

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Mascara

FACULTE DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Réseaux électriques et haute tension

Par

Mr ELEZAAR Abderrahmane

Thème

Contribution à l'étude d'un filtre d'air électrostatique

SOUTENU LE : 02/07/2017 DEVANT LE JURY COPOSE DE :

Mr. BENMIMOUNE Youcef	Prof, Univ de Mascara	PRESIDENT
Mr. Prof. FLAZI Samir	Prof, USTO	RAPPORTEUR
Mr. TAHOUR Youcef	Prof, Univ de Mascara	EXAMINATEUR
Mr. MERABET Boualem	MCA, Univ de mascara	EXAMINATEUR

Année universitaire 2017

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée courage, patiente et force durant tous ces années d'étude.

Je souhaite tout particulièrement exprimé ma gratitude à mon encadreur, le professeur FLAZI.S que nous remercions de la confiance qu'il nous a accordés, son encadrement, son aide et ces conseils.

Les travaux présentés dans ce projet ont été effectués au sein du Laboratoire de génie électrique d'Oran (LGEO) Un vif remerciement à tous l'équipe de laboratoire d'avoir être m'accepter pour faire les essais sans oublié leur encouragement

Je teins à exprimer ma gratitude aux membres du jury, Mr BENMIMOUNE Youcef, Mr FLAZI Samir, Mr TAHOUR Mohamed, Mr MERABET Boualem, Mme OUIS Amel, qui ont acceptés d'examiner mon travail.

Je remercie aussi tous les enseignants du département d'électrotechnique et le chef de département.

Je remercie tous les personnes ayant aidé de loin ou de près à l'élaboration de mon travail.

Table des matières

Remerciements..... I
Table des matières.....II
Liste des figures... ..VI

Introduction général

Introduction général.....1

CHAPITRE I : La pollution poussiéreuse et la décharge couronne

I.1 Introduction.....4
I.2 Evolution de la qualité de l'air dans le monde.....4
 I.2.1. Les principaux polluants atmosphériques.....5
 I.2.1.1 Combustion d'hydrocarbures.....5
 I.2.1.2 Monoxyde de carbone6
 I.2.1.3 oxydes d'azote.....6
 I.2.1.4 L'ozone8
 I.2.1.5 Le dioxyde de soufre.....9
 I.2.1.6 Composés organiques volatiles.....9
 I.2.1.7 Les particules.....9
I.3. Efficacité des différents filtres par rapport aux principaux polluants.....10
I.4 EFFET DE COURONNE.....11
 I.4.1. Phénomènes de multiplications électroniques : Phénomènes de collision.....11
 I.4.1.1. Choc élastique11
 I.4.1.2. Choc inélastique.....11
 a) Excitation atomique.....11
 b) Ionisation par choc électrique.....12

c) photon suffisamment énergétique.....	12
d) Recombinaison et attachement.....	12
I.4.2. Les différents modes de décharges couronne.....	12
I.4.2.1 Effet de couronne en tension négative.....	12
I.4.2.2 Effet de couronne en tension positive.....	13
I.4.2.3 Effet de couronne en tension alternative.....	14
I.4.3. Les facteurs influençant la décharge couronne.....	15
I.4.3.1 Facteurs géométriques.....	15
I.4.3.1.1 Rayon de la courbure.....	15
I.4.3.1.2 Distance inter-électrodes.....	15
I.4.3.1.3 La nature des électrodes.....	16
I.4.3.2. Les facteurs physico-chimiques.....	17
I.4.3.2.1 La température.....	17
I.4.3.2.2 L'humidité.....	17
I.4.3.2.3 La pression.....	17
I.4.3.2.4 La densité de l'air.....	18
I.4.3.3. Facteurs électriques.....	18
I.4.4. Décharges électriques dans les gaz.....	18
I.4.5. Seuil critique de l'effet de couronne.....	21
III. Conclusion.....	23

CHAPITRE II : Les filtres électrostatique

II.1 Introduction.....	24
II.2 Historique.....	24
II.3 Types de filtres électrostatiques.....	26
II.3.a. Electrofiltres fil-plaque.....	26
II.3.b Electrofiltre de plaque-plate.....	28
II.3.c. Electrofiltres fil-cylindre.....	28
II.3.d. Electrofiltres humides.....	29
II.3.e. Electrofiltre à deux étages.....	30
II.4 Principe de fonctionnement des électrofiltres.....	31
II.5 Bilan des forces sur une particule.....	33
II.5.1 Force de Coulomb.....	33
II.5.2 force de trainée (La formule de Stokes, la relation d'Einstein).....	33

II.6 Mécanismes de charge des particules	35
II.6.1. Charge « naturelle » par attachement des ions	36
II.6.2. Triboélectrisation	36
II.6.3. Charge par charge d'espace ionique.....	37
A. La Charge par champ	37
B. La charge par diffusion	38
C. La charge mixte	40
II.7. Vitesse de migration des particules	42
II.8. Conclusion	47

**CHAPITRE III : Réalisation d'un système de production de la pollution
et un système de traitement de la pollution.**

III.1 Introduction	48
III.2 La description du montage expérimental	49
III.3 Générateur de pollution	50
III.3.1 Conception	50
1- souffleur électrique.....	50
2- Variateur de tension (gradateur)	51
3- Une enceinte sphérique	51
4- tube en PVC	51
III.3.2 Réalisation	51
III.3.3 Mode de fonctionnement	52
III.4 Filtre électrostatique	53
III.4.1. Essai et vérification du fonctionnement de notre montage de dépollution d'air pollué	54
III.4.1 Expérience hors tension	54
III.4.2 Expérience sous tension	55
III.4.2.1 premier cas	55
III.4.2.2 deuxième cas	58
III.4.2.3 troisième cas	60

III.5 Conclusion.....61

Conclusion générale.....62

ANNEXE

Annexe 1.....64

Annexe 2.....66

Référence bibliographie

LISTE DES FIGURES :

CHAPITRE I

Figure I.1 : Mécanisme simplifié de formation des suies.....6

Figure I.2 : Mécanisme simplifié de la formation de l’ozone dans l’atmosphère sous l’influence de la présence de NO_x et de COV.....8

Figure I.3 : classification des polluants par taille et domaine d’efficacité des filtres10

Figure I.4 : Effet de couronne en tension négative.....13

Figure I.5 : Effet de couronne en tension positive.....13

Figure I.5 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la Décharge couronne [8 ,11].....15

Figure I.6 : Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes (d = 0.5cm, $\varnothing=125\mu\text{m}$, et $H_r = 5\%$) [8 ,11].....15

Figure I.7 : Schéma d’évolution de la décharge observée en fonction de la pression [8.9]...16

CHAPITRE II

Figure II.1 : Exemples de dispositifs industriels de filtration de l’air [17].....25

Figure II.2 : Type d’électrofiltre fil-plan.....27

Figure II.3 : Type d’électrofiltre fil-cylindre29

Figure II.4 : Type d’électrofiltre humide30

Figure (II.5) : Electrofiltre31

Figure II.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d’un filtre électrostatique [17]32

Figure II.3 : Variations du facteur de correction de Cunningham(équation I.3) en fonction du diamètre des particules ($T = 293 \text{ K}$ $\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$).....34

Figure II.4 : Estimation du nombre de charges élémentaires des particules pour les mécanismes de charge par champ et par diffusion dans l'air atmosphérique ($T = 293 \text{ K}$, $\varepsilon_p = 4,5$ et $ni \cdot t \sim 1014 \text{ s/m}^3$).....35

Figure II.5 : Variations de la charge des particules prédite par la relation de *Cochet* en fonction du diamètre dp ($\lambda = 0,065 \mu\text{m}$, $\varepsilon_p = 4,5$ et $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).....41

Figure II.6 : Schémas explicatif pour le mouvement d'une particule chargée et les forces qui agissent sur elle entre deux plaques parallèles.....42

Figure II.7 : Variations de la vitesse de migration théorique w_{th} en fonction de la taille des particules ($T = 293 \text{ K}$, $\lambda_g = 0.065 \mu\text{m}$, $\eta_g = 1.8 * 10^{-5} \text{ kg/m.s}$).....43

Figure II.8 : Variations de la distance du parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction de la taille des particules pour différentes valeurs de champ électrique.....45

Figure II.9 : Variations de la distance de parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction du champ électrique pour différents valeurs de diamètre de particule (en fixant la vitesse de l'écoulement $U_g=1\text{m/s}$).....45

Figure II.10 : Variations de la distance de parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction de la vitesse de l'écoulement de gaz pour différents valeurs de diamètre de particule (en fixant $E=5\text{KV}$).....46

Figure II.11 : Variations de la distance de parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction de la vitesse de l'écoulement de gaz pour différents valeurs de champ électrique (en fixant $dp=10\mu\text{m}$).....46

CHAPITRE III

Figure III.1 : Schéma du principe de dépollution d'air de particules solides en suspension par plasma froide dans notre montage	49
Figure III.2 : photographie du dispositif de générateur de pollution	50
Figure III.3 : Souffleur électrique	50
Figure III.4 : Variateur de tension.....	51
Figure III.5 : Enceinte sphérique.....	51
Figure III.6 : Tube en PVC	51
Figure III.7 : Photographie du dispositif de filtre électrostatique.....	53
Figure III.8: Photographie d'un dépôt de poussière sur la plaque hors tension avec une vitesse très réduite.....	55
Figure III.9 : Photographie d'un dépôt de poussière sur la plaque sous tension.....	56
Figure III.10 : Photographie approchée d'un dépôt de poussière sur la plaque sous tension.....	57
Figure III.11 Photographie d'un dépôt de poussière sur la plaque sous tension (tension plus élevée).....	58
Figure III.12 : Photographie d'un dépôt de la farine sur la plaque sous tension (sans arrêt l'injection de la farine).....	59
Figure III.13 : Photographie d'un dépôt de la farine (orienté ver le sol) sur la plaque sous tension.....	59
Figure III.14 : Photographie approchée d'un dépôt de poussière de la farine sur la plaque sous tension (en coupant l'injection de la farine).....	60
Figure III.15 : Photographie d'un dépôt de poussière sur les fils de la haute tension.....	60

Introduction générale

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

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

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

Dans tous les cas lors d'une telle épuration, les particules parasites que l'on souhaite éliminer se déposent sur le filtre. Le dépôt qui en résulte modifie les caractéristiques du filtre. Ce colmatage est de toute évidence nuisible au bon déroulement du processus de filtration. L'accumulation de particules tend à rendre le passage du fluide au travers de l'ensemble filtre-dépôt de plus en plus difficile et on assiste à une chute de perméabilité de l'ensemble.

Le but de la filtration étant de fixer les particules indésirables sur un collecteur, la chute de perméabilité est inévitable. La question de la filtration est de trouver un compromis convenable entre le nombre de particules que l'on souhaite capturer et la chute de perméabilité qui en résulte.

Il est alors intéressant de comprendre comment vont comporter les particules pour trouver une géométrie désirable, afin de quitter le problème de colmatage, et par la même occasion, d'augmenter la durée de vie du filtre. De ce fait, il est nécessaire de comprendre le trajet de la particule qui est le problème aigu parmi ceux rencontrés en filtration.

Ce travail a pour objectif de l'étude théorique et expérimental sur le trajet de la particule dans un filtre électrostatique.

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Nous présentons dans le premier chapitre, l'évolution de la qualité de l'air dans le monde et les principaux polluants émis naturellement ou du fait des activités humaines, puis nous donnons un aperçu général sur la décharge électrique tel que la décharge couronne et nous nous sommes intéressés particulièrement aux décharges couronne générées entre deux électrodes par l'application d'un champ électrique.

Dans le deuxième chapitre nous abordons une étude bibliographique sur les notions générales des précipitateurs électrostatiques, tel que leur principe de fonctionnement vu que les phénomènes qui interviennent sont très complexes et la physique des particules, sur le processus de charge des particules qui est fondamental pour le fonctionnement des filtres électrostatiques. Une autre étude bibliographique a été présentée dans le même chapitre, sur la vitesse de migration des particules et les différents paramètres qui influencent sur la trajectoire de celle-ci.

Dans le troisième chapitre, nous présentons deux montages que nous avons conçus et réalisés dans le laboratoire de génie électrique, le premier c'est un système créant un environnement pollué avec une certaine homogénéité qui peut produire en permanence de l'air pollué afin de tester les filtres électrostatique des laboratoires. Le deuxième montage est un filtre électrostatique multi fils-plan qui nous a permis d'étudier l'influence des différents paramètres sur la trajectoire de la particule.

I.1 Introduction

La pollution atmosphérique est un problème connu de tout temps, qui s'est développé de manière très importante depuis la première Révolution Industrielle ; on peut citer le phénomène londonien bien connu de smog ou brouillard. Après la fin de la seconde guerre mondiale, les collectivités ont commencé à s'intéresser scientifiquement au phénomène de la pollution atmosphérique. La pollution était due à un nombre indéfini d'espèces polluantes. Certains furent déterminées tôt, comme l'ozone ou les oxydes d'azotes, d'autres plus récemment, comme les particules et les composés organiques volatils.

Pour tenter de garder intacte l'atmosphère terrestre et éviter les pathologies inhérentes à la pollution atmosphérique (problèmes pulmonaires, cardiaques, rénaux ou cancéreux), les Nations-Unies ont lancé des sommets et des conférences (Rio) permettant l'établissement d'une réglementation à l'échelle planétaire (Protocole de Kyoto).

Les entreprises concernées par ces lois doivent se mettre en conformité sous peine de payer des taxes revues actuellement à la hausse. Elles ont le choix entre changer leurs procédés polluants ou traiter la pollution de l'air par des procédés usuels comme l'oxydation ou des procédés innovants comme la décharge couronne, que nous allons étudier au cours de ce chapitre.

I.2 Evolution de la qualité de l'air dans le monde

La pollution de l'air a des effets variés sur la santé et sur l'environnement ; c'est un phénomène local, continental et mondial. Le chauffage, l'évaporation des solvants et des hydrocarbures, les fumées des usines et les gaz produits par les véhicules en sont à l'origine. S'y ajoutent les émissions polluantes à l'intérieur des habitations ou des bureaux ; fumées de tabac, chauffages, cuisines par exemple, les émissions liées aux activités agricoles, à l'élevage intensif et aux phénomènes naturels (feux de forêt, activité volcanique). La pollution de l'air constitue à la fois une atteinte à la qualité de vie et à la santé, elle est aussi néfaste pour l'environnement et le climat (pluies acides, pollution photochimique, trou dans la couche d'ozone, effet de serre, ...). L'échelle géographique d'analyse des phénomènes de pollution de l'air va du très local (odeurs, effets des particules, du benzène) à l'échelle mondiale (effet de serre dû aux émissions de dioxyde de carbone), en passant par des phénomènes régionaux ou continentaux (pluies acides ou pollution photochimique, formation d'ozone). Ici, nous considérons comme pollution atmosphérique l'introduction par l'homme dans l'atmosphère et les espaces clos, directement ou indirectement, de substances ayant des conséquences 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, à provoquer des nuisances olfactives excessives[1,2].

I.2.1 Les principaux polluants atmosphériques

L'état et la population des pays développés s'intéressent à la connaissance et à la mesure des différents polluants atmosphériques depuis une cinquantaine d'années [3]. Le bilan des espèces polluantes qui suit a été établi à partir des données transmises par les associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air. Le recul est parfois encore insuffisant dans certaines agglomérations pour évaluer avec certitude son évolution ; les variations météorologiques d'une année sur l'autre sont susceptibles de provoquer des variations plus importantes de la qualité de l'air que l'évolution des émissions polluantes.

I.2.1.1 Combustion d'hydrocarbures

La combustion est une réaction chimique exothermique. Elle se produit pour un mélange d'un carburant et d'un comburant. Lorsque la combustion est complète, il en résulte du dioxyde de carbone et de l'eau. La figure 1.1 présente une suite possible de réactions entraînant la formation de suies dans un moteur à partir d'hydrocarbures. Les premiers produits de combustions formés sont CO , CO_2 , H_2 , H_2O et des espèces plus complexes issues des hydrocarbures imbrûlés. Une phase de formation de chaînes d'hydrocarbures polycycliques (HPC) précède la formation des particules. Les systèmes d'injection récents permettent d'homogénéiser la combustion en limitant les déséquilibres locaux. Il existe pourtant toujours une part d'hétérogénéité dans les chambres de combustion, ce qui se traduit par la coexistence de combustible non brûlé et d'oxygène dans la flamme [4, 5]. La combustion propre à base d'hydrocarbures n'existe pas. Les améliorations successives des moteurs depuis plus de 30 ans permettent aujourd'hui de rejeter assurément moins de CO_2 et d'optimiser les rendements, mais ils émettent toujours trop de polluants.

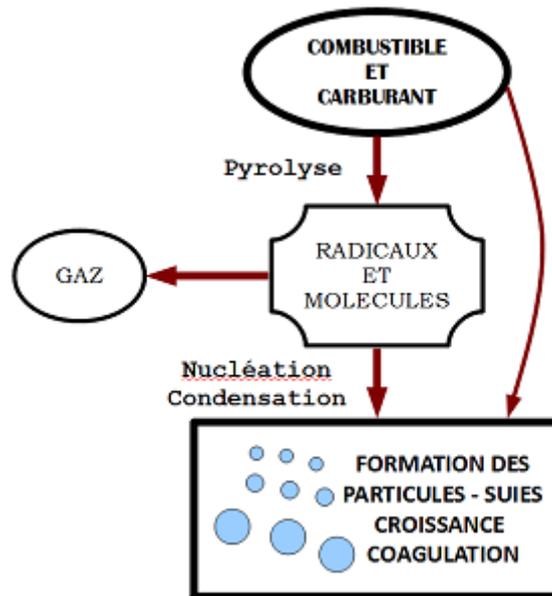


FIGURE I.1 Mécanisme simplifié de formation des suies

I.2.1.2 Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone, de formule CO , est un gaz à la fois incolore et inodore. C'est l'un des gaz les plus abondants à la sortie de la chambre de combustion des véhicules routiers. Le CO est un gaz asphyxiant qui se fixe à la place du dioxygène sur l'hémoglobine et provoque des intoxications. Quelque soit le combustible utilisé, il se forme en grande quantité lorsque la combustion est incomplète. En présence d' O_2 , il s'oxyde facilement pour donner du CO_2 , responsable majoritaire de l'accentuation rapide de l'effet de serre. Les émissions de CO sont faibles lorsque les combustions s'effectuent en mélange riche en O_2 et la totalité du CO est rejeté sous la forme CO_2 . Les catalyseurs d'oxydation transforment très bien le CO en CO_2 , mais cette efficacité est toute relative lorsque le fonctionnement est à basse température. Environ 80% du CO et des hydrocarbures (HC) sont émis lorsque le catalyseur n'est pas encore activé [4, 5].

I.2.1.3 oxydes d'azotes

De tous les oxydes d'azote existants, seuls CO et NOB_2 sont regroupés sous l'appellation « oxyde d'azote » dans la terminologie environnementale. Ces molécules sont incolores à température ambiante. CO est formé principalement dans les moteurs à combustion des véhicules et est oxydé dans l'atmosphère en CO . Le dioxyde d'azote est quatre fois plus toxique que le monoxyde d'azote, il provoque des emphysèmes pulmonaires

si l'agression est répétée. Les concentrations de dioxyde d'azote ont baissé dans la plupart des agglomérations d'environ 20% sur les dix dernières années. Les concentrations de monoxyde d'azote mesurées par les capteurs proches du trafic automobile ont baissé d'environ 30% dans la plupart des agglomérations. Ces évolutions sont à mettre en relation avec les modifications des véhicules particuliers (installation de pots catalytiques) qui constituent les principaux émetteurs de ces polluants.

