142.35

60%	65%	70%	75%	80%	85%
155.29	168.23	181.17	194.11	207.05	220

Tableau III.1: La tension d'alimentation du variateur de vitesse

III.5.6 Mesure des paramètres physiques de l'air

Durant l'étude expérimentale, nous avons effectué les mesures de la pression, à l'aide d'un baromètre à mercure de la température, à l'aide d'un thermomètre à mercure (**figure III.10**), et de l'humidité, à l'aide d'un hygromètre à cheveux (**figure III.11**). Les relevés de ces trois paramètres ont été effectués avant chaque essai.



Figure III.10 : Un baromètre à mercure



Figure III.11 : Un hygromètre à cheveux

III.5.7 Résultat expérimentaux

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

1. La tension appliqué V_a ;
2. Le courant I collecté par le micro-ampèremètre ;

3. La vitesse d'écoulement de l'air à travers le PES ;
4. Les paramètres physiques de l'air (la pression, la température et l'humidité).

III.6 les matériaux utilisés

III.6.1 matériaux utilisés pour la fumée



Figure III.12 : Déchets du bois

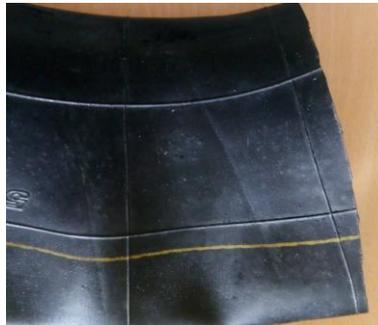


Figure III.13: Chambre à air



Figure III.14 : Flanc de pneu (Apex)

III.6.2 Détecteur multigaz (IBRID MX6)

Le MX6 IBRID est bien plus qu'un concentré des meilleures technologies d'Industrial Scientific. C'est le premier détecteur de gaz muni d'un écran LCD couleur, il détecte des taux dangereux d'oxygène, de gaz combustibles et toxiques, et de composés organiques volatiles (COV) comme jamais auparavant (**figure III.15**)[6].



Figure III.15: Détecteur multigaz (IBRID MX6)

III.6.3 Les habiles de protection utilisés

Un gant est un élément de protection, un élément d'hygiène recouvrant la main (**figure III.16**).

La blouse est un vêtement qui se porte par-dessus les autres pour les protéger. Elle couvre les épaules, le dos et le torse mais ne descend pas plus bas que le genou pour une commodité de mouvement (**figure III.17**).

Un masque à gaz, ou masque anti-gaz, Il se porte sur le visage et couvre les entrées des voies respiratoires (bouche, nez), et il les protège (**figure III.18**).



Figure III.16 : Gant



Figure III.17 : La blouse



Figure III.18 : Masque anti-gaz

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé le dispositif expérimental, ainsi qu'on a présenté son principe de fonctionnement, et nous avons présenté la méthode de mesure des différents paramètres essentiels qui caractérisent la décharge couronne.

Dans le chapitre qui suit, nous allons élaborer à l'interprétation de l'étude expérimentale de la décharge couronne dans le précipitateur électrostatique en lame filetée-plan. Nous avons réalisé nos essais au laboratoire de haute tension de Bejaia, où nous y avons exploité les sources et appareils utiles pour nos mesures. Les divers résultats obtenus et leurs discussions feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Resultats et discussion

IV.1 Introduction

Plusieurs travaux ont été destinés pour l'étude des propriétés de la décharge couronne à la surface des plans mis à la terre pour différentes géométries des PES. Mais un grand nombre des études négligent les effets de l'écoulement d'air, les conditions atmosphérique, le nombre de lames et la migration des particules. Pour notre cas, nous essayons de tenir compte de toutes ces conditions.

Le but de notre étude expérimentale est de distinguer l'influence de la migration des particules fines sur les paramètres de la décharge tels que les caractéristiques courant-tension, la mobilité des porteurs de charges.

IV.2 Caractérisation de la décharge couronne dans un PES à vide

IV.2.1 Effet de la distance inter-électrode sur la décharge couronne

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 [1], [2]. 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-électrode.

La **figure IV.1** montre les allures des caractéristiques courant/tension pour les deux polarités. Le courant augmente graduellement avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse une certaine valeur (V_0) et ce jusqu'au claquage du milieu gazeux V_c . Le courant continu qui traverse l'espace inter-électrode est une fonction non linéaire de la tension appliquée. Bien que les décharges recouvrent des phénomènes complexes, une relation empirique classique simple dite loi courant-tension de Townsend est généralement utilisée. En 1914, Townsend [3,4] a tiré une formule pour la caractérisation courant-tension et la stabilité de phénomène dans un système fil-cylindre, plus tard il a été empiriquement constaté que la relation Townsend pourrait également être utilisée pour les géométries fil-plan et pointe-plan, comme Henson publie [5] cette formule est donnée :

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

Ou bien :

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

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.

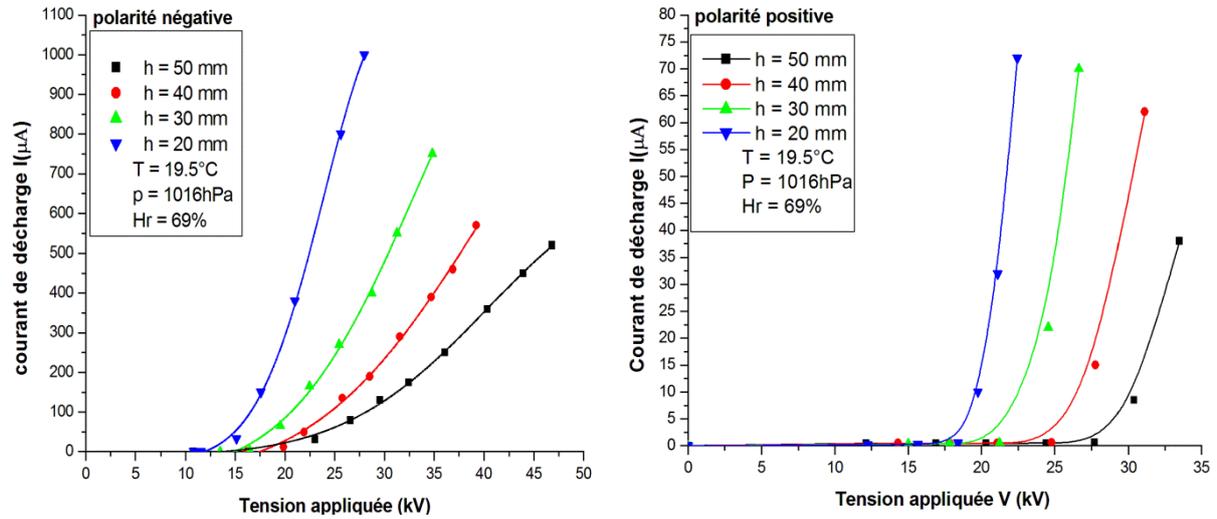


Figure IV.1 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance Inter-électrode pour les deux polarités

Il apparait clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour des 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-électrode.

La caractéristique $I = f(V)$ à une forme quadratique et elle confirme la loi de Townsend, la tension seuil V_0 augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. On peut obtenir des informations plus claires si nous traçant les courbes $I/V = f(V)$ équation (IV.2).

Pour une électrode active négative, comme 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, c'est pour ça dans la majorité des cas, on utilise la décharge couronne négative ce qui nous amène à faire une comparaison entre la décharge couronne négative et la décharge couronne positive. Sur la **figure IV.1**, on peut identifier aussi l'effet de la polarité sur la courbe $I = f(V)$.

La tension nécessaire pour maintenir le même courant de décharge est plus élevée avec une polarité positive et la tension seuil en polarité négative est supérieure à celle de la polarité positive.

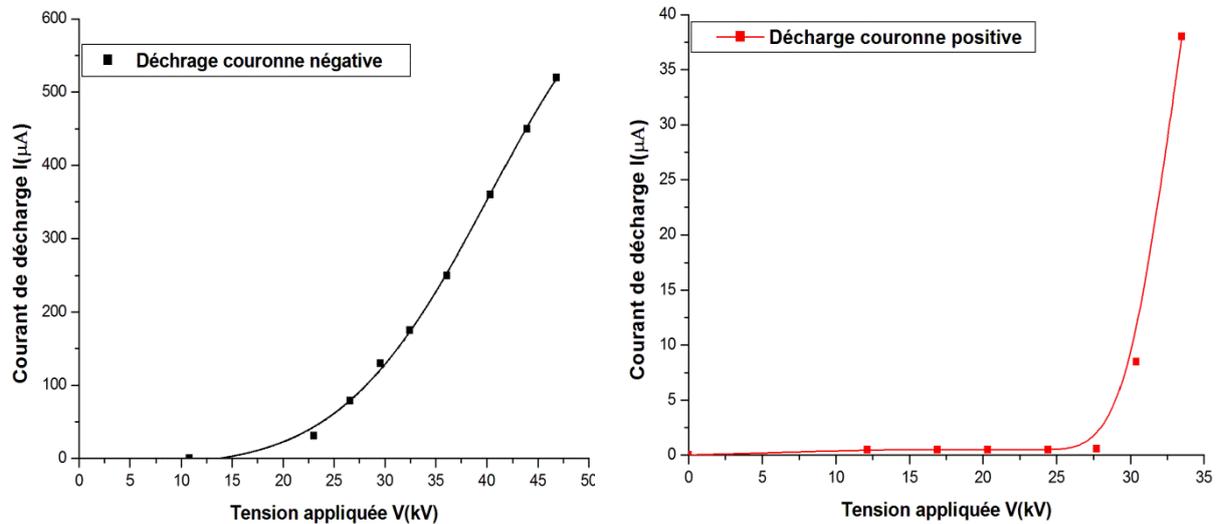


Figure IV.2 : Caractéristiques courant – tension en fonction de la distance inter-électrode pour les deux polarités

Il apparait clairement que le courant de décharge est plus important lors de la polarité négative sur la lame par exemple pour une tension appliquée constante $V = 30$ kV, le courant de décharge $I = 140\mu\text{A}$ pour la polarité négative, et $I = 10\mu\text{A}$ pour la polarité positive. Pour obtenir une efficacité de dépolluage optimale, il faut que la concentration d'ions dans le gaz soit maximale, c'est-à-dire que le courant est maximal, sans claquage électrique. Par conséquent, la tension de fonctionnement est prise légèrement inférieure à la tension de claquage de quelques kV. Ceci est la source des problèmes de perte d'efficacité du PES dans la majorité des applications utilisant des décharges couronnes, on cherche à éviter le passage de l'arc pour ne pas détériorer les électrodes et les appareils de mesures.

A 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 IV.3** montre que la tension de claquage pour les deux polarités est identique pour des distances inter-électrodes très faibles. À partir de la distance inter-électrode $h = 40$ mm les deux courbes s'éloignent pour atteindre une tension de claquage $V_c = 85.5$ kV à une distance inter-électrode $h = 50$ mm en polarité négative, et avec la même distance on atteint une tension de claquage $V_c = 53$ kV en polarité positive. Cette tension est plus élevée dans une décharge négative ce qui nous favorise à travailler avec cette dernière.

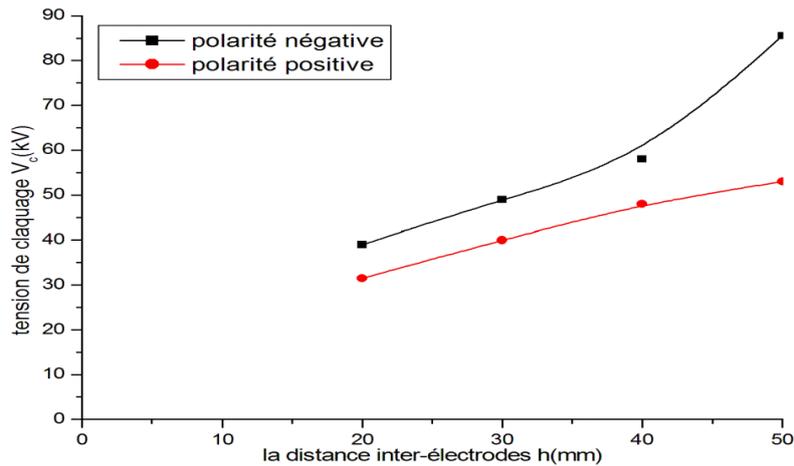


Figure IV.3 : Tension de claquage en fonction de la distance inter-électrode pour les deux polarités

IV.2.2 Facteur géométrique K en fonction de la distance inter-électrode

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, le paramètre K peut être déterminé par les pentes des droites représentées sur la figure IV.4.

Pour se faire, on a d'abord déterminé les valeurs des tensions seuil V_0 en traçant la courbe $I/V=f(V)$. Alors, pour une quelconque distance inter-électrode on obtient une linéarité de point représentant le rapport cité, et par ajustement de cette droite, on remarquera que celle-ci coupe l'axe des x en un point, dont ce dernier représente la tension seuil V_0 qui correspond à la distance inter-électrodes étudiée.

