

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie électrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUE

Thème

**Etude et réalisation d'un filtre électrostatique à
trois alimentations**

Présenté Par :

- 1) Mammam Mohamed El sadek .
- 2) Maamar Mohamed Adel.

Devant les jurys composés de :

Pr. YOUNESS M	Pr	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. BARRACHED D	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. AISSOU M	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2017/2018

DÉDICACES

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères frères et sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes amis,, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de

Votre soutien infailible,

Merci d'être toujours là pour nous.

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **DR BRACHED DJELOUL**, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nous tenons également à remercier infiniment au membre de jury, le président **PR YOUNESS MOHAMMED**, notre examinateur **DR AISSOU MASSINISSA**.
Veuillez accepter dans ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

Chapitre I :

Généralités sur la décharge électrique

I.1	Introduction :.....	3
I.2	Processus d'ionisation et d'excitation :.....	3
I.2.1	Ionisation par collision :.....	4
I.2.2	Photo-ionisation :.....	5
I.2.3	Ionisation thermique :.....	5
I.2.4	Ionisation par les atomes métastables :	6
I.3	Excitation atomique :	6
I.4	Désexcitation :.....	7
I.5	Détachement et recombinaison :	7
I.5.1	Détachement d'électron :.....	7
I.5.2	Recombinaison :.....	7
I.5.3	Attachement d'électron :	8
I.6	Processus Cathodiques :.....	8
I.6.1	Emission par bombardement d'ions positifs :	8
I.6.2	Emission par photon ::.....	9
I.6.3	Emission thermique :.....	9
I.6.4	Emission par champ :	9
I.6.5	Emission par les métastables :.....	10
I.7	Avalanche électronique :.....	10
I.8	Mécanismes de claquage :.....	11
I.8.1	Théorie de Townsend :.....	11
I.8.2	Théorie du Canal (Streamer) :	12
I.8.3	Déférence entre la décharge de Townsend et Streamer :.....	16
I.8.4	Caractéristique courant-tension et régimes de décharge :	16
I.9	L'effet couronne :.....	17
I.9.1	Décharge couronne :.....	17

I.10	Loi de Peek- champ critique :	18
I.10.1	Conducteur lisse :	18
I.10.2	Conducteur réel :	19
I.11	Conséquences de l'effet de couronne dans l'air à la pression atmosphérique :	20
I.11.1	Pertes	20
I.11.2	Interférences radiotélévision :	20
I.11.3	Bruit audible :	20
I.12	Applications utilisant la décharge couronne :	21
I.12.1	Parafoudre :	21
I.12.2	Neutralisation :	21
I.12.3	Filtre électrostatique :	21
I.12.4	Séparateur électrostatique :	21
I.13	Conclusion :	22

Chapitre II :

Les filtres électrostatiques

II.1	introduction :	23
II.2	historique :	23
II.3	définition :	24
II.4	Construction et fonctionnement des filtres électrostatiques :	25
II.4.1	Filtrage électrostatique :	25
II.4.2	Types de filtres électrostatiques :	27
II.4.2.1	Électrofiltre Plaque – Fil :	27
II.4.2.2	Electrofiltre de plaque plate :	29
II.4.2.3	Électrofiltre fil-cylindre :	29
II.4.2.4	Electrofiltres humides :	30
II.4.2.5	Electrofiltres à deux étages :	31
II.4.3	Phénomènes mis en jeu :	32
II.5	Modèle du fonctionnement des filtres électrostatiques :	35
II.5.1	Efficacité de collecte :	35
II.5.2	Vitesse de migration :	36
II.5.3	Facteur de Cunningham :	36
II.6	Paramètres influençant l'efficacité :	39

II.6.1	Contre émission :	39
II.6.2	Le réentraînement :	40
II.6.3	Les effets électro hydrodynamiques :	40
II.7	Les avantages et les inconvénients d'électrofiltres :	41
II.7.1	Les avantage :	41
II.7.2	Les inconvénients :	41
II.8	Conclusion :	42

Chapitre III : Modélisation et optimisation d'un filtre électrostatique à refoulement

III.1	Introduction	43
III.2	Description du filtre électrostatique de laboratoire	43
III.3	Principe de fonctionnement	46
III.4	Matériel utilise	46
III.5	Etude expérimentale	48
III.5.1	Les expériences préliminaires	48
III.5.1.1	Diamètre de poussière D=2mm	48
III.5.1.2	Diamètre de poussière D=1.4mm	51
III.6	Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences	54
III.6.1	Choix des intervalles d'étude	54
III.6.2	Plan d'expériences composite et modèle de deuxième degré	56
III.7	Résultats des expérimentations	57
III.8	Conclusion	62

Chapitre IV : Modélisation et optimisation d'un filtre électrostatique à aspiration

IV.1	Introduction	63
VI.2	Description du filtre électrostatique de laboratoire	63
VI.3	Etude expérimentale	64
VI.3.1	Les expériences préliminaires	64
VI.3.1.1	Diamètre de poussier D=2mm	64
VI.3.1.2	Diamètre de poussier D= 1.4mm	67
IV.4	Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences	71

IV.4.1 Choix des intervalles d'étude.....	71
IV.5 Résultats des expérimentations	73
IV.6 Conclusion	78
CONCLUSION GENERALE :	79

Liste des figures

Figure(I.1): Collision entre un atome et un électron	P 4
Figure(I.2): Emission d'électron secondaire par bombardement d'ion positive	P 9
Figure(I.3): Accélération de l'électron	P 10
Figure(I.4): Ionisation par collision	P 10
Figure(I.5): Avalanche électronique.	P10
Figure(I.6): Entretien de la décharge par les processus cathodiques (TOWNSEND)	P12
Figure(I.7): Etapes successives du développement du STREAMER	P15
Figure(I.8): Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter électrode : 13 mm)	P16
Figure(I.9): Conducteur aérien.	P18
Figure(I.10): Représentation de quelque application de la décharge couronne :	P22
a- Parafoudre	P22
b- Filtre électrostatique	P22
c- Séparateur électrostatique	P22
Figure(II.1): Photographie d'un précipitateur électrostatique	P25
Figure(II.2): Les principales étapes qui interviennent dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique.	P26
Figure(II.3): Types d'électrofiltre plaque-fil	P28
Figure(II.4): Types d'électrofiltre plaque plate	P29
Figure(II.5): Types d'électrofiltre fil-cylindre	P30
Figure(II.6): Un électrofiltre humide	P31
Figure(II.7): Types d'électro filtres à double étage avec deux alimentation.	P32
Figure(II.8): Types d'électro filtres à double étage avec trois alimentation.	P33
Figure(II.9): variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules	P37
Figure(II.10): l'évolution de la charge des particules donnée par le modèle de Cochet en fonction du diamètre des particules.	P38
Figure(II.11): l'évolution de la vitesse de migration w_{th} en fonction du diamètre des particules	P38
Figure(III.1): photographie d'un diapositif de laboratoire	P43
Figure(III.2): filtre de deux étages trois alimentations.	P44
Figure(III.3): photographie de filtre	P45
Figure(III.4): photographie de la partie de collection	P45
Figure(III.5): photographie de la partie d'ionisation	P45
Figure(III.6): photographie de souffleur	P46
Figure(III.7): Photographie de la balance	P47
Figure (III.8): Photographie d'un générateur	P47
Figure (III.9): Photographie de tamiseur	P47
Figure(III.10): Variation du rendement en fonction de la vitesse du l'air.	P49
Figure(III.11): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.	P50
Figure(III.12): Variation du rendement en fonction de la tension de collection	P51
Figure(III.13): Variation du rendement en fonction de la vitesse du l'air.	P52
Figure(III.14): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.	P53
Figure(III.15): Variation du rendement en fonction de la tension de collection	P54
Figure(III.16): Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan	P56

<i>composite.</i>	
Figure(III.17): Effets de chaque facteur sur la réponse pour $D1=2mm$.	P58
Figure(III.18): Effets de chaque facteur sur la réponse pour $D2=1.4mm$.	P59
Figure(III.19): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour $D1=2mm$.	P59
Figure(III.20): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour $D2=1.4mm$.	P60
Figure(IV.21): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0, pour $D1=2mm$.	P60
Figure(III.22): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0, pour $D2=1.4mm$.	P61
Figure(IV.1): photographie d'un dispositif de laboratoire.	P63
Figure(IV.2): Variation du rendement en fonction de la vitesse de l'air.	P65
Figure(IV.3): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.	P66
Figure(IV.4): Variation du rendement en fonction de la tension de collection.	P67
Figure(IV.5): Variation du rendement en fonction de la vitesse de l'air.	P68
Figure(IV.6): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.	P69
Figure(IV.7): Variation du rendement en fonction de la tension de collection.	P70
Figure(IV.8): Effets de chaque facteur sur la réponse pour $D1=2mm$.	P74
Figure(IV.9): Effets de chaque facteur sur la réponse pour $D2=1.4mm$.	P75
Figure(IV.10): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour $D1=2mm$.	P75
Figure(IV.11): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour $D2=1.4mm$.	P76
Figure(IV.12): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0, pour $D1=2mm$.	P76
Figure(IV.13): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0, pour $D2=1.4mm$.	P77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau(I.1) : Energies d'ionisation de quelques gaz.....	04
Tableau(I.2) : Facteur de surface de quelque conducteurs.....	19
Tableau(III.1): influence de la vitesse du l'air sur le rendement.....	48
Tableau(III.2): influence de la tension d'ionisation sur le rendement.....	49
Tableau III.3): influence de la tension de collection sur le rendement.....	50
Tableau III.4): influence de la vitesse du l'air sur le rendement.....	51
Tableau(III.5): influence de la tension d'ionisation sur le rendement.....	52
Tableau(III.6): influence de la tension de collection sur le rendement.....	53
Tableau(III.7): Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré.....	57
Tableau(IV.1): influence de la vitesse du l'air sur le rendement.....	65
Tableau(IV.2): influence de la tension d'ionisation sur le rendement.....	66
Tableau(IV.3): influence de la tension de collection sur le rendement.....	67
Tableau(IV.4): influence de la vitesse du l'air sur le rendement.....	68
Tableau(IV.5): influence de la tension d'ionisation sur le rendement.....	69
Tableau(IV.6): influence de la tension de collection sur le rendement.....	70
Tableau(IV.7): Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré.....	73

INTRODUCTION GENERALE

Dans notre vie l'atmosphère se change à cause des activités humaines et naturelles, la qualité d'air est détériorée et la santé de l'être humain est en risque. Chaque jour le degré de pollution augmente de plus en plus et les risques de maladie liés à la pollution de l'environnement de notre planète deviennent plus grands à cause du développement grandissant. Tous les industries du monde participent à la pollution de l'atmosphère avec les rejets rejetés dans l'air, dans la mer et oublient la vie de l'être humaine et l'être vivant et son droit de vivre dans un milieu propre naturel sans pollution.

Les gouvernements du monde ont réglementé les émissions de polluants dans les rejets industriels et imposent des normes de plus en plus sévères. Ces réglementation rendent nécessaires de nouvelles études pour l'amélioration des techniques de filtration et de trouver d'autres solutions pour traiter les déchets industriels.

La plus ancienne de ces applications est le dépoussiérage électrostatique. Le précipitateur électrostatique, appelé également électro-filtre, est un moyen efficace pour la séparation des particules d'un gaz. Les électro-filtres sont principalement utilisés dans l'industrie lourde telle que la sidérurgie, les unités d'incinération des déchets, les cimenteries, les unités de production d'énergie. On trouve aussi ces filtres dans des applications domestiques telles que l'épuration de l'air des locaux (fumées de tabac,...) ou celle des ambiances de travail (brouillards d'huile, poussières de bois, ciment, farine,.....) et aussi dans les incinérateurs des déchets médicaux.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier les électro-filtres à un seul étage et à deux étages.

Ce document est composé de quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous présentons essentiellement la définition détaillée et les généralités sur l'effet couronne, de citer les paramètres rentrant en jeu ainsi que les conséquences et les applications industrielles directes de l'effet couronne.

Le deuxième chapitre est consacré sur l'étude des différents précipitateurs qui existent, leurs principes de fonctionnement et leurs efficacités.

Le troisième chapitre consacré a l'explication du modèle d'électro-filtre à deux étages réalisé, les différentes composantes de notre filtre (partie d'ionisation et partie de collection) par refoulement, les expériences préliminaires ensuite donné une étude expérimentale avec la méthode du plan d'expérience pour modéliser et optimiser notre dispositif dans laboratoire (IRECOM).

Le dernier chapitre est consacré sur les différentes composantes du modèle d'électro-filtre (deux étage) par aspiration, ensuite donné une étude expérimentale avec la méthode du plan d'expérience pour modéliser et optimiser le dispositif dans laboratoire (IRECOM).

Chapitre I

Généralités sur la décharge électrique

Généralités sur la décharge électrique

I.1 Introduction

Il existe une expérience simple, que tout le monde peut la faire, permettant de percevoir une force électrostatique, il suffit de frotter une règle en plastique avec un chiffon bien sec et de l'approcher de petits bouts de papier (c'est *l'électrisation*). Les papiers se collent à la règle, les corps électrisés possèdent de *l'électricité*. L'expérience est simple à réaliser, cependant l'interprétation n'est pas simple puisque si la règle est chargée par frottement, les bouts de papiers ne le sont a priori pas. Autre expérience du même style, un filet d'eau est dévié si on approche un film de cellophane.

Plus simplement, tout le monde a reçu une décharge en attrapant un chariot par temps très sec ou en descendant ou montant dans une voiture. Ce sont des phénomènes où il s'est produit une accumulation de charges, d'électricité et d'électricité statique.