Il existe différentes formes oxydées de l'azote [3.4]. La plus simple est le monoxyde d'azote NO et l'état d'oxydation le plus élevé est le pentoxyde de diazote N_2O_5 . Le trioxyde de diazote N_2O_3 et le tétraoxyde de diazote N_2O_4 sont présents à des concentrations négligeables dans l'air et sont souvent ignorés. Le N_2O_4 est un dimère diamagnétique du dioxyde d'azote NO_2 (molécule paramagnétique comme NO ou O_2). Le protoxyde d'azote N_2O est le 4e gaz le plus participatif à l'effet de serre après l'eau (H_2O , forme vapeur), le dioxyde de carbone CO_2 , et le méthane CH_4 . Le N_2O a une capacité de rétention thermique près de 300 fois supérieure à celle du CO_2 . Le NO est un gaz inodore et sans couleur, alors que le NO_2 est brun rougeâtre, et d'odeur discernable. Gaz irritants, ils pénètrent dans les plus fines ramifications des voies respiratoires, se combinent à l'hémoglobine comme le monoxyde de carbone, et provoquent une asphyxie interne. Les oxydes d'azotes sont des oxydants puissants et très toxiques même à de faibles concentrations. Outre la participation des NO_x pour la formation d'ozone, ils entrent dans la composition des pluies acides, des *smogs* (nuages de pollution) et contribuent à l'aggravation de l'effet de serre. 48% des NO_x sont émis par les transports. Considérons les 2 formes de NO_x les plus présentes dans les gaz d'échappement et à l'origine de la formation des autres formes d'oxydes d'azotes : le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO_2 . Le NO se forme dans les combustions à haute température (moteurs à explosion, fours de cimenteries, incinération des déchets, etc.) et est issu de la seule combinaison des radicaux azotes et oxygène, majoritairement présents dans l'air (comburant classique). Les oxydes d'azote sont formés, en majeure partie, lorsque la température maximale de flamme est atteinte. Près de 90% des NO_x sont émis sous la forme NO à la sortie d'un moteur. Au contact de l'air, le NO s'oxyde et se transforme en NO_2 suivant une constante de réaction plutôt lente, dépendant des conditions atmosphériques (rayonnement, humidité, température...). Les réglementations imposent une mesure globale des NO_x , comprenant à la fois le NO et le NO_2 , sans dissociation. L'utilisation de catalyseurs

d'oxydation permet dans certains cas d'oxyder près de 70% du NO en NO_2 . Mais le NO_2 aussi est un poison et c'est d'une importance majeure que de parvenir à la réduction complète des NO_x dans leur ensemble.

I.2.1.4 L'ozone

L'ozone, O_3 , est un gaz toxique bleuâtre et instable, à l'odeur très reconnaissable. Dans la stratosphère, de 19 à 30 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre il constitue la couche d'ozone. Suivant un procédé naturel, l'ozone filtre les rayons ultraviolets (UV) entrant dans l'atmosphère. En revanche, l'ozone présent dans les basses couches de l'atmosphère (troposphère) devient nocif ou toxique. Des dommages irréversibles sur les tissus de la région respiratoire et des poumons peuvent se produire si l'ozone est présent en quantité suffisamment élevée. La Figure I.2 présente les mécanismes de production d'ozone à partir de la photodissociation du NO_2 [4].

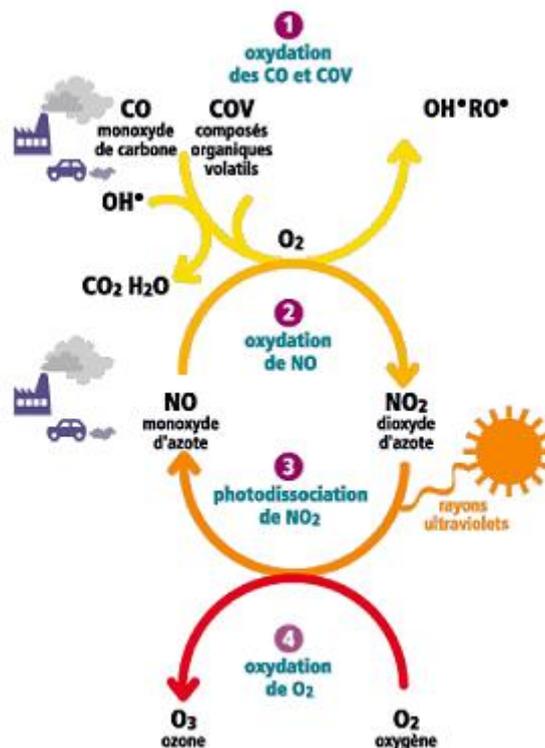


FIGURE I.2 Mécanisme simplifié de la formation de l'ozone dans l'atmosphère sous l'influence de la présence de NO_x et de COV.

I.2.1.5 Le dioxyde de soufre

Le dioxyde de soufre, SO_2 , est un gaz irritant. Il est généralement arrêté par les muqueuses. Dans certains cas, et pour certaines concentrations, il peut entraîner une gêne respiratoire, des bronchites ou même des maladies du cœur. Concernant les effets sur l'environnement, le SO_2 se transforme en acide sulfurique au contact de l'humidité de l'air et participe avec les NO_x au phénomène des pluies acides. Lors des combustions, les impuretés soufrées contenues dans le carburant réagissent avec l'oxygène de l'air pour former du dioxyde de soufre SO_2 . Depuis 2005, la réglementation et les taxes ont poussé les pétroliers à diminuer la teneur en soufre des carburants (low-sulfur diesel). Aujourd'hui les émissions de dioxydes de soufre sont globalement en accord avec les réglementations de l'Union Européenne et française. Le dioxyde de soufre pose cependant encore quelques problèmes lorsqu'il rentre en réaction avec l'eau contenue dans le gaz d'échappement. La réaction est fortement favorisée par les catalyseurs d'oxydation actuels. Les sous-produits alors formés contaminent ou détériorent les filtres et les catalyseurs, les rendant inopérants [4.6].

I.2.1.6 Composés organiques volatiles

Les composés organiques volatiles, *COV*, désignent une grande variété de substances gazeuses. Les hydrocarbures résiduels dans les échappements des véhicules y sont souvent associés. En plus des transports, ils sont issus des procédés industriels impliquant ou non l'utilisation de solvant (chimie, parachimie, colles, imprimerie, raffineries, production d'alcool, etc.). Les dangers occasionnés sont du même ordre que pour les NO_x ou SO_2 , mais les taux d'émissions dans les transports sont beaucoup plus faibles [4].

I.2.1.7 Les particules

Au sens réglementaire, une poussière est une particule dont le diamètre est inférieur ou égale 100 μ m ou dont la vitesse de chute dans l'air est inférieure ou égale 25cm/s. Les sources d'émission des particules fines (PM : particule mater) sont nombreuses : transport routière, industries, combustion du bois ... La lutte contre cette forme de pollution est toutefois plus complexe du fait de la diversité des sources à considérer (sources directes comme les transports, l'industrie, la combustion du bois... mais aussi sources indirectes, les particules pouvant se former à partir de gaz émis dans l'atmosphère).

On classe les particules solides en catégories de taille décroissante, les plus petites dites insédimentables, car incapable de se déposer au sol sous l'effet de la gravitation, possédant un

diamètre inférieur à 0,1µm. Ce sont les plus dangereuses pour la santé humaine car elles sont susceptibles de pénétrer dans les alvéoles pulmonaires. Par ailleurs, elles contaminent les plus hautes couches atmosphériques et sont donc responsables d'une pollution globale. Le problème des poussières est devenu une des préoccupations majeures qu'elles soient d'origine mécanique (broyage, concassage, transport de minéraux), ou d'origine chimique ou thermique (souvent submicronique), toutes ces poussières doivent faire l'objet de traitements appropriés selon différents procédés techniques en fonction d'autres critères industriels (encombrement, énergie consommée, simplicité, fiabilité, coût, etc.), nos travaux ne portent que sur la dépollution de l'air des particules qu'il contient, l'aspect chimique (NO_x et COV) n'étant pas abordé [4, 7].

I.3 Efficacité des différents filtres par rapport aux principaux polluants

La figure I.3 illustre trois types de filtres et l'efficacité qu'ils manifestent par rapport aux différents polluants et leurs tailles :

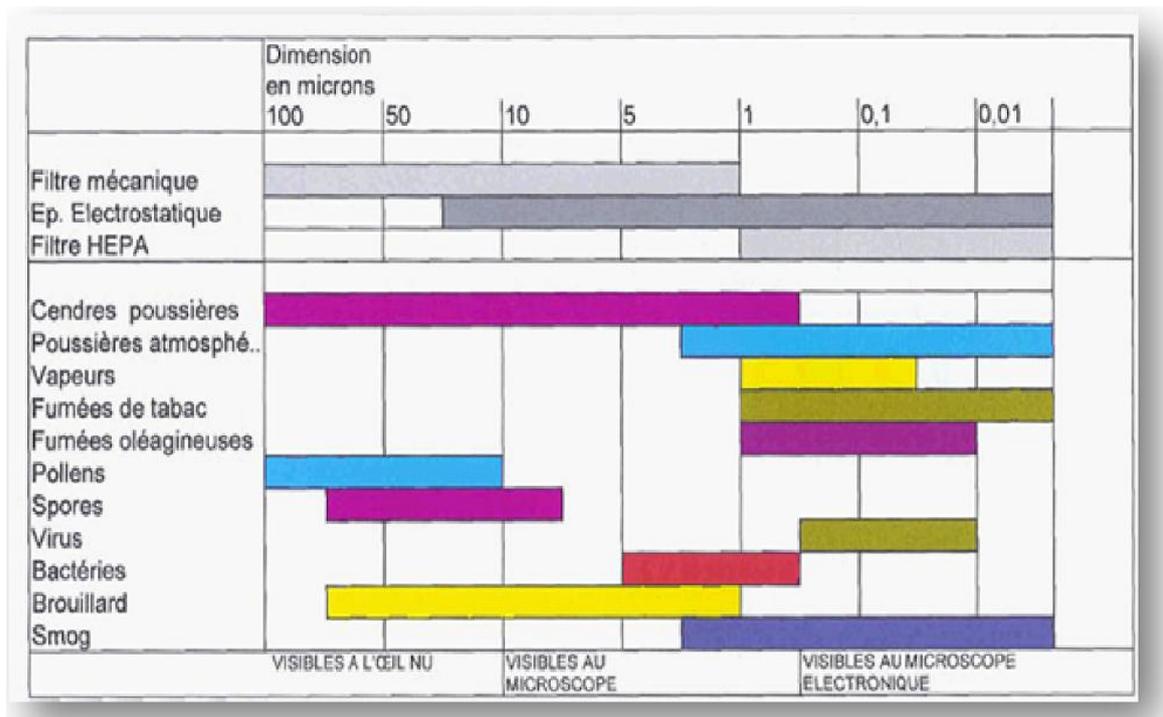


Figure I.3 classification des polluants par taille et domaine d'efficacité des filtres

D'après la classification des différents polluants le filtre mécanique peut filtrer les cendres de poussières, pollens, spores et la plage qui s'étend de 1 µm à 100 µm. Le filtre HEPA c'est un filtre fines de 0.01 µm à 1 µm comme fumées oléagineuses, virus et les smogs. Pour les filtres électrostatiques le processus de filtrations qui s'étend de 0.01 µm jusqu'à 25 µm.

I.4 Effet de couronne

Le traitement des rejets contenant des gaz et de particules potentiellement nuisible à la santé humaine et à l'environnement par plasma froid hors équilibre thermodynamique généré par décharge électrique tel que décharge couronne, luminescente, est considéré comme une alternative aux procédés classique de traitement de pollution de l'air. Le principe essentiel dans le traitement des gaz polluants par plasma froid, est que l'essentiel de l'énergie électrique est utilisé pour générer des électrons très énergétiques qui conduisent à la formation d'espèce très active tels que les radicaux, ceux-ci pour la décomposition des molécules polluantes ou à leur réduction et non au chauffage du milieu.

Pour le traitement d'air de pollution particulaire, un procédé électrostatique est utilisé basé sur la charge des particules puis leur déplacement sous l'effet de forces électriques vers les parois de collection de la pollution.

I.4.1 Phénomènes de multiplications électroniques : 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 [8.9].

I.4.1.1 Choc élastique

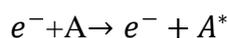
Dans ce cas les atomes conservent la même structure interne, seule leur vitesse est accrue. L'énergie du système reste inchangée.

I.4.1.2 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.

a) Excitation atomique : un atome neutre peut être excité par collision avec un électron ou bien par absorption d'un photon [8].

- Excitation par collision avec un électron



- Excitation par absorption d'un photon

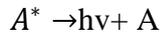


Avec :

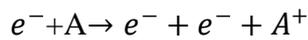
h : Constante de Planck « $h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ J. s »,

ν : Fréquence du photon « Hz », $h\nu$: Énergie du photon « J »,

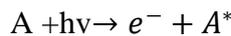
Lorsque l'atome excité revient à son état initial, un photon est émis, c'est ce processus qui intervient dans l'effet couronne et qui est responsable des effets lumineux :



b) Ionisation par choc électrique : ce phénomène est régi par l'équation suivante

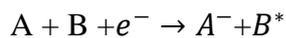
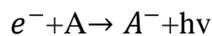


c) photon suffisamment énergétique

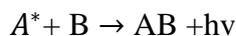


d) Recombinaison et attachement : les processus conduisant à la diminution du nombre d'électrons libres dans un gaz ionisé peuvent être de deux types : attachement ou recombinaison.

• L'attachement :



• La recombinaison :



I.4.2 Les différents modes de décharges couronne

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

I.4.2.1 Effet de couronne en tension négative

Les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques sont repoussés par la cathode vers la zone de champ électrique plus faible tel qu'illustré à la Figure (Figure I.4.a). Ceux-ci se recombinent rapidement avec les molécules neutres et forment des ions négatifs (Figure I.4.b). Pendant ce temps, les ions positifs créés lors des avalanches électroniques s'approchent de la cathode dans la zone de champ intense (Figure I.4.c). Ils sont captés avant que les ions négatifs ne s'éloignent suffisamment de la cathode pour ne plus modifier le champ électrique dans la zone active. Les ions négatifs forment alors la charge d'espace négative (Figure I.4.d).

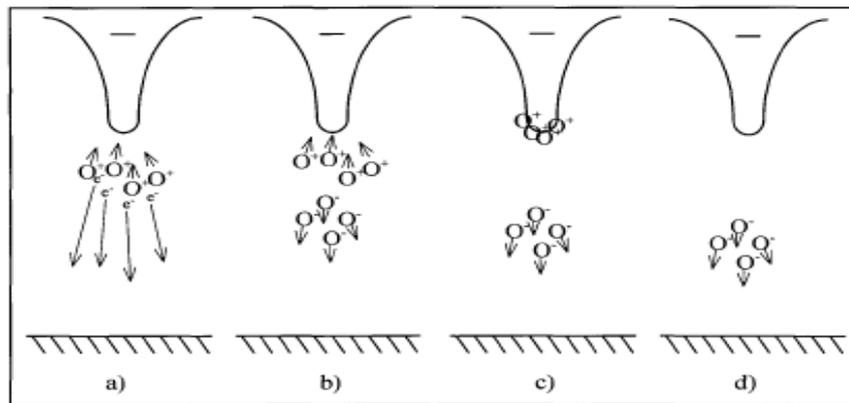


Figure I.4 Effet de couronne en tension négative.

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

I.4.2.2 Effet de couronne en tension positive

En tension positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense tel qu'illustré à la Figure I.5.a.

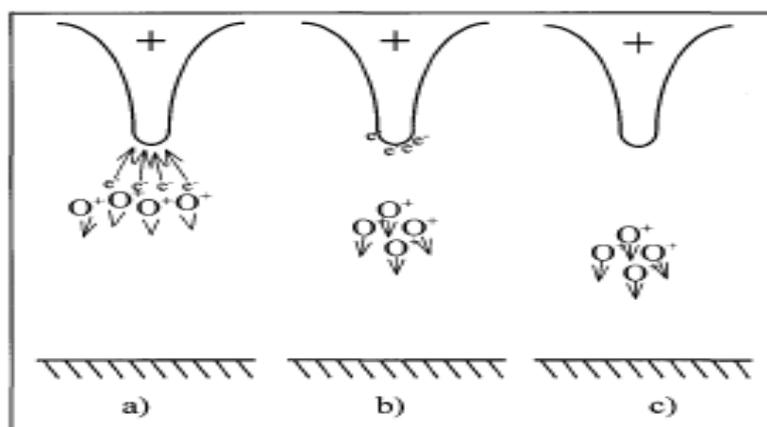


Figure I.5 Effet de couronne en tension positive

Ils sont rapidement captés par l'anode, ce qui a pour effet de laisser dans l'espace entre les électrodes les ions positifs, autre produit des avalanches électroniques (Figure I.5.b). Les ions positifs sont plus lourds et, par le fait même, plus lents que les électrons. Ces ions positifs forment la charge d'espace positive qui se déplace vers la cathode, où le champ électrique est moins intense (Figure I.5.c).

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

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

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

I.4.2.3 Effet de couronne en tension alternative

Il est physiquement possible de voir apparaître, en tension alternative, tous les modes de décharge couronne en tension continue. Les alternances positives et négatives peuvent donner lieu à leurs modes de décharge respectifs. Cependant, il faut considérer le temps d'évacuation des charges d'espace formées pendant une alternance pour prévoir les modes qui seront possibles pendant l'alternance suivante. La distance entre les électrodes ainsi que le gradient de tension déterminent le temps de migration des ions et, par le fait même, leur effet sur les décharges. Si les ions n'ont pas le temps d'être évacués avant le changement de polarité de la tension appliquée, ceux-ci réduiront le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante. Donc, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continue.

I.4.3 Les facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [10], on distingue trois facteurs essentiels :

Facteurs géométriques.

Facteurs physico-chimiques.

Facteurs électriques.

I.4.3.1 Facteurs géométriques

I.4.3.1.1 Rayon de la courbure

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

I.4.3.1.2 Distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la Figure I.6. Il apparaît clairement que le courant est plus important et croît plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites [8,11].

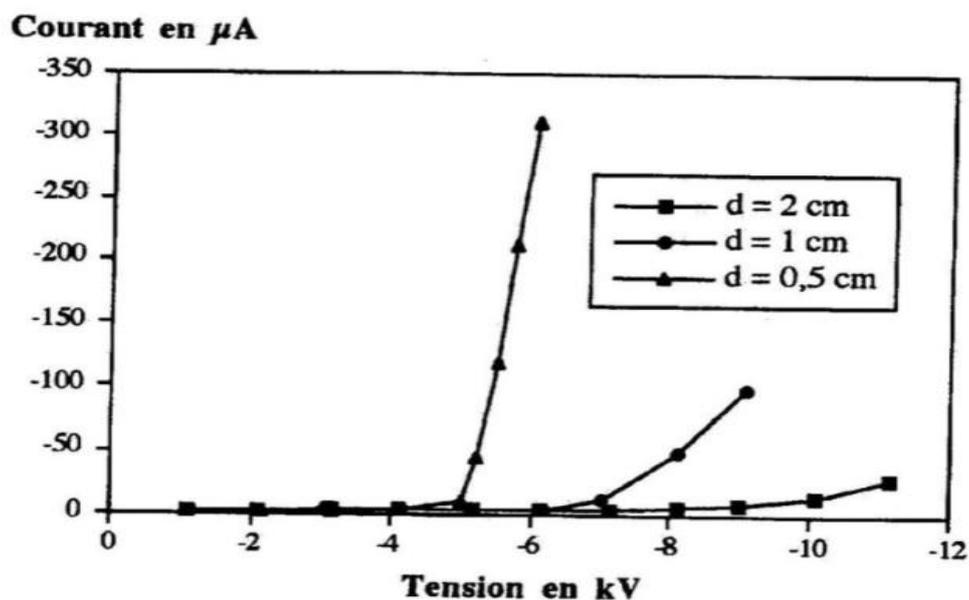


Figure I.6 Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [8 ,11].