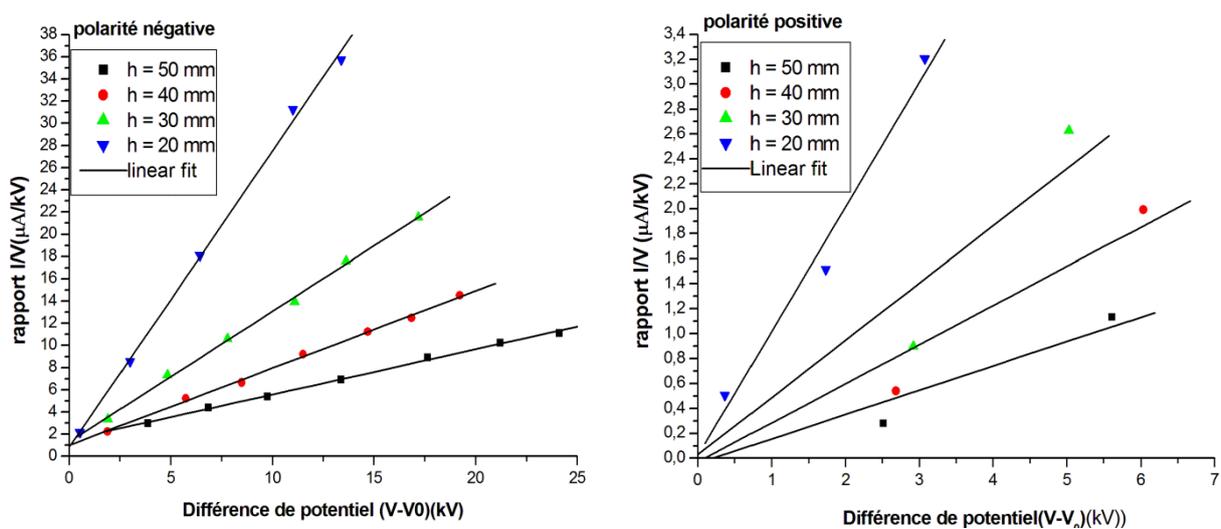


Figure IV.4 : Dépendance du rapport courant/ tension (I/V) Avec la différence de tension ($V-V_0$) pour les deux polarités

La constante géométrique K est proportionnelle à la mobilité apparente des porteurs de charge, cependant, nous avons toujours trouvé dans la littérature une petite différence entre les mobilités ($\mu+$) et ($\mu-$) inférieur ou égale à 10%. Il est à noter que les valeurs de k pour la décharge couronne négative sont plus élevées que celles de la couronne positive pour les même distance inter-électrode, voir le **tableau IV.1**. Le rapport $(K-/K+) = (\mu-/μ+)>1$ confirme donc que la mobilité des porteurs de charge négative est toujours supérieure à celle des porteurs de charge positive dans la région de dérive sont des électrons dont la mobilité est plus élevée que ceux des ions.

$h(\text{mm})$ $K (\mu\text{A}/\text{kV}^2)$	20	30	40	50
($K+$)	0.998	0.45903	0.31371	0.19532
($K-$)	2.67221	1.1776	0.69497	0.40752
$K-/K+$	2.67757	2.56541	2.21533	2.08642

Tableau IV.1 : Résultats de facteur K pour les couronnes négatives et positives.

IV.2.3 Formule empirique générale des caractéristiques courant-tension

Étude expérimentale des décharges couronnes démontre que toutes les formules empiriques existantes rencontrent quelques difficultés à décrire les caractéristiques courant-tension. Sur la base des données expérimentales et des connaissances de création de la couronne, une nouvelle formule générale a été développée par Meng et al [6] pour découvrir les phénomènes de décharge couronne en géométrie pointe-plan. Cette formule (**équation IV.3**), indique que le courant de décharge peut être exprimé en fonction de différence de tension entre la tension appliquée et la tension seuil avec une puissance n . Le champ d'application n est un exposant qui diffère d'un auteur à l'autre et ils donnent tous $n \leq 2$ et confirmé par les résultats des études antérieures.

$$I = AV(V - V_0)^n \text{ (IV.3)}$$

$$\log_{10}(I) = n \cdot \log_{10}(V - V_0) + b \text{ (IV.4)}$$

et $A = 10^b$

Où :

I : le courant de décharge couronne (μA) ;

V : tension appliquée (kV) ;

V_0 : tension seuil (kV) ;

A : constante géométrique ;

n : un exposant qui diffère d'un auteur à l'autre.

Pour déterminer l'exposant n , nous utilisons l'échelle logarithmique de la dépendance de courant de décharge I sur la différence de tension ($V-V_0$) (voir la figure IV.5). Les valeurs de l'exposant n sont données dans le tableau IV.2, le modèle de Meng et al est peut être également appliqué à des filtres électrostatiques de type lame-plan.

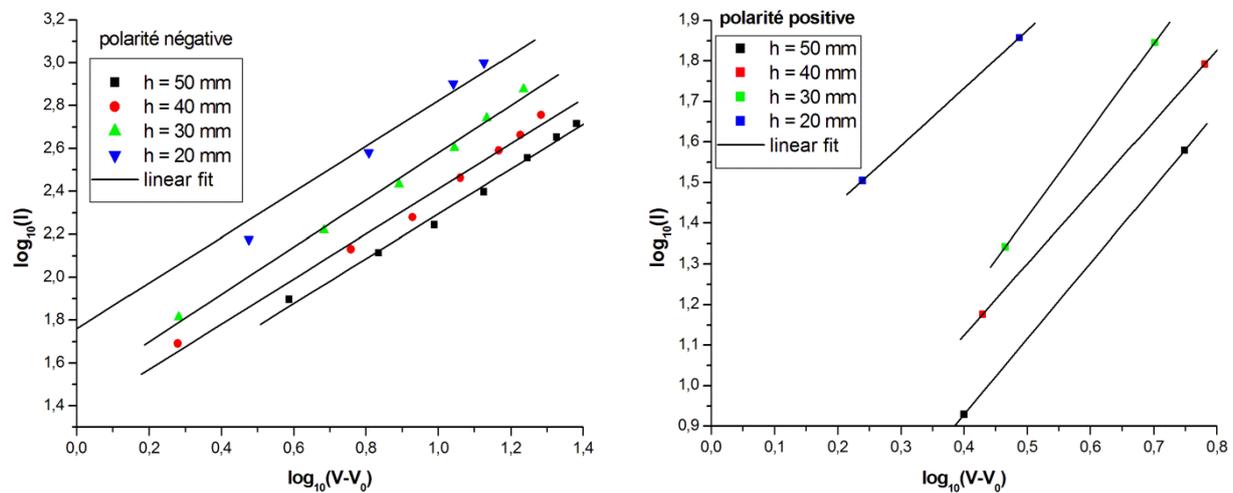


Figure IV.5 : Dépendance du courant(I) avec la différence de tension ($V-V_0$) sur une échelle logarithmique (pour les deux polarités)

h (mm)	20	30	40	50
n +	1.41778	2.13051	1.75384	1.86278
n-	1.06237	1.10053	1.05159	1.0431

Tableau IV.2: Résultats de l'exposant n pour la couronne négative

L'exposant $n > 1$ et les valeurs de n pour la couronne positive sont toujours plus élevées que celles de la couronne négative pour les mêmes distances inter-électrodes. La formule de Meng et al. Semble être applicable non seulement pour la couronne négative et positive dans des géométries point-plan [6], mais aussi pour les deux polarités dans les géométries lame-plan, (voir le tableau IV.2).

IV.2.4 Effet de la distance inter-lame sur la décharge couronne négative

La configuration lames-plan est soumise à l'étude théorique et expérimentale. P. Cooperman et G. Cooperman[7-8], [9] 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:

$$\frac{I}{V} = \frac{4\pi\varepsilon_0\mu}{h^2 \log\left(\frac{R_e}{r_0}\right)} (V - V_0) \text{ où } K = \frac{4\pi\varepsilon_0\mu}{h^2 \log\left(\frac{R_e}{r_0}\right)} \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{Pour } \frac{h}{a} \geq 2.0 \quad R_e = \frac{a}{\pi} e^{\frac{\pi h}{2a}} \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{Pour } \frac{h}{a} \leq 0.6 \quad R_e = \frac{4h}{\pi} \quad (\text{IV.6})$$

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, R_e est le rayon équivalent, μ est la mobilité des porteurs de charges.

Sur les **figures IV.6 et IV.7**, la distance inter-lames $2a$ à différentes valeurs de 10mm jusqu'à 240mm avec un pas de 10mm pour $h = 50$ mm fixe.

On observe que l'espace inter-lames $2a$ influe sur la caractéristique $I=f(V)$ c'est ce que nous montre **l'équation IV.5**.

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 $(2a) \geq h$. Donc, on peut dire que la loi de Cooperman est vérifiée sous **l'équation IV.5**.

D'après les **figures IV.6 et IV.7** pour $(0.6a) \geq h$, on observe que la distance inter-lames n'a aucune influence sur la caractéristique $I=f(V)$, car le facteur K (équation IV.4) est indépendant de l'espace inter-lames $2a$. On voit clairement que le courant de décharge est identique quelque 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 IV.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 [8], [9], la décharge recouvre les deux phénomènes.

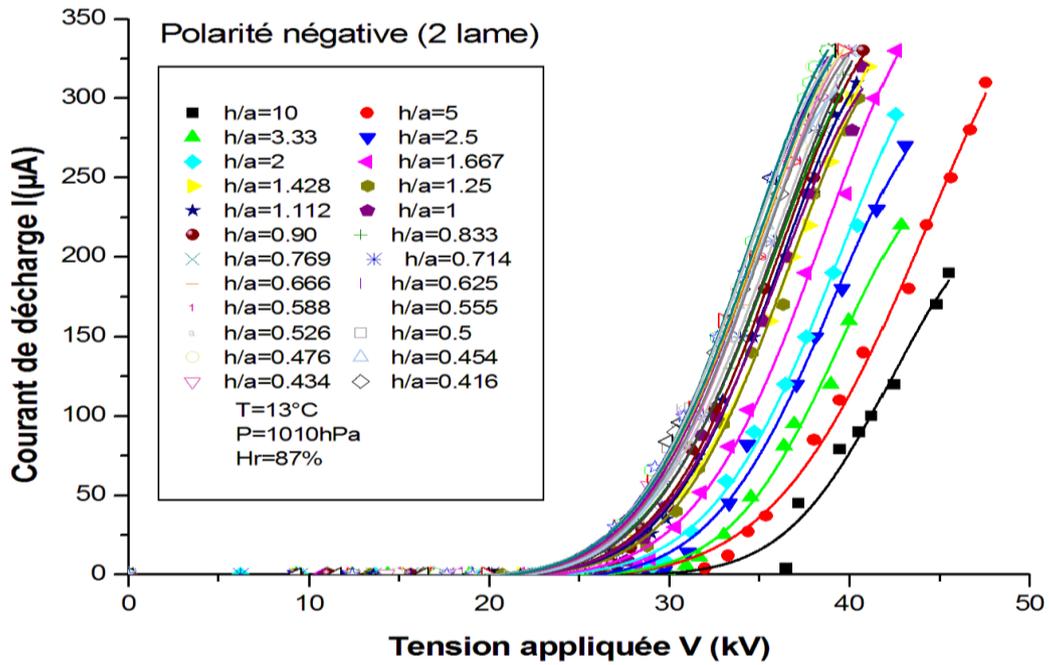


Figure IV.6 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives (2lames)

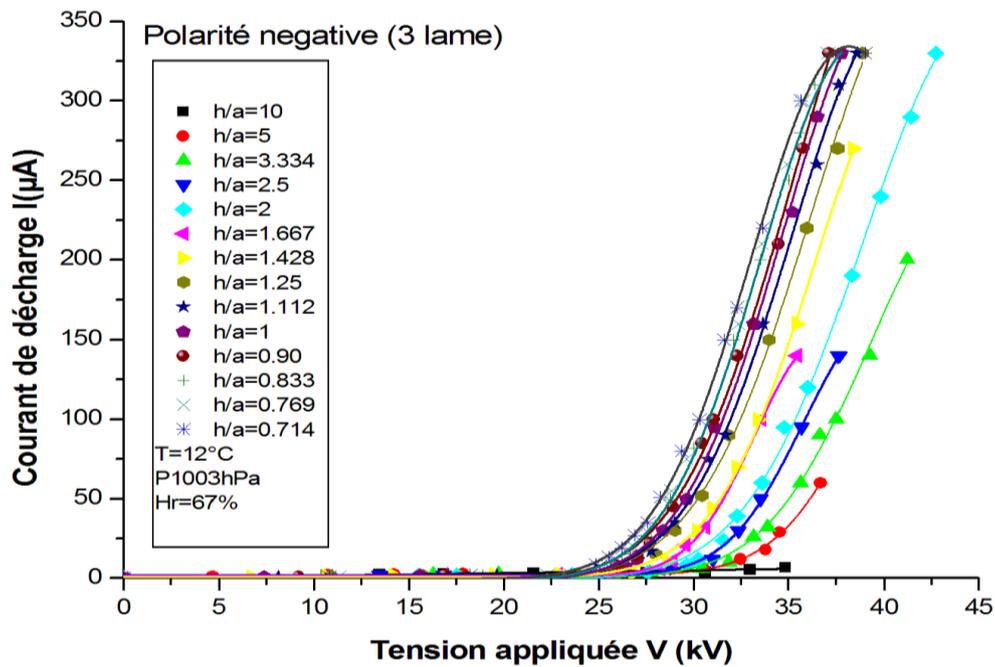


Figure VI.7 : Caractéristique courant-tension en fonction d'espace inter-lames négatives (3lames)

IV.2.5 Influence d'écoulement de l'air sur la décharge couronne

Les résultats d'étude expérimentale sur l'influence de la variation de l'écoulement de l'air sur la décharge couronne sont rapportés sur les figures IV.8-IV.13.