À partir de là, on peut considérer deux catégories de corps : les isolants, ou diélectriques, où l'état d'électrisation se conserve localement et les conducteurs où cet état se répartit sur la surface du conducteur. L'électrisation des corps a pu être observée grâce aux propriétés isolantes de l'air sec qui empêche l'écoulement vers la terre des charges créées par frottement.

De même une petite expérience permet de démontrer l'importance de l'électricité statique, il suffit de charger un peigne en plastique (en se peignant avec des cheveux sec) puis d'approcher le peigne chargé d'une lampe à tube à néon : dans l'obscurité, en approchant le peigne du tube, celui s'allume localement ! Le champ électrique produit par le peigne est suffisant pour exciter le gaz à l'intérieur du tube. D'où l'importance de l'électricité statique, si le champ électrique d'un simple peigne est suffisant pour exciter un gaz, la décharge d'électricité statique dans un appareil électronique sensible peut aussi le détruire.

I.2 Processus d'ionisation et d'excitation [1]

Les électrons dans un conducteur sont libres, dès qu'on applique un champ aussi faible soit-il ils se détachent de l'atome et se déplacent avec le champ. Par contre dans un isolant, les électrons sont liés et ne se détachent que si on leur fournit une énergie suffisamment grande supérieure à l'énergie d'ionisation de l'atome.

L'énergie d'ionisation W_i est l'énergie qui retient l'électron dans l'orbite de l'atome.

$$W_i = e V_i \quad (\text{I.1})$$

e : charge élémentaire d'un électron ; V_i : potentiel d'ionisation

Tableau(I.1) : Energies d'ionisation de quelques gaz.

Molécules	W_i (eV)
CO ₂	13.7
N ₂	15.5
O ₂	12.2
H ₂	15.4
H ₂ O	12.6

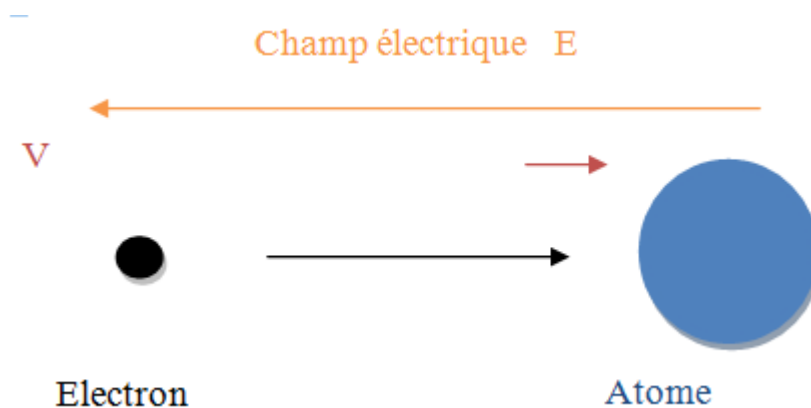
I.2 .1 Ionisation par collision

Sous l'action du champ électrique E l'électron qui se déplace avec une énergie cinétique W_c entre en collision avec l'atome

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{I.2})$$

m : masse de la particule

v : vitesse de la particule



Figure(I.1) : Collision entre un atome et un électron

Si : $W_c \geq W_i$

✓ ionisation de l'atome



Avec $\Delta W = W_c - W_i$ énergie supplémentaire cédée à l'électron libère sous forme d'énergie cinétique. C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz.

I.2 .2 Photo-ionisation

L'atome absorbe l'énergie d'un photon W_p .

Si : $W_p \geq W_i$

✓ photo-ionisation



Avec $\Delta W = W_p - W_i$ cédée à l'électron libéré sous forme d'énergie cinétique.

Si W_p légèrement inférieure à W_i

✓ photo-excitation.



I.2 .3 Ionisation thermique

Lorsqu'un gaz est porté à une température élevée (>1500 °K), l'atome est ionisé grâce à l'énergie thermique absorbée W_{th} .



Avec :

W_{th} : l'énergie thermique gagnée par l'atome.

A : Atome neutre

A^+ : Atome ionisé ou ion positif

e : électron libéré

$$\Delta W = W_{th} - W_i \quad (\text{I.7})$$

L'ionisation thermique est rencontrée surtout dans les gaz à haute pression. Dans ce cas, l'ionisation ne se produit pas au cours d'un seul choc, mais est le résultat d'excitations successives ; en effet, la forte densité des particules rend la fréquence des chocs élevée. Le temps moyen entre deux chocs successifs est inférieur à la durée de vie de l'atome excité, si bien les excitations se cumulent pour arriver à la valeur d'ionisation.

I.2.4 Ionisation par les atomes métastables

Un métastable A^m est un atome excité qui garde assez longtemps l'énergie absorbée (de l'ordre de 1s). Lors de la rencontre avec un atome B, il peut se produire un transfert d'énergie qui permettra l'ionisation de ce dernier.



A^m : Atome métastable.

B : Atome neutre.

A : métastable désexcité.

B^+ : Atome ionisé.

E : électron libéré

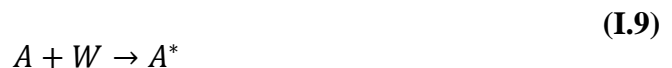
ΔW : Énergie cédée à l'électron libéré

C'est le processus le moins fréquent.

I.3 Excitation atomique

Un atome excité A^* est un atome qui a absorbé et emmagasiné une énergie. Cela se produit lorsque l'énergie cinétique est légèrement inférieure à W_i .

Si W_c est légèrement inférieure à W_i excitation de l'atome.



Chaque type de gaz possède une valeur propre de l'énergie d'excitation W_{ext} :

$$W_{ext} = eV_{ext} \quad (\text{I.10})$$

V_{ext} : Potentiel d'excitation

I.4 Désexcitation

Les processus de désexcitation peuvent se produire spontanément, lorsque l'électron d'un atome excité revient sur son orbite fondamentale. La perte d'énergie est compensée par l'émission d'un photon ayant une énergie égale au potentiel de désexcitation.

Après un temps très bref (entre 10^{-7} et 10^{-10} s) l'énergie est restituée au gaz sous forme d'un photon d'énergie :

$$W_p = h\nu (A^* \rightarrow A + W_p) \quad (\text{I.11})$$

Avec :

$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$: constante de Planck

ν : fréquence du photo

I.5 Détachement et recombinaison

I.5.1 Détachement d'électron

Détachement : Quand l'ion négatif cède l'électron supplémentaire.



I.5.1 Recombinaison

Quand deux charges opposées se recombinent pour former une particule neutre (inverse de la photo ionisation)

a) Entre un ion positif et un électron :



b) Entre deux ions opposés :



I.5.3 Attachement d'électron

Quand un électron s'attache à un atome pour former un ion négatif :



L'attachement se produit pour des champs assez faibles. Les particules neutres (atomes et molécules) favorisent l'attachement des électrons.

L'attachement correspond à une diminution d'électrons dans le gaz ; par analogie avec l'augmentation d'électrons par ionisation (α), on écrit :

$$\frac{dn}{n} = -\eta dx \text{ soit } n = n_0 e^{-\eta x} \quad (\text{I.16})$$

Avec :

η : coefficient d'attachement,

n_0 : nombre d'électrons initial

n : nombre d'électrons attachés.

I.6 Processus Cathodiques

Si on fournit à un métal une énergie suffisante, supérieure à l'énergie d'extraction, il libère un ou plusieurs électrons situés à sa surface. Pour cette raison la cathode joue un rôle important car les électrons extraits participent au claquage.

Exemples:

Aluminum $W_{ext} = 0,1 \text{ eV}$

Nickel $W_{ext} = 0,075 \text{ eV}$

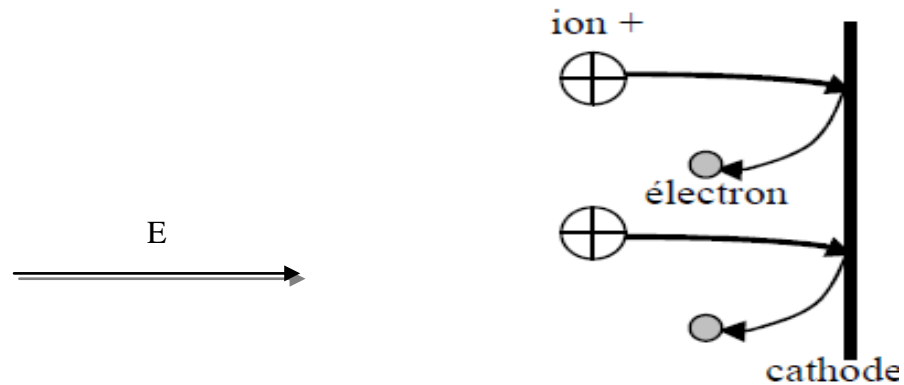
Alliage Al-Ni $W_{ext} = 0,15 \text{ eV}$.

I.6.1 Emission par bombardement d'ions positifs

Les ions positifs se dirigent vers la cathode avec une énergie cinétique et la bombardent.

$$W_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{I.17})$$

Si $W_c \geq W_{ext}$, la cathode libère un ou plusieurs électrons. C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz. la figure montre le bombardement



Figure(I.2) : Emission d'électron secondaire par bombardement d'ion positive

I.6.2 Emission par photon

La cathode absorbe un photon d'énergie $W_c = h\nu$

Si : $W_c \geq W_p$ il y a extraction d'un ou plusieurs électrons.

I.6.3 Emission thermique

Quand la température de la cathode devient très grande (entre 1500 et 2500 °K), l'énergie thermique de la cathode extrait un ou plusieurs électrons. En effet, les vibrations élevées des particules s'aboutissent à la libération d'un ou de plusieurs électrons situés à la surface du métal.

I.6.4 Emission par champ

Si le champ à la surface est très élevé (10^7 à 10^8 V/cm), un ou plusieurs électrons peuvent être extraits par la force électrique

✓ Remarque :

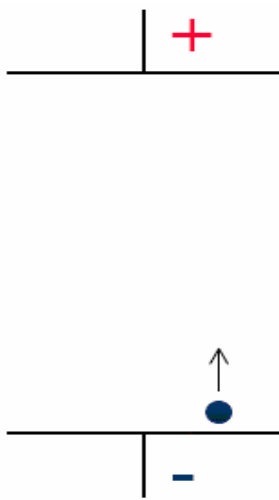
De tels champs peuvent être atteints lorsque la cathode présente des irrégularités et des Imperfections à la surface (micro-pointes) même avec une tension appliquée de 2 à 5 kV. C'est un processus d'ionisation très peu fréquent.

I.6.5 Emission par les métastables

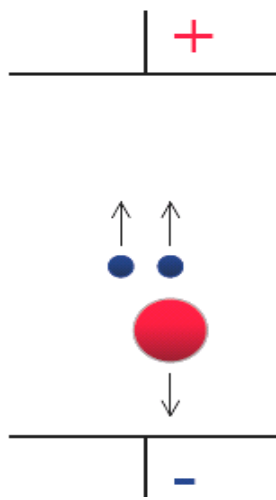
Le bombardement de la cathode par les métastables permet aussi l'extraction d'électrons. C'est aussi un processus peu fréquent.

I.7 Avalanche électronique

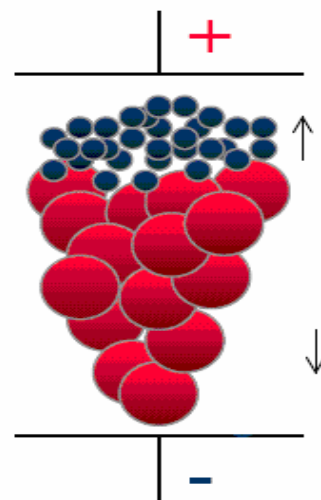
Considérons un système de deux électrodes planes et par allè les plongées dans un gaz isolant et entre les quelles il y a un électron libre. Lorsqu'on applique une tension, l'électron est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique (figure I.3). Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons (figure I.4). Ce phénomène est caractérisé par un coefficient α appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de (Townsend)). Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collisions au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive), à la création d'une avalanche électronique.



Figure(I.3): Accélération de l'électron



Figure(I.4): Ionisation par collision



Figure(I.5) : Avalanche électronique.

I.8 Mécanismes de claquage

I.8.1 Théorie de Townsend

✓ Mécanismes de claquage

Dans la théorie de Townsend, les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode qui vont venir renforcer l'avalanche. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important. L'avalanche s'auto entretient et le claquage se produit même si la tension n'est plus appliquée. On définit le coefficient γ appelé coefficient d'émission secondaire ou second coefficient de Townsend qui représente le nombre d'électrons arrachés à la cathode par un ion positif. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz.

✓ Critère de claquage

L'équation générale de Townsend reliant le courant d'avalanche I au courant initial I_0 en champ non uniforme est :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1 + \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta)\right] \alpha dx}{1 - \gamma \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx} \quad (\text{I.18})$$

Où :

d : Distance inter-électrodes en mm

α : Coefficient d'ionisation

γ : Coefficient d'émissions secondaires

η : Coefficient d'attachement

Ce dernier caractérise la propriété qu'ont certains gaz à capturer des électrons (gaz dits électronégatifs).