I.4.3.1.3 La nature des électrodes

La caractéristique courant-tension est représentée selon la nature des électrodes (cuivre, aluminium, et acier) sur la Figure I.7.

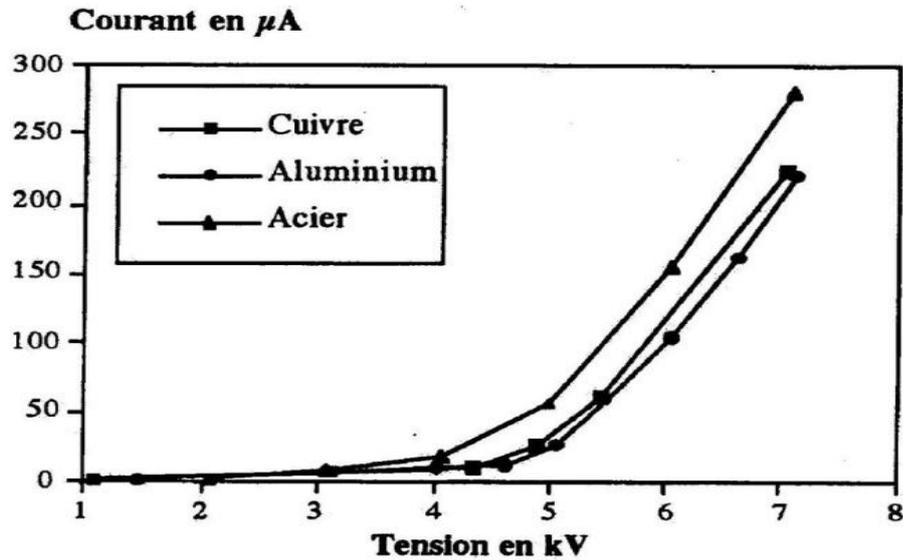


Figure I.7 Caractéristique courant-tension selon la nature des électrodes ($d = 0.5\text{cm}$, $\phi = 125\mu\text{m}$, et $H_r = 5\%$) [8 ,11].

La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique comme le montre le tableau I.1 [8,11].

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

Tableau I.1 Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative ($K_H=5\%$, $\phi_{fil} 125\mu\text{m}$).

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

I.4.3.2 Les facteurs physico-chimiques

I.4.3.2.1 La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [8,12]. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit «pd» [8.9].

I.4.3.2.2 L'humidité

L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation [8,12]. Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [8,12]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.

I.4.3.2.3 La pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La Figure I.8 montre l'effet de la pression sur la décharge.

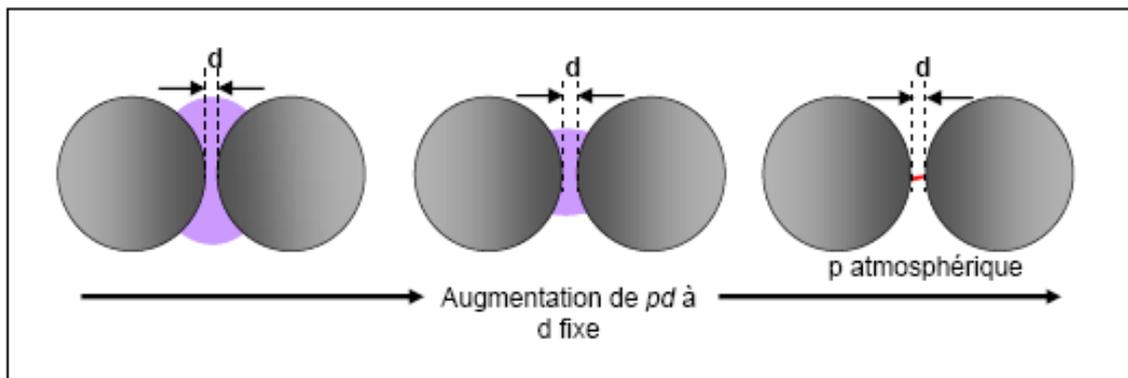


Figure I.8 Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression [8.9].

I.4.3.2.4 La densité de l'air

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

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

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta}$$

Avec :

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

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

I.4.3.3 Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative. Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente.

I.4.4 Décharges électriques dans les gaz

Les ions ou les électrons dans le gaz soumis à un champ électrique ont un mouvement superposé d'agitation thermique et de translation moyenne parallèle au champ ; la direction de ce mouvement dépend du signe de la charge et la vitesse de migration d'un ion v_i est proportionnelle au champ électrique E et à la mobilité des porteurs de charge [13]:

$$v_i = K_i \cdot E \quad v_e = K_e \cdot E \quad \text{(I-1)}$$

K_i est la mobilité des ions et K_e celle des électrons. La vitesse de migration des ions est petite par rapport à la vitesse d'agitation thermique. Malgré l'action du champ électrique extérieur, l'énergie cinétique reste pour l'ion pratiquement égale à l'énergie cinétique d'agitation thermique. En effet à chaque choc, l'ion échange de l'énergie cinétique avec les molécules neutres ou avec les autres ions; il n'acquiert pas d'énergie cinétique supplémentaire. Au contraire, pour un électron, les chocs élastiques avec les molécules n'entraînent que de très faibles échanges d'énergie cinétique; malgré ces chocs l'électron peut donc acquérir une énergie cinétique beaucoup plus grande que l'énergie d'agitation thermique. Dans un gaz qui

est soumis à un champ électrique extérieur, seuls les électrons reçoivent assez d'énergie pour ioniser les atomes ou les molécules. Les électrons libres qui circulent dans certains gaz peuvent être capturés par les atomes ou les molécules et forment des ions négatifs. Les électrons accélérés par un champ électrique extérieur suffisamment élevé accumulent une énergie suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres lors de chocs inélastiques.

Considérons l'émission photoélectrique d'électrons à partir d'une cathode sous l'action d'un faisceau lumineux; les deux électrodes se trouvent dans une enceinte remplie par un gaz sous une pression de quelques millimètres de mercure. Soit n_0 le nombre des électrons émis par la cathode, ce qui correspond à un courant I_0 , et n le nombre d'électrons reçus par l'anode, (courant I). L'expérience montre que :

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(\alpha \cdot x) \quad \text{(I-2)}$$

Où x représente la distance entre les électrodes et α est le coefficient d'ionisation. Donc les électrons se multiplient selon la loi $n = n_0 \cdot \exp(\alpha \cdot x)$ et il en résulte que $\frac{dn}{dx} = \alpha \times n$. En se déplaçant de dx dans le sens du champ, un électron produit donc $\alpha \cdot dx$ électrons. Le nombre d'électrons créés par un électron donné, dans un champ donné, est donc proportionnel à la distance dx parcourue par cet électron parallèlement au champ et au coefficient α qui est une constante qui ne dépend pas du nombre d'électrons. On peut dire que chaque électron primaire est à l'origine d'une avalanche électronique à multiplication exponentielle [13].

Considérons le cas d'un champ électrique fortement divergent, comme par exemple, dans une configuration pointe-plan. L'intensité du champ est très élevée au voisinage de la pointe et décroît rapidement vers la plaque. A mesure que les électrons s'éloignent de la pointe cathode, l'énergie cinétique acquise par ceux-ci entre deux collisions successives diminue. Les phénomènes d'ionisation par chocs deviennent rares. De plus, une certaine proportion d'électrons libres disparaît par les mécanismes de recombinaison et d'attachement électronique. Une charge d'espace ionique se forme alors dans cette zone, ce qui conduit à une baisse de l'intensité du champ électrique sur la pointe ; la région située au voisinage de la pointe constitue la zone active, là où l'ionisation de l'air est très importante; on dit qu'une décharge électrique se produit dans cette région.

L'évolution spatiale de la décharge est une fonction de la nature du gaz, de l'importance relative des mécanismes d'ionisation et d'attachement ainsi que de la densité d'électrons primaires présents dans le gaz. La théorie de Townsend [13] montre que le nombre des chocs ionisants par unité de longueur, pour une espèce moléculaire donnée, est caractérisé par le premier coefficient de Townsend α . Ce coefficient d'ionisation α inclut l'ionisation par chocs d'électrons, attachement et détachement. La valeur de α dépend du champ électrique, de la nature et de la pression du gaz. Les gaz rares sont très faciles à ioniser. Si le gaz est électronégatif il se produit un attachement des électrons, ce qui implique une réduction de α . Dans le cas des gaz poly-atomiques, les électrons perdent beaucoup d'énergie dans les chocs avec les molécules et α est plus faible.

Lorsque la pression est très grande, l'électron acquiert difficilement de l'énergie, les chocs avec les molécules étant très nombreux. Si la pression est très faible, l'électron acquiert une grande énergie mais ne rencontre pas beaucoup de molécules. Dans les deux cas, forte ou faible pression, le coefficient d'ionisation α a une valeur faible. Le champ électrique a l'influence la plus importante sur la valeur de α , une relation approchée entre α et E qui caractérise bien le phénomène d'ionisation [13.14] est :

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot \exp\left(-B \cdot \frac{p}{E}\right) \quad (\text{I-3})$$

Où A et B sont des constantes et p est la pression du gaz.

D'après la théorie de Townsend, des électrons primaires situés au voisinage de la pointe sont indispensables pour l'apparition d'une décharge. Cependant, il existe certains mécanismes qui permettent de générer quelques électrons initiaux à la surface de la pointe : le bombardement par les ions positifs, les photons incidents émis lors de la recombinaison ion-électron, etc... Les électrons issus de la pointe vont être à l'origine d'avalanches électroniques de la même façon que les électrons naturels. Cette émission d'électrons libres, appelée émission secondaire, détermine donc une augmentation du courant électrique à travers le gaz. S'il existe un champ électrique suffisamment important, un électron libre dans le gaz se multiplie. A partir de l'électron initial, le nombre d'électrons créés par l'avalanche entière est inférieur ou égal à $\exp(\alpha \cdot d)$, où d est la distance entre les deux électrodes. On atteint la limite $\exp(\alpha \cdot d)$ lorsque l'électron initial part de la cathode. Chaque électron a γ chances d'être régénéré par les mécanismes secondaires. Γ est le deuxième coefficient qui intervient dans la théorie de Townsend. Si $\gamma \cdot \exp(\alpha \cdot d) > 1$, il est possible que le phénomène s'amplifie

indéfiniment [13]. Au contraire, si $\gamma \exp(\alpha.d) < 1$, il est impossible qu'il y ait multiplication indéfinie de l'électron. On peut dire que la condition nécessaire mais non suffisante pour qu'une décharge électrique soit auto-entretenu est la suivante :

$$\gamma \exp(\alpha.d) > 1 \quad \text{(I-4)}$$

Cette relation est valable lorsque le champ électrique est uniforme; dans ce cas le coefficient d'ionisation α ne dépend pas de la position par rapport aux électrodes et la condition $\gamma \exp(\alpha.d) > 1$ se réduit en fait à une condition du potentiel appliqué à la cathode : lorsque ce potentiel est supérieur à une valeur seuil appelée potentiel disruptif local $R_S V$, il est possible que la décharge électrique soit auto-entretenu. Pour un champ électrique divergeant (système pointe-plan), la condition d'apparition d'une décharge électrique n'est plus donnée par la relation (I-5). D'après Felici [13] pour un champ non uniforme la condition d'amorçage d'une décharge autoentretenu est :

$$\int \alpha(x).dx > \log\left(\frac{1}{\gamma}\right) \quad \text{(I-5)}$$

Ainsi l'ionisation fait intervenir non seulement le champ à la surface des électrodes mais aussi le champ dans le volume de l'isolant. La condition d'existence d'une décharge auto entretenu est en effet que le champ soit suffisamment grand sur une certaine longueur.

I.4.5 Seuil critique de l'effet de couronne

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique d'effet de couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat.

Selon *F.W. Peek*, pour une configuration cylindrique, l'apparition de l'effet de couronne est fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur, et de la densité de l'air [15].

$$E_c = E_p \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta R_0}} \right) \quad \text{(I-6)}$$

Où: $E_p = 31 \text{ kV/cm}$, $K = 0,308$

δ = densité relative de l'air

($\delta = 1$ pour $P = 76 \text{ cm Hg}$ et $t = 25^\circ$) t = température en $^\circ\text{C}$, p = pression de l'air en cm Hg

R_0 = rayon du conducteur en cm

E_c = champ critique en kV/cm

La formule (1-6) reliée à l'effet de couronne montre un effet non négligeable de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne. En effet, à pression constante, pour une température qui varie entre 0° et 60° C on obtient un champ critique différent soit: **44,18 kV/cm** pour 0° C et **37,87 kV/cm** pour 60° C. Ainsi l'effet de couronne apparaît à une tension plus faible lorsque la température augmente.

Il est à noter que l'état de surface du conducteur est très important dans la détermination du champ électrique. La relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies. La rugosité superficielle diminue le champ critique, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental m , appelé coefficient de surface. Alors le champ critique d'un conducteur imparfaitement poli s'exprime sous la forme [15].

$$E_0 = mE_c \quad \text{(I-7)}$$

I.5 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude bibliographique sur l'évolution de la qualité de l'air dans le monde et les principaux polluants gazeux. Le traitement par plasma froid permet une consommation énergétique bien inférieure aux traitements par oxydation thermique ou catalytique, en effet on a cité les décharges électriques dans le cas général et nous nous sommes intéressés particulièrement aux décharges couronne générées entre deux électrodes par l'application d'un champ électrique. Nous avons décrit les différents mécanismes à l'origine de la formation et de la propagation de ce type de décharge. L'ensemble de ces phénomènes intervient dans le fonctionnement des filtres électrostatiques, qui vont être présentés dans le chapitre suivant.

II.1 Introduction

Les électrofiltres existent depuis plus de 140 ans. Ils ne sont passés du statut de « boîte noire » au statut de procédé physiquement maîtrisé qu'il y a peu, avec l'apparition des méthodes de calcul numérique. Les électrofiltres ont en effet longtemps été victimes de leur très bonne efficacité et de leur complexité physique. Permettant des abattements sur les particules de toutes tailles remarquables et dimensionnés à l'aide de formules relativement simple, les électrofiltres se sont longtemps contentés de bien marcher et les améliorations effectuées ont été majoritairement d'ordre pratique : design des électrodes, système de nettoyage des plaques collectrices et amélioration du rendement des alimentations électriques. Aborder le fonctionnement des électrofiltres requiert des connaissances diverses et poussées : mécanique des fluides, électrostatique, physique des particules, voire génie électrique.

II.2 Historique

Le principe de fonctionnement de l'électrofiltre est connue depuis 1820 [16], mais la première application industrielle connue d'électrofiltre remonte à début 1880 et a été utilisée presque simultanément en Allemagne et en Angleterre. A cette époque la haute tension est produite par friction de diélectriques et stockée dans des bouteilles de Leyde (condensateur primitif) ou par des bobines de Ruhmkorff. Les isolants naturels utilisés (bakélite, mica, verre) ne permettent pas de travailler à des tensions dépassant 10-15 kV. Les premiers électrofiltres ne sont installés que lorsque la valeur marchande des particules récupérées (fumées d'acide sulfurique, fumées d'oxydes métalliques) justifie leur construction, au-delà de toute considération environnementale. Des efficacités de collecte de 90-95% sont donc largement suffisantes, la quantité restante coûtant trop cher à précipiter. Comme aucune législation contre les rejets gazeux n'est en vigueur, la situation n'évoluera que dans les cas de pollutions extrêmes (cimenteries et fours à plomb). On s'aperçoit rapidement de l'intérêt économique d'avoir les plus grands espaces inter-électrodes possibles, malgré les difficultés à produire des très hauts voltages. Les électrofiltres industriels ont donc historiquement des dimensions gigantesques, d'autant plus importantes que le gaz circule à très faible vitesse (1,5 à 1,8 m/s). Les puissances volumiques de travail de l'époque (1919) sont de l'ordre de 0,3 J/L pour les cimenteries et de l'ordre de 1 J/L globalement [11]. Un grand pas en avant a été réalisé lorsque Walter Deustch mis au point la relation théorique liant l'efficacité de filtration, le débit traité et la surface collectrice (1922). Cette relation est alors utilisée pendant 50 ans par les ingénieurs, puis modifiée par Matts et Ohnfeldt pour être un peu plus réaliste. Enfin à

titre anecdotique, des applications de précipitation électrostatique sont à l'étude pour l'abattement des brouillards naturels (Uchiyama, 1995, cité par [9]) dans les zones de transports routiers ou maritimes denses.

De nombreuses techniques de filtration de l'air destinées à répondre au problème croissant de la pollution atmosphérique ont été mises au point, notamment pour le secteur industriel. On regroupe les dispositifs qui les utilisent en quatre catégories (figure II.1) [17].

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

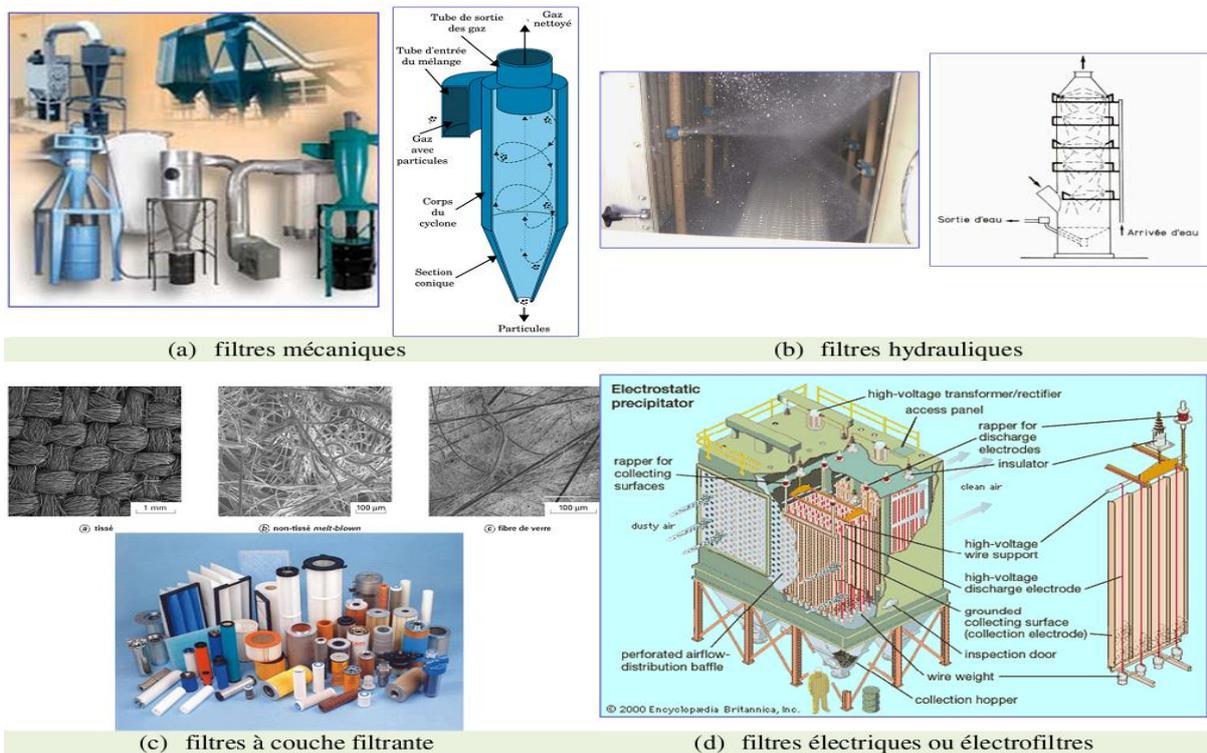


Figure II.1 Exemples de dispositifs industriels de filtration de l'air [17].