Nous avons fait varier la tension appliquée tout en maintenant la vitesse de l'écoulement de l'air dans le canal. Dans la configuration lames-plan, les résultats montrent qu'à partir d'une vitesse seuil de l'écoulement de l'air, les champs électriques sont modifiés par la vitesse du vent tel que le champ est proportionnel au courant de décharge.

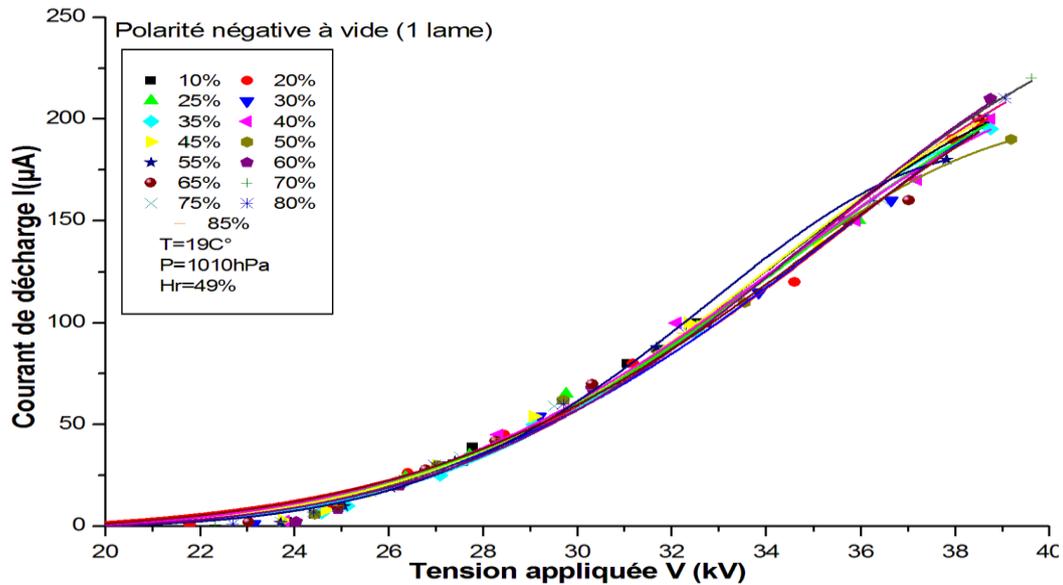


Figure VI.8 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (1 lame)

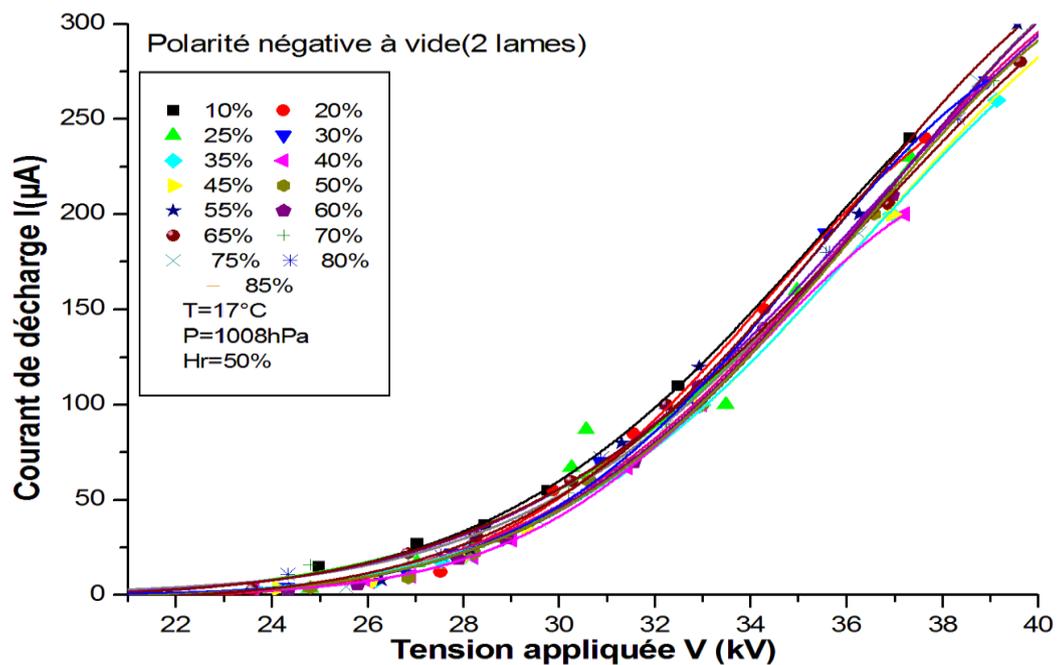


Figure VI.9 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (2 lames)

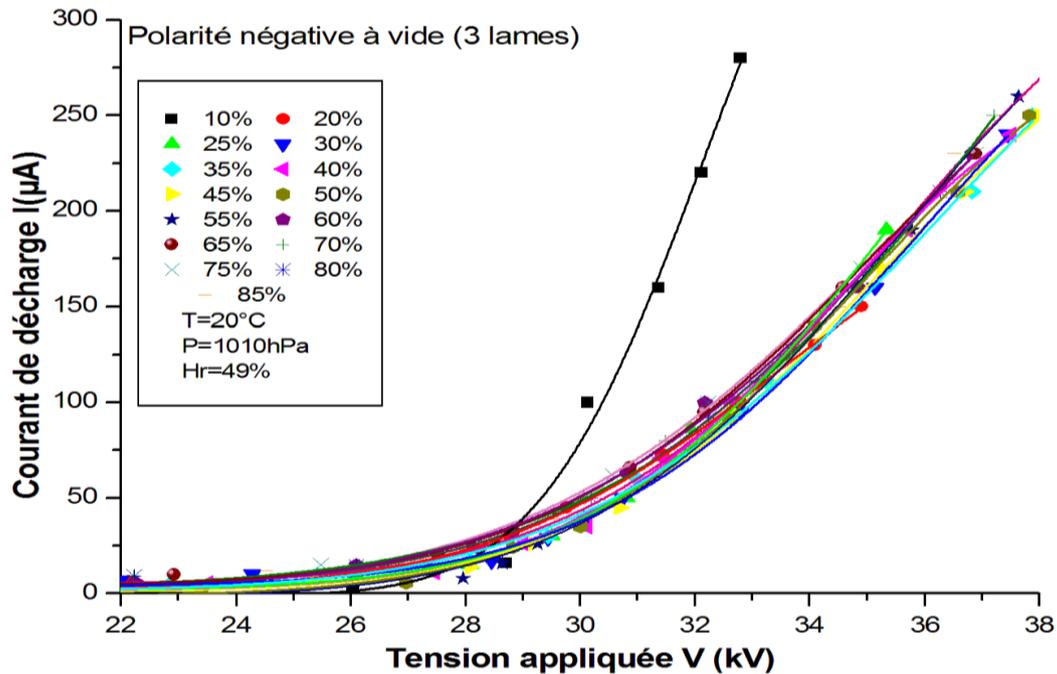


Figure VI.10: Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (3 lames)

Les **figures IV.8-IV.10** montrent que plus la vitesse de l'écoulement d'air augmente, le champ électrique du vent diminue, ceci élucide que dans la décharge couronne négative la vitesse du vent mécanique injecté domine la vitesse du vent électrique, c'est-à-dire les lignes de champ provenant des fils vont s'élargir du côté de l'écoulement. Cela tend à prouver que le vent électrique a une influence négligeable dans le phénomène de précipitation. Par contre l'efficacité de collecte étant meilleur dans la décharge couronne négative.

Dans le cas de la couronne positive (**figures IV.11-IV.13**), nous notons que plus l'écoulement augmente le champ électrique augmente, c'est-à-dire il y a une forte accélération locale des particules, ceci montre encore une fois que le vent électrique est dominant, qui est plus important dans une décharge couronne positive. La vitesse du vent électrique supérieure à la vitesse de l'écoulement de l'air parce que la décharge positive possède un grand nombre de streamer dans sa zone d'ionisation, ceci explique ce surplus de vitesse généré dans la nappe de fils par le fait que les streamers induisent aussi le vent électrique. Il est généralement admis que la présence du vent ionique ou la différence de vitesses entre les ions et les particules chargées au sein de PES réduit leur efficacité de collection en augmentant le taux de turbulence[10].

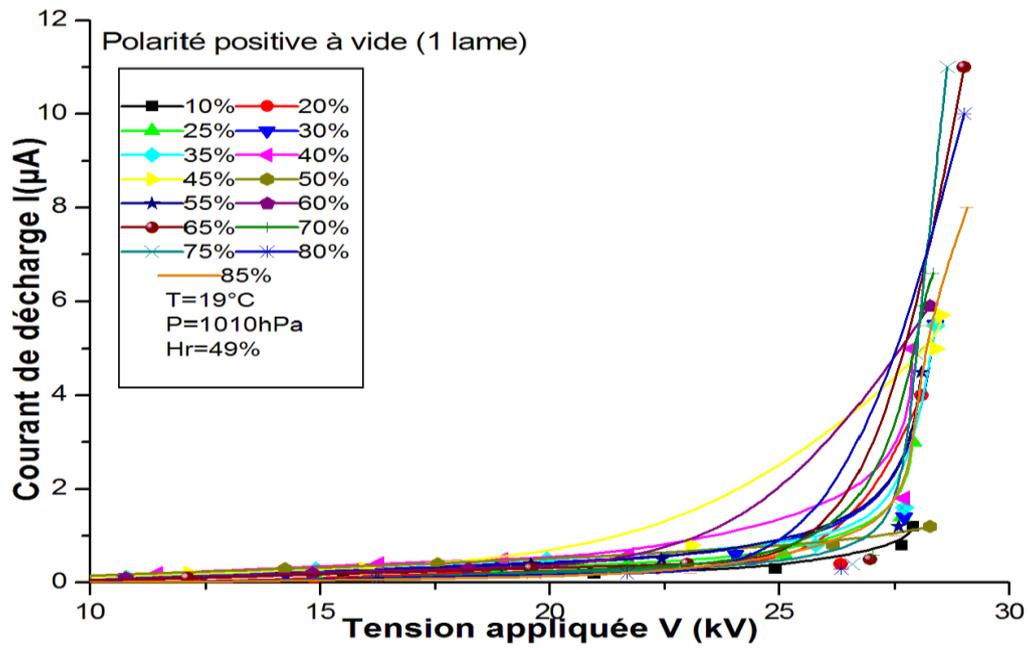


Figure VI.11 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (1 lame)