Dans ce cas, le critère de claquage est:

$$\gamma \int_0^d \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx = 1 \quad (\text{I.19})$$

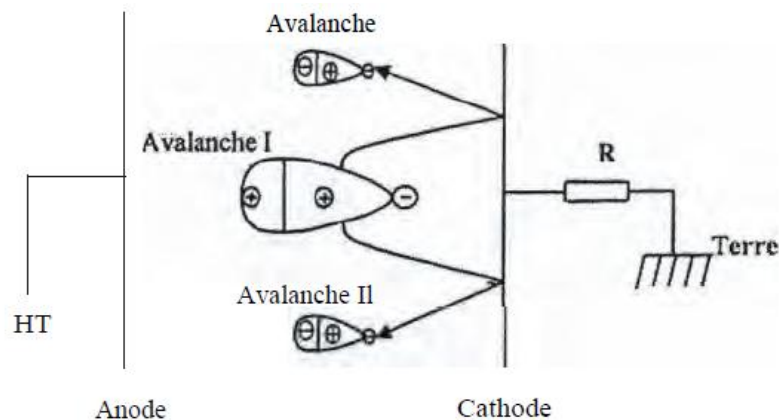
Pour un champ uniforme, ce critère devient:

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha - \eta} [\exp(\alpha - \eta) d - 1] = 1 \quad (\text{I.20})$$

Pour un champ uniforme et un gaz non électronégatif, le critère devient :

$$\gamma [\exp \alpha d - 1] = 1 \quad (\text{I.21})$$

Dans le cas d'intervalles inter-électrodes de plus d'un centimètre et des pressions proches de la pression atmosphérique, la théorie de Townsend ne peut pas expliquer les temps de développement de la décharge mesurés (10^{-9} à 10^{-7} s). Ces temps étant beaucoup plus courts que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode. Cette théorie ne peut également pas expliquer le fait que la tension de claquage ne dépende pas du matériau de la cathode qui doit intervenir par l'intermédiaire du coefficient d'émissions secondaires γ .



Figure(I.6) : Entretien de la décharge par les processus cathodiques (TOWNSEND)

I.8.1 Théorie du Canal (Streamer)

✓ Mécanismes de claquage

Dans la théorie du Streamer, la présence d'une seule avalanche de taille suffisamment importante peut provoquer le claquage par l'intermédiaire d'un canal de plasma appelé Streamer.

Les mécanismes de base de cette théorie sont :

- La création d'une avalanche primaire du type Townsend engendrée par un électron germe.

- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la première avalanche.
- La photo ionisation du gaz à la tête de l'avalanche.
- La transition avalanche-Streamer lorsque le champ de charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué.

L'avalanche primaire peut prendre naissance en un point quelconque de l'intervalle inter électrodes pour une valeur critique du champ électrique. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. En effet, dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode (électrode positive) alors que de l'autre côté, les ions positifs restent immobiles (la mobilité des électrons est 100 à 1000 fois supérieure à celle des ions). Le champ devient alors non uniforme et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice. Le champ électrique sur les flancs de l'avalanche quant à lui, diminue. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ 10^8 électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur les pôles.

Dans l'avalanche, les électrons et les ions se recombinent en partie. L'énergie rayonnée peut provoquer la photo ionisation des particules de gaz se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'avalanche. Les électrons nouvellement créés peuvent, si le champ local est suffisamment intense, conduire par chocs ionisants, à la naissance de nouvelles avalanches dites secondaires qui vont créer à leurs tours une charge d'espace positive à l'avant de la première. Ce sa avalanches secondaires jouent le rôle de facteur d'entretien et la décharge devient autonome.

Chaque avalanche se développe pour son propre compte et de façon très rapide. La première' a pas fini de croître que déjà toute une chaîne se crée. Alors que les électrons se déplacent vers l'anode, la chaîne semble progresser vers la cathode. La progression de cette chaîne est très rapide du fait que les phénomènes se transplantent par rayonnement lumineux et non par migration d'électrons et d'ions. L'ionisation se fait donc sans l'intervention de la cathode.

La décharge prend alors la forme d'un canal dans la direction de l'axe des électrodes. Son développement dépend de la répartition du champ électrique.

D'autre part, lors de collisions élastiques (non ionisantes) avec les particules neutres du gaz, les charges leur transmettent une partie de leurs énergies cinétiques. Il en résulte une augmentation

De la température du gaz. Tant que celle-ci est inférieure à celle nécessaire à l'ionisation thermique, elle n'aura aucune influence sur le développement de la décharge C'est le cas dans le développement du type Streamer.

Le champ électrique extérieur nécessaire à l'entretien du streamer est inférieur à celui conditionnant l'ionisation par collisions. Pour l'air, par exemple, le champ moyen du Streamer se développant à partir de l'anode est d'environ $0.5 \cdot 10^6$ V/m et de $1.5 \cdot 10^6$ V/m lorsque celui-ci se développe à partir de la cathode alors que le champ critique est d'environ $3 \cdot 10^6$ V/m (dans les conditions normales de pression et de température).

Dans le cas d'intervalles inter-électrodes importants (> 1 m pour l'air à pression atmosphérique), la décharge en forme de Streamer se transforme lors de son passage vers l'autre électrode en une forme de décharge appelée Leader. L'augmentation du nombre de porteurs de charges à l'intérieur du Streamer en même temps que sa propagation peut accroître la température du gaz jusqu'à une valeur favorisant l'ionisation thermique.

L'intensité du champ électrique nécessaire au maintien de cette forme de décharges est plus faible que celle du Streamer ; ce champ décroît avec la longueur du Leader.

✓ Critère de claquage

Plusieurs critères ont été proposés pour caractériser le claquage selon le mécanisme du Streamer. Meeka déterminé l'équation suivante pour la rupture d'un intervalle en champ non uniforme :

$$\alpha_x \exp \left[\int_0^x \alpha dx \right] = K E_x \left(\frac{x}{p} \right) \quad (\text{I.22})$$

Avec

x : se rapporte à la position du front de l'avalanche.

α : Coefficient d'ionisation.

x : Longueur critique de l'avalanche

K : Constante caractéristique du gaz.

E : Le champ électrique

P : La masse volumique du gaz

Raether a proposé une relation semblable :

$$\int_0^x \alpha dx = k \tag{I.23}$$

Où k est une constante du gaz.

Pour l'air atmosphérique, elle est voisine de 20.

Pedersen a proposé la relation suivante pour l'air :

$$\alpha_x \exp \left[\int_0^x \alpha dx \right] = G(x, \rho) \tag{I.24}$$

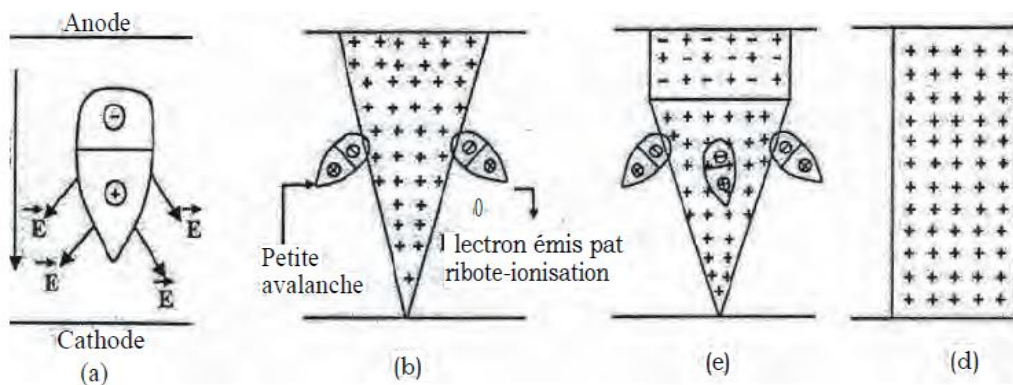
Où $G(x, \rho)$ est une fonction de la longueur critique de l'avalanche et de la masse volumique du gaz.

Pour le SF₆, il a proposé la relation suivante :

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = 18 \tag{I.25}$$

On conclut que "le modèle du Streamer est important d'un point de vue quantitatif puisqu'il permet de connaître la probabilité conditionnant le mécanisme de décharges pour les grandes valeurs du produit .Malheureusement, à cause du grand nombre de phénomènes qui interviennent, l'obtention de résultats qualitatifs sur la base de ce mécanisme est pratiquement impossible.

Les considérations théoriques doivent être complétées par des résultats expérimentaux, permettant d'établir des relations quantitatives nécessaires à la conception de systèmes d'isolation.



Figure(I.7) : Etapes successives du développement du STREAMER

I.8.3 Différence entre la décharge de Townsend et Streamer

Pour la théorie de Townsend, la pression utilisée dans les gaz est très faible, il faut attendre qu'on ions positif au moins se dirige vers la cathode pour en extraire un ou plusieurs électrons secondaires, qui provoqueront d'autres avalanche secondaires.

Pour la théorie Streamer, la pression utilisée dans le gaz est très élevée ; les électrons secondaires sont libérés par photo ionisation dans le volume du gaz et contribution à la formation du canal avec un champ intense.

$$E_t = E + E_r \quad (\text{I.26})$$

Avec :

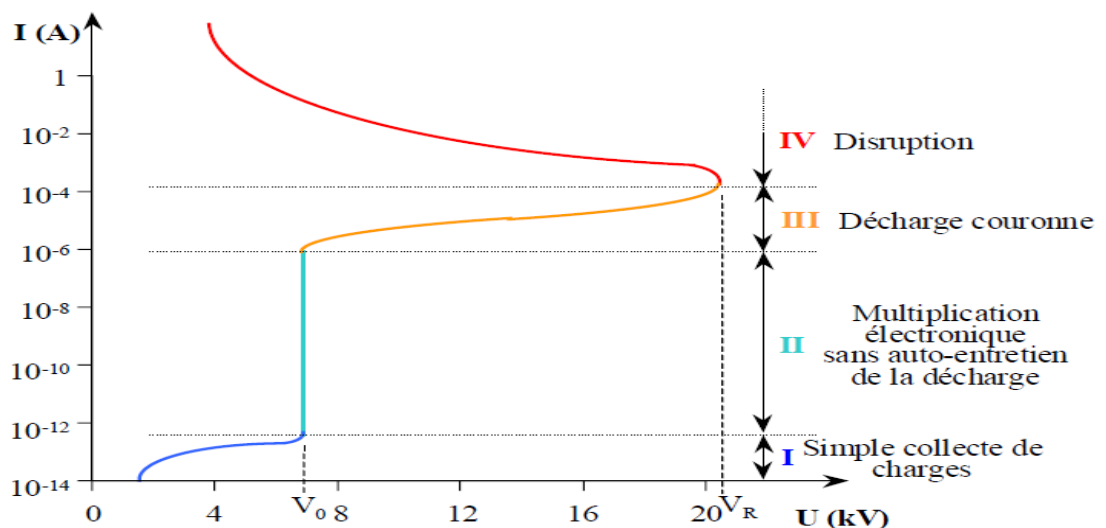
E_t : Champ total.

E : Champ électrique.

E_r : Champ radial.

I.8.4 Caractéristique courant-tension et régimes de décharge

La caractérisation courant-tension de la décharge couronne est obtenue en faisant croître la tension appliquée à l'intervalle gazeux. Différents régimes de décharge sont alors parcourus (Figure I.8).



Figure(I.8):Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique (configuration pointe-plan, distance inter électrode : 13 mm).

Le premier régime(I) consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter électrode.

Le second régime (II), qui se produit à partir d'une tension seuil V_0 , traduit le déclenchement de l'avalanche électronique de Townsend mais ne répond pas encore au critère d'auto-entretien de la décharge. La décharge est qualifiée de non-autonome car elle dépend de processus d'ionisation externes pour donner naissance aux électrons germes. Pour ce régime, le courant augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée.

Pour le troisième régime (III), l'ionisation du gaz par la décharge est suffisante pour ne plus nécessiter de phénomènes d'ionisation extérieurs : la décharge est auto-entretenu. C'est le régime de la décharge couronne, où apparaissent les dards (aussi appelés 'streamers') responsables de la composante impulsionnelle du courant. Au-delà d'une tension appliquée V_r , la température du canal augmente fortement, ce qui provoque la dilatation brutale du gaz. Le champ réduit E/N est alors suffisamment important pour que les phénomènes d'ionisation deviennent majoritaires par rapport à l'attachement électronique. Le régime d'arc (IV) est atteint, le milieu passe de l'état de plasma hors équilibre à l'état de plasma thermique.

I.9 L'effet couronne [2]

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension.

Quand la densité de charge sur une électrode devient très importante et si le potentiel est assez élevé, le champ électrique devient assez grand pour qu'il se produise une décharge dans l'air.

Les formes d'électrodes le plus propices au développement de ce phénomène sont celles qui présentent les plus grandes courbures : pointe, fil de petit diamètre.

I.9.1 Décharge couronne

La décharge couronne représente l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure, les électrodes étant soumises à une différence de potentiel élevée. On désigne sous le nom d'électrode active celle qui possède le

plus petit rayon de courbure, la décharge étant positive ou négative suivant que cette électrode joue le rôle d'anode ou de cathode.

Le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes ou molécules en électrons et ions positifs.

Les charges de signe opposé à celui du conducteur sont instantanément attirées vers lui et neutralisées alors que les charges de même signe sont repoussées. Si l'électrode active est anode, les ions positifs sont repoussés et traversent l'espace entre les deux électrodes.

Pour une électrode active cathode, comme les électrons s'attachent très rapidement aux atomes ou molécules neutres, des ions négatifs sont formés et tout se passe comme si des ions de même polarité que l'émetteur étaient émis sous l'effet de l'ionisation.

✓ Inconvénients

Pertes couronne, interférence avec les ondes radio, bruit et vibrations des conducteurs

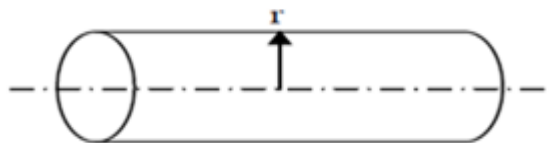
✓ Avantage

Plusieurs applications industrielles (Filtres électrostatiques, séparateurs électrostatiques, photocopie...).