II.3 Types de filtres électrostatiques

Les filtres électrostatiques sont configurés de plusieurs manières. Certaines de ces configurations ont été développées pour l'action spéciale de commande et d'autres ont évolué pour des raisons économiques. Les types qui seront décrits ici sont :

- Précipitateurs fil-plaque.
- Précipitateurs plaque-plaque.
- Précipitateurs tubulaire.
- Précipitateurs humide, qui peut avoir l'une des configurations mécaniques précédentes.
- Précipitateurs à deux étages.

II.3.a. Electrofiltre fil-plaque

Les électrofiltres fil-plaque sont employés dans une grande d'applications industrielles, y compris les chaudières à charbon, les fours à ciment et le pétrole raffiné, les usines d'agglomération, les fours à l'oxygène, les fours électriques à arc, les batteries de four à coke et les fours des verres.

Dans un électrofiltre fil-plaque les électrodes de dépôt sont des plaques parallèles et équidistantes et le gaz est ionisé à partir d'électrodes ionisantes situées dans les plans verticaux à mi-distance entre les plaques (figure II.2). En général, les électrodes de collecte sont soumises périodiquement au frappe, ce qui permet de décoller les agrégats afin de les retenir dans les bacs spéciaux placés dans la partie inférieure du filtre. Les précipitateurs industriels, ayant des longueurs de plusieurs dizaines de mètres, sont divisés en plusieurs segments nommés champs. Chaque champ a sa propre alimentation électrique, indépendante des autres parties du filtre ; cela permet l'adaptation des conditions électriques en fonction de la taille et de la concentration des particules dans chaque champ [11.21].

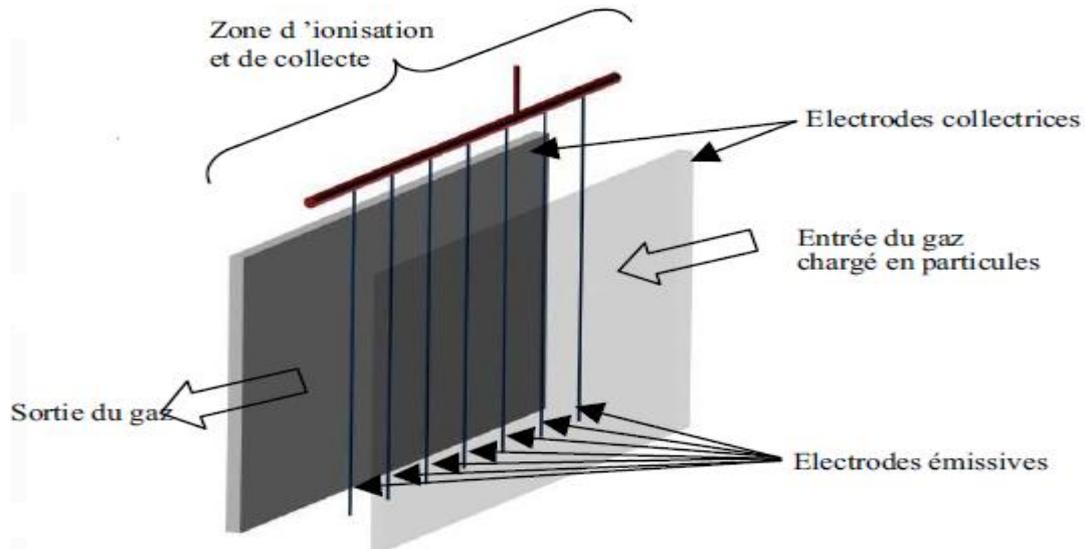


Figure II.2 Type d'électrofiltre fil-plan.

Les électrofiltres fil-plaque permettent à beaucoup de ruelles d'écoulement fonctionner en parallèle et chaque ruelle peut être tout à fait grande. En conséquence, ce type de précipitateur est bien adapté pour manipuler de grands volumes de gaz. Le besoin de frapper les plaques de collecte pour déloger la poussière rassemblée sur les plaques d'être divisé en sections, souvent trois ou quatre en série entre eux, qui peuvent être indépendamment frappés.

Les alimentations d'énergie pour les électrofiltres et obtenue par la conversion de la tension CA (220/380V) industriel à la tension CC dans la gamme de 20 à 1000 kV.

La tension appliquée aux électrodes cause le claquage électrique de l'air entre les électrodes, une action connue sous le nom de « décharge couronne ». Les électrodes habituellement sont données une polarité négative parce qu'une décharge couronne négative soutient une tension plus élevée que la décharge couronne positive avant le claquage et le passage en régime d'arc. Les ions produits dans la décharge couronne suivent des lignes de champ électrique des fils aux plaques de collecte. Par conséquent, chaque fil établit une zone de remplissage par laquelle les particules doivent passer [11]. Les particules passant par la zone de remplissage interceptent certains ions, qui deviennent attachés. Les petites particules d'aérosol peuvent absorber des dizaines d'ions avant que leur charge totale devienne assez grande pour repousser d'autres ions et les grandes particules peuvent absorber des dizaines de milliers. Les forces électriques sont donc beaucoup plus fortes sur les grandes particules.

II.3.b. Electrofiltre de plaque-plaque

Un nombre significatif de plus petits précipitateurs emploient de plaques au lieu des fils pour les électrodes hautes tension. Les plaques augmentent le champ électrique moyen qui peut être employé pour collecter les particules et elles fournissent une superficie accrue pour la collection des particules. La décharge couronne ne peut pas être produite sur des plaques par elle-même, ainsi les électrodes qui produisant la décharge couronne sont placées en avant et parfois derrière la plaque plate. Ces électrodes peuvent être les aiguilles pointu-aigues attachées aux bords des plaques (électrode émissive) ou des fils indépendants. A la différence des autres ESP, cette conception fonctionne également bien avec la polarité négative ou positive. Le fabricant a choisi d'employer la polarité positive pour réduire la génération de l'ozone.

Un électrofiltre de plaque plaque fonctionne avec peu ou pas de courant de décharge couronne traversant la poussière collectée, excepté directement sous les aiguilles ou les fils de décharge couronne. Ceci a deux conséquences. Le premier est que l'unité est légèrement moins susceptible de la corona arrière que les unités conventionnelles sont place qu'aucune corona arrière n'est produite dans la poussière collectée et les particules chargées des deux polarités des ions ont des surfaces de grandes collections disponibles. La deuxième conséquence est que le manque de courant dans la couche collectée cause une force électrique qui tend à enlever la couche de la surface de collecte ; ceci peut mener aux pertes de frappe élevées [11.20].

II.3.c. Electrofiltres fil-cylindre

Dans le cas des électrofiltres fil-cylindre, l'électrode ionisante est tendue le long de l'axe du cylindre placé verticalement (Figure II.3). Classiquement, le dépôt de particules formé sur la face intérieure de cylindre est nettoyé par intermédiaire d'un système de frappe. Ainsi, les agglomérats se détachent et sous l'intérieure de la gravité, ils tombent dans les trémies dans la partie inférieure du filtre. C'est pour cette raison que ce type de filtre électrostatique est fréquemment utilisé pour enlever de particules liquides, divers acides, huiles, le goudron, etc. [11].

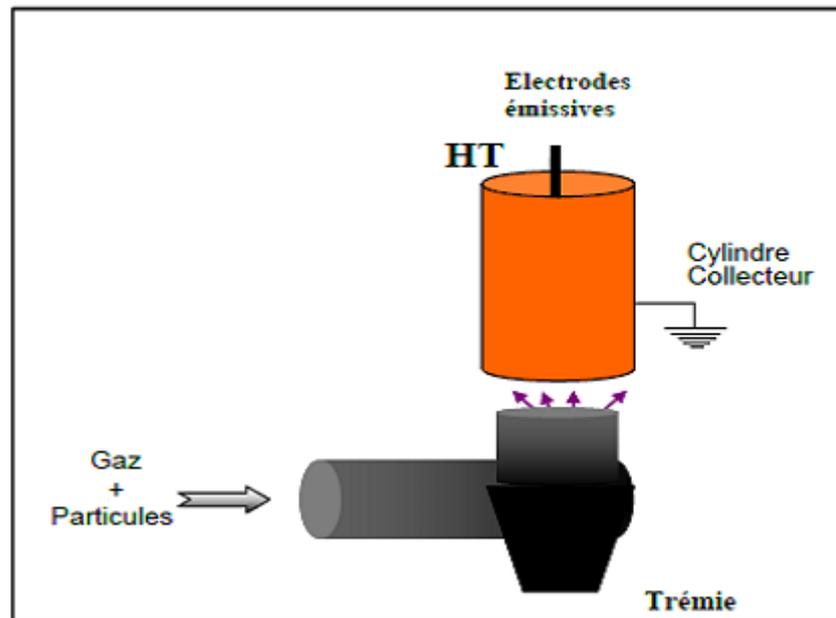


Figure II.3 Type d'électrofiltre fil-cylindre

II.3.d. Electrofiltres humides

Pour les précipitateurs usuels, il existe une valeur de la résistivité des particules au-delà de laquelle les performances de séparation sont terriblement dégradées ; une possibilité consiste alors à utiliser des électrofiltres dits humides. En comparaison avec les électrofiltres classiques, ceux humides utilisent plus un film d'eau pour enlever le dépôt sur les surfaces des électrodes de collecte. La réalisation technique est beaucoup plus compliquée, car dans ce cas, il est nécessaire d'ajouter un système de pompage et de distribution d'eau sur les électrodes de dépôt. En plus, l'effluent à traiter est au préalable saturé en vapeur d'eau ce qui demande une très bonne régulation du courant à travers l'espace inter-électrodes afin d'éviter des courts-circuits. Tout ceci conduit à des coûts d'investissement et à des dépenses d'énergie très élevés par rapport aux filtres secs. Malgré ces inconvénients, les électrofiltres humides sont présents dans certaines applications pratiques en raison de quelques Avantages, parmi lesquels les plus importantes sont [11]

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

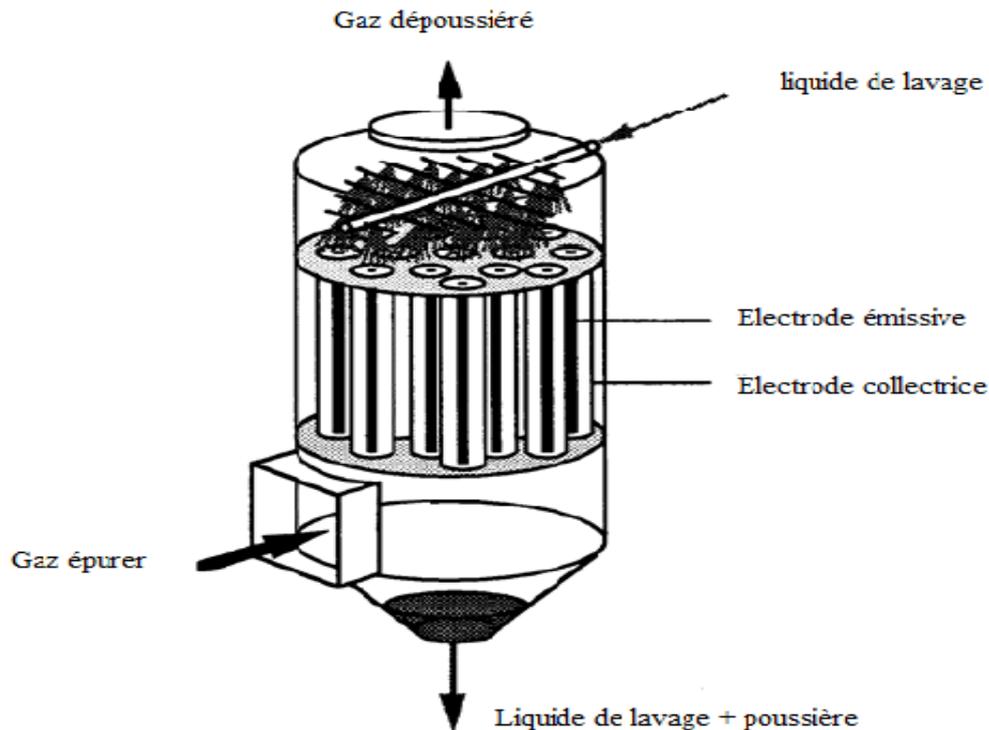


Figure II.4 Type d'électrofiltre humide

II.3.e. Electrofiltre à deux étages

Les filtres électrostatiques à deux étages ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement pour la filtration de l'air ambiant dans certains bâtiments et halles des productions. Les deux sections d'un tel filtre sont alimentées séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de tension ainsi que des câblages électriques séparés. Le premier étage, nommé ioniseur, comporte des électrodes de décharge en forme de fil ou de tube. Les électrodes de collecte peuvent être soit des plaques parallèles et équidistantes, soit des cylindres coaxiaux. La figure (II.5) présente une vue schématique d'un précipitateur à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme des plaques. Les électrodes couronne sont portées à un potentiel électrique de polarité positive [11]

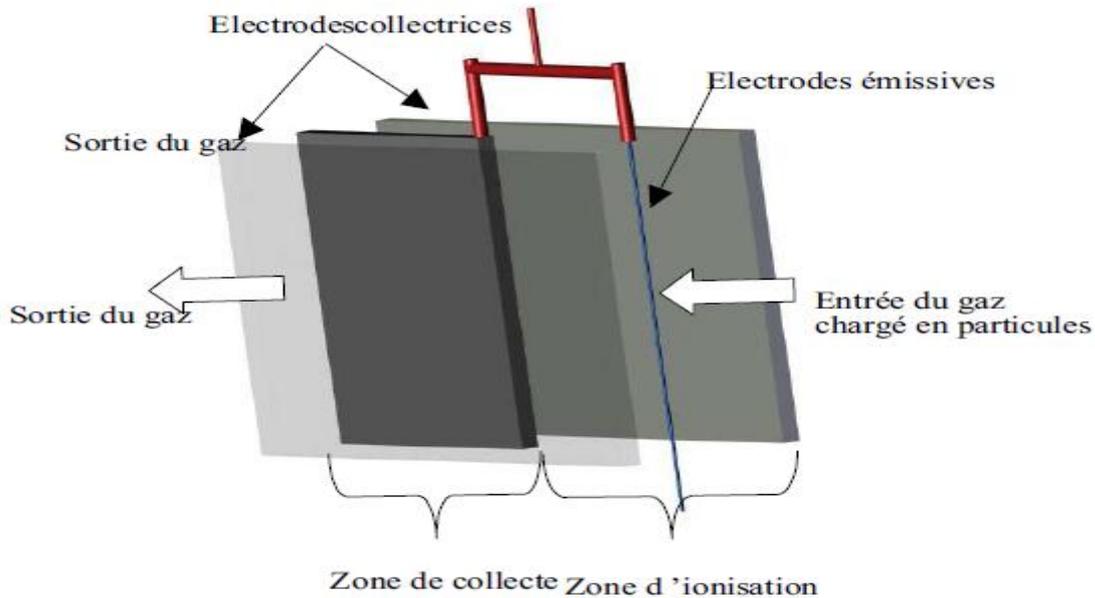


Figure II.5 Electrofiltre

II.4 Principe de fonctionnement des électrofiltres

Le filtre électrostatique est un dispositif dans lequel les forces électrostatiques piègent les particules contenues dans un gaz. Il est constitué d'un ensemble d'électrodes actives et d'électrodes de collecte et peut être de géométrie plane ou cylindrique. La décharge générée au sein de ce dispositif, souvent maintenue à un fort potentiel négatif, produit des ions, par attachement des électrons libres aux molécules du gaz. Lors de collisions de ces ions avec des particules, ces dernières se chargent.

Afin d'expliquer le principe de fonctionnement d'un électrofiltre, prenons l'exemple d'un précipitateur électrostatique industriel de géométrie cylindrique (figure II.6) [17]. Il est constitué d'un cylindre métallique disposé verticalement (l'électrode de collecte) et d'un fil suspendu le long de l'axe central du cylindre (l'électrode active). L'électrode active est reliée à la haute tension continue tandis que l'électrode de collecte est reliée à la masse.

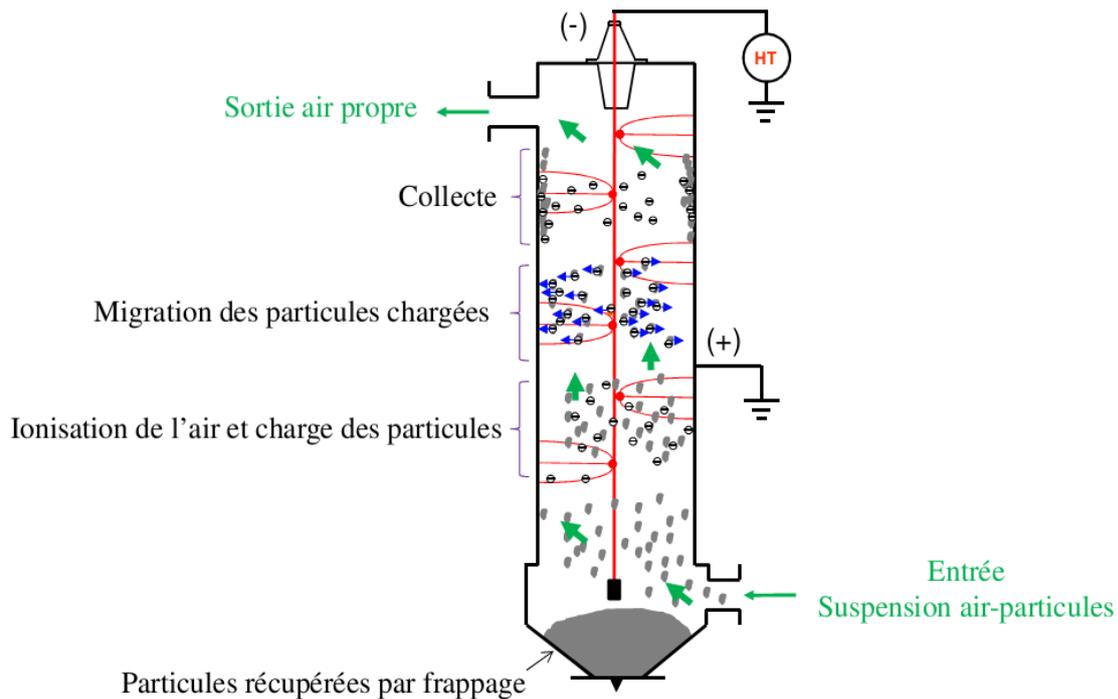


Figure II.6 Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique [17]

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

II.5 Bilan des forces sur une particule

Le bilan des forces s'appliquant à une particule plongée dans un fluide est le suivant :

$$\sum \text{forces} = \text{masse} \cdot \text{accélération}$$

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

Dans la plupart des cas de résolution de la trajectoire des particules, seules les forces de Coulomb et la force de traînée sont prises en compte. En effet les forces gravitaires peuvent être considérées comme négligeables pour les particules submicroniques, étant donné les échelles de temps observées dans les électrofiltres (au plus quelques secondes de temps de séjour). De plus, les forces à courte portée (Van der Waals, force image, force de dipôle) sont très faibles et influent très peu sur la trajectoire des particules dans l'espace inter électrodes, qui est infiniment plus grand que l'ordre de grandeur de la portée de ces forces [12].

II.5.1. 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 E , les particules ayant acquis une charge électrique q subissent la force de Coulomb F_e proportionnelle à la charge :

$$F_e = q \cdot E \quad (\text{II-1})$$

L'expression (II-1) est l'équation de base pour la force électrostatique agissant sur les particules en suspension dans les précipitateurs électrostatiques, dans lesquels les particules peuvent être captées par les électrodes collectrices.

II.5.2. force de traînée (La formule de Stokes, la relation d'Einstein) [18]

La viscosité implique que tout corps animé d'une vitesse relative \vec{v} , par rapport au fluide, est soumise à une force de frottement \vec{F} : • $\vec{F} = -\alpha \vec{v}$

Une approximation souvent pertinente consiste à assimiler le corps en mouvement à une sphère de rayon r . Dans ce cas la formule de Stokes s'écrit :

$$\alpha_{\text{Sphere}} = 6\pi\eta r$$

Où η est la viscosité dynamique du gaz.