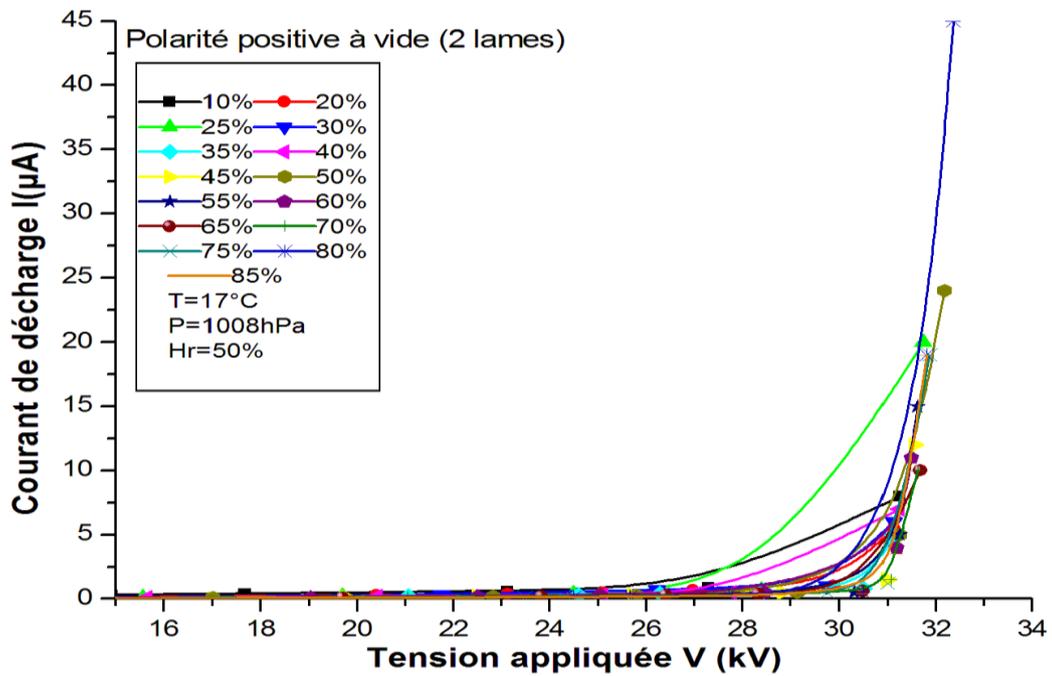


Figure VI.12 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (2 lames)

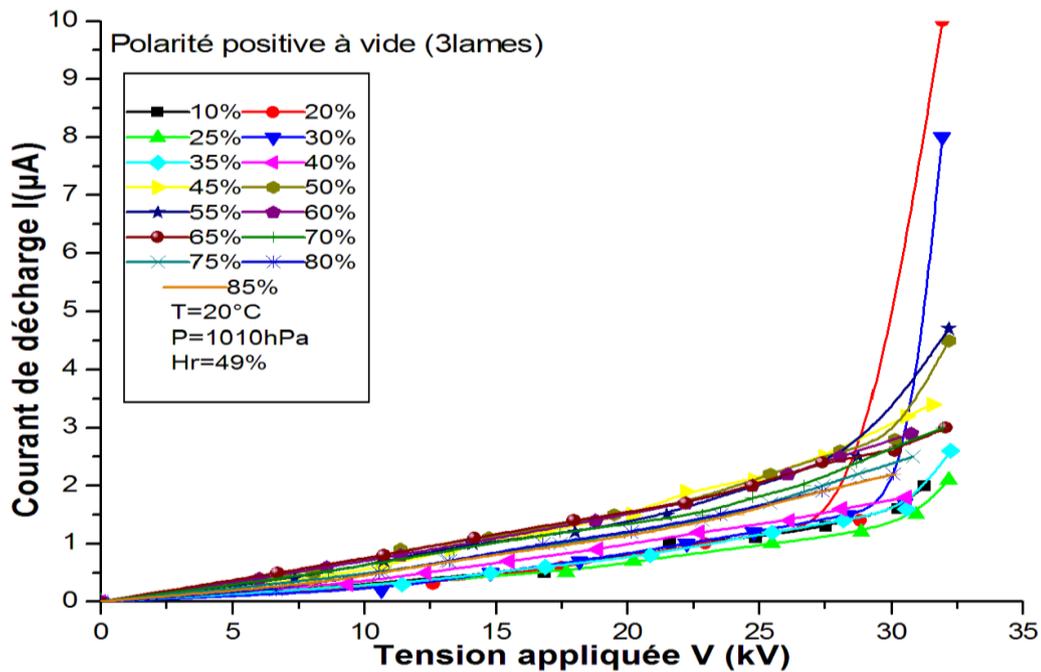


Figure VI.13 : Caractéristique courant-tension en fonction de l'écoulement (3 lames)

IV.3 Effet de la migration des particules sur la décharge couronne dans un PES

La combustion est une réaction chimique exothermique complexe entre un combustible (bois, charbon, hydrocarbures...) et un comburant (air, oxygène pur...), nécessitant un apport d'énergie. Dans notre étude, les combustibles utilisés sont le bois, le chambre à air et flanc de pneu (Apex). Le comburant utilisé est l'oxygène de l'air, comme dans les moteurs d'automobile. Le combustible est oxydé avec, en général, un dégagement de chaleur et de lumière. La connaissance des réactions intermédiaires est donc l'élément essentiel de la compréhension du phénomène de combustion. Ces réactions, à l'aide d'un partenaire quelconque de collision (O_2 , H_2O , etc.), produisent des espèces intermédiaires comme par exemple des radicaux O, OH, H et bien d'autres. Ces radicaux sont des molécules ou des atomes réactifs qui peuvent attaquer à leur tour d'autres molécules et déclencher des réactions en chaîne.

Les aérosols, suspension de particules solides dans un gaz, sont des constituants majeurs de l'atmosphère. Ils suscitent un intérêt croissant pour les recherches. En effet, ils sont impliqués dans de nombreux processus naturels tels que la formation des nuages ou la modification du bilan radiatif de l'atmosphère. Ils peuvent, cependant, être nocifs pour la santé, notamment à l'échelle submicronique. Enfin, l'avènement des nanotechnologies repose sur le contrôle de l'intensité des propriétés selon le diamètre des particules. Ainsi, de

nouvelles instrumentations de mesures granulométriques voient le jour et visent à améliorer les performances en termes de sensibilité tant en concentration qu'en taille.

En effet, pour évaluer les conséquences sur l'homme et sur l'environnement d'un rejet atmosphérique, il est nécessaire d'estimer la dispersion et le dépôt de ces polluants.

IV.3.1 La migration des particules dégagée de la combustion du bois

La réaction chimique entre la combustion du bois et le comburant air dégage des particules de type monoxyde de carbone ou CO. Ce gaz est incolore, inodore et mortel à forte concentration. Dans ce cas, on a expérimenté la fumée générée par combustion naturelle du bois pour une vitesse d'écoulement de 20% correspondante à une tension appliquée au ventilateur $V_{alt}=51.76V$ pour les deux polarités, et on a rapporté les caractéristiques courant/tension sur les **figures IV.14.a, IV.14.b**. La taille moyenne de telle particule est d'environ $2.5\mu m$, appelée $PM_{2.5}$, il est important de noter que, les $PM_{2.5}$ incluent les particules très fines et ultrafines, qui pénètrent dans les alvéoles pulmonaires.

On voit alors que pour une vitesse de 20%, le courant de décharge est proportionnel à la tension appliquée, pour la polarité négative on atteint une filtration à une tension $V=26.28 kV$. On observe que la tension seuil V_0 lors de l'essai avec fumé augmente par rapport à l'essai à vide, par contre pour la polarité positive on peut dire qu'il y a aucune filtration qui commence à partir de la tension $V_f= 34.65kV$ qui est proche de la tension de claquage $V_c=37.1kV$.

On remarque qu'il y a un dépôt des particules sur le plan de mesure pour la décharge couronne négative, contrairement à la décharge couronne positive on observe que le plan est propre.

La tension nécessaire pour maintenir le même courant de décharge est plus élevée avec une polarité positive et la tension seuil en polarité négative est supérieure à celle de la polarité positive.

A 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. Cette tension est par contre plus élevée dans une décharge négative. Par conséquent, l'écart V_c-V_0 est souvent plus grand dans une décharge négative. Pour cette raison, dans la majorité des électrofiltres, les électrodes émissives sont alimentées par une tension négative afin d'assurer une bonne charge des particules, un champ électrique suffisamment intense ainsi que pour limiter autant que possible les claquages.

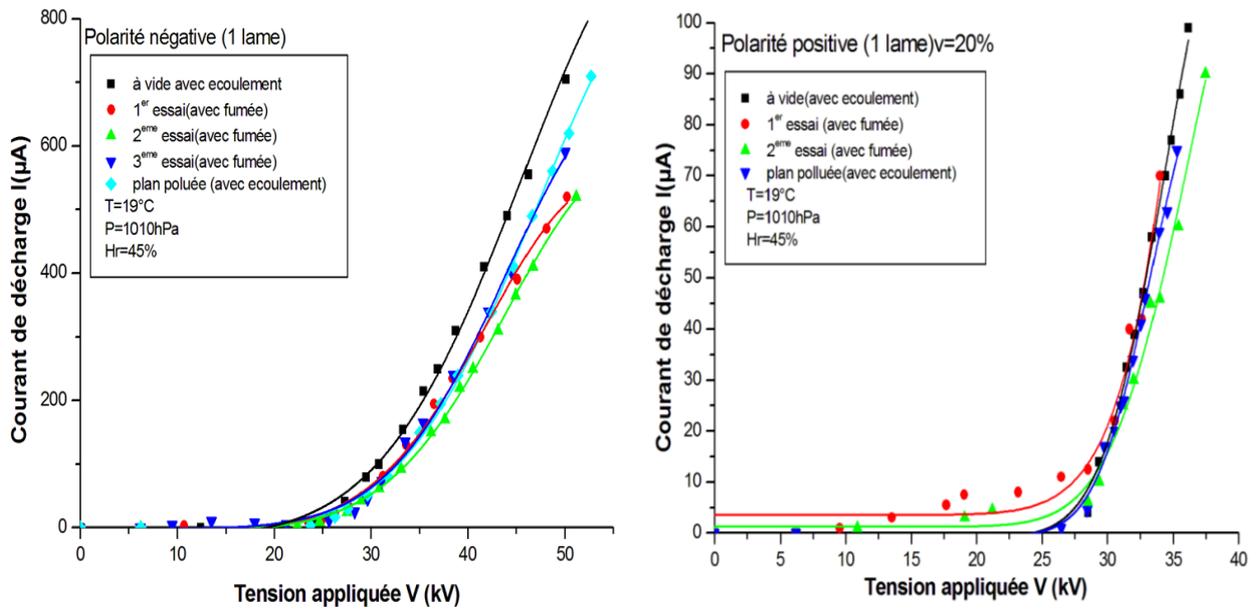


Figure IV.14.a : Caractéristique courant-tension pour les deux polarités a 20% (une lame)



Figure IV.14.b : Photo représente le dépôt des particules sur le plan de mesure

➤ **Facteur géométrique K :**

L'aérosol est d'abord chargé puis séparé selon la mobilité électrique pour remonter des mesures de courant par gamme de mobilité à la concentration d'aérosol. Les décharges électriques, notamment les décharges couronnes, sont utilisées pour produire les ions qui servent pour la charge de l'aérosol en raison de leur stabilité et de leur simplicité de mise en œuvre. Pour limiter les pertes de l'aérosol chargé et éviter la déstabilisation de la

décharge par le dépôt d'aérosol sur les électrodes, les ions sont extraits de l'espace inter-électrodes. Les ions et les aérosols sont donc mélangés en aval de la décharge, pour charger l'aérosol par diffusion d'ions.

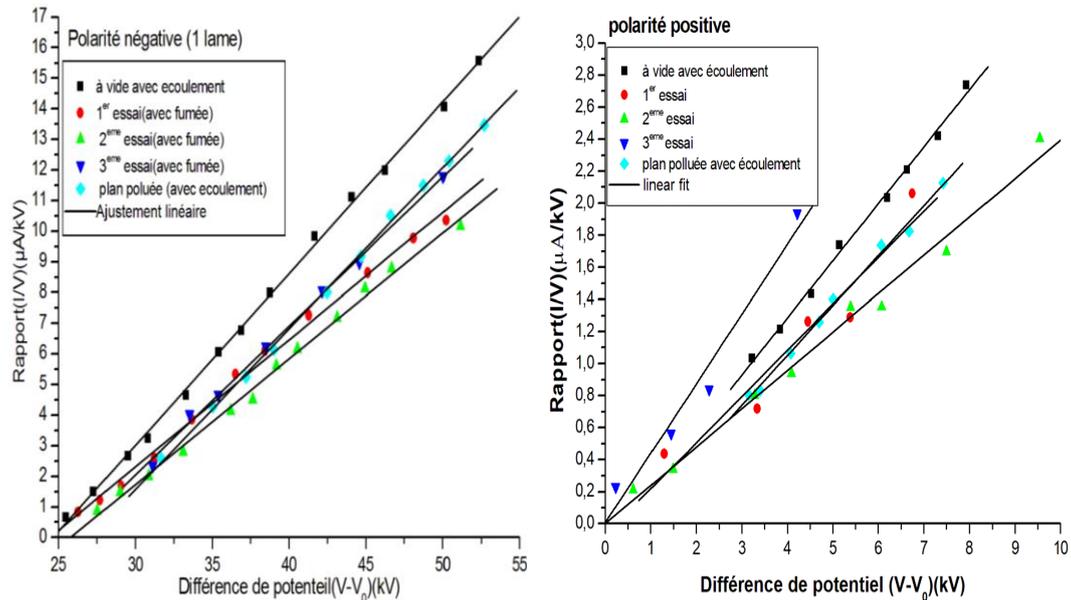


Figure IV.15 : Dépendance du rapport courant/ tension (I/V) avec la différence de tension ($V-V_0$) pour les deux polarités

D'après les résultats obtenus dans le **tableau IV.3**, on remarque que les valeurs de K pour la décharge couronne négative sont plus élevées par rapport à celle de la décharge couronne positive pour les mêmes essais. Le rapport $K-/K+ > 1$ confirme donc que la mobilité des porteurs de charge négative est toujours supérieure à celle des porteurs de charge positive.