I.10 Loi de Peek- champ critique

Le champ critique d'apparition de l'effet couronne sur un conducteur est :

I.10.1 Conducteur lisse



Figure(I.9) : Conducteur aérien.

$$E_{CC} = E_s \delta \left(1 + \frac{k}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (kv/cm) \quad (\text{I.27})$$

Pour une tension continue : E_{cc} en valeur efficace ;

Pour une tension alternative : E_{cc} en valeur max ou amplitude

Avec :

$$\delta = \frac{3.92 * P}{273 + t} \quad \text{densité relative de l'air} \quad (\text{I.28})$$

Remarque : conditions normales $P = 76 \text{ cm}$ et $t = 25^\circ\text{C}$ $\delta=1$

Où :

$E_s = 30 \text{ kV/cm}$

R : Rayon du conducteur (cm)

P : Pression en cm de mercure (cm Hg)

T : Température ($^\circ\text{C}$)

$K = 0,308$.

I.10.2 Conducteur réel

Le conducteur réel d'une ligne aérienne présente une surface non lisse et rugueuse (toronnée). En plus, la graisse du conducteur favorise le dépôt de poussières, particules végétales et même des insectes. Ces particules forment des micro-pointes qu'on appelle aspérités.

Le pouvoir de pointe fait diminuer le champ critique : $E_0 = m * E_{cc}$

Avec $0 < m < 1$: coefficient de l'état de surface.

Tableau(I.2) : Facteur de surface de quelque conducteurs.

Conducteur	Facteur de surface m
Lisse et neuf	1
Lisse, oxydé	0,93 – 0,98
Toronné	0,72 – 0,9
par défaut	0,85

L'effet couronne dépend de la géométrie des conducteurs (forme, présence d'irrégularités ...) et de l'environnement (pression, humidité, pollution).

I.11 Conséquences de l'effet de couronne dans l'air à la pression atmosphérique

I.11.1 Pertes

Dans une décharge couronne, une grande partie de l'énergie électrique est perdue dans les collisions entre les molécules neutres du gaz. Ainsi les pertes dépendent principalement de la quantité de charge produite. De plus elles sont fortement influencées par l'état de surface du Conducteur et par les conditions climatiques. En effet, la valeur moyenne annuelle des pertes par effet de couronne est relativement faible soit de l'ordre de quelques kW/cm. Mais par mauvais temps on peut atteindre une valeur maximum de pertes par effet de couronne plus de vingt fois plus grande que la valeur moyenne.

Ces augmentations ont une influence sur la livraison d'énergie surtout pendant les périodes de pointe. Pour ces raisons les concepteurs de ligne déterminent le diamètre et le nombre de conducteurs par phase en considérant le champ critique d'apparition de l'effet de couronne et de l'intensité de précipitation.

I.11.2 Interférences radiotélévision

La nature impulsionnelle de la décharge couronne est à l'origine des parasites ou interférences radiotélévision qui peuvent être captées par les antennes des récepteurs qui se trouvent proches de lignes de transport d'énergie (moins de 100 m). Outre l'effet de couronne, les étincelles ou les petits arcs électriques sont également responsables de perturbations.

I.11.3 Bruit audible

L'effet de couronne est à l'origine d'une onde sonore produite par une variation locale de la pression qui se propage dans l'air environnant. La principale source de bruit audible provient des gouttes suspendues ou des gouttes passant à proximité des conducteurs. Il a été observé aussi que le givre est un générateur de bruit audible. De plus, en présence de la vibration induite par effet de couronne sous pluie, les bruits irréguliers sont parfois modulés à la fréquence de vibration mécanique des conducteurs.

I.12 Applications utilisant la décharge couronne

I.12.1 Parafoudre

L'effet couronne augmente la conductivité de l'air autour de la pointe ; le canal de la foudre qui opte pour le chemin le moins résistant est capté par le paratonnerre. Figure(I.10.a)

I.12.2 Neutralisation

La surface de l'avion se charge par frottement avec l'air. Les charges créées par effet couronne produit par des flèches disposées sur les ailes de l'avion éliminent par neutralisation les charges surfaciques.

I.12.3 Filtre électrostatique

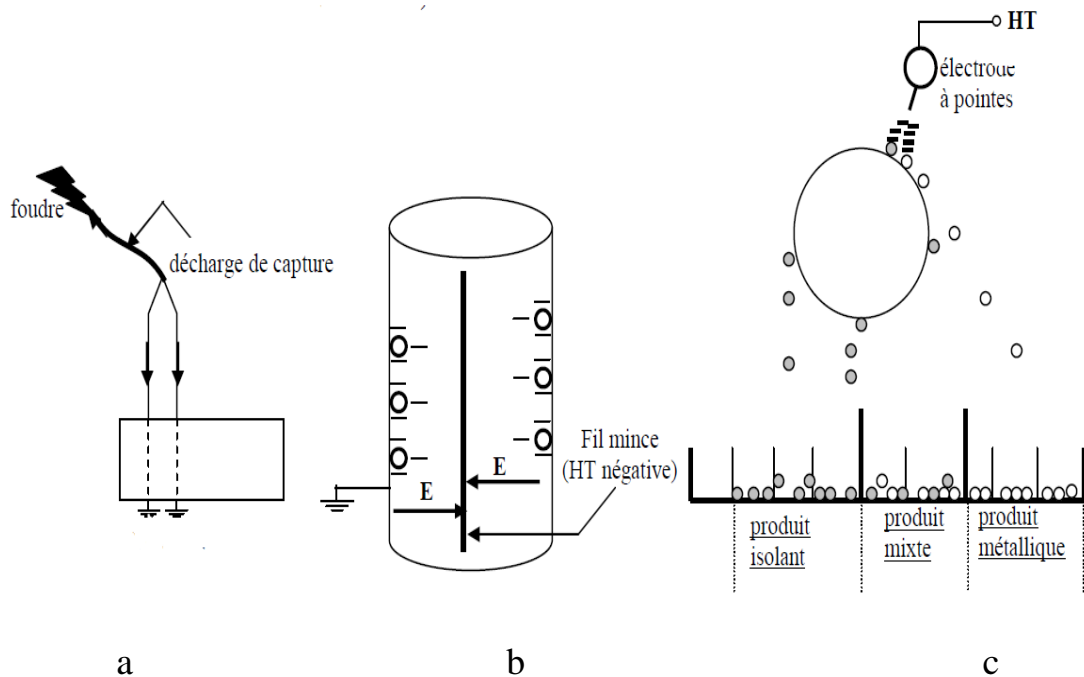
Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussière qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir.

Le cylindre joue le rôle d'un filtre de poussières, lequel une fois saturé sera remplacé par un nouveau filtre. Figure (I.10.b)

I.12.3 Séparateur électrostatique

Un mélange de particules granuleuses acquière des charges électriques créées par effet couronne grâce à une électrode à pointes reliée à une source de haute tension négative.

Ces particules se comportent différemment selon qu'elles sont isolantes ou métalliques et tombent dans des endroits différents. Figure(I.10.c).



Figure(I.10) : Représentation de quelques applications de la décharge couronne .

a-Parafoudre

b-Filtre électrostatique

c- Séparateur électrostatique

I.13 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de présenter essentiellement la définition détaillée et les généralités sur l'effet couronne, de citer les paramètres rentrant en jeu ainsi que les conséquences et les applications industrielles directes de l'effet couronne.

La décharge couronne sera le paramètre principale pour le fonctionnement du filtre électrostatique.

Chapitre II

Les filtres électrostatiques

Les filtres électrostatiques

II.1 Introduction

Les filtres électrostatiques sont des moyens utilisés pour éliminer les particules polluantes solides (telles que la poussière et la fumée) ou liquides (tel que le brouillard) contenues dans un gaz en utilisant une force électrostatique.

Les filtres électrostatiques ont été largement utilisés pour la filtration des gaz dans la plupart des processus industriels avec un volume de gaz moyen et élevé ($> 2000 \text{ m}^3/\text{min}$), y compris les chaudières, les hauts fourneaux et les cimenteries.

Les filtres électrostatiques utilisent directement l'énergie électrique pour contribuer à l'enlèvement de fines particules de tout genre de gaz d'échappement. Leur rendement est très haut. Des particules aussi petites qu'un dixième de micron peuvent être enlevées. Le système possède deux électrodes isolées, l'une de l'autre et à différentes charges électriques. Quand un gaz chargé d'aérosols passe entre ces électrodes, les particules d'aérosol se précipitent sur celle à charge plus faible. Il existe plusieurs types des filtres électrostatiques. Ils sont principalement utilisés à des fins industriels, mais aussi pour la purification de l'air dans des bâtiments publics, des salles de cinéma, des wagons, etc....

Dans ce chapitre nous citons au premier lieu des notions de bases sur le principe et les modèles de fonctionnement des électro filtres et leurs efficacités, les différents types des filtres électrostatiques utilisés actuellement dans l'industrie.

II.2 Historique

Le principe de fonctionnement de l'électro filtre est connue depuis 1820, mais la première application industrielle connue d'électro filtre 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 électro filtres 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. 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* [3] 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,) dans les zones de transports routiers ou maritimes denses.

II.3 Définition

L'électrofiltration est un procédé extrêmement efficace pour la séparation des particules d'un gaz.

Les électrofiltres sont principalement utilisés dans l'industrie lourde telle que la sidérurgie, les unités d'incinération des déchets (figure II.1.), les cimenteries, les unités de production d'énergie. Ils peuvent également être utilisés pour des applications domestiques telles que l'épuration de l'air des locaux (fumées de tabac, ...) ou celles des ambiances de travail (brouillards d'huile, poussières de bois, ...). Leur efficacité est extrêmement élevée, notamment pour les particules microniques et submicroniques ou d'autres systèmes sont peu efficaces [4-6].



Figure(II.1) : Photographie d'un précipitateur électrostatique.

II.2 Construction et fonctionnement des filtres électrostatiques

II.4.1 Filtrage électrostatique

Le principe du fonctionnement des précipitateurs électrostatiques est basé sur l'action du champ électrique sur les charges ou les particules chargées. La force électrique agit directement sur les particules chargées à retenir ; donc ces forces sont des forces séparatrices.

Ce phénomène de précipitation électrostatique se retrouve largement dans les filtres électrostatiques (appelés également précipitateurs électrostatiques(ESP) ou électro filtre) [7].

Dans les filtres électrostatiques les plus simples, un potentiel électrique très élevé est appliqué à un fil placé dans l'axe d'un cylindre relié à la terre à l'intérieur duquel passe le gaz pollué. Une décharge couronne se forme autour du fil et les ions qui ont la même polarité que le fil sont repoussés vers le cylindre. Cela conduit à la formation d'une charge d'espace ionique ayant une densité très forte à proximité du fil et qui décroît vers la surface du cylindre.

Certains de ces ions sont captés par les poussières en raison de la distorsion locale du champ électrique, causée par la différence de la valeur entre la permittivité relative des particules et celle du gaz [8,9]. Ainsi, les particules se chargent en captant les ions, jusqu'à atteindre une charge maximale (souvent appelée charge limite). Pour une particule quelconque de taille suffisante (supérieure à quelques microns), la charge limite correspond au moment où l'intensité du champ électrique dû aux charges acquises à sa surface devient égale à celle du maximum sur la surface d'une particule identique non chargée, du champ électrique généré par la différence de potentiel entre les deux électrodes et la distribution de charge d'espace. Les particules chargées sont soumises à une force électrique dirigée vers la surface du cylindre extérieur relié à la terre. Elles forment alors une couche qui adhère ainsi à la paroi jusqu'à ce

qu'elles soient détachées par le frappage du cylindre ou emportées par lavage. Les étapes successives qui interviennent dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique sont représentées schématiquement dans la figure (II.2).

La formation de la couche de poussières sur la surface collectrice est gérée principalement par les forces électriques ainsi que par les forces d'adhésion surfacique. Les particules isolantes ne perdent pas immédiatement leur charge au contact de l'électrode de collecte, ce qui assure une bonne compaction de la couche. Par contre, les particules conductrices perdent en un temps très court leur charge au contact de la paroi et se chargent en polarité opposée par induction [10].

Donc, le fonctionnement d'un précipitateur électrostatique reste efficace seulement si les particules ont une résistivité électrique suffisamment élevée.

Généralement, les électrofiltres traitent des fumées de charbon, des brouillards d'huile, des fumées de soudage, des gaz évacués par les moteurs diesel, etc.... Cependant, ils ne peuvent pas épurer les poussières métalliques, les gaz explosifs ou les vapeurs d'eau, cas dans lesquels la conductivité électrique des particules devient importante.

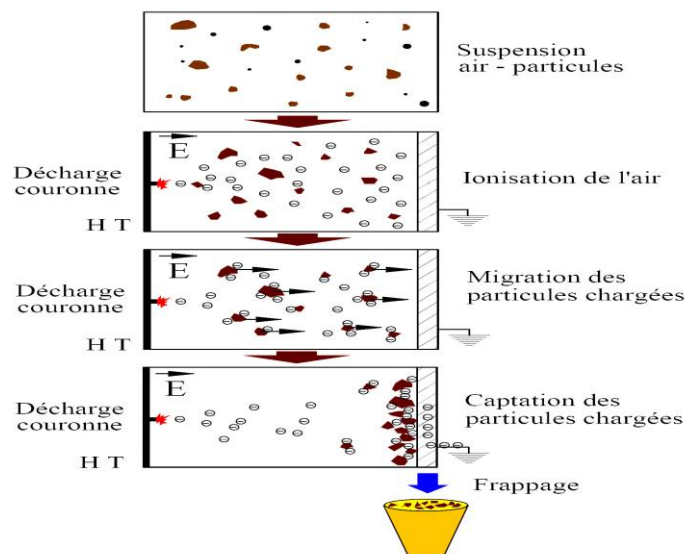


Figure (II.2): Les principales étapes qui interviennent dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique.

A partir de ces principes simples de fonctionnement, plusieurs types de filtres électrostatiques ont été réalisés au cours du temps, en essayant de trouver pour chaque application pratique la variante de construction qui assure la meilleure efficacité de séparation [11,12].

II.4.2 Types de filtres électrostatiques

Les filtres électrostatiques (électro filtres) sont configurés de plusieurs manières.