Et α est la facteur de frottement.

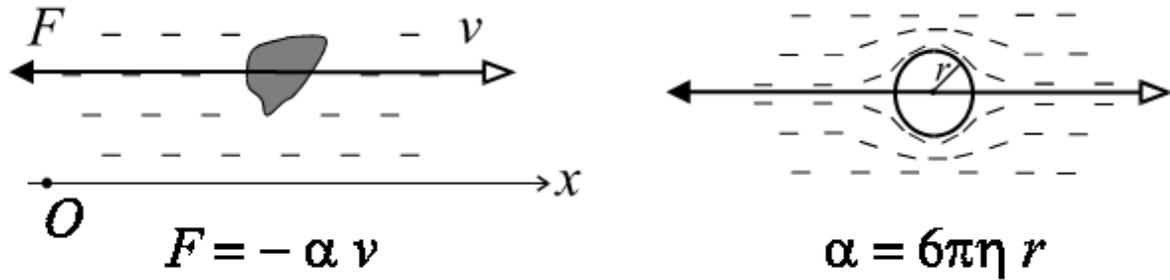


Figure II.7 les forces qui agissent sur une particule plonger dans un fluide avec une vitesse \vec{v} .

Donc la force de trainée s'écrit comme suit :

$$\vec{F} = -6\pi\eta_g r_p \vec{v} = -3\pi\eta_g d_p \vec{v} \quad (\text{II.2})$$

Où η_g est la viscosité dynamique du gaz et d_p est le diamètre de la particule

Pour tenir compte du fait que les très petites particules peuvent glisser entre les molécules de gaz lorsque leur taille est proche du libre parcours moyen moléculaire, on ajoute un coefficient multiplicatif dit coefficient de correction de Cunningham (il existe une multitude de relations différentes) [16]:

$$Cu = 1 + 1.246 \frac{2\lambda_g}{d_p} + 0.42 \frac{2\lambda_g}{d_p} \exp\left(-0.87 \frac{d_p}{2\lambda_g}\right) \quad (\text{II.3})$$

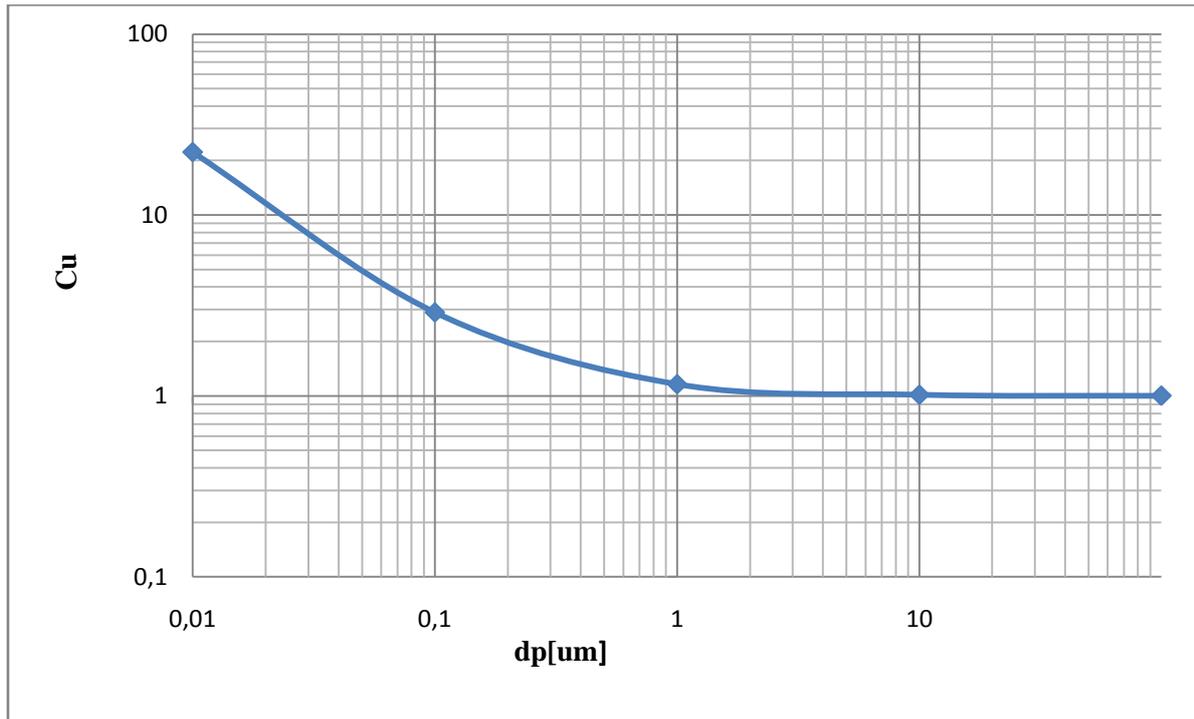


Figure II.8 Variations du facteur de correction de Cunningham (équation I.3) en fonction du diamètre des particules ($T = 293 \text{ K}$ $\lambda_g = 0,065 \text{ }\mu\text{m}$)

La force de trainée s'exprime alors par :

$$\vec{F} = -3 \pi \eta_g d_p \vec{v} \frac{1}{Cu} \quad (\text{II. 4})$$

II.6 Mécanismes de charge des particules

Les fines particules en suspension dans l'air peuvent recueillir des charges électriques grâce à plusieurs mécanismes qui sont : la charge « naturelle » par attachement des ions existant dans l'atmosphère, la triboélectrisation (regroupant la charge par contact et la charge par frottement) et la charge par charge d'espace ionique (regroupant la charge par champ et la charge par diffusion; les ions gazeux étant produit dans ce cas principalement à l'aide d'une source radioactive ou d'une décharge électrique). La densité d'ions peut être unipolaire (positive ou négative utilisée pour la charge des particules) ou bipolaire (utilisée pour la neutralisation de l'aérosol) [12].

II.6.1. Charge « naturelle » par attachement des ions

Dans l'atmosphère terrestre, il existe des ions positifs et négatifs générés sans interruption par l'action des radiations cosmiques et des gaz radioactifs émanant du sol. Comme présenté par Hinds [12], l'air contient environ 1000 ions/cm³ avec en première approximation un nombre égal d'ions positifs et négatifs. Les particules d'aérosol qui sont initialement neutres, peuvent acquérir une charge par collision (due à leur mouvement thermique aléatoire) avec des ions. Les particules chargées vont avoir tendance à perdre leur charge lentement en attirant des ions de signe opposée. Donc, ce processus tend vers un état d'équilibre appelé « distribution de charge en équilibre de Boltzmann ». Cet équilibre de Boltzmann représente la distribution de charge d'un aérosol en présence d'ions bipolaires. Pour des concentrations égales d'ions positifs et négatifs dans l'air, en première approximation la fraction des particules f_n de taille donnée ayant n charges élémentaires positives ou négatives est donnée par :

$$f_n = \left(\frac{K_E e^2}{\pi d_p K_B T} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{K_E n^2 e^2}{d_p K_B T} \right) \quad (\text{II-5})$$

Où K_E , constante électrostatique, e charge élémentaire, d_p diamètre de particule, K_B constante de Boltzmann ; T , température.

II.6.2. Triboélectrisation

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

La charge par contact se produit pendant la séparation de particules sèches et non-conductrices de surfaces solides. Dans ce processus, quand une particule touche une surface, des charges sont transférées, si bien que la particule acquiert une charge nette positive ou négative quand elle se sépare de la surface. La polarité de la particule chargée et le nombre de charges sur celle-ci dépendent des matériaux et de leurs positions relatives dans les séries

triboélectriques. Le frottement augmente le nombre de charges acquises. Parce qu'il requiert des surfaces sèches, le phénomène de charge par contact devient inefficace en conditions d'humidité relative plus grande que 65% environ [12].

II.6.3. Charge par charge d'espace ionique

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. De nombreuses études [12] [16] ont montré que le procédé de charge peut être principalement attribué à deux mécanismes :

- la charge par champ
- la charge par diffusion

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

A. La Charge par champ

Comme le suggère son nom, ce mécanisme de charge est relié à l'action du champ électrique. Une particule présente dans un gaz provoque une distorsion locale du champ électrique; les lignes de champ aboutissent à la surface de celle-ci. Cette distorsion locale du champ dépend de la nature de la particule : lorsque la particule est conductrice la distorsion du champ est maximale. Pour une particule non-conductrice (isolante), la perturbation du champ dépend de sa permittivité. Ainsi, l'intensité du champ électrique augmente à la surface de la

particule. Dans ce cas, les ions présents dans le gaz qui se déplacent le long des lignes de champ électrique, peuvent atteindre la surface de la particule. Chaque ion qui atteint la particule change la distribution locale du champ électrique. Tant que le champ électrique créé par la charge de la particule est inférieur au champ électrique maximum qui existe à la surface de la particule lorsqu'elle n'est pas chargée, les ions continuent d'atteindre la surface de celle-ci. Lorsque la charge acquise est suffisante, les lignes de champ contournent la particule ; on dit que la particule a acquis la charge de saturation par champ q_s [12].

Une première théorie concernant la charge par champ a été développée en 1923 par Rohmann et elle a été complétée par Pauthenier en 1932. Ces auteurs montrent que les ions arrivent sur une particule tant que la charge de celle-ci n'est pas suffisante pour les repousser ; on parle alors d'une charge limite par champ q_s . Pauthenier a montré qu'à cause du phénomène de répulsion électrostatique, seule une partie réduite de la surface des particules est atteinte par les ions. Continuant dans le même esprit, d'autres auteurs ont apporté des contributions complémentaires. D'après McDonald, ce mécanisme de charge est prépondérant tant que la taille des particules est supérieure à environ $0,5\mu\text{m}$. La quantité de charge acquise par les particules dépend de leur diamètre, du champ électrique, de la densité d'ions présents, du temps de présence des particules dans le champ électrique, de la mobilité des ions et de la constante diélectrique ϵ_p de la matière constituant les particules. Ce processus de charge par champ cesse lorsque la particule porte une charge de saturation qui s'écrit [12] :

$$q_s = \left(\frac{3\epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \left(\frac{E d_p^2}{4K_E e} \right) \quad (\text{II-6})$$

où d_p est le diamètre des particules et E est le champ électrique.

B. La charge par diffusion

Le processus de charge par diffusion a été imaginé pour expliquer la charge des particules lorsque le champ électrique appliqué est faible (ou même nul) et lorsque la taille des particules est suffisamment petite (quelques libres parcours moyens). Il est alors nécessaire de prendre en compte le phénomène de diffusion des ions dans le processus de charge. 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. Ce mécanisme de charge par diffusion a une importance plus grande pour les particules très fines, d'un diamètre inférieur à $0,5 \mu\text{m}$. Dans la charge par diffusion, la quantité de charge accumulée dépend de la taille des particules, de la densité des ions, de la vitesse moyenne d'agitation thermique des ions, de la constante diélectrique de la particule, de la température absolue du gaz, du temps de présence des particules au sein du champ. Selon Friedlander, l'expression de la charge d'une particule en fonction du temps s'écrit [16] :

$$q(t) = \frac{d_p k_B T}{2e^2} \ln \left[1 + \left(\frac{2\pi}{m_i k_B T} \right)^{1/2} d_p e^2 n_i T \right] \quad (\text{II.7})$$

où n_i est la concentration des ions, k_B est la constante de Boltzmann, m_i est la masse des ions, T est la température et t est le temps de charge.

La charge acquise est proportionnelle à d_p^2 pour le mécanisme de charge par champ et à d_p pour la charge par diffusion ; la charge par champ est le mécanisme dominant pour les particules plus grandes que $1 \mu\text{m}$, et la charge par diffusion est le mécanisme dominant pour les particules plus petites que $0,1 \mu\text{m}$, même en présence d'un champ électrique. Entre $0,1$ et $1 \mu\text{m}$, ces deux mécanismes fonctionnent en même temps et la situation est beaucoup plus compliquée. Dans la Figure II.9, on voit que les particules de taille inférieure à $0,1 \mu\text{m}$ ont acquis statistiquement moins d'une charge élémentaire par champ et que le mécanisme par diffusion est également inefficace pour les particules plus petites que $0,03 \mu\text{m}$.

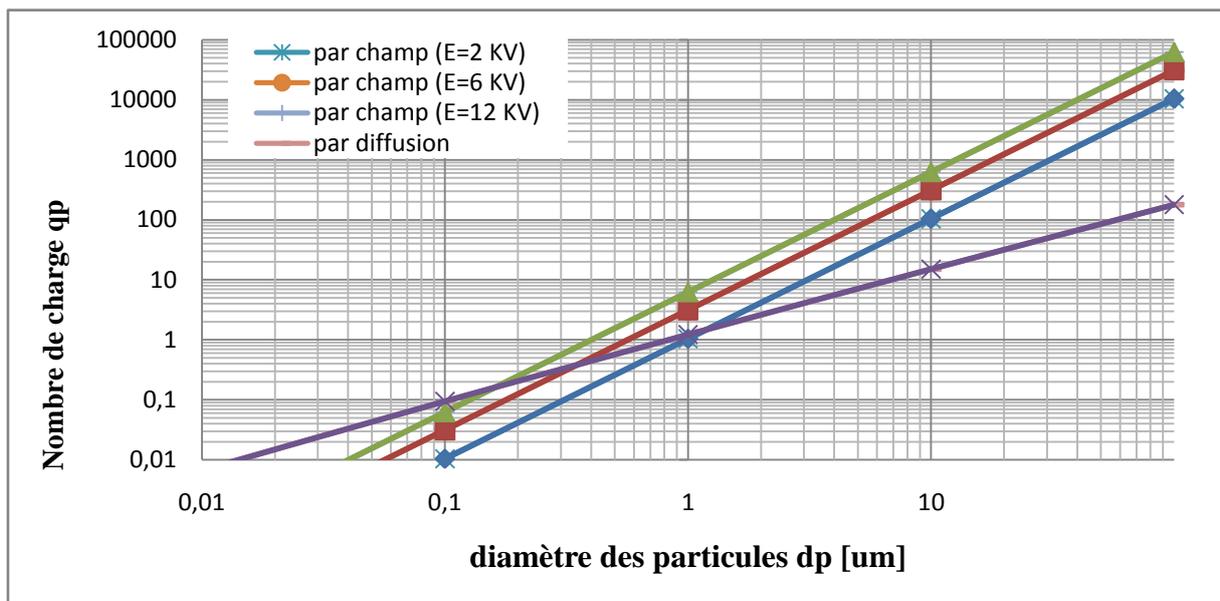


Figure II.9 Estimation du nombre de charges élémentaires des particules pour les mécanismes de charge par champ et par diffusion dans l'air atmosphérique ($T = 293 \text{ K}$, $\epsilon_p = 4,5$ et $n_i \cdot t \sim 10^{14} \text{ s/m}^3$).

C. La charge mixte

Pratiquement, les deux mécanismes agissent ensemble pour les particules de taille comprise entre 0,5 et 1 μm dans l'air. Cependant, la charge totale acquise par une particule n'est pas simplement la somme de la charge par champ et de la charge par diffusion. Les deux mécanismes interagissent et plusieurs traitements approchés ont été proposés pour résoudre ce problème très complexe [12].

Smith & McDonald ont développé un modèle de charge des particules basé sur la théorie cinétique et qui tient compte simultanément des mécanismes de charge par champ et de charge par diffusion. En considérant que la charge des particules est très largement due au mouvement d'agitation thermique des ions, le champ électrique externe ne représente qu'un facteur perturbateur du phénomène de charge par diffusion. Ces auteurs considèrent qu'au voisinage d'une particule chargée, la distribution des ions est modifiée par le champ électrique.

Des travaux plus récents sur le processus de charge ont été développés par Fjeld en 1989. L'auteur considère qu'une particule peut accumuler une certaine charge sous l'effet du champ électrique ou par diffusion, suivant l'importance des deux mécanismes. Il établit des relations pour la charge par champ et par diffusion en tenant compte du couplage entre les deux mécanismes. Pour cela il distingue deux régimes de charge : un régime où la charge par champ et la charge par diffusion sont présente en même temps ; un autre où la particule a atteint la charge limite par champ et où seule la charge par diffusion intervient. Les relations établies par Fjeld conduisent à des valeurs de charge cohérentes avec les résultats expérimentaux obtenues en 1957 par Hewitt mais seulement dans le cas où le champ électrique extérieur est faible.

Lawless & Altman ont amélioré le modèle de Fjeld en modifiant les lois de charge qui, cette fois-ci, conduisent à de bons résultats même dans le cas où le champ électrique extérieur est important. A partir d'arguments physiques, ils obtiennent des relations assez simples qui prennent en compte les interactions des mécanismes de charge.

En définitive, pour relier la vitesse de migration w_E à la taille des particules on fera appel à une relation établie par Cochet. Elle donne la charge limite d'une particule qui se trouve dans un champ électrique d'intensité E en tenant compte de manière indirecte de l'effet

de la charge par diffusion (elle offre une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux pour $d_p > 0,3 \mu\text{m}$ [12]) :

$$q_p^s = \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right) + \left(\frac{2}{1+2\lambda/d_p}\right) \left(\frac{\varepsilon_p-1}{\varepsilon_p+2}\right) \pi \varepsilon_0 d_p^2 E \quad (\text{II-8})$$

ici λ est le libre parcours moyen des molécules et ε_0 est la permittivité de vide.

La Figure II.10 présente les variations de la charge limite en fonction du diamètre des particules ($\varepsilon_p = 4,5$) en considérant plusieurs valeurs de l'intensité du champ électrique E .