	à vide avec écoulement	1 ^{er} essai avec fumée	2 ^{ème} essai avec fumée	3 ^{ème} essai avec fumée	plan polluée
K +	0.35569	0.2887	0.23928	0.43431	0.31073
K -	0.56075	0.41844	0.41399	0.4994	0.49804
K- / K +	1.576513	1.449394	1.7301487	1.14986	1.6028062

Tableau IV.3 : Le Facteur K pour les deux polarités

➤ **L'exposant n :**

La caractéristique I/V du système lame-plan semble également suivre les formules générales proposées par Meng et al données par l'équation IV.3 ou le paramètre n peut être déterminé par l'équation IV.3 et représenté à la figure IV.15 à la fois positif et négatif, corona DC. L'influence de la fumée générée par combustion naturelle du bois sur les valeurs du paramètre n est représentée dans le tableau IV.4. Nous notons que les valeurs de paramètre n positive est inférieure à 1 dans le cas des essais avec fumée, et proche de la valeur 1.5 dans le cas de n négative.

	à vide avec écoulement	1 ^{er} essai avec fumé	2 ^{eme} essai avec fumé	3 ^{eme} essai avec fumé	plan polluée
n +	1.22976	0.99188	0.99228	0.73856	1.30629
n -	1.69977	1.72535	1.45587	1.68331	1.33809

Tableau IV.4 : Résultats de l'exposant n pour la couronne négative et positive

Les figures IV.16.a, IV.16.b illustrent la concentration des particules à la sortie de PES après et avant la filtration en fonction du temps. La caractéristique indique que la fumée dégagée de la combustion naturelle du bois est composée de CO. Les particules contenues dans le gaz de combustion sont nettoyées à l'aide de précipitateurs électrostatiques (PES). Ce PES recueille efficacement de grandes particules du gaz CO et l'efficacité de collecte est grande pour les particules PM_{2,5} ou les particules fines.

Nous avons alors déduit, d'après la figure IV.14.b, que la polarité positive est défavorable pour notre PES en lame-plan, parce qu'elle se manifeste sous des résultats très flous, à savoir aussi sa difficulté de manipulation, ou encore, la gamme de fonctionnement de celle-ci est trop rétrécie par rapport à la polarité négative, autrement dit, les tensions de claquage dans cette polarité sont trop proches de celles de seuil. Cependant nous avons donné suite à la caractérisation de notre système qu'avec la polarité négative.



Figure IV.16.a : Photo de la fumée avant et après la filtration

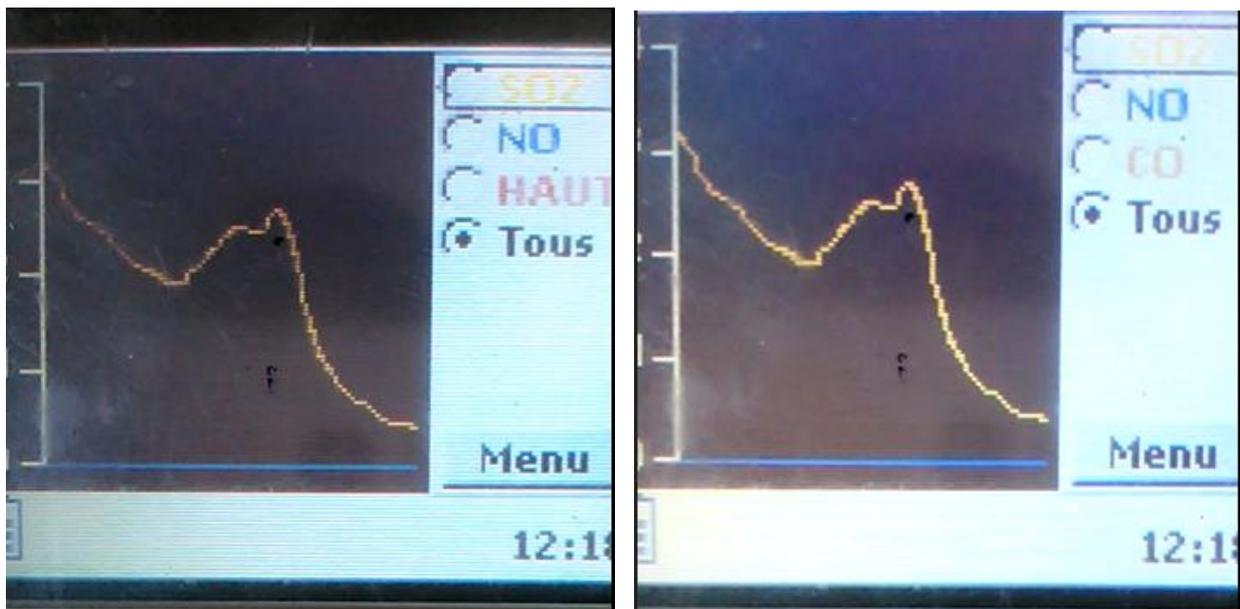


Figure IV.16.b : Spectre représente la concentration des particules à la sortie de PES

Les figures IV.17.a, IV.17.b indiquent les caractéristiques courant-tension mesurées au plan en fonction de la tension appliquée à l'électrode lame pour la polarité négative et pour différentes vitesses d'écoulement d'air. Les images au dessous des mesures courant-tension caractérisent le dépôt des particules sur le plan de mesure.

Par ailleurs, la présence de la vitesse de l'écoulement d'air modifie l'allure de la caractéristique courant-tension. En effet, pour la même tension appliquée le courant de

décharge négative est plus faible avec la présence de l'écoulement des particules à travers le PES.

Les images du dépôt des particules montrent que l'efficacité de notre PES diminue avec l'augmentation de la vitesse des particules. Le dépôt est concentré au dessous de l'électrode haute tension parce que le champ électrique est très intense à cette zone.

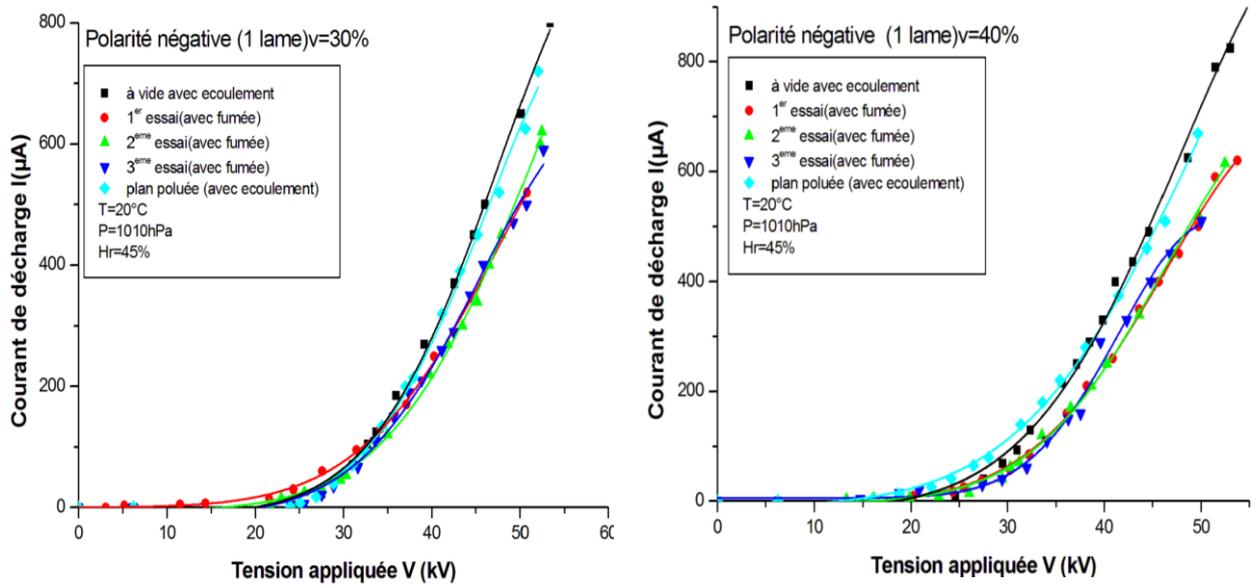


Figure IV.17.a : Caractéristique courant-tension en fonction de la vitesse de migration des particules



Figure IV.17.b : Photo montre l'effet de la vitesse de migration des particules sur l'efficacité de filtration

Les figures IV.18.a, IV.18.b montrent l’Influence de nombres de lames sur le dépoussiérage électrostatique. En fixant la vitesse d’écoulement pour les PES de configuration deux lames-plan et de trois lames-plan, l’évolution du courant de décharge à travers l’espace inter-électrodes est de forme non linéaire pour les deux PES(s).

Le courant de décharge diminue pendant la filtration pour les deux PES(s). L’écart entre les caractéristiques courant-tension avant et pendant la filtration est très important dans le PES deux lames-plan par rapport au PES trois lames-Plan.

Les images du dépôt des particules sur le plan de mesure montrent que le système de filtration de configuration deux lames-plan est plus efficace au système trois lames-plan.

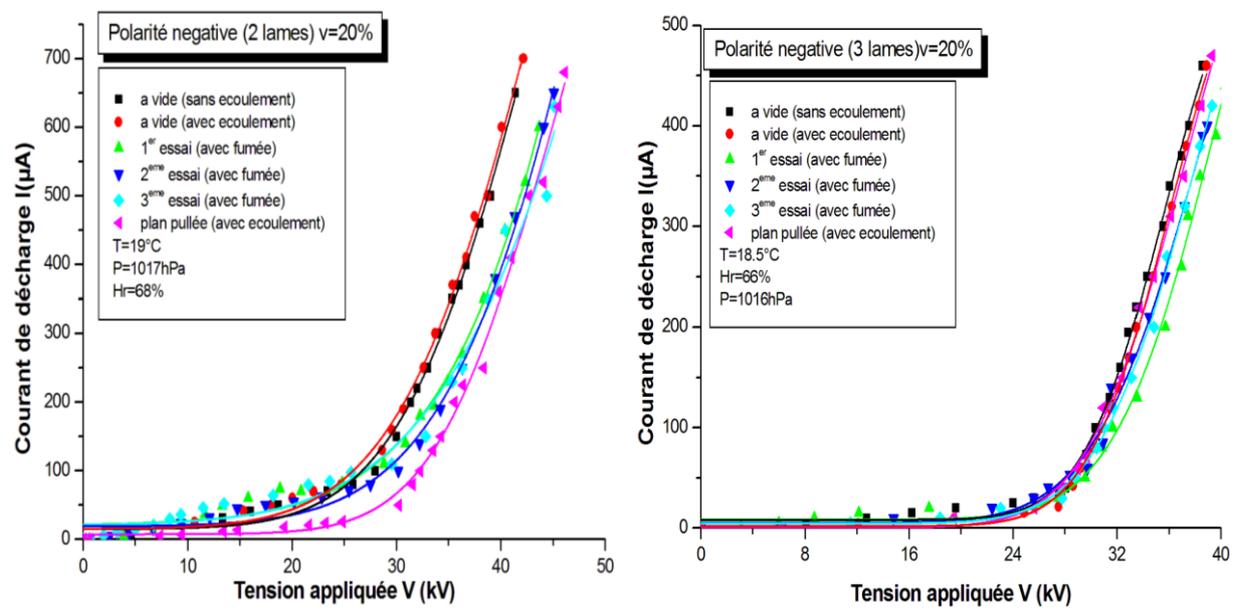


Figure IV.18.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour la vitesse faible (20%)



Figure IV.18.b : Photos montrent l'influence de nombre de lames sur la filtration des particules pour vitesse faible (20%)

Dans les figures IV.19.a, IV.19.b nous constatons que le courant de décharge diminue légèrement avec la présence des particules CO en fixant la vitesse de migration. La gamme de variation entre les caractéristiques courant-tension avant, pendant et après la filtration est très faible.

Nous remarquons sur les images du dépôt des particules que l'efficacité de collection est réduite.