Certaines de ces configurations ont été développées pour l'action spéciale de commande, et d'autre sont évolué pour des raisons économiques.

Les types qui seront décrits ici sont :

- 1- le précipitateur de plaque-fil, la variété la plus commune.
- 2- le précipitateur de plaque plate.
- 3- le précipitateur fil-cylindre (tubulaire).
- 4- le précipitateur humide, qui peut avoir l'une des configurations mécaniques précédentes.
- 5- le précipitateur à deux étages.

II.4.2.1 Électro filtre Plaque – Fil

Les Électro filtres Plaque – Fil sont employés dans une grande variété d'applications industrielles, y compris les chaudières à charbon, les fours à ciment, les chaudières de rétablissement de moulin à papier d'incinérateur de déchets solides et, le pétrole raffinant les unités fendantes catalytiques, les usines d'agglomération, les fours à l'oxygène, les fours électriques à arc, les batteries de four à coke, et les fours de verre.

Dans un électro filtre Plaque – Fil 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.3). En général, les électrodes de collecte sont soumises périodiquement au frappe, ce qui permet de décoller les agrégats afin de les retenir dans des 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 [13,14].

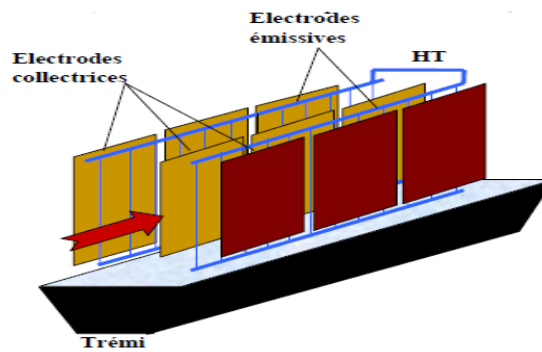


Figure (II.3): Types d'électro filtre plaque-fil

L'électro filtre Plaque – fil permet à beaucoup de ruelles d'écoulement de 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 a causé les plaques d'être divisé en sections, souvent trois ou quatre en série entre eux, qui peuvent être indépendant frappé.

Les alimentations d'énergie pour les électro filtres et obtenu par la conversion de la tension CA (220v /380) industriel à la tension CC dans la gamme de 20.000 à 100.000 V.

L'approvisionnement compose d'un transformateur élévateur, des redresseurs à haute tension, et parfois des condensateurs de filtre. L'unité peut assurer la tension CC rectifiée à demi-onde ou double alternance. Il y a les composants auxiliaires et les commandes pour permettre à la tension d'être ajustée sur le possible de plus haut niveau sans étincellement excessif et pour protéger l'approvisionnement et les électrodes en cas un arc ou un court-circuit lourd se produit.

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 donné es une polarité négative parce qu'une décharge couronne négative soutient une tension plus élevée qu'une 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 [15].

Les particules passant par la zone de remplissage interceptent certains ions, qui deviennent attachés. Les petites particules d'aérosol (diamètre de $\mu m < 1$) peuvent absorber des dizaines d'ions

avant que leur charge totale devienne assez grande pour repousser d'autres ions, et les grandes particules (diamètre de $\mu m > 10$) peuvent absorber des dizaines de milliers. Les forces électriques sont donc beaucoup plus fortes sur les grandes particules.

II.2.2.2 Électro filtre de plaque plate

Un nombre significatif de plus petits précipitateurs emploient des plaques plates au lieu des fils pour les électrodes à haute tension. Les plaques plates augmentent le champ électrique moyen qui peut être employé pour collecter les particules, et elles fournissent une superficie accrue pour la collection de particules. La décharge couronne ne peut pas être produite sur des plaques plates par elles-mêmes, ainsi les électrodes qui produisant la décharge couronne sont placés en avant et parfois derrière de la plaque plate. Ces électrodes peuvent être les aiguilles pointu-aiguës attachées aux bords des plats ou des fils indépendants. À 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 électro filtre de plaque plate 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 parce qu'aucune corona arrière n'est produite dans la poussière collectée, et les particules chargées des deux polarités des ions ont des surfaces de grande collection 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 [16].

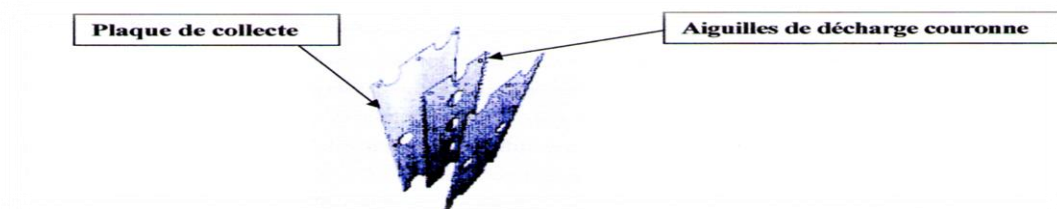


Figure (II.4): Types d'électro filtre plaque plate.

II.4.2.3 Électro filtre fil-cylindre

Dans le cas des électro filtres fil-cylindre, l'électrode ionisante est tendue le long de l'axe du cylindre placé verticalement (figure II.5). Classiquement, le dépôt de particules formé sur la face

intérieure du cylindre est nettoyé par intermédiaire d'un film liquide. Ainsi, les agglomérats se détachent et, sous l'influence de la gravité, ils tombent dans les trémies situées dans la partie inférieure du filtre. C'est pour cette raison que ce type de filtre électrostatique est fréquemment utilisé pour enlever des particules liquides (divers acides, huiles), le goudron, etc [16].

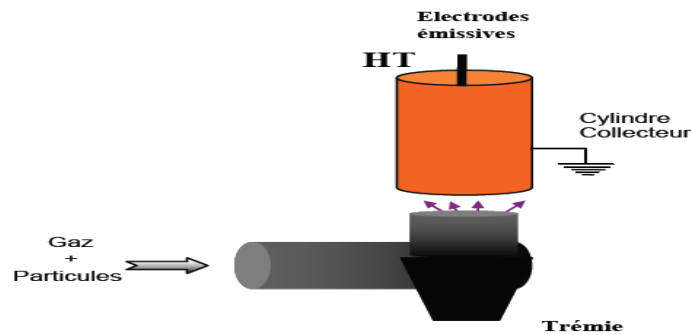


Figure (II.5): Types d'électro filtre fil-cylindre

II.4.2.4 Electro filtres humides

Pour les précipitateurs électrostatiques 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 électro filtres dits humides. En comparaison avec les électro filtres classiques, ceux humides utilisent en 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 court-circuit. 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 électro filtres humides sont présents dans certaines applications pratiques en raison de quelques avantages, parmi lesquels les plus importantes sont [15] :

- les rendements de filtration sont supérieurs à ceux des électro filtres secs.
- le réentraînement des particules collectées est inexistant.
- les performances de séparation sont indépendantes de la résistivité des poussières.

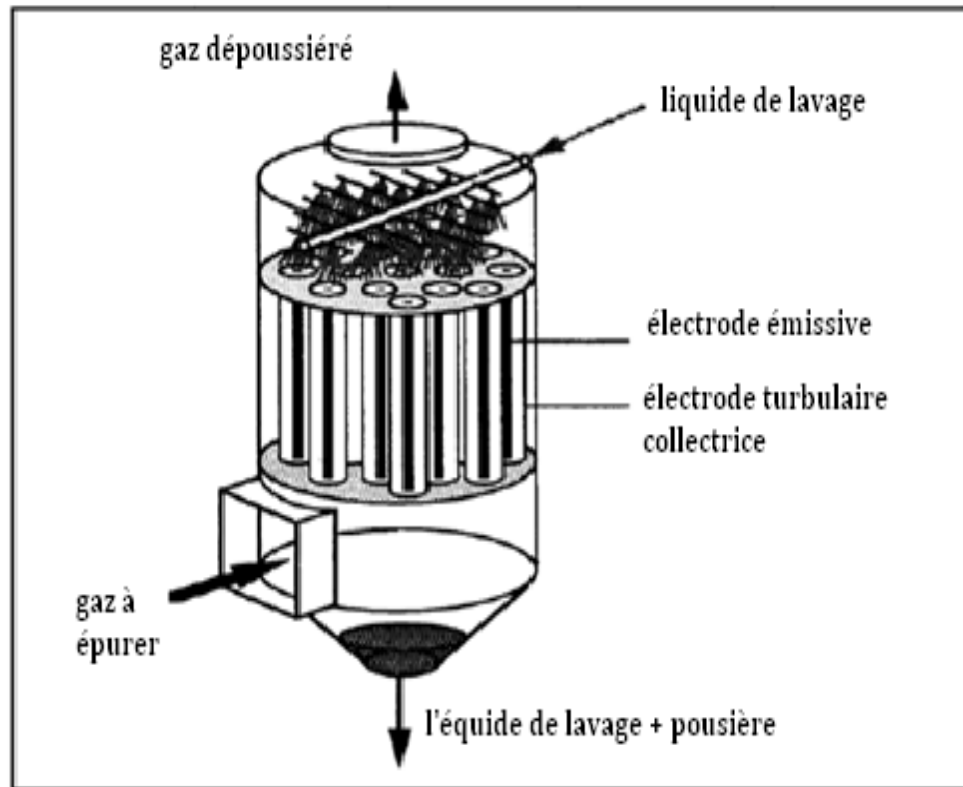
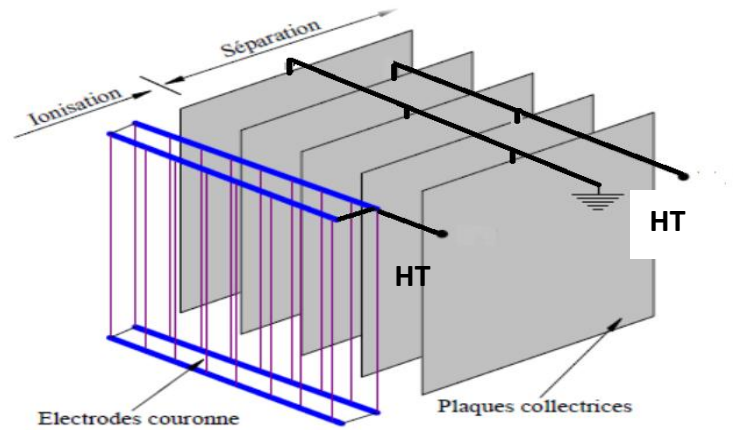


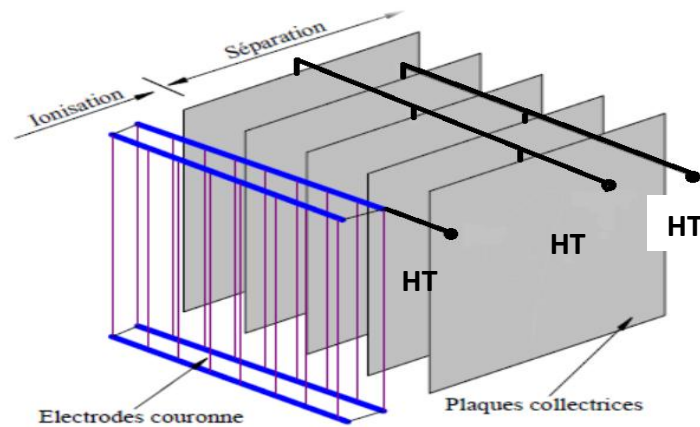
Figure (II.6): Un électrofiltre humide.

II.4.2.5 Électrofiltres à deux étages

Les filtres électrostatiques à double étage 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 de production. 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 ionisateur, 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.7) présente une vue schématique d'un précipitateur à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme de plaques. Un problème pour ce type de précipitateurs est l'impossibilité d'utiliser le système de frappe car il provoque le ré-envol des poussières non chargées. Le lavage des électrodes est donc adopté. Afin d'avoir une production d'ozone la plus faible possible, les électrodes couronne sont portées à un potentiel électrique de polarité positive [15].



Figure(II.7) : Types d'électro filtres à double étage avec deux alimentation [17].



Figure(II.8) : Types d'électro filtres à double étage avec trois alimentation.

II.4.3 Phénomènes mis en jeu

Une bonne compréhension du fonctionnement des précipitateurs électrostatiques impose une très minutieuse investigation pour chaque processus qui se déroule à l'intérieur de ces appareils. Une telle étude comporte des difficultés importantes, car entre les phénomènes se produisant lors du fonctionnement d'un électro filtre existent de fortes interactions. Cela demande donc, non seulement une bonne connaissance de ces phénomènes mais, surtout, une fine perception des liens existants entre eux-ci.

Le transport des particules à l'intérieur d'un filtre électrostatique dépend de plusieurs facteurs, habituellement groupés en deux catégories. Dans la première catégorie se trouvent ceux de nature électrique, comme la distribution du champ électrique et la densité de la charge d'espace ionique entre les électrodes. Essentielle pour la séparation est aussi la charge électrique acquise par les particules au cours de leur trajet à l'intérieur du filtre. L'autre groupe de paramètres réunit toutes les grandeurs caractérisant l'écoulement gazeux.

Il comprend en particulier la différence de pression du gaz entre l'entrée et la sortie du filtre qui, en l'absence d'effets électriques, détermine sa vitesse moyenne, le degré de turbulence, Le profil de la vitesse, la température, etc....Cet écoulement porte généralement le nom d'écoulement primaire ou principal (également appelé flux principal) à travers un électro filtre.

Les conditions électriques au sein d'un électro filtre sont directement reliées à la forme géométrique des électrodes et à la polarité du potentiel appliqué. Pour voir la complexité du problème, nous rappelons, par exemple, que les électrodes d'ionisation peuvent être de simples fils ou, avoir une forme plus compliquée : des tiges avec pointes, des spirales, des bandes, etc....La forte intensité du champ électrique au voisinage de ces électrodes conduit à l'apparition de décharges couronne, responsables elles-mêmes de la création de la charge d'espace ionique. L'étude théorique du champ et de la charge ionique demande d'abord des connaissances sur les décharges électriques dans les gaz, plus particulièrement sur la décharge couronne. Très souvent on fait appel à des méthodes d'investigation numérique, lourdes à gérer, qui demandent, dans le même temps, des grands efforts de calcul [16].