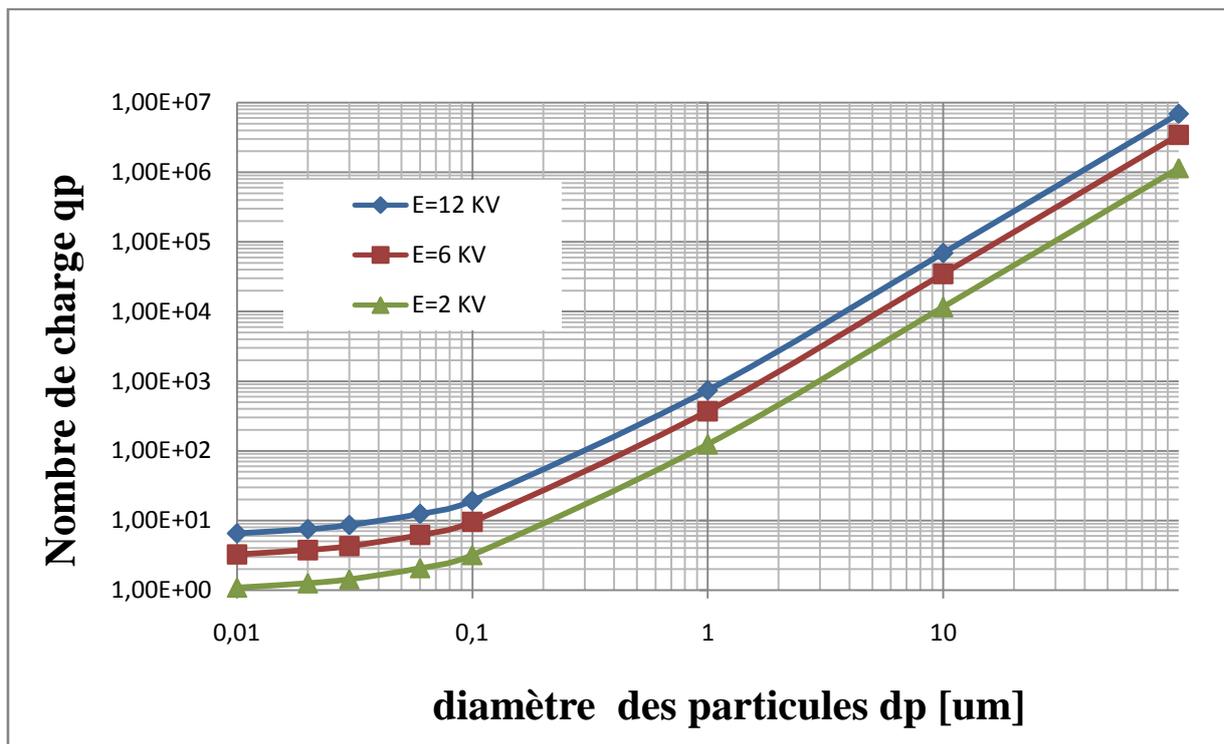


Figure II.10 Variations de la charge des particules prédite par la relation de *Cochet* en fonction du diamètre d_p ($\lambda = 0,065 \mu\text{m}$, $\varepsilon_p = 4,5$ et $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Remarque

Le temps caractéristique du mouvement des particules de poussière est de l'ordre de 10^{-2} s, par contre le temps de charge est de l'ordre de 10^{-8} s. Cela signifie que le temps de charge est négligeable par rapport au temps caractéristique de mouvement des particules de poussière. [19]

II.7 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 :

- 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 ;

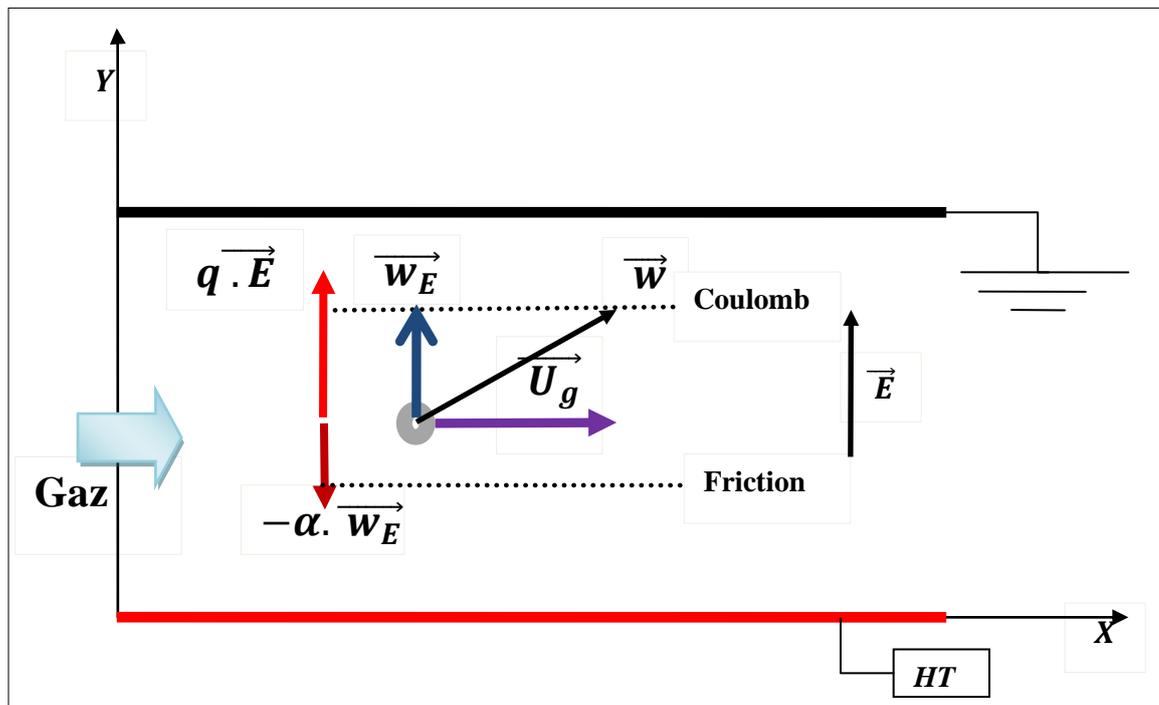


Figure II.11 Schémas explicatif pour le mouvement d'une particule chargée et les forces qui agissent sur elle entre deux plaques parallèles.

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 U_g soumise à un champ électrique supposé uniforme et constant E (voir la figure II.11). Le déplacement de celle-ci à l'intérieur du précipitateur est donné par la relation d'équilibre mécanique :

$$m_p \cdot \frac{dw}{dt} = F_e + F_t \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant dans la relation (II.9) 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 :

$$\frac{dw_E}{dt} + \frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot C u} \cdot w_E - \frac{q_p}{m_p} \cdot E = 0 \quad (\text{II. 10})$$

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.10) donne l'évolution suivante au cours du temps (voir annexe1)

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

Où w_{th} est appelée vitesse théorique de migration et a pour l'expression :

$$w_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot C u \quad (\text{II. 12})$$

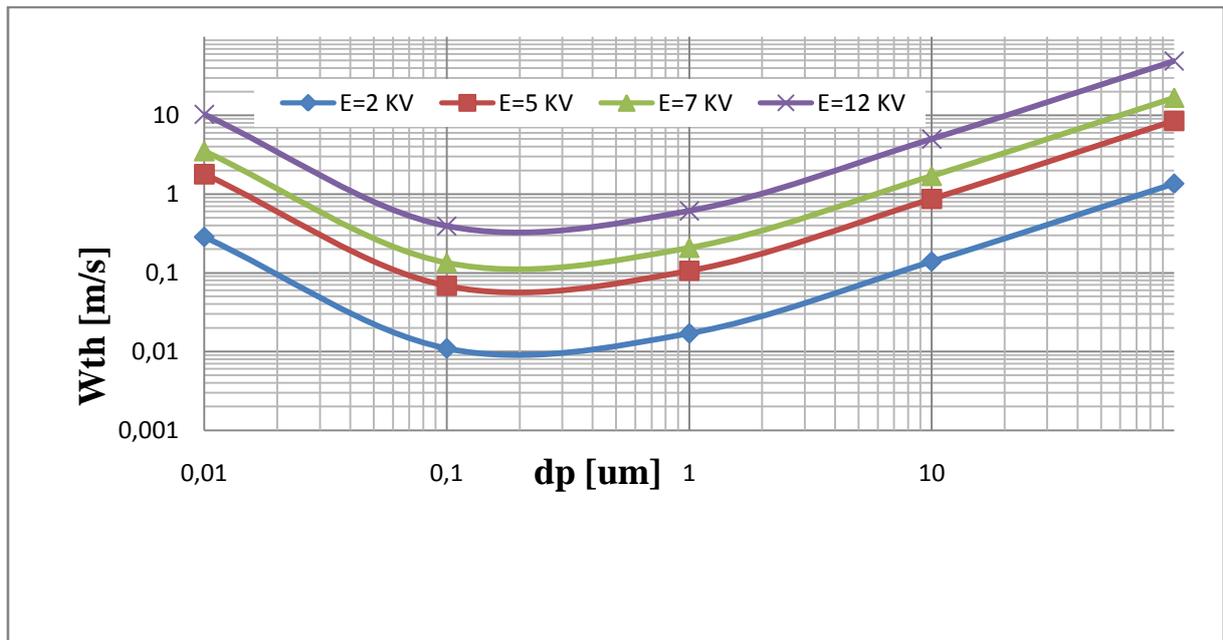


Figure II.12 Variations de la vitesse de migration théorique w_{th} en fonction de la taille des particules ($T = 293 \text{ K}$, $\lambda_g = 0.065 \mu\text{m}$, $\eta_g = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$)

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

$$\tau_p = \frac{m_p}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot C u = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \eta_g} \cdot C u \quad (\text{II.13})$$

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

La vitesse de migration théorique (relation II.12) représente, dans cette approche, la valeur stationnaire de la vitesse des particules dans la direction du champ électrique (perpendiculaire aux plaques collectrices) ; elle caractérise le processus de migration des particules à l'intérieur de l'électrofiltre. L'ensemble des modèles analytiques est basé sur ce concept.

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

$$L = \overline{U}_g \cdot \frac{h}{w_{th}} \quad (\text{II.14})$$

Où \overline{U}_g est la vitesse moyenne de l'écoulement du gaz. Donc toutes les particules de même taille, identiquement chargées, seront collectées à une distance égale à L (voir annexe 2).

$$\begin{aligned} L &= \overline{U}_g \cdot \frac{h \cdot 3 \pi \eta_g d_p}{q_p \cdot E} = \overline{U}_g \cdot \frac{h \cdot 3 \pi \eta_g d_p}{\left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}}\right) \left(\frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2}\right) \right] \pi \varepsilon_0 d_p^2 E \cdot E} \\ &= \overline{U}_g \cdot \frac{h \cdot 3 \pi \eta_g}{\left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}}\right) \left(\frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2}\right) \right] \pi \varepsilon_0 d_p E \cdot E} \end{aligned} \quad (\text{II.15})$$

Dans pour bien diriger la distance L pour une taille de particule (d_p) et la hauteur h données, il suffit de jouer essentiellement sur la vitesse moyenne de l'écoulement du gaz U_g ou bien le champ électrique E (voir figures II.13, II.14, II.15, II.16).

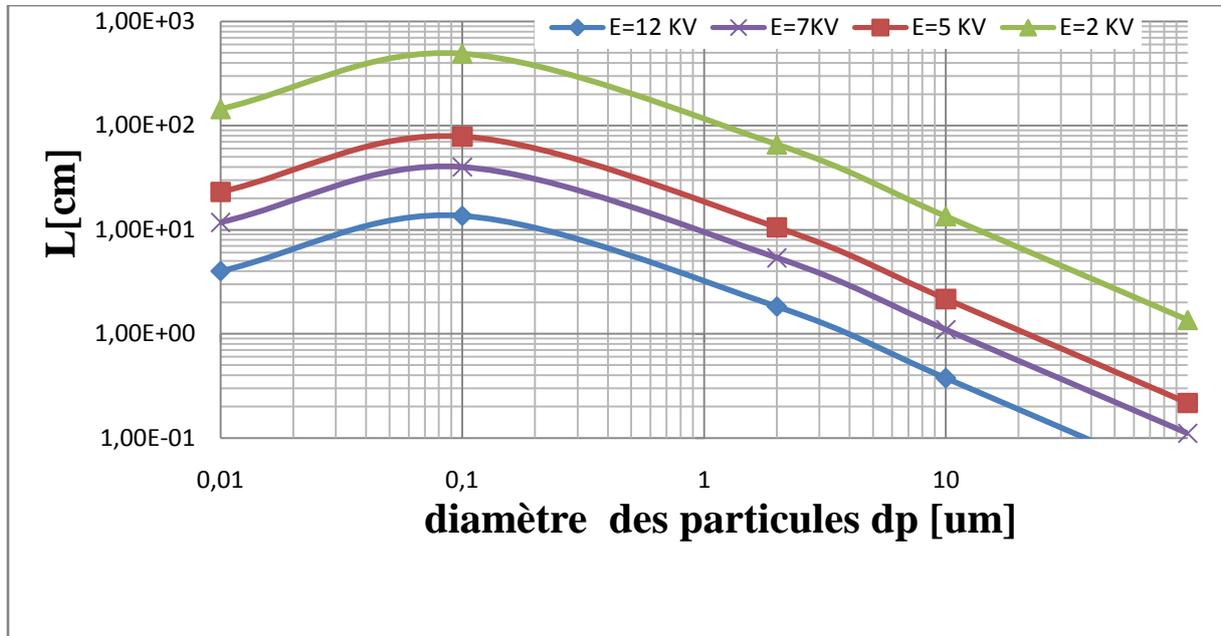


Figure II.13 Variations de la distance du parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction de la taille des particules pour différentes valeurs de champ électrique.

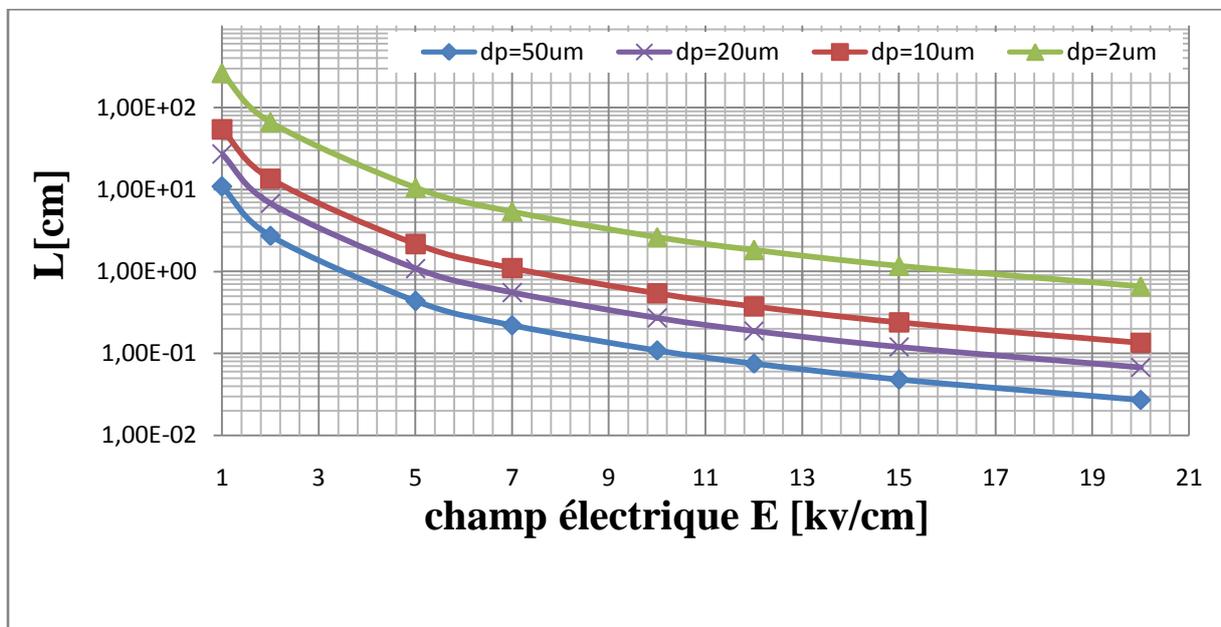


Figure II.14 Variations de la distance de parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction du champ électrique pour différents diamètres de particule (en fixant la vitesse de l'écoulement $U_g=1\text{m/s}$).

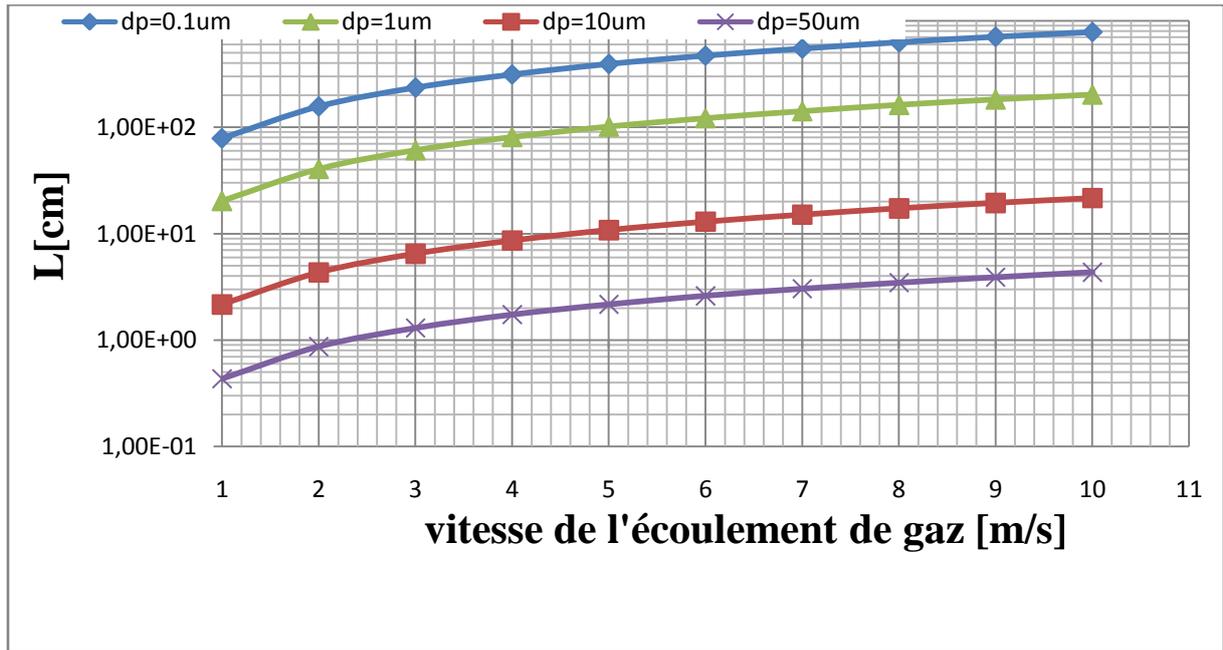


Figure II.15 Variations de la distance de parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction de la vitesse de l'écoulement de gaz pour différents valeurs de diamètre de particule (en fixant $E=5KV$).

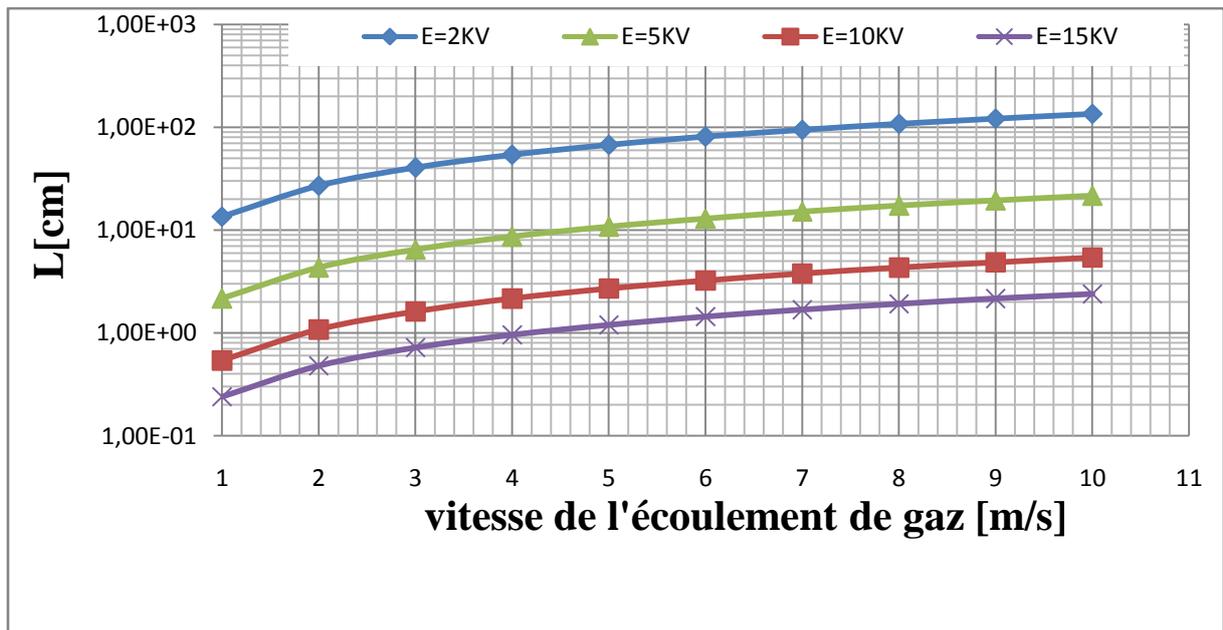


Figure II.16 Variations de la distance de parcours de particule suivant l'axe (ox) en fonction de la vitesse de l'écoulement de gaz pour différents valeurs de champ électrique (en fixant $dp=10\mu m$).