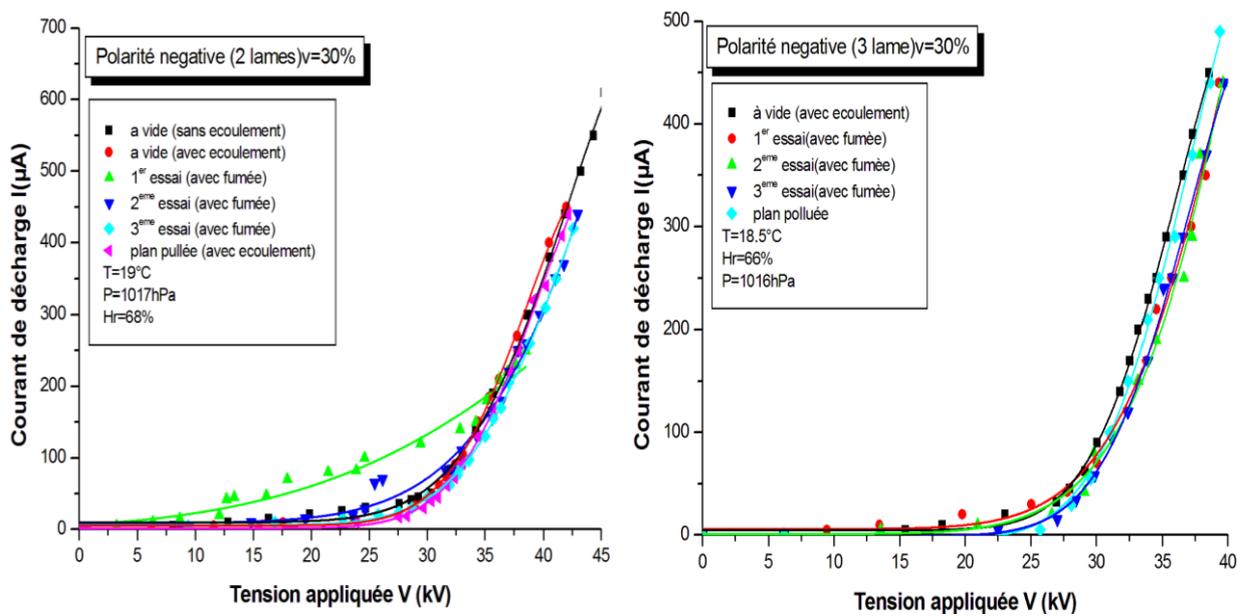


Figure IV.19.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour la vitesse moyenne (30%)



Figure IV.19.b : Photos montrent l'influence de nombre de lames sur la filtration des particules pour une vitesse moyenne (30%)

Les figures IV.20.a, IV.20.b caractérisent deux configurations géométriques pour la filtration des particules. Les courants de décharge mesurés au plan propre et au plan pollué sont presque similaires.

Nous constatons que lorsque la vitesse de migration est importante au sein de PES, l'efficacité de collection est réduite en augmentant le taux de turbulence.

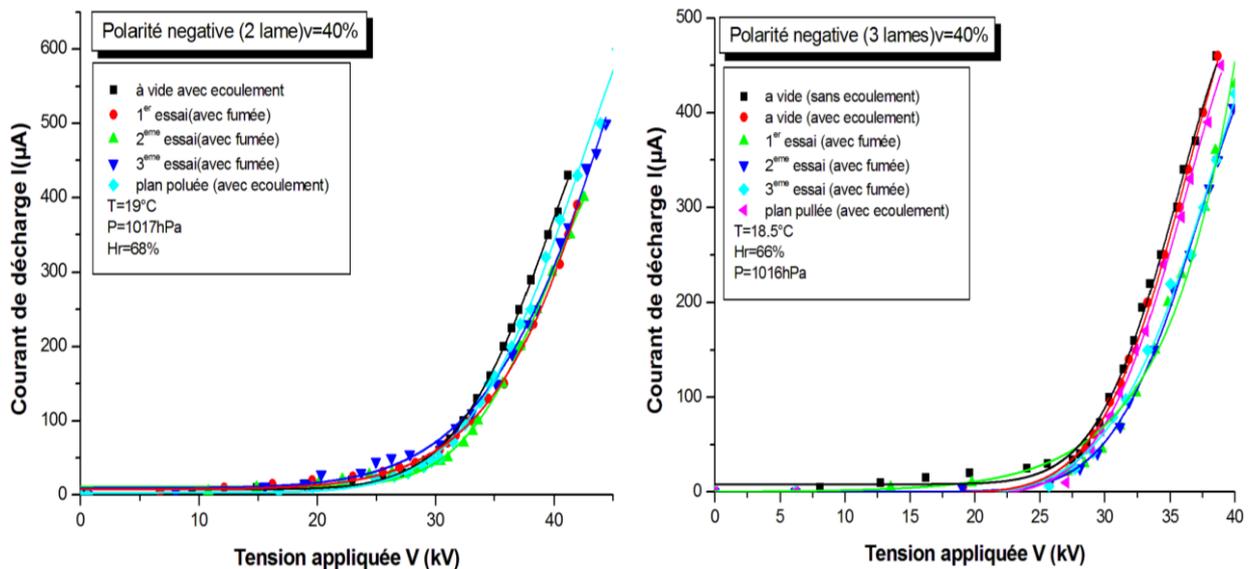


Figure IV.20.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour la vitesse plus fortes (40%)

En final, Le CO est un gaz asphyxiant qui se fixe à la place du dioxygène sur l'hémoglobine et provoque des intoxications. Pour cela, notre système de filtration des particules de type CO est très efficace pour des vitesses de migration de 20%.



Figure IV.20.b : Photos montrent l'influence de nombre de lames sur la filtration des particules pour une vitesse plus fortes (40%)

IV.3.2 La migration des particules dégagée de la combustion de chambre à air

La réaction chimique entre la combustion de chambre à air et le comburant air dégage des particules de types dioxyde de soufre (SO_2) et monoxyde de carbone (CO).

L'élimination de (SO_2) et de (CO) par la décharge couronne a été étudiée pour déterminer comment les précipitateurs électrostatiques (PES) peuvent collecter efficacement les particules de moins de $2,5 \mu\text{m}$ de diamètre provenant des gaz de combustion.

Les **figures IV.21.a, IV.21.b** montrent une représentation d'une particule formée par deux polluants SO_2 et CO et la concentration de SO_2 est très élevée par rapport à CO. L'absence de la décharge montre une très forte concentration des particules et lorsque la décharge acquerra une tension suffisante pour la filtration la concentration des particules diminue et devient très faibles.

Le courant de décharge qui traverse l'espace inter-électrodes diminue pendant la filtration. Les images montrent un dépôt très important des particules CO et SO_2 et nous pouvons dire que notre système est très efficace pour cette combinaison de particules.

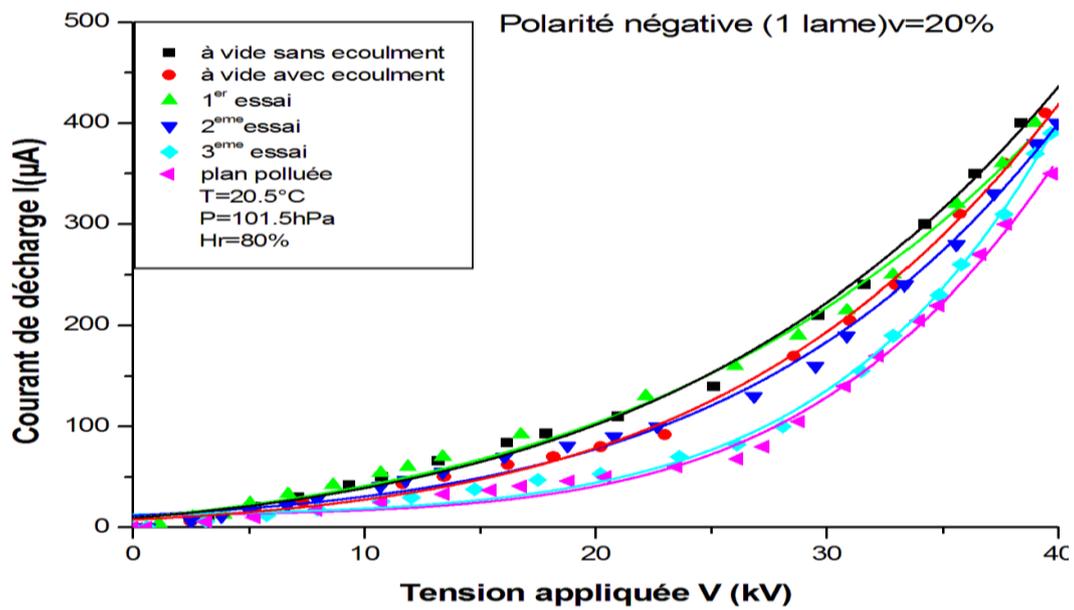


Figure IV.21.a : Caractéristique courant-tension pour la polarité négative



Figure IV.21.b : Photos représente le dépôt des particules

La mobilité des porteurs de charges à un rôle très important dans le domaine de dépoussiérage électrostatique et le facteur géométrique K est proportionnelle à la mobilité. Le facteur géométrique K et l'exposant n du modèle empirique de Meng sont présentés dans le **tableau IV.5**.

	à vide sans écoulement	à vide avec écoulement	1 ^{er} essai avec fumée	2 ^{ème} essai avec fumée	3 ^{ème} essai avec fumée	plan polluée	
K -	0.36834	0.41569	0.37229	0.4398	0.59646	0.4812	
n -	1.18793	1.1141	0.91832	0.87928	0.88333	0.77558	

Figure IV.5 : Résultats de facteur K et de l'exposant n pour la polarité négative

L'échenillant chambre à air compose d'une grande quantité de SO₂ par rapport à CO, montré dans les **figures IV.22.a, IV.22.b** Les courbes montrent une très forte concentration des particules avant l'application de la décharge et pendant la filtration, la caractéristique de concentration des particules est réduite.

Le PES de géométrie lame-plan est très efficace pour l'élimination des aérosols de dioxyde de soufre et monoxyde de carbone.



Figure IV.22.a : Photos représentent la fumée de la combustion de chambre à air avant et après la filtration

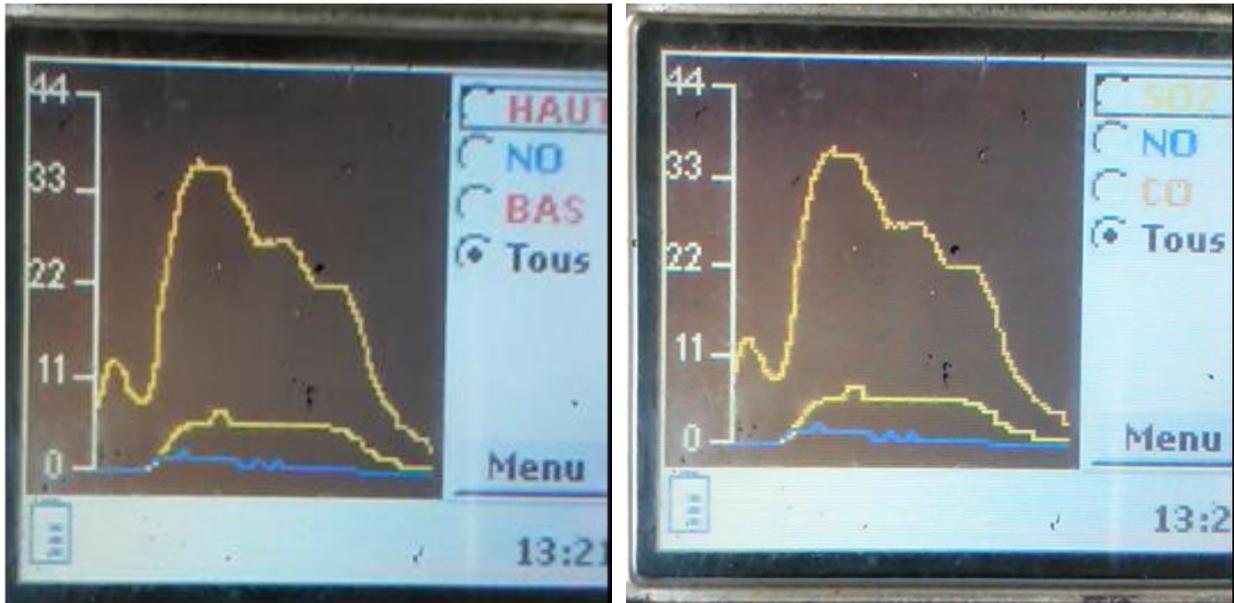


Figure IV.22.b : Spectres représentent la concentration des particules à la sortie de PES

Le taux d'humidité dans la **figure IV.23.b** est $H_r=80\%$ alors que l'élimination du SO_2 augmente au fur à mesure que la concentration de vapeur d'eau augmentait car le SO_2 se transforme en acide sulfurique au contact de l'humidité de l'air.



Figure IV.23.b : L'effet de nombre de lames sur l'efficacité de filtration

La **figure IV.23.a** explique que pendant la filtration la caractéristique courant-tension augmente et la tension seuil de la décharge couronne diminue. A partir delà, nous pouvons

dire que le SO₂ à une température très élevée. Cela provoque une augmentation de la résistivité superficielle des particules.