Le processus de charge des particules est un autre aspect important de ce problème. Il faut d'abord comprendre les phénomènes de base qui amènent les ions à s'attacher aux particules. Le calcul de la charge électrique d'une particule nécessite la connaissance, enchaque point, de l'intensité du champ électrique et de la densité de charge d'espace, ainsi que d'autres facteurs qui peuvent influencer sa trajectoire. Il existe plusieurs modèles qui permettent le calcul de la charge d'une particule sphérique, mais pour instant, il manque des mesures expérimentales très précises permettant de calibrer ces modèles.

L'écoulement du gaz se déroule d'une façon spécifique pour chaque précipitateur électrostatique. Cependant, il existe deux paramètres principaux qui influencent directement l'efficacité de collection : la vitesse moyenne du gaz et l'intensité de la turbulence. Sans rentrer dans les détails, l'étude de l'écoulement gazeux impose de prendre en compte le couplage entre les

grandeurs électriques et mécaniques, car la turbulence n'est pas seulement générée par la différence de pression entre l'entrée et la sortie du filtre, mais aussi par les phénomènes associés à la décharge couronne et au mouvement des ions et des particules dans le champ électrique. Les chocs entre les molécules neutres du gaz et les ions accélérés par le champ électrique déterminent, en l'absence d'écoulement moyen, l'apparition du vent ionique un mouvement du gaz allant des électrodes ionisantes vers les électrodes collectrices. En présence d'écoulement forcé, les forces électriques génèrent un écoulement secondaire ; le mouvement du gaz au sein d'un électro filtre sera donc le résultat des contributions du flux primaire et de l'écoulement secondaire. Dans la littérature spécialisée, on l'appelle souvent mouvement électro-aérodynamique [15]. Beaucoup d'auteurs ont réalisé des études théorique set expérimentales dans ce domaine. Pourtant, l'intensité de la turbulence est très souvent mesurée ou calculée dans des situations bien particulières qui fournissent peu d'information dans des cas plus généraux.

Basés sur ces concepts ainsi que sur l'observation directe du fonctionnement de certains filtres électrostatiques, plusieurs modèles de précipitation électrostatique ont vu le jour. Dans le passé, des modèles théoriques simples ont été développés et utilisés pendant un demi-siècle afin de dimensionner les électro filtres. Cependant, leur mise en œuvre pratique, du fait des simplifications appliquées, engendre des erreurs de conception. Plus récemment, des modèles plus raffinés qui considèrent une valeur finie de l'intensité turbulente ont été développés, sans toutefois recevoir de vérifications expérimentales. De nos jours des modèles numériques de fonctionnement des électro filtres sont apparus, mais ils négligent certains aspects soit sur la partie électrique, soit sur la partie de mécanique des fluides. Ainsi, malgré tous les efforts au cours des années, la précipitation électrostatique reste un domaine dans lequel l'empirisme occupe une place encore importante et la conception de nouvelles installations passe systématiquement par une loi de similitude avec des installations existante sou des maquettes.

De l'ensemble des points présentés très brièvement dans ce paragraphe nous pouvons retenir les idées suivantes :

- ✓ la précipitation électrostatique met en jeu des phénomènes électriques, aérauliques et mécaniques des suspensions qui sont étroitement liés ;
- ✓ une simulation fine du fonctionnement d'un électro filtre nécessite la mise en œuvre de méthodes permettant de calculer localement l'ensemble des grandeurs électriques et aérodynamiques ;

- ✓ afin de connaître l'évolution dans le temps de la charge électrique des particules, il est nécessaire de déterminer leurs trajectoires en fonction des données électriques et mécaniques.

II.5 Modèles du fonctionnement des filtres électrostatiques

Estimer l'efficacité de séparation d'un nouveau précipitateur électrostatique en vue de sa réalisation pratique reste encore un problème difficile. L'importance d'un dimensionnement correct représente finalement un problème économique car, entre le gabarit d'un filtre et son coût total de fabrication il y a une liaison très étroite. Au cours du temps plusieurs travaux ont été menés pour créer des modèles théoriques capables d'offrir des informations sur le rendement du fonctionnement de certaines installations. Au début il y a eu des approches simples, semi-empiriques, qui ont leurs racines dans les observations directes sur le fonctionnement des électro filtres déjà existants. Ce sont les modèles qu'on appelle analytiques; ils permettent de décrire l'efficacité de collecte en fonction de paramètres géométriques, électriques et mécaniques. De nos jours, le développement des moyens de calcul ont permis d'émettre au point des modèles numériques, basés sur la simulation des phénomènes produits au sein d'un électro filtre [11,18].

II.5.1 Efficacité de collecte

L'efficacité fractionnaire de filtration η_f est définie comme étant le nombre de particules collectées par tranche granulométrique N_{ci} rapporté au nombre de particules N_{ca} de cette même tranche en amont du filtre. L'efficacité fractionnaire s'écrit :

$\eta_f = \frac{N_{ci}}{N_{ca}}$ Ce qui donne on terme de concentration :

$$\eta_f = 1 - \frac{C_{cs}}{C_{ca}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

C_{ca} : concentration en particules en amont du filtre.

C_{cs} : concentration en particules en aval du filtre.

Les concentrations sont mesurées à l'aide d'une sonde iso-cinétique placée en aval du filtre, dans une section pour laquelle la concentration est uniforme et où le profil de vitesse est établi. Quand aucun potentiel n'est appliqué au fil, on a vérifié qu'aucune particule n'était piégée, la concentration mesurée en aval est C_{ca} En présence d'un champ électrique cette même sonde mesure C_{cs} [19].

II.5.2 Vitesse de migration

Lorsqu'on applique un champ électrique intense dans l'espace inter-électrodes de l'électrofiltre, les particules chargées qui s'y sont présentes subissent une force proportionnelle à la charge électrique ; c'est la force de Coulomb. La présence de cette force a comme résultat un mouvement radial des particules vers la cathode collectrice, processus appelé migration des particules. La vitesse de migration est obtenue en égalant la force de coulomb à la force de résistance du fluide au déplacement de la particule, appelé force de trainée [16].

Usuellement, cette vitesse a pour expression (supposant que les particules sont sphériques) :

$$W_{th} = \frac{q_p E}{3\pi\mu_g d_p} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

q_p : la charge de la particule,

E : le champ électrique,

μ_g : la viscosité dynamique du gaz,

d_p : le diamètre de la particule.

II.5.3 Facteur de Cunningham

Cependant, pour des particules de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$, leur taille devenant comparable au libre parcours moyen des molécules du gaz porteur à pression atmosphérique, on doit tenir compte du mouvement brownien des molécules de gaz. Dans ce cas, la vitesse de migration est corrigée par un facteur de correction appelé facteur de Cunningham [20].

La relation (II.2) devient :

$$W_{th} = \frac{q_p E}{3\pi\mu_g d_p} \cdot C_c \quad (\text{II.3})$$

Le facteur de Cunningham C_c est défini par l'expression :

$$C_c(Kn) = 1 + A \cdot Kn \quad (\text{II.4})$$

Qui dépend du nombre de Knudsen Kn caractérisant les différents régimes de mouvement de

la particule dans le gaz.

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \tag{II.5}$$

Avec :

λ : le libre parcours moyen des molécules de gaz ($\lambda \approx 0.065 \mu m$ pour l'air dans les conditions normales de température et de pression)

Le coefficient A a l'expression suivante :

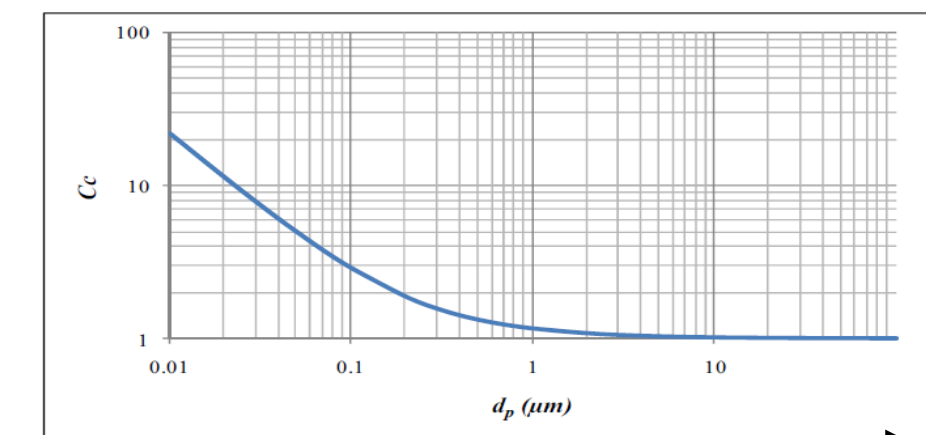
$$A = \alpha_1 + \alpha_2 \exp\left(-\frac{\alpha_3}{Kn}\right) \tag{II.6}$$

Et : $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ dépendent de la composition du gaz et de la forme de la particule.

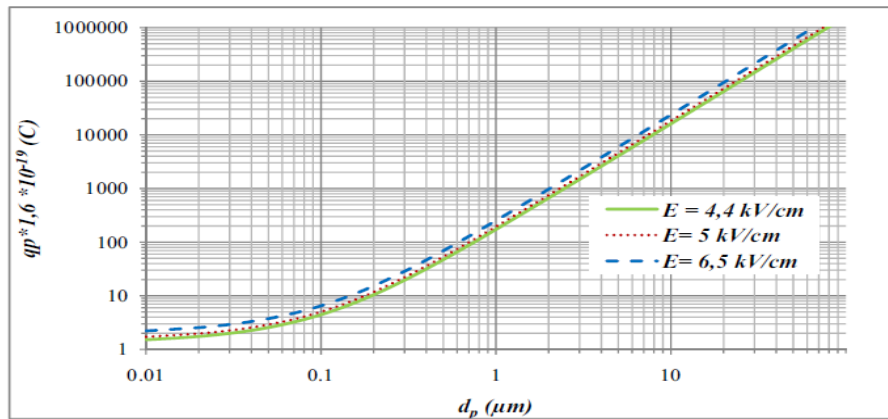
Si la particule mobile est considérablement plus grande que le libre parcours moyen alors, elle se déplace dans le fluide comme si le fluide était un milieu continu. Mais si la particule a une taille comparable ou plus petite que le libre parcours moyen des molécules, la particule est affectée par les collisions avec les molécules et glisse parfois entre elles. Un tel mouvement s'appelle écoulement moléculaire libre. La Figure (II.8) présente la variation du facteur de Cunningham en fonction du diamètre des particules sphériques dans le cas de l'air atmosphérique pour lequel on a : $\alpha_1=1, 246, \alpha_2=0,42, \alpha_3=0,87$.

L'équation(II.4) devient :

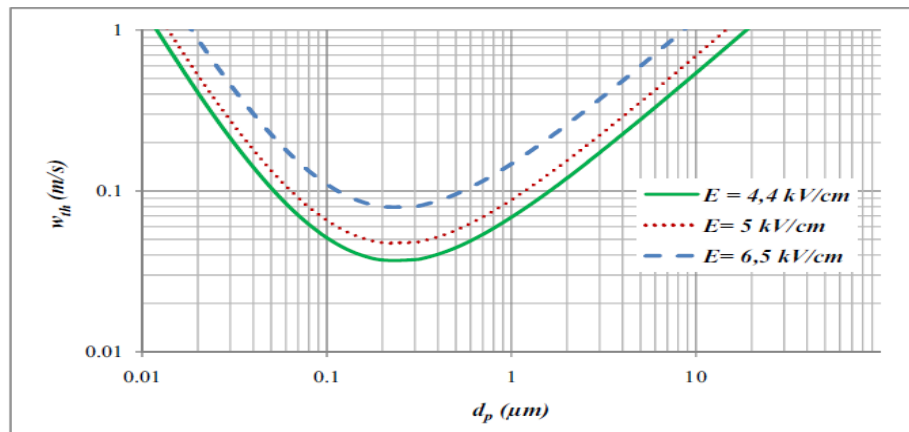
$$(Kn) = 1 + 1,246 \cdot Kn + 0,42 \cdot Kn \cdot \exp\left(-\frac{0,87}{Kn}\right) \tag{II.7}$$



Figure(II.9) : variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules.



Figure(II.10) : l'évolution de la charge des particules donnée par le modèle de Cochet en fonction du diamètre des particules.



Figure(II.11) : l'évolution de la vitesse de migration w_{th} en fonction du diamètre des particules.

La Figure(II.10), montre l'évolution de la charge électrique des particules en fonction de leurs diamètres. En utilisant ces résultats, on peut évaluer les valeurs de la vitesse de migration théorique W_{th} (Figure II.11). On remarque que cette vitesse W_{th} en fonction du diamètre des particules passe par un minimum pour d_p égale à environ 0,25 μm . Donc on peut prédire que pour les électro filtres, le minimum de l'efficacité de filtration est obtenu pour les particules dont le diamètre est compris entre 0,1 et 1 μm .

II.6 Paramètres influençant l'efficacité

Nous avons vu que l'efficacité dépendait de la vitesse de migration et de la charge de la particule ainsi que du caractère turbulent de l'écoulement. D'autres processus peuvent influencer l'efficacité rendant son dimensionnement très difficile. Parmi ces phénomènes, la contre émission, le réentraînement, la concentration des particules et la turbulence jouent un rôle prépondérant.