II.8 Conclusion

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

Le travail essentiel de cette partie a été visionné sur l'étude théorique de la trajectoire des particules solides et les différents paramètres qui influencent sur cette dernière.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la conception de deux montages expérimentaux que nous avons réalisé dans le laboratoire de génie électrique d'Oran, le premier c'est un générateur de pollution qui permet de contrôler le débit et la vitesse de l'écoulement du gaz et le second est un filtre permettant d'étudier l'influence des différents paramètres (géométrique et électrique) sur la trajectoire de la particule.

Nous commençons par une présentation des principales parties de ce montage expérimental puis le rôle de chacune d'elles où nous insisterons sur l'importance de la partie active du montage dans la charge et le déplacement des particules vers la plaque de collection.

Nous terminerons cette partie par un essai de vérification de fonctionnement du montage expérimental sur l'air chargé de particules et l'étude de l'influence des différents paramètres sur le trajet de cette dernière.

III.2 La description du montage expérimental :

La figure II.1 illustre le principe de base dans le traitement de la pollution particulaire de notre montage expérimentale :

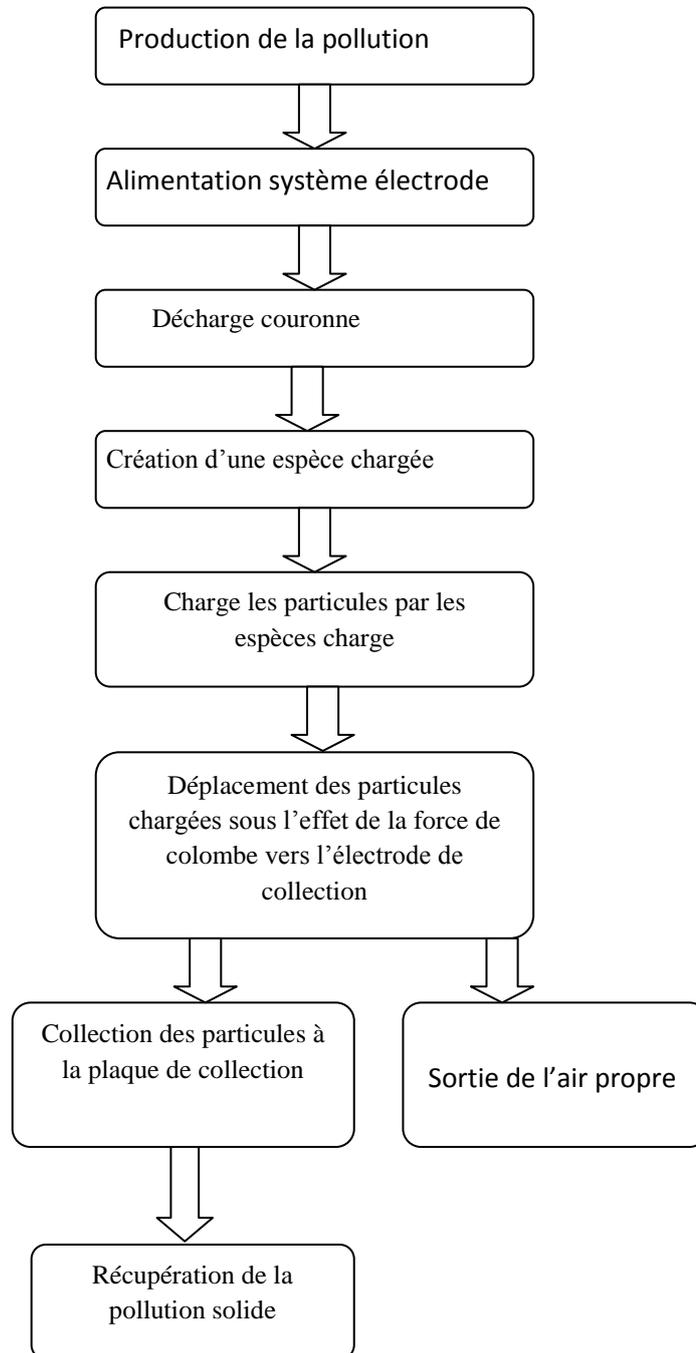


Figure III.1 Schéma du principe de dépollution d'air de particules solides en suspension par plasma froide dans notre montage.

III.3 Générateur de pollution :

III.3.1 Conception

Pour tester les filtres électrostatiques des laboratoires, on a besoin d'un générateur de pollution qui peut produire en permanence de l'air pollué avec une pollution spécifique tel que, le ciment, la farine, poudre de PVC et sciure de bois...etc. La figure III.2 montre une photographie de notre générateur.

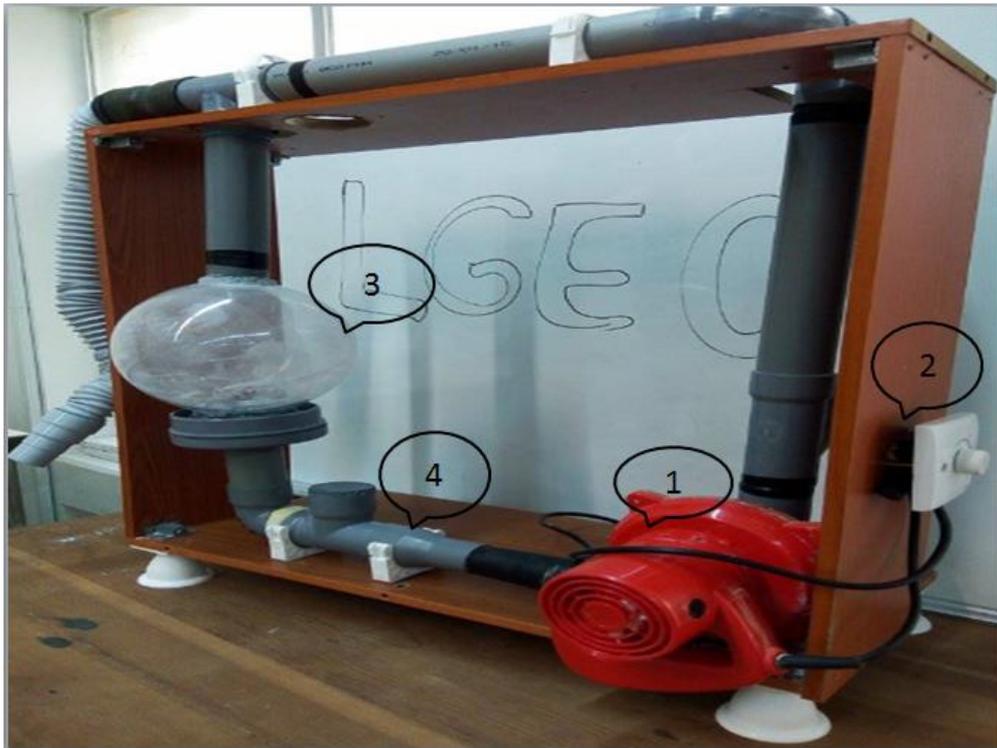


Figure III.2 photographie du dispositif de générateur de pollution.

1. souffleur électrique

Le souffleur électrique à main est équipé d'une motorisation électrique qui offre de nombreux avantages tel que la limitation des émissions sonores et polluantes, l'optimisation de l'efficacité est surtout un démarrage facile. On l'a utilisé pour soufflé et aspiré l'air pollué.



Figure III.3 Souffleur électrique

2. Variateur de tension (gradateur)

Un variateur électronique de vitesse est un dispositif destiné à régler la vitesse et le moment d'un moteur électrique à courant alternatif en faisant varier respectivement la fréquence et la tension, ainsi le courant, délivré à la sortie. Celui-ci a été utilisé pour varier la tension d'entrée du souffleur, donc la vitesse de poussé.



Figure III.4 Variateur de tension

3. Une enceinte sphérique

Une géométrie sphérique de diamètre 18cm a pour rôle de faire un mélange de particules pour obtenir une homogénéité complète. Cette géométrie a été choisie pour permettre aux particules de circuler et ne pas se déposer sur la surface ou bien dans des coins non accessibles à l'air en mouvement, pour avoir une meilleure homogénéité.



Figure III.5 Enceinte sphérique

II.2.4. Tube en PVC :

On a utilisé des tubes en PVC de diamètre 50 mm dont le rôle est d'acheminer l'air pollué vers l'entrée du filtre.



Figure III.6 Tube en PVC

III.3.2 Réalisation

L'aboutissement au montage final, est passé par différentes étapes, au début on a inséré un disque à l'intérieur de la sphère pour avoir un meilleur refoulement d'air ce dernier a été contrôlé avec un système de clapier, on a eu des problèmes d'étanchéité et une accumulation de la poussière sur la surface de la sphère. Au deuxième essai on a placé une tige qui aide à déplacer le disque à l'intérieur de la sphère pour varier le débit d'air provenant du souffleur afin d'avoir une homogénéité de l'air on a remarqué des fuites d'air pollué au niveau de la tige causé par un fort débit du gaz. Les essais précédents nous ont amenés à un

choix optimale qui s'est porté sur une bande d'évier qui nous a donné une homogénéité désiré toute en éliminant le problème d'étanchéité et l'accumulation de la poussière sur la parois de la sphère.

III.3.3 Mode de fonctionnement

Le souffleur électrique injecte de l'air avec une certains vitesse qui est commandé par le gradateur pour avoir un refoulement variable et désiré des particules polluantes, ce refoulement va emporter les particules de pollution injecté via un tube en PVC forme « T ».cette dernière va être acheminé par des tube vers la sphère qui a un rôle important pour l'homogénéité du mélange.

Notre dispositif peut fonctionner en deux manières distinctes circuit ouvert et circuit fermé :

III.3.4.1Circuit ouvert

Le souffleur va pousser l'air pollué vers la sphère pour le mélanger, ensuite l'air pollué sortant de la sphère sera injecté dans le. Dans ce cas on aura une vitesse importante semblable à la sortie d'air des cheminées et cela est dû à un non-retour.

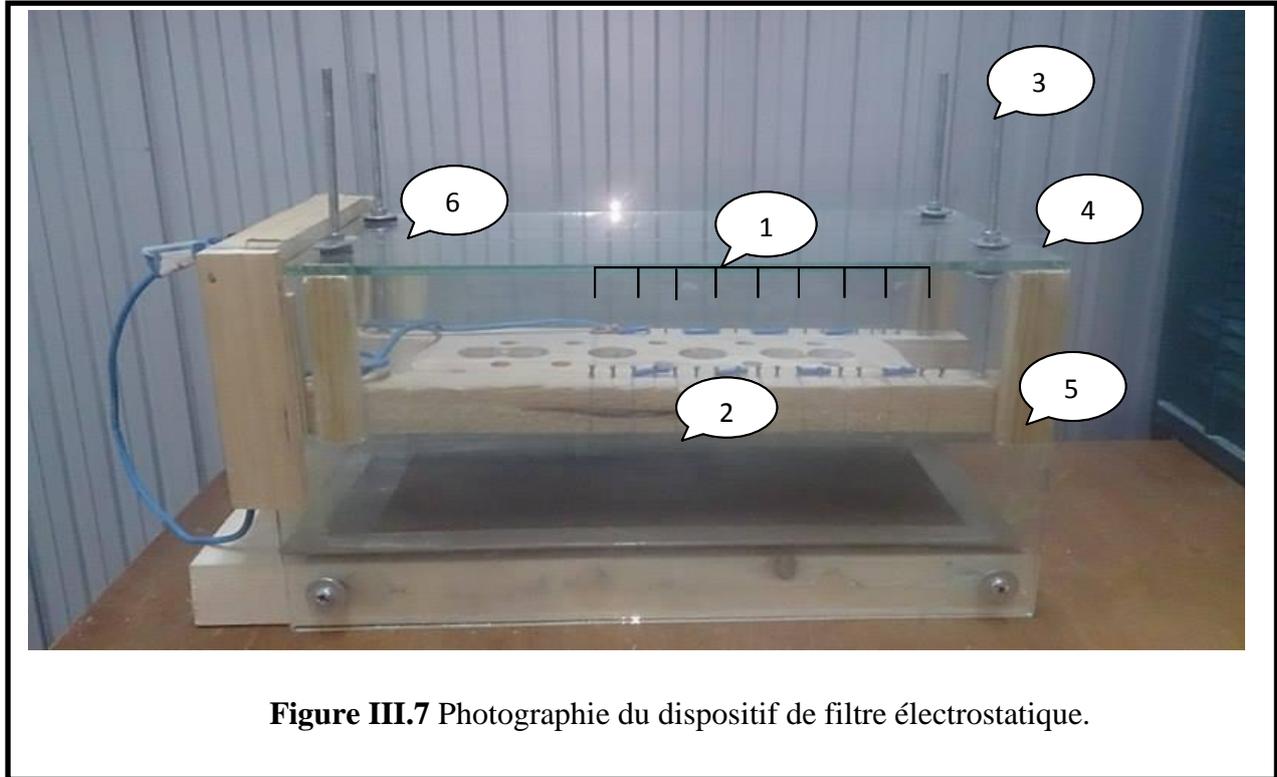
III.3.4. 2 Circuit fermé

Il est basé sur le même principe du circuit précédent mais contrairement à ce dernier, le mélange va être divisé en deux partie une parties va injecter au filtre et l'autre aspiré par le souffleur pour le réinjecté à nouveau, ce processus va continuer durant le fonctionnement.

Ce type de circuit nous procure une meilleure homogénéité, il est utilisé pour divers applications avec un débit bien contrôlé.

III.4 Filtre électrostatique

La figure III.7 montre une photographie de notre dispositif de dépollution de l'air électrostatique multi fils - plan.



La constitution du dispositif de la figure III.7 est comme suite :

1 fils de l'électrode émissive (de la haute tension) les espases entre eux 2 cm.

2 plaque de collection (électrode de masse).

3 boulons (nombre 4) pour varier l'espace inter électrode (entre les fils et la plaque de collection) varie entre 1cm jusqu'un 10cm.

4 supports en bois (nombre 4).

5 parois de filtre en vers.

6 fil d'alimentation.

III.4.1 Essai et vérification du fonctionnement de notre montage de dépollution d'air pollué :

Au début des essais de fonctionnement, on a utilisé le bois comme des parois de filtre, mais nous avons constaté une décharge importante qui se circule au parois de filtre se qui favorise le claquage dans le bois avant d'atteindre la décharge couronne entre l'espace inter électrode, de ce fait, nous avons pris une matière en vers (qui a une résistivité électrique importante) cette matière nous a aidé de diminuer le problème de décharge.

On utilise les boulons qui nous permettent de varier l'espace inter électrode à partir de 1cm jusqu'à 10cm.

On a pris au début des essais l'espace entre les fils de l'électrode de la haute tension 1cm, mais nous avons constaté juste au début de l'apparition de la décharge couronne un claquage entre les fils (le premier et le dernier) de la haute tension et la plaque de la collection, de ce fait, on a augmenté la distance entre les fils progressivement jusqu'à atteindre une valeur de 2cm qui nous a donné une décharge couronne dans tous les fils, ce qui a permis de faire l'expérience.

L'aboutissement au montage expérimental actuel décrit au début de ce chapitre, est passé par différentes étapes, d'une part pour la concrétisation de l'idée de base qui est une conception du système de dépollution d'air de particules polluantes par décharge électriques et d'autre part faire un choix convenable des différentes parties du dispositif.

Dans notre expérience on utilise deux matières comme particules polluantes le ciment et la farine.

III.4.1 Expérience hors tension

Au cours de la première tentative de fonctionnement (hors tension), on a remarqué que la vitesse de ventilation (la vitesse d'écoulement d'air) est inversement proportionnelle au temps de séjours de la pollution à l'intérieur du système. Pour des faibles vitesses, le temps de séjour de particule était important.



Figure III.8 Photographie d'un dépôt de poussière sur la plaque hors tension

On remarque dans la figure III.8 que la distribution du dépôt est uniforme dans tous les points de la plaque et on a remarqué aussi que la distribution de la granulométrie de la particule est aléatoire c'est à dire qu'on retrouve toutes les particules quelque soit leur taille (grosses et petites) sur toute la plaque. Ce phénomène explique que la gravité n'a pas un grand effet sur la trajectoire la particule

III.4.2. Expérience sous tension

III.4.2.1. premier cas

On a choisi le ciment comme particule de pollution

Au début de cette expérience on utilisait une distance inter électrode de 4cm (entre les fils et la plaque) puis on a alimenté le filtre électrostatique en augmentant progressivement la tension jusqu'à arriver la décharge couronne (environ 20kv), à partir de cette valeur on a injecté la pollution de ciment puis on a arrêté l'injection en laissant le filtre sous tension (voir Figure III.9).



Figure III.9 Photographie d'un dépôt de poussière sur la plaque sous tension.

Dès qu'on a atteint la valeur de la tension critique, l'air s'est ionisé en formant autour des fils une couronne lumineuse. Les particules se chargent par attachement des électrons existants dans l'espace inter électrode, les particules migrent vers l'électrode de masse sous l'influence de trois force qui sont la force électrique, la force d'écoulement du gaz porteur (l'air) et la force de trainé. On remarque que les particules collectées sont intense juste en face des fils ce qui explique que la force de coulomb est importante dans ces lignes et on constate aussi que la granulométrie des particules collectées est diminuée progressivement (les particules les plus grosse sont collectées au début de la plaque et au fur et à mesure la granulométrie des particules diminue jusqu'à atteindre les petite particules) (voir figure III.9).

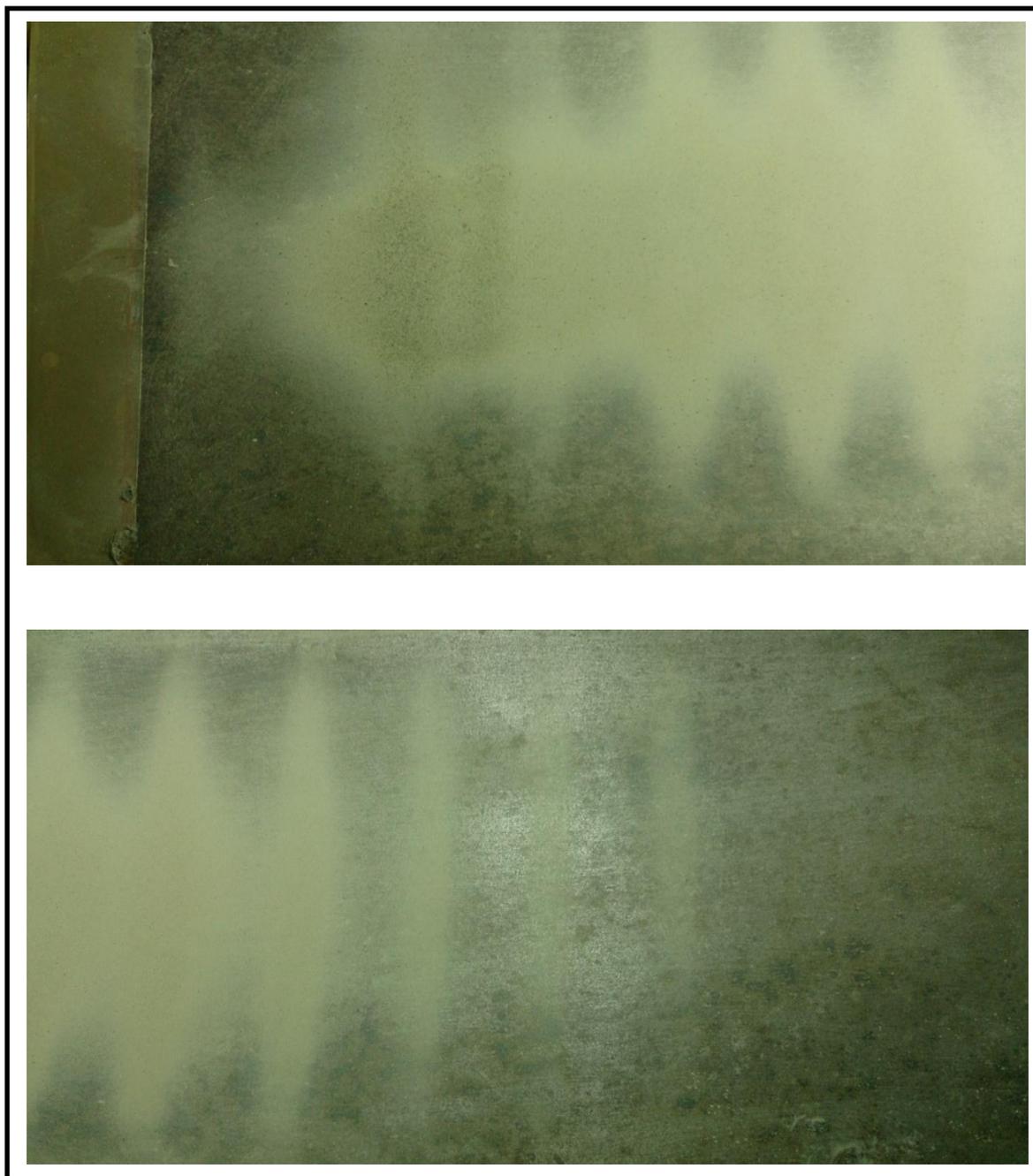


Figure III.10 Photographie rapprochée d'un dépôt de poussière sur la plaque sous tension

On constate que pour le cas hors tension, la granulométrie des particules qui sont tombées sur la plaque est aléatoire, par contre sous tension, les particules tombent progressivement selon leur taille.