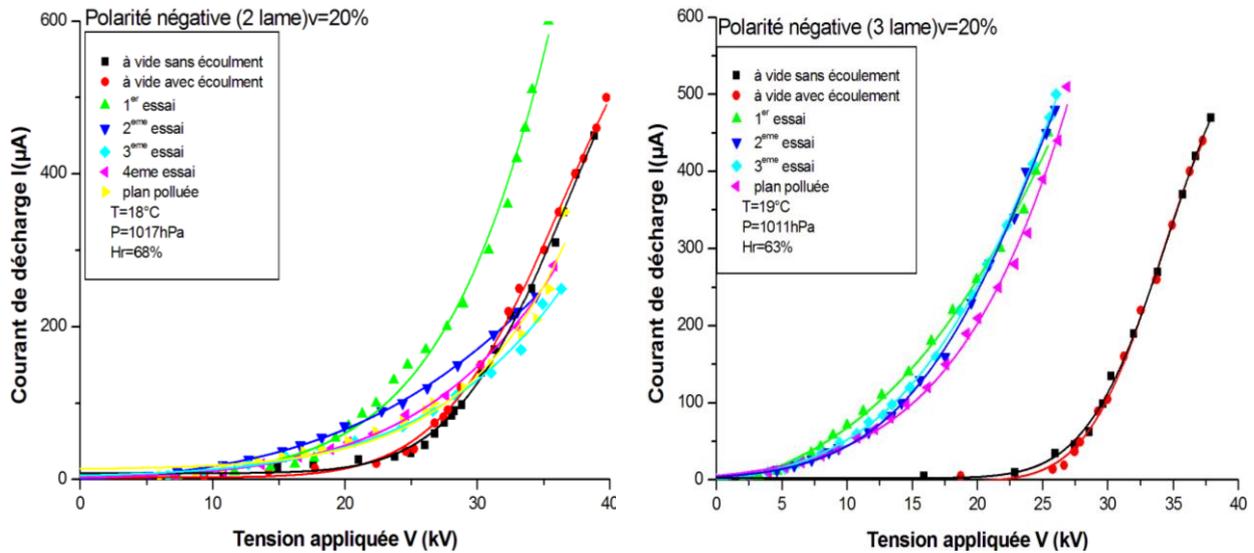


Figure IV.23.a: Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour faible vitesse (20%)

IV.3.3 La migration des particules dégagée de la combustion du flanc de pneu (Apex)

Une augmentation croissante des rejets de polluants gazeux dans l’atmosphère. Parmi ces polluants on trouve les oxydes d’azote qui ont des effets néfastes sur la santé et l’environnement et sont responsables de certaines maladies lorsque leur concentration dans l’air est importante. De ce fait, la mise en place de normes environnementales sur les divers oxydes (NO_x, SO_x, ozone, etc...) a motivé la recherche de nouveaux moyens de dépollutions.

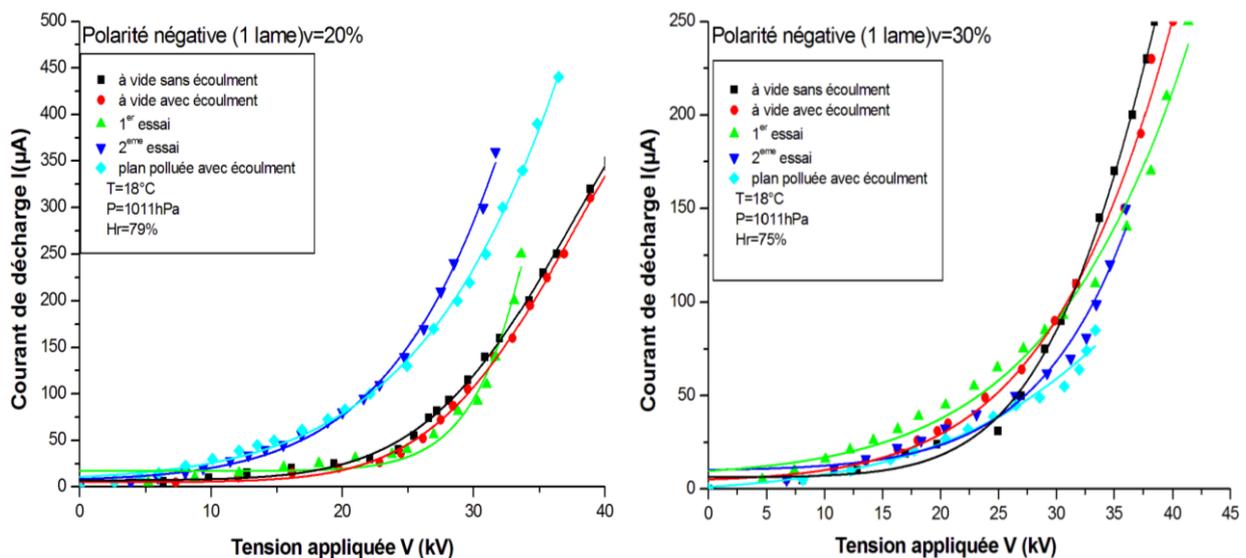


Figure IV.24.a : Caractéristique courant-tension en fonction de la vitesse de migration



Figure IV.24.b : Photos montrent l'effet de la vitesse des particules sur l'efficacité de filtration

La réaction chimique entre la combustion du flanc de pneu (Apex) et le comburant air dégage des particules de types dioxyde de soufre (SO_2), monoxyde de carbone (CO) et monoxyde d'azote (NO). Le SO_2 se transforme en acide sulfurique au contact de l'humidité de l'air et participe avec les NO au phénomène des pluies acides.

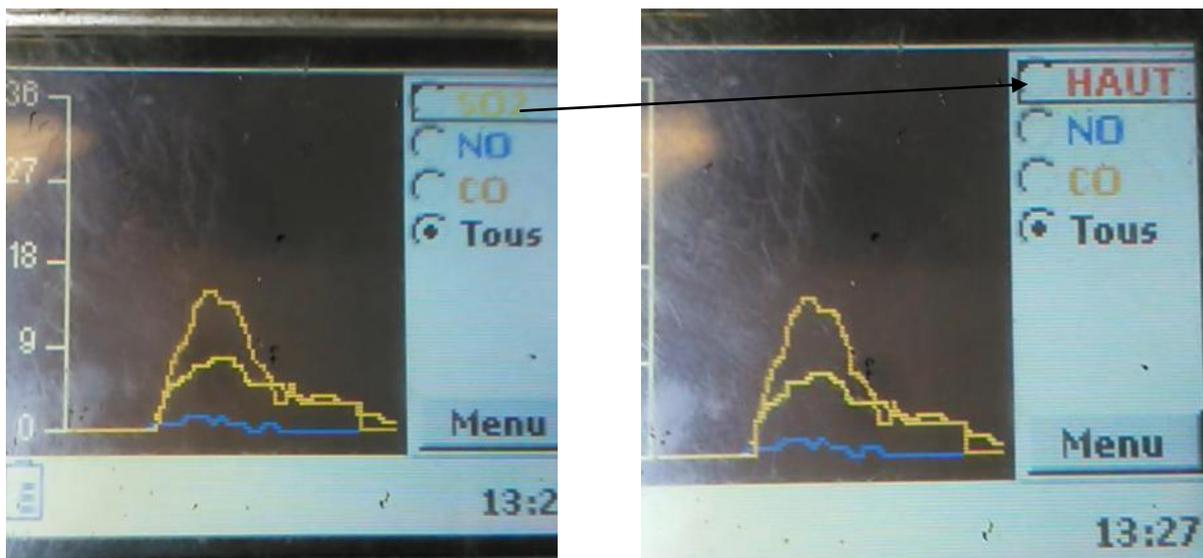


Figure IV.25 : Spectre représentent la concentration de SO_2

Les figures IV.24-IV.26 montrent les résultats expérimentaux de la réduction de NO, CO et SO₂ par application de la décharge couronne en polarité négative et nous remarquons l'existence d'une dépendance entre la tension appliquée et la diminution de la concentration des particules.

Ce traitement des gaz pollués par les décharges couronnes est notamment rendu possible par la multiplication des décharges électriques. L'efficacité de notre système de filtration dépend de plusieurs paramètres, tels que la géométrie des électrodes, la nature du polluant, ou encore le temps de résidence et le régime d'alimentation en tension.

Les caractéristiques courant-tension de la décharge couronne augmentent avec la présence des particules dans l'espace inter-électrodes par contre le seul de l'effet couronne diminue.

Malgré l'effet de température qui augmente la résistivité des particules. Les images montrent que les trois PES(s) sont très efficaces pour collecter des particules fines.

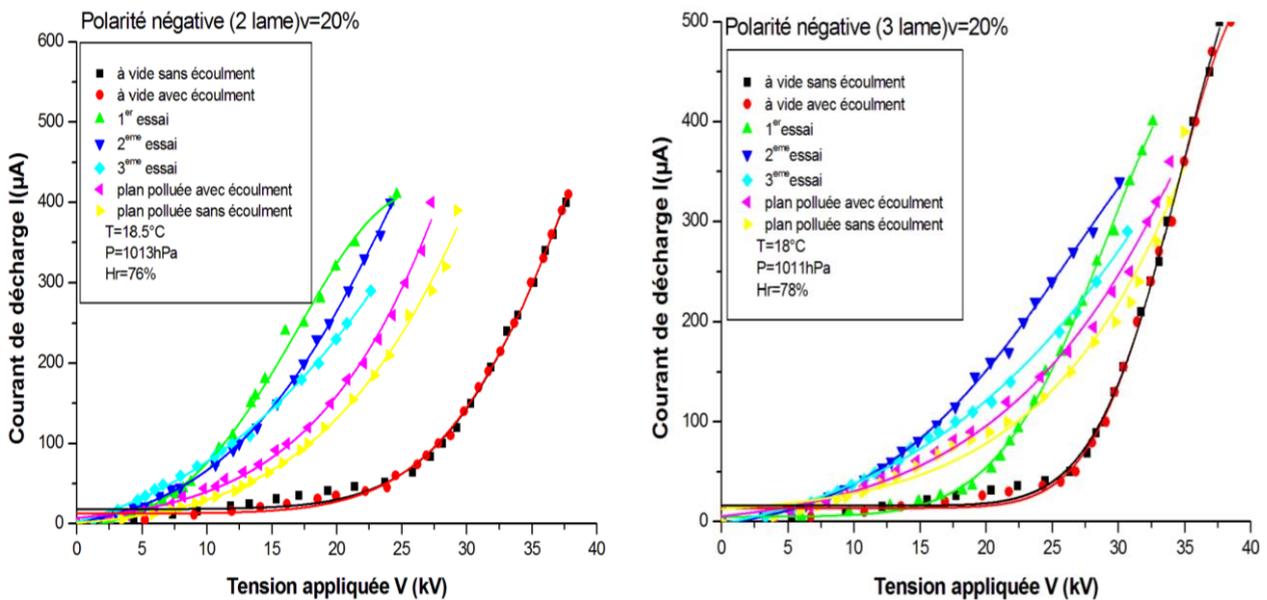


Figure IV.26.a : Caractéristique courant-tension en fonction de nombre des lames pour faible vitesse (20%)



Figure IV.26.b : l'influence du nombre de lames sur l'efficacité de filtration

IV.4.Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude expérimentale ayant pour objet la mesure des différents paramètres essentiels qui caractérisent la décharge couronne à la surface des plan mis à la terre. Cette étude permet de mesurer les caractéristiques courant-tension, de déduire la mobilité des porteurs de charges au voisinage immédiat des plans collecteurs et de mesurer la concentration des particules.

L'étude expérimentale que nous avons développée, a permis de mettre en évidence l'effet de plusieurs paramètres sur la décharge couronne en géométrie lames-plan.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons développé une étude expérimentale de la migration des aérosols sur le comportement de la décharge couronne dans le précipitateur électrostatique de configuration lame-plan, tenant compte des paramètres géométriques (distance inter-électrodes et inter-lames) et des paramètres physiques sur cette décharge.

Le principe de fonctionnement du précipitateur électrostatique de géométrie lame-plan est basé sur la décharge couronne. Dans ce travail, nous avons développé une étude expérimentale de cette décharge couronne en déterminant les caractéristiques courant-tension, la tension appliquée, tension seuil, facteur géométrique, Effet de la migration des particules, la mobilité des porteurs de charges à l'intérieur de ce type de précipitateur en fonction des paramètres principale tels que la vitesse de l'écoulement de l'air et le nombre de lame.

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

- ✓ Le 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.
- ✓ Le courant de décharge croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes.
- ✓ La tension seuil V_0 augmente avec l'augmentation de la distance inter-électrodes car le champ électrique s'affaiblit.
- ✓ Pour les mêmes distances inter-électrodes 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.