II.6.1 Contre émission

La contre-émission est un terme décrivant la décharge électrique locale sur une électrode normalement passive dans le système lorsque celle-ci est recouverte de poussières faiblement conductrices. Sous certaines conditions de tension et de courant, le dépôt isolant, se casse localement et un petit trou ou cratère se forme à partir duquel une décharge électrique apparaît.

Celle-ci réduit le rendement de collecte en abaissant la tension de claquage et en produisant des ions de signe opposé à la décharge principale, qui diminue la charge dépoussières. Si la particule est conductrice, il y a peu de perturbation. Lorsque la conductivité baisse, les ions créés par décharge couronne commencent à être gênés par la résistance de la couche. Ceci entraîne une augmentation de la tension à travers le dépôt et une baisse correspondante au sein du gaz, ce qui entraîne une baisse du courant. Si la conductivité est encore réduite, la tension à travers la couche continue d'augmenter jusqu' à la création d'une décharge diélectrique dans le dépôt ce qui correspond à l'initiation de la contre-émission.

La chute de tension à travers la couche déposée suit la loi d'Ohm. Pour des résistivités désarticules élevées (10^{11} ohm.cm), il se produit une chute de tension de plusieurs kilovolts dès que l'épaisseur de la couche atteint quelques millimètres. Dans ce cas, il se peut que l'effet Couronne ne démarre pas car la différence de potentiel n'est plus suffisante.

Pour des résistivités inférieures à 10^4 Ohm.cm, l'agglomération des particules sur l'électrode réceptrice est négligeable et celles-ci sont ré-entraînées par le courant gazeux.

Entre ces deux valeurs opératoires limites, plus la résistivité des particules est grande, plus l'électro filtre est efficace.

II.6.2 Le réentraînement

Le réentraînement intervient lorsque les particules déposées sur l'électrode collectrices déchargent rapidement et donc ne sont plus le siège de la force électrostatique. Elles se détachent donc de l'électrode et sont emportées par l'écoulement. Il est difficile de retenir les poussières d'une résistivité qui peut être modifiée en jouant sur la température et l'humidité du gaz [22,23]. Ce phénomène de ré envol peut être aussi du à la contre émission qui détériore la couche de particules déposée. De plus, il peut être provoqué par une mauvaise répartition de l'écoulement et notamment par les effets de la turbulence. En effet, les grandes fluctuations du champ de vitesses du gaz affectent la diffusion turbulente des particules de telle sorte que l'efficacité de l'ESP décroît.

II.6.3 Les effets électro hydrodynamiques

Le comportement des particules chargées dans un précipitateur électrostatique industriel est largement déterminé par le champ électrique ainsi que par l'écoulement principal et secondaire du gaz (vent ionique). De nombreuses investigations expérimentales sur l'origine de la turbulence et l'écoulement secondaire ont été réalisées. La turbulence est engendrée par différents phénomènes qui ont pour conséquences la modification de l'efficacité de l'ESP qui est fonction :

- ✓ Du profil de vitesse et de l'intensité de la turbulence.
- ✓ De l'intensité et de la distribution du champ électrique.
- ✓ De la taille et de la charge de la particule.
- ✓ Du réentraînement des particules.
- ✓ Du vent ionique.
- ✓ Du caractère <non idéal > (rugosité des parois, inhomogénéité de la décharge couronne...).

Il est généralement admis que la présence du vent ionique au sein des ESPS réduit leur efficacité de collections en augmentant le taux de turbulence et donc la diffusion qui lui est associée [24-28].

II.7 Les avantages et les inconvénients d'électro filtres

II.7.1 Les avantage

- Haut rendement de collecte pour toutes tailles de particules, spécialement pour les particules d'un diamètre inférieur a10 μm .
- Construction et fonctionnement simples.
- Consommation d'énergie nominale.
- Elimination à sec du matériel collecté.

II.7.2 Les inconvénients

- Des limites de fonctionnement sont imposées par des températures élevées du gaz porteur ; par forte humidité, etc....
- Cout de maintenance et du tissu de rechange élevée (loges à sac difficiles a maintenir, dû a la difficulté de trouver et remplacer même un simple sac qui a une fuite. De plus, environ un quart des sacs doivent être remplacé année)
- Diminution larges de l'équipement.
- Problème avec la manipulation des fines particules qui pourraient user, corroder ou boucher les tissus.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité quelques notions sur les filtres électrostatiques, leurs principes de fonctionnement, leurs efficacités et les différents types des électro-fils.

De plus, les modèles de fonctionnement des électro filtres ont été présentés et critiqués.

Nous procéderons de la façon suivante :

- On utilise les poussières de quelques matériaux comme le bois et le PVC.
- Un électro filtre de type fil-plaque, conçu et réalisé dans notre laboratoire(IRCOM), va être testé.
- un ensemble de données expérimentales concernant le fonctionnement électrique et les performances de filtration sera alors à notre disposition.

Dans le chapitre suivant on va présenter les moyens expérimentaux mis en œuvre pour réaliser les objectifs de cette étude. Ainsi, l'installation expérimentale, les techniques, les outils de mesure et le procédé expérimental seront détaillées.

Chapitre III

Modélisation et optimisation d'un filtre électrostatique à refoulement

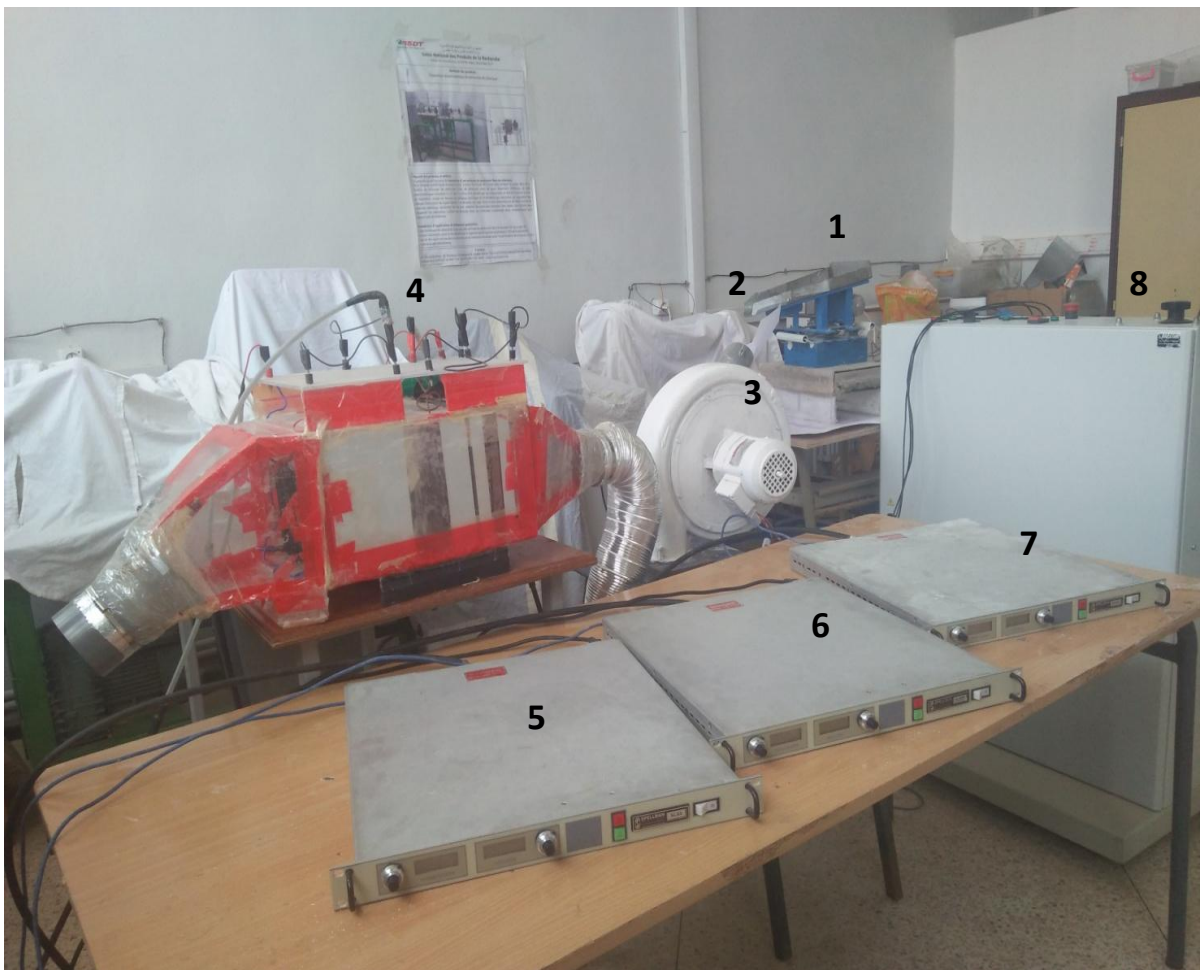
Modélisation et optimisation d'un filtre électrostatique à refoulement

III.1 Introduction

Dans le but de concevoir et réaliser notre filtre électrostatique a deux étages, nous avons mené nos expériences dans le laboratoire d'IRECOM. Les filtres électrostatiques à deux étages, on des performances qui dépendent des conditions de fonctionnement liées aux présences de trois générateurs haut tension.

Au début nous avons commencé par réalisation d'un filtre électrostatique avec une possibilité de varier la tension d'ionisation et de collection et la vitesse du l'air par refoulement.

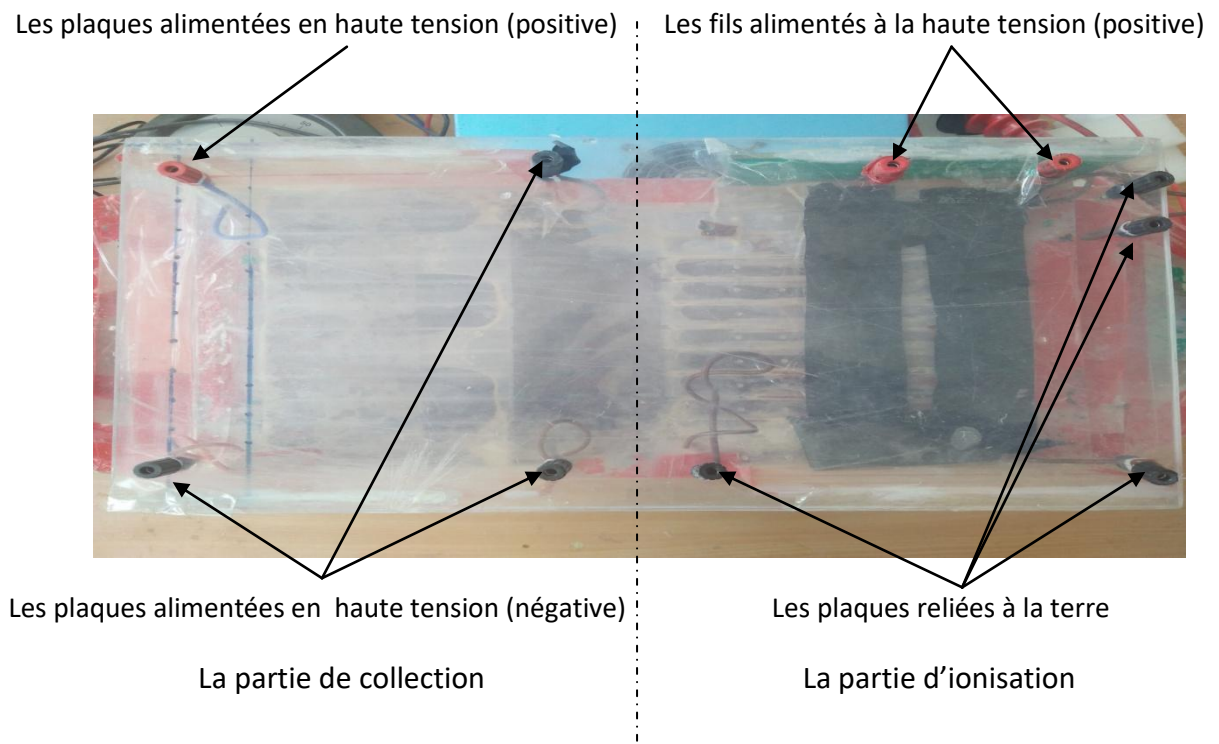
III.2 Description du filtre électrostatique de laboratoire



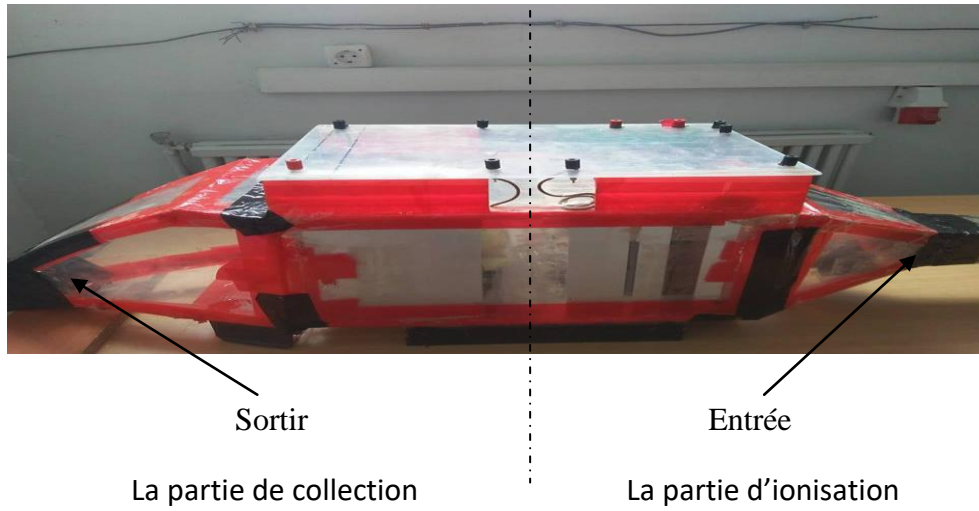
Figure(III.1) : Photographie d'un dispositif de laboratoire.