Dans la même expérience que précédente sauf qu'on a augmenté la valeur de la tension.



Figure III.11 Photographie d'un dépôt de poussière sur la plaque sous tension (tension plus élevée).

On remarque que les particules collectées sont très intenses au début de la plaque c'est à dire, la valeur de la tension est proportionnel inversement à la distance de parcours de la particule. Les particules collectées augmentent au fur et à mesure de l'élévation de la tension appliquée en raison de l'accroissement du champ électrique dont elle s'accompagne.

III.4.2.2 deuxième cas

On a choisi la farine comme particule de pollution

Dans ce cas l'idée est toujours l'étude la trajectoire de la particule de notre filtre en gardant la même configuration et les mêmes paramètres que la précédente expérience, mais on a changé seulement le type de pollution (farine).

Après l'injection de la farine dans le filtre sous tension, on a remarqué au début que les particules sont migrées vers la plaque de collection et sont collectées sur celle-ci. Puis on a constaté que les particules collectées sont ré-entraînées dans l'espace inter électrode.



Figure III.12 Photographie d'un dépôt de la farine sur la plaque sous tension (sans arrêt de l'injection de la farine).

A travers les essais que l'on a faits, les particules du ciment collectées ne se ré-entraînent pas, par contre la farine se ré-entraîne dans l'espace inter électrode. Ce qui explique que la résistivité électrique du ciment est très importante par rapport la résistivité de la farine (selon l'état thermique de la matière), car dans les mêmes conditions thermiques, la résistivité de la farine est plus grande que le ciment, sauf que la farine est sensible à l'humidité.



Figure III.13 Photographie d'un dépôt de la farine sur la plaque (orientée vers le sol).

La figure III.9 montre clairement que les particules qui sont collectées sur la plaque restent collées malgré l'orientation de la plaque vers le sol.

III.4.2.3 Troisième cas

Cette expérience a été faite, afin d'éclairer le phénomène de ré-entraînement. On a fait même chose que l'expérience précédente sauf qu'après un certain temps, on a arrêté l'injection de la farine tout en gardant le filtre sous tension (voir figure III.14, figure III.15).



Figure III.14 Photographie d'un dépôt de la farine sur la plaque sous tension (en coupant l'injection de la farine).



Figure III.15 Photographie rapprochée d'un dépôt de la farine sur les fils de la haute tension.

On remarque dans la dernière expérience que la farine qui se collecte, se ré-entraîne dans l'espace inter électrode, ce qui explique que la conductivité de la farine est importante. Les particules de la farine arrivées à la plaque de collection se déchargent puis se rechargent à nouveau par conduction (contacte avec la plaque), donc se repoussent vers l'espace inter électrode (figure III.14). Certaines de ces particules sortent avec l'air purifié (ce qui diminue l'efficacité du filtre) et le reste migrent vers les fils actifs par attraction (ce qui augmente le rayon de la courbure des fils) (voir figure III.15).

III.5 Conclusion

D'après les expériences qui sont faite, pour une géométrie donnée, on constate que la valeur de la tension et la taille de la particule se sont les paramètres les plus essentiels qui affectent sur le trajet de la particule.

La dernière expérience a été éclairée que l'état thermique de la particule joue un rôle très important au phénomène de réentraînement, qui nous a aidé pas de faire les mesures ce qui concerne la trajectoire de la particule.

Conclusion générale

L'objectif de cette étude, était la détermination du trajet de la particule théoriquement et expérimentalement et les différents paramètres qui affectent sur ce dernier.

Dans notre recherche bibliographique sur les travaux expérimentaux dans le domaine de dépollution, on a recherché un modèle de trajectoire pour la particule par la décharge hors équilibre, ainsi que l'influence de certains paramètres sur celle-ci.

On a présenté aussi dans ce travail, la réalisation d'un générateur de pollution avec l'amélioration d'un filtre électrostatique, tout en arrivant de savoir le comportement de la particule. .

Pour la réalisation du générateur de pollution, on est passée par plusieurs étapes préliminaires et multiples expériences pour avoir une pollution homogène afin d'aboutir à un produit capable de s'adapter aux différents types de filtres électrostatiques dans les laboratoires.

Pour le filtre électrosatique, on a conçu et réalisé un dispositif expérimental avec un système de décharge multi fils-plan à travers de plusieurs constructions, afin d'atteindre la géométrie désirée. Selon le principe d'électrostatique, les particules chargées se déplacent vers les parois de collecte sous l'influence de la force résultante. Une telle conception offre la possibilité de réduire ou quitter le phénomène de réentraînement des fines particules conductrices agglomérées. Pour cette raison on a basé dans les essais sur la trajectoire de la particule.

Dans la première expérience, on a injecté les particules avec une vitesse d'écoulement du gaz réduit sans alimenter les fils actives (hors tension), on constate que les particules sont distribuées uniformément sur toute la plaque de collection, ce que veut dire que la gravité n'influence pas tellement sur la trajectoire de la particule.

Dans les expériences suivantes, on a mis le filtre sous tension, en augmentant la tension jusqu'à arriver la décharge couronne. A partir de cette étape, on a fait l'injection des particules (on a utilisé deux types de matières comme agent de pollution).

Le premier temps, on a utilisé la matière de ciment comme agent de pollution.

On a constaté que les particules qui sont collées sur la plaque de collection, a été commencé par les plus grosses particules au début de la plaque, puis se dégradées progressivement jusqu'à atteindre les plus fines particules après certain distance sur la plaque. En restant sur la même expérience sauf qu'on augmente la tension, on a vu que le parcours de la particule collée a été moins que le précédent, cela signifie que Les particules collectées augmentent au fur et à mesure de l'élévation de la tension appliquée en raison de l'accroissement du champ électrique dont elle s'accompagne. Donc à partir de ces essais, la taille de la particule et la valeur de la tension sont des paramètres très importants sur la trajectoire de la particule.

Dans le second temps, on a utilisé la matière de farine comme agent de pollution.

On a constaté dans cette expérience que la farine qui se collecte, se ré-entraîne dans l'espace inter électrode, ce qui explique que le taux d'humidité de la farine est important. Les particules de la farine arrivées à la plaque de collection se déchargent puis se rechargent à nouveau par conduction (contacte avec la plaque), donc se repoussent vers l'espace inter électrode. Certaines de ces particules sortent avec l'air purifié ce qui diminue l'efficacité du filtre et le reste migrent vers les fils actifs par attraction ce qui augmente le rayon de la courbure des fils. Cette expérience a été faite juste pour éclairer le phénomène de réentraînement et son inconvénient.

On conclu que le trajet de la particule est très important pour le dimensionnement du filtre électrostatique. Cependant, nous nous contentâmes des différents essais de réalisation. Nous envisageons dans l'avenir de poursuivre notre recherche avec d'une part le régime de l'écoulement turbulent et la géométrie du filtre (le type et le diamètre des électrodes et l'espace inter électrode...) et d'autre part améliorer la partie de production de la pollution, afin que les particules polluantes se distribuent dans l'air de façon plus ou moins homogène et par la, nous nous approchons de manière plus ou moins concrète d'une source émissive de pollution.

ANNEXE 1

$$\frac{dw_E}{dt} + \frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot w_E - \frac{q_p}{m_p} \cdot E = 0 \quad (\text{I. 10})$$

$$\overline{w_E} + \frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot w_E - \frac{q_p}{m_p} \cdot E = 0 \quad (*)$$

La résolution de cette équation se fait par la méthode de la variation de constante

La résolution de l'équation(I. 10) sans deuxième ordre

$$\frac{dw_E}{dt} + \frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot w_E = 0$$

$$\frac{dw_E}{dt} = -\frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot w_E$$

$$\int \frac{dw_E}{w_E} = \int -\frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot dt \Leftrightarrow \ln w_E = -\frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot t + cte \Leftrightarrow w_E = e^{-\frac{t}{\tau_p} + cte} \quad ; \quad Cte \in \mathbb{R}$$

$$\Leftrightarrow w_E = c \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (**)$$

Dont :

$$C = e^{cts} \quad \text{et} \quad \tau_p = \frac{m_p}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot Cu$$

Par l'utilisation de la méthode de variation de constante [C = C(t)]

$$(**) \Leftrightarrow w_E(t) = C(t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \quad (***)$$

$$(***) \Rightarrow \overline{w_E} = -\frac{1}{\tau_p} e^{-\frac{t}{\tau_p}} \cdot C(t) + \overline{C(t)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}}$$

Alors :

$$(*) \Leftrightarrow -\frac{1}{\tau_p} e^{-\frac{t}{\tau_p}} \cdot C(t) + \overline{C(t)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} + \frac{3 \pi \eta_g d_p}{m_p \cdot Cu} \cdot C(t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} = \frac{q_p}{m_p} \cdot E$$

$$\Leftrightarrow -\frac{1}{\tau_p} e^{-\frac{t}{\tau_p}} \cdot C(t) + \overline{C(t)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} + \frac{1}{\tau_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \cdot C(t) = \frac{q_p}{m_p} \cdot E$$

$$\Leftrightarrow \overline{\mathbf{C}(t)} \cdot e^{\frac{t}{\tau_p}} = \frac{q_p}{m_p} \cdot \mathbf{E} \Leftrightarrow \overline{\mathbf{C}(t)} = \frac{q_p}{m_p} \cdot \mathbf{E} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \Leftrightarrow \mathbf{C}(t) = \int \left(\frac{q_p}{m_p} \cdot \mathbf{E} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) dt$$

$$\mathbf{C}(t) = \frac{q_p}{m_p} \cdot \tau_p \mathbf{E} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} + k \quad ; \quad k \in \mathbb{R}$$

En remplace l'expression $\mathbf{C}(t)$ dans (***) :

$$(***) \Leftrightarrow \mathbf{w}_E(t) = \left(\frac{q_p}{m_p} \cdot \tau_p \cdot \mathbf{E} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} + k \right) \cdot e^{\frac{t}{\tau_p}} \quad (****)$$

On a à $t=0s$ $\mathbf{w}_E = 0m/s$

$$K = -\frac{q_p}{m_p} \cdot \tau_p \mathbf{E}$$

$$(****) \Leftrightarrow \mathbf{w}_E(t) = \left(\frac{q_p}{m_p} \cdot \tau_p \cdot \mathbf{E} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}} - \frac{q_p}{m_p} \cdot \tau_p \cdot \mathbf{E} \right) \cdot e^{\frac{t}{\tau_p}}$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{w}_E(t) = \frac{q_p}{m_p} \cdot \tau_p \mathbf{E} \left(e^{-\frac{t}{\tau_p}} - 1 \right) \cdot e^{\frac{t}{\tau_p}}$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{w}_E(t) = \frac{q_p}{m_p} \cdot \tau_p \mathbf{E} \left(1 - e^{\frac{t}{\tau_p}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{w}_E(t) = \frac{q_p}{m_p} \cdot \frac{m_p}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot \mathbf{C}u \cdot \mathbf{E} \left(1 - e^{\frac{t}{\tau_p}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{w}_E(t) = \frac{q_p}{m_p} \cdot \frac{m_p}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot \mathbf{C}u \cdot \mathbf{E} \left(1 - e^{\frac{t}{\tau_p}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{w}_E(t) = w_{th} \left(1 - e^{\frac{t}{\tau_p}} \right) \quad ; \quad w_{th} = \frac{q_p \cdot \mathbf{E}}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot \mathbf{C}u$$

ANNEXE 2

Application numérique

Les données sont:

Le champ : $E=5 \text{ KV/cm} = 5 \cdot 10^5 \text{ V/m}$

La vitesse du vent : $= 1 \text{ m/s}$

Le rayon de la particule moyenne à : $r=1 \mu\text{m}$.

La viscosité dynamique de la particule : $\eta_g = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ à 20c

Le libre parcours moyen : $\lambda_g = 0.065 \mu\text{m}$

La distance initiale entre la particule et la plaque de collection : $h=2\text{cm}$

$$Cu = 1 + 1.246 \frac{2 \cdot \lambda_g}{d_p} + 0.42 \frac{2 \cdot \lambda_g}{d_p} \exp\left(-0.87 \frac{d_p}{2 \cdot \lambda_g}\right)$$

$$Cu = 1 + 1.246 \frac{2 \cdot 0.065}{2} + 0.42 \frac{2 \cdot 0.065}{2} \exp\left(-0.87 \frac{2}{2 \cdot 0.065}\right) = 1.081$$

On a pris la charge q donnée par la relation de Cochet (1-7).

$$q_p^s = \left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}}\right) \left(\frac{\varepsilon_p - 1}{\varepsilon_p + 2}\right) \right] \pi \varepsilon_0 d_p^2 E$$

$$q_p^s = \left[\left(1 + \frac{2 \cdot 0.065}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2 \cdot 0.065}{2}}\right) \left(\frac{4.5 - 1}{4.5 + 2}\right) \right] \pi * 8.85 \cdot 10^{-12} * 2^2 \cdot 10^{-12} * 5 \cdot 10^5$$

$$q_p^s = 1.1924 \cdot 10^{-16} \text{ coulomb} \quad \text{à } E=5\text{kv}$$

$$q_p^s = \left[\left(1 + \frac{2 \cdot 0.065}{2}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2 \cdot 0.065}{2}}\right) \left(\frac{4.5 - 1}{4.5 + 2}\right) \right] \pi * 8.85 \cdot 10^{-12} * 2^2 \cdot 10^{-12} * 7 \cdot 10^5$$

$$q_p^s = 1.6689 \cdot 10^{-16} \text{ coulomb} \quad \text{à } E=7\text{kv}$$

$$w_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot Cu = \frac{1.1924 \cdot 10^{-16} * 5 * 10^5}{3 \pi 1.8 * 10^{-5} * 2 * 10^{-6}} * 1.081 = 0.19 \text{ m/s} \quad \text{à } E=5\text{kv/cm}$$

$$w_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3 \pi \eta_g d_p} \cdot Cu = \frac{1.6694 \cdot 10^{-16} * 7 * 10^5}{3 \pi 1.8 * 10^{-5} * 2 * 10^{-6}} * 1.081 = 0.3725 \text{ m/s} \quad \text{à } E=7\text{kv/cm}$$

Donc à partir de (I.13) on calcule L

$$L = \overline{U}_g \cdot \frac{h}{w_{th}} = I \frac{2}{0.19} = 10.53 \text{cm} \quad \text{à } E=5\text{kv/cm}$$

$$= I \frac{2}{0.3725} = 5.37 \text{cm} \quad \text{à } E=7\text{kv}$$

$$L = \overline{U}_g \cdot \frac{h \cdot 3 \pi \eta_g d_p}{q_p \cdot E} = \overline{U}_g \cdot \frac{h \cdot 3 \pi \eta_g d_p}{\left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \right) \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \right] \pi \epsilon_0 d_p^2 E \cdot E} = \overline{U}_g \cdot \frac{h \cdot 3 \pi \eta_g}{\left[\left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \right) \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2} \right) \right] \pi \epsilon_0 d_p E \cdot E}$$

Références bibliographiques

- [1] : Laure MARTIN Dépollution d'effluents chargés en composés organiques volatils cycliques (toluène et bêta-pinène) par décharge couronne à barrière diélectrique. Thèse de doctorat de l'université, PARIS VI, le 4 juillet 2005.
- [2] Hinds W. C, Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. 2nd Edition, Wiley - Interscience, New York, 1999.
- [3] : Code de l'environnement, Article L220-2, définition de la pollution atmosphérique : <http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/Devenu?CR=LOI%2096-1236%201996-12-30%20art%A32>
- [4] : du ministère de l'écologie et du développement durable, L'évolution de la qualité de l'air en France - le point au 1er janvier 2004 http://www1.environnement.gouv.fr/article.php3?id_article=1950
- [5] : Site de la Mission interministérielle de l'Effet de Serre : La convention cadre sur les changements climatiques et état des signatures : <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/accords/conventi.htm>
- [6] : -Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques signée à Rio de Janeiro en juin 1992, <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/pdf/cvccadre.pdf>
- [7] : Texte et commentaires sur le Protocole de Kyoto <http://www.effet-deserre.gouv.fr/fr/accords/engageme.htm>, <http://www.effet-de-serre.gouv.fr/pdf/kyoto.pdf>
- [8] : SAAD Djedjiga « Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques » Thèse : de magister en Electrotechnique, Option : Machines électriques.L' Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 21 décembre 2011
- [9] : Flavien. Koliatene «Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, le 5 janvier 2009.
- [10] : Rezzouga M, Tilmatine A, Gouri R, Medles K, Dascalescu L «Experimental modiling of high-voltage corona discharge using design of experiments». Front. Electr. Electron. Eng, 2(2): 139-143. China 2007.
- [11] : Brahim. Benamar «La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique». Thèse de doctorat de l'université, Henri Poincaré, Nancy, le 13 novembre 2008.
- [12] : Hailong PANG « dépoussiérage électrostatique pour les particules submicronique en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète mars) ». thèse de doctorat l'université, JOSEPH FOURIER 18 Décembre 2006

Références bibliographiques

[13] Bassem KHADDOUR « Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée » Thèse de doctorat de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE 21 Novembre 2006

[14] : Nicolas DUBUS «Contribution à l'étude thermique d'un réacteur à décharge à barrière diélectrique». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, novembre 2009.

[15] : Alyen. Abahazem «Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz». Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III – Paul Sabatier Décembre 2009.

[16] R. Boichot, “Filtration des particules issues des moteurs diesel par matrices fibreuses plongées dans un champ électrique”, Thèse de Doctorat de l'Université de Savoie, 2005.

[17] 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.

[18] François Rothen : Physique générale -La physique des sciences de la nature et de la vie. Presses polytechniques et universitaires romandes - CH - 1015 Lausanne (1999)

[19] CHEKOUN Samir. Piégeage des Grains de Poussière dans les Gains d'un Plasma de Décharge. Thèse : de magister en physique. L'Université des Sciences et de la Technologie de bab elzouar Alger 2010

[20] BENAÏSSA Tahar. Contribution a l'Etude d'un Filtre Electrostatique. Thèse : de magister en Electrotechnique, Option : Haute tension et environnement. L'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. 2008.

[21] BELHACHMI Abdelkader « Analyse et optimisation du fonctionnement d'un filtre électrostatique dans le cas fil plan ». . Thèse : de magister en Electrotechnique, Option : Haute tension et environnement. L'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran. 2012.