Conclusion générale

- ✓ 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.
- ✓ Dans la formule de Meng, une augmentation significative de l'exposant n pour les différentes distances inter-électrodes, les valeurs de n pour la couronne négative étaient toujours plus élevées que celles de la couronne positive pour les mêmes distances inter-électrodes.
- ✓ 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 $(2a) \geq h$. Donc, on peut dire que la loi de Cooperman est vérifiée pour des intervalles bien précis, car pour des rapports $(0.6a) \geq h$, il n'y a aucune influence sur la décharge couronne car le courant de décharge est identique quel que soit la distance inter-lames, ce qui confirme la loi de Cooperman. Donc pour obtenir une valeur constante du courant, les électrodes lames doivent être suffisamment éloignées entre elles de $2a \gg h$.
- ✓ L'influence de la variation de l'écoulement de l'air sur la décharge couronne Dans la configuration lames-plan, les résultats montrent qu'à partir d'une vitesse seuil de l'écoulement de l'air, les champs électriques sont modifiés par la vitesse du vent tel que le champ est proportionnel au courant de décharge. dans la décharge couronne négative la vitesse du vent mécanique injecté domine la vitesse du vent électrique, Cela tend à prouver que le vent électrique a une influence négligeable dans le phénomène de précipitation. Par contre l'efficacité de collecte étant meilleure dans la décharge couronne négative.
- ✓ la décharge couronne a été étudiée pour déterminer comment les précipitateurs électrostatiques (PES) peuvent collecter efficacement les particules fine et ultrafine provenant des gaz de combustion (déchets du bois, chambre à air, Flanc de pneu), L'efficacité de notre PES dépend de la vitesse des particules et le nombre de lame utilisée.

Conclusion générale

De nombreuses perspectives sont envisagées pour poursuivre ces travaux et compléter nos résultats. Il est recommandé de réaliser des mesures sur l'efficacité des précipitateurs électrostatiques dans différentes conditions par l'étude granulométrique en introduisant des particules de différents diamètres. Pour déterminer l'influence de l'écoulement du gaz, il est recommandé d'utiliser des techniques optiques telles que la vélocimétrie par imagerie de particules.

Finalement, Nous espérons que d'autres travaux pratiques et numériques soient poursuivis pour améliorer la précision de calcul, en déterminant la zone d'ionisation avec précision ainsi que la charge d'espace.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques chapitre 1

- [1]R. Farhi, C. Morel, G. Cheron, « Matières plastique et adjuvant hygiène et sécurité », INRS, ED, Février 2008.
- [2] M. Handala. Mohand-Amokrane, « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50Hz : une interface isolante air/solide », thèse de doctorat UMMT.O, décembre 2007.
- [3] Julien. Jarrige, « Etudes expérimentale des décharge électriques impulsionnelles. Application au traitement des effluents gazeux et à la décontamination de surface », thèse doctorat de l'université de Rouen, Février 2008.
- [4]B.Gueller, A.Veverka, « les processus impulsionnels dans les machines électriques », ENERGUIYA, Moscou, 1976.
- [5]F. Paschen. Sur la différence de potentiel nécessaire à la formation d'arc électrique dans de l'air, de l'hydrogène et du gaz carbonique sous différentes pressions, volume 37, pages 69-96. Wied. Annales de physique, (1889).
- [6] B. F. J. Schonland, « Atmospheric Electricity », Methuen, London, (1953).
- [7]Alyen. Abahazem «Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz». Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III – Paul Sabatier
Décembre 2009.
- [8]J. M townsend, Electricity in gases, oxford university press, (1914).
- [9] L. Parissi, 1999, Etude d'un procédé de traitement d'air chargé en composé organiques volatiles par décharge moyenne fréquence avec barrière diélectrique : mécanisme mis en œuvre et recherche d'optimisation, thèse de doctorat de l'université de Paris VI.
- [10] L. B. Loeb. Electrical coronas, their basic physical mechanisms. University of california press, 1965.
- [11]H. Raether. Electron avalanches and breakdown in gases. Butterworths, London, (1964) pp. 27-30.
- [12]A. Komuro and R. Ono, two-dimensional simulation of fast gas heating in an atmospheric pressure streamer discharge and humidity effects, J. Phys. D :Appl. Phys. 47 (2014) 155202.
- [13]K. Hassouni, F. Massines, and J. P. Pouvesle. Plasmas hors-équilibre à des pressions atmosphériques, Publications de l'Université de saint Etienne, (2004), pp. 49-108.
- [14]R. C. Fletcher, Phyd. Rev., 76 (1949) pp. 1501.

- [15] C. Gary, les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions, Edition Eyrolles. (1984).
- [16] J. M. Meek, 1940, Phys. Rev., Vol. 57 (1940) pp.722 – 728.
- [17] H. Raether, 1941, Zeit. Phys., 117, pp. 394-524.
- [18] A. Alyen, Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, (2009).
- [19] J. S. Chang, P. A. Lawless and T. Yamamoto, corona discharge processes, IEEE Trans. Plasma Sci. 19 (1991) pp. 1102-1166.
- [20] G. Hartmann, Spectrographie de la décharge couronne : étude des mécanismes de collisions dans le dard, (1977), Thèse Univ. Paris XI.
- [21] A. Lacoste, D. Pai, C. Laux, Ion wind effect in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air, AIAA Reno., (2004), pp. 354.
- [22] M. Goldman, R. S. Sigmond, corona insulation, IEEE Trans. Elec. Ins. EI. 12/2 (1982) pp. 90-105.
- [23] L. Dascalescu, An introduction to ionized gases, theory and applications, Toyohashi University of Technology, (1993).
- [24] B. Khaddour, Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée, Thèse de doctorat de L'INPG, France, (2006).
- [25] B. Darmane, 2006, « Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge à barrière diélectrique – étude électrique, granulométrique et aérodynamique », thèse de doctorat, Université de Poitiers.
- [26] M. Robinson, Movement of air in the electric wind of the corona discharge, AIEE Trans. Journal, 80 (1961) pp. 143- 150.
- [27] M. Smirdec, « la décharge couronne continue en milieu humide. Caractérisation des espèces produites dans une atmosphère contrôlée. Phénomènes de pollution et pouvoir dépolluant », Thèse PhD, Université de Paris VI, (1997).
- [28] M. Rezzouga, A. Tilmatine, R. Gouri, K. Medles, L. Dascalescu, « Experimental modeling of high-voltage corona discharge using design of experiments », front, electr, electron, eng, 2, pp, 139-143, 2007.

[29] M.P. Panaget, « Etude en laboratoire des effets physico-chimiques induits par les pertes de transport à haute tension », Thèse de doctorat de l'université Paris 6, 1997.

[30] K. Hamoumeche, Étude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan, Thèse de magister, UMMTO, décembre 2009.

[31] M.P. Panaget, Étude en laboratoire des effets physico-chimique induits par les Pertes électriques des lignes de transport à haute tension, Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, 1997.

[32] H .Nouri, Influence des paramètres physiques de l'air sur le précipitateur électrostatique d'aérosols, Thèse de doctorat, université de Bejaia ,2010.

Références bibliographiques chapitre 2

- [1] A. D. Moore, Electrostatic precipitators, Elsevier, Amsterdam, 1982
- [2] Commission de la production et des échanges. La pollution de l'air. Technical report, Rapport d'Information N°3088 de l'Assemblée Nationale, (2001), France, www.assembleenationale.fr/rap-info/i3088.asp, pp. 7. (2001).
- [3] W. C. Hinds. Aerosol Technology : Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. 2nd Edition, Wiley-Interscience, New-York, pp. 8-12. (1999).
- [4] W. C. Hinds. Aerosol Technology : Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. 2nd Edition, Wiley-Interscience, New-York, 1999.
- [5] Rabah Gouri Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré. Application aux particules submicroniques Thèse de Doctorat de l'Université de POITIERS, 2012.
- [6] T. B. Jones, Electromechanics of Particles, Cambridge University Press, New-York. pp. 10. (1995).
- [7] J.S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley, Handbook of Electrostatic Processes , Marcel Dekker, 24 pp. 27-101. (1995).
- [8] P. Atten, H. L. Pang & J. Podlinski, Collecte et dispersion de particules de fumée dans un électrofiltre, C. S. F. Electro., Paris & Gif-sur-Yvette, pp. 134-141. (2008).
- [9] H. J. WHITE, Industrial electrostatic precipitation, Addison Wesley Publishing Company, New York (1963).
- [10] P. A. Lawless, R. F. Altman, Espm: an advanced electrostatic precipitator model, IEEE Ind. Appl. 29 th IAS Annual Meeting Denver, pp.1519-1526.
- [11] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau, G. Touchard, Electrostatic precipitation in wire-to

cylinder configuration: Effect of the high-voltage power supply waveform, *Journal of Electrostatics*, 67 pp.117-122. (2009).

[12] M. KHALIJ, Caractérisation et modélisation de l'efficacité de filtration d'un électrofiltre de type Cottrell, Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, (2001).

13] ELEZAAR Abderrahmane «Contribution à l'étude d'un filtre d'air électrostatique »MEMOIRE de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE Université de Mascara 2017

[14] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatics*, 70 pp. 20-24. (2012).

[15] P. CONTAL, Les techniques du dépolluissage, Document de synthèse sur le dépolluissage, ESIGEC Chambéry, (1993).

[16] J.S. Chang, A.J. Kelly, and J.M. Crowley. *Handbook of Electrostatic Processes*. Marcel Dekker, pp.11-25. (1995)

[17] A. Mizuno. Electrostatic precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(5) pp. 615–624. (2000).

[18] N. Tachibana and H. Fujishima. Application of electrostatic precipitation with in termittent energization. In *Pro. International Conference on Modern Electrostatics*, pp.14. (1988).

[19] T. Yamamoto, M. Mieno, K. Shibata, and K. Sakai. Studies on rapping reentrainment from electrostatic precipitators. In *Pro. 7th International Conférence on Electrostatic Precipitation*, pp. 163–170. (1998).

[20] S. Masuda and J. D. Moon. High intensity charging device for carbon soot particles. In *Proc. 2nd International Conference on Electrostatic Precipitation*, pp. 871. (1984).

[21] I. E. Japan. *Handbook of Electrostatics*. Ohm-Pubilshing Co., 1998.

[22] S. Masuda and A. Mizuno. Light measurement of back discharge. Journal of Electrostatics, Vol. 2 pp. 375. (1976).

[23] S. Masuda and A. Mizuno. Initiation condition and mode of back discharge. Journal of Electrostatics, Vol. 4 pp. 35-52. (1977).

Références bibliographiques chapitre 3

- [1] H. Nait Ighil « Caractérisation de la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique », mémoire master, Université de Bejaia (2014).
- [2] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatic*, 70 pp. 20-24. (2012).
- [3] P. CONTAL, Les techniques du dépolluissage, Document de synthèse sur le dépolluissage, ESIGEC Chambéry, (1993).
- [4] K. Hassouni, F. Massines, and J. P. Pouvesle. Plasmas hors-équilibre à des pressions atmosphériques, Publications de l'Université de Saint Etienne, pp. 49–108. (2004).
- [5] R. C. Fletcher, *Phyd. Rev.*, 76 (1949) pp. 1501.
- [6] <http://www.indsci.fr/produits/detecteurs-multigaz/mx6/>

Références bibliographiques chapitre 4

- [1] M. Goldman, R.S. Sigmond, Corona insulation, IEEE Trans. Elec. Ins. EI. 12/2 pp. 90 – 105. (1982).
- [2] J.S. Chang, A.J. Kelly, and J.M. Crowley. Handbook of Electrostatic Processes. Marcel Dekker, pp.11-25. (1995)
- [3] K. Hassouni, F. Massines, and J. P. Pouvesle. Plasmas hors-équilibre à des pressions atmosphériques, Publications de l'Université de Saint Etienne, pp. 49–108. (2004).
- [4] R. C. Fletcher, Phyd. Rev., 76 (1949) pp. 1501.
- [5] A. Mizuno. Electrostatic precipitation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 7(5) pp. 615–624. (2000).
- [6] P. CONTAL, Les techniques du dépolluissage, Document de synthèse sur le dépolluissage, ESIGEC Chambéry, (1993).
- [7] J. P. Boeuf and L. C. Pitchford, Electrohydrodynamic force and aerodynamic flow acceleration in surface dielectric barrier discharge, Jour. Appl. Physics, 97 103307.(2005).
- [8] J. Bohm, Electrostatic Precipitators, Elsevier, Amsterdam, 1982.
- [9] N. Tachibana and H. Fujishima. Application of electrostatic precipitation with intermittent energization. In Pro. International Conférence on Modern Electrostatics, pp.14. (1988).
- [10] H. Ait Said, H. Nouri and Y Zebboudj, Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator, Journal of Electrostatic, 2015