Le schéma descriptif de notre dispositif expérimental représenté dans la photographie de la figure(III.1) permet de faire ressortir les différentes parties du dispositif qui seront décrit par la suite

- 1- vibreur.
 - 2- Entrée de la poussière.
 - 3- souffleur.
 - 4- filtre électrostatique.
 - 5-générateur de haute tension de polarité négative.
 - 6-générateur de haute tension de polarité positive.
 - 7-générateur de haute tension de polarité négative.
 - 8- autotransformateur.
- le filtre électrostatique.



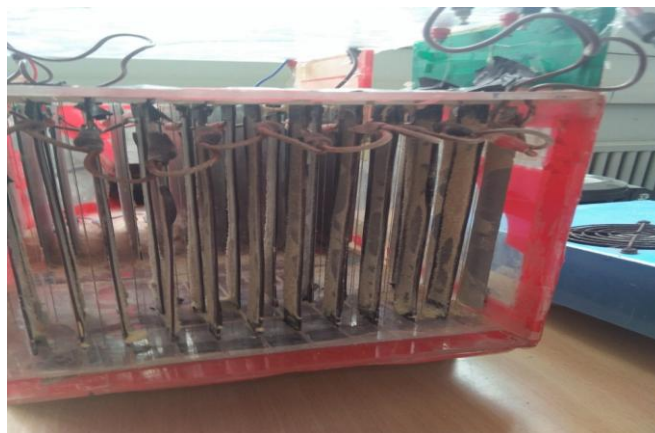
Figure(III.2): filtre de deux étages trois alimentations.



Figure(III.3): Photographie de filtre.



Figure(III.4): Photographie de la partie de collection.



Figure(III.5): Photographie de la partie d'ionisation.

III.3 Principe de fonctionnement

La première partie (ionisation) est constituée de fils de faible rayon alimenté par un générateur de haute tension (positive) et des plaques de largeur 2 cm sont reliées à la terre.

Les électrodes d'ionisation sont régulièrement espacé d'une distance ($D=2\text{cm}$).

L'augmentation du potentiel électrique appliqué conduit à un champ intense près de l'électrode haute tension où se développe une avalanche électronique. Les ions et les électrons créés par la décharges couronnes chargent les particules polluantes. Les fines particules qui se trouvent 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 deuxième partie (collection) est consisté des plaques collectrices, alimenté par un générateur de haute tension (négative) et les autres plaque sont alimenté par un générateur de haute tension (positive), la distance entre ces plaque ($D= 2\text{cm}$).les particules chargé dans la première partie sont accumulées sur les plaques de collections.

III.4 Matériel utilise

- ✓ **souffleur et aspirateur :**



Figure(III.6): Photographie du souffleur et aspirateur.

✓ **Balance:**



Figure(III.7): Photographie de la balance.

✓ **Générateur de la haute tension :**



Figure (III.8): Photographie d'un générateur HT.

✓ **Tamiseur :**

Les tamis de différents diamètres

Moteur de vibration



Figure (III.9): Photographie de tamiseur.

III.5 Etude expérimentale

Il y a trois facteurs que nous avons étudiés dans ce travail:

- ✓ Tension d'ionisation.
- ✓ Tension de collection.
- ✓ La vitesse de l'air.

III.5.1 Les expériences préliminaires

III.5.1.1 Diamètre de poussière $D_1=2\text{mm}$

✚ *Variation de la vitesse de l'air*

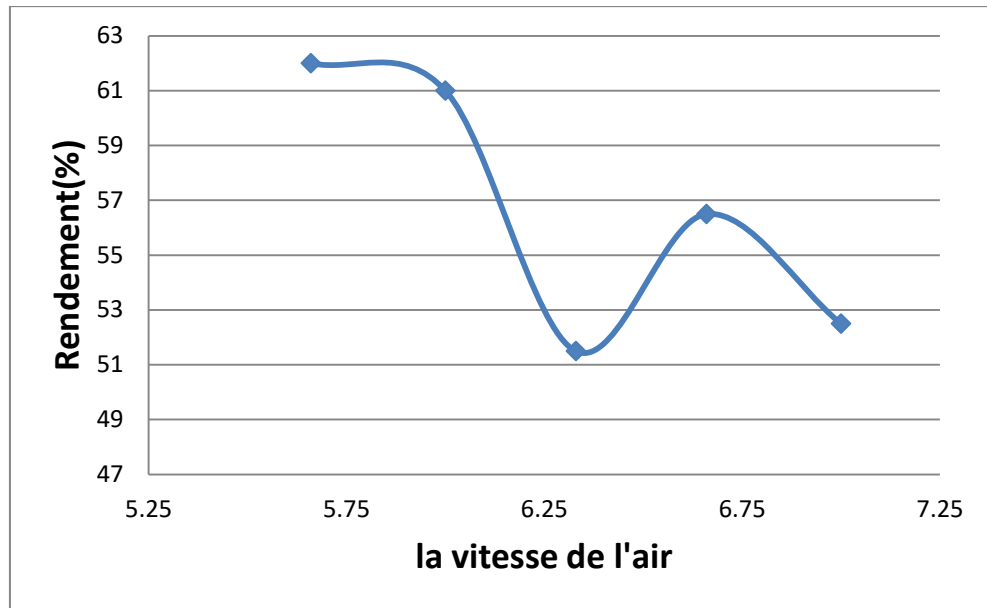
Tension d'ionisation (positive) constante=7.5kV

Tension de collection (positive) constante=7kV

Tension de collection (négative) constante=-7kV

Tableau(III.1): Influence de la vitesse du l'air sur le rendement.

Vitesse (m/s)	$M_e(g)$	$M_s(g)$	$\eta(\%)$
5.66	20	7.6	62
6	20	7.8	61
6.33	20	9.7	51.5
6.66	20	8.7	56
7	20	9.5	52.5



Figure(III.10) : Variation du rendement en fonction de la vitesse du l'air.

✚ Variation de tension d'ionisation

La vitesse du l'air constante=5.66m/s

Tension de collection (négative) constante=-7kv

Tension de collection (positive) constante=7kv

Tableau(III.2): Influence de la tension d'ionisation sur le rendement

U_i (kV)	Me(g)	Ms(g)	η (%)
7.5	20	9.2	54
7	20	10	50
6.5	20	10	50
6	20	9.6	52
5.5	20	10.2	49

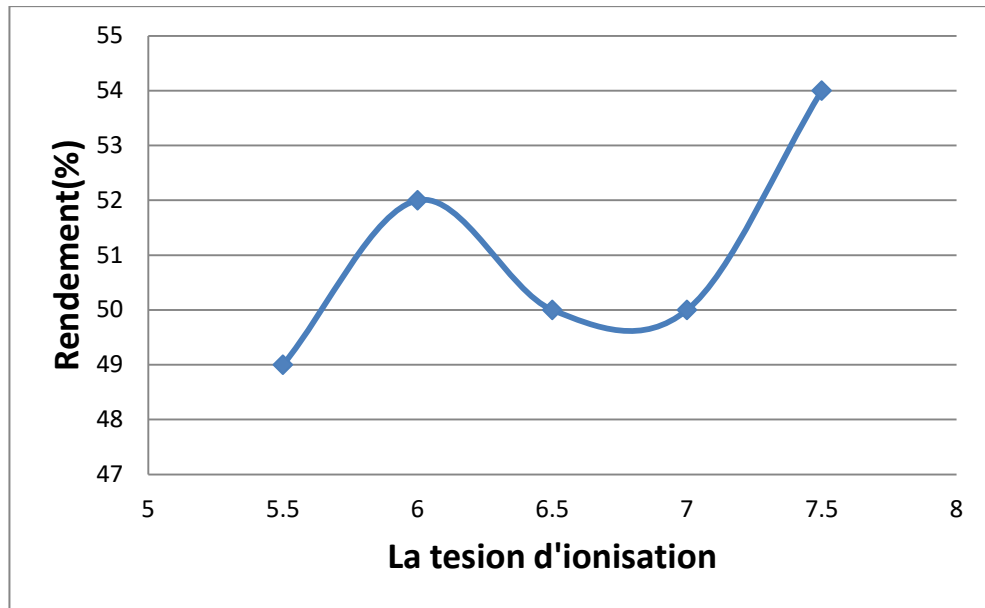


Figure (III.11): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.

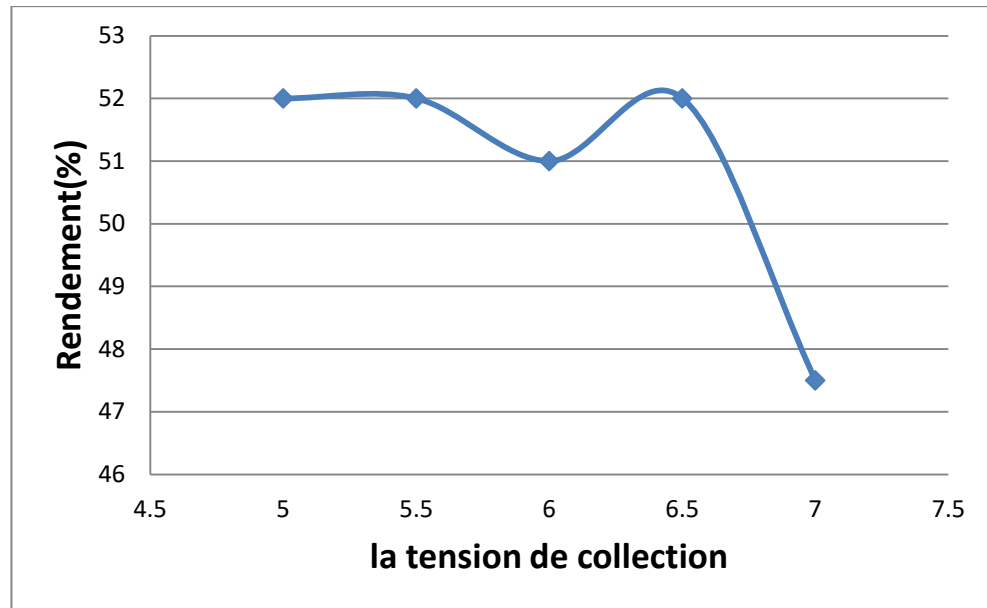
✚ Variation de la tension de collection

Tension d'ionisation (positive) constante =7.5kv

La vitesse de l'air constante=5.66m/s

Tableau(III.3): Influence de la tension de collection sur le rendement.

$U_c(KV)$	$M_e(g)$	$M_s(g)$	$\eta(\%)$
7	20	10.5	47.5
6.5	20	9.6	52
6	20	9.8	51
5.5	20	9.6	52
5	20	9.6	52



Figure(III.12): Variation du rendement en fonction de la tension de collection.

III.5.1.2 Diamètre de poussier D2= 1.4mm

✚ Variation de la vitesse de l'air

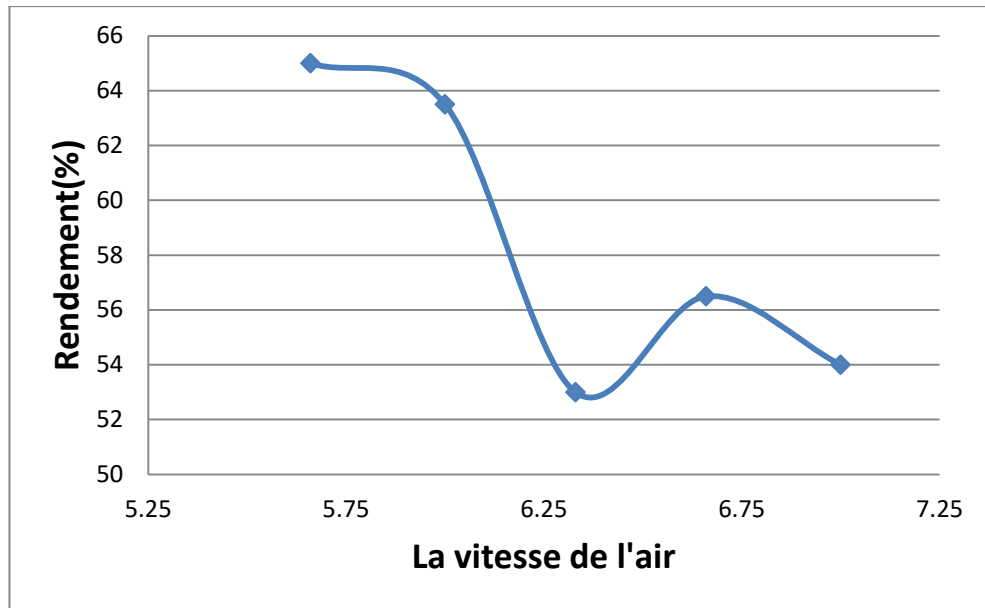
Tension d'ionisation (positive) constante =7.5kv

Tension de collection (négative) constante=-7kv

Tension de collection (positive) constante=7kv

Tableau(III.4): Influence de la vitesse de l'air sur le rendement

Vitesse (m/s)	$M_e(g)$	$M_s(g)$	$\eta(\%)$
5.66	20	7	65
6	20	7.3	63.5
6.33	20	9.4	53
6.66	20	8.7	56.5
7	20	9.2	54



Figure(III.13): Variation du rendement en fonction de la vitesse de l'air.

✚ Variation de tension d'ionisation

La vitesse de l'air constante=5.66m/s

Tension de collection (positive) constante=7kv

Tension de collection (négative) constante=-7kv

Tableau(III.5): Influence de la tension d'ionisation sur le rendement

U_i (kV)	M_e (g)	M_s (g)	η (%)
7.5	20	9	55
7	20	9.4	53
6.5	20	9.5	52.5
6	20	9.1	54.5
5.5	20	9.6	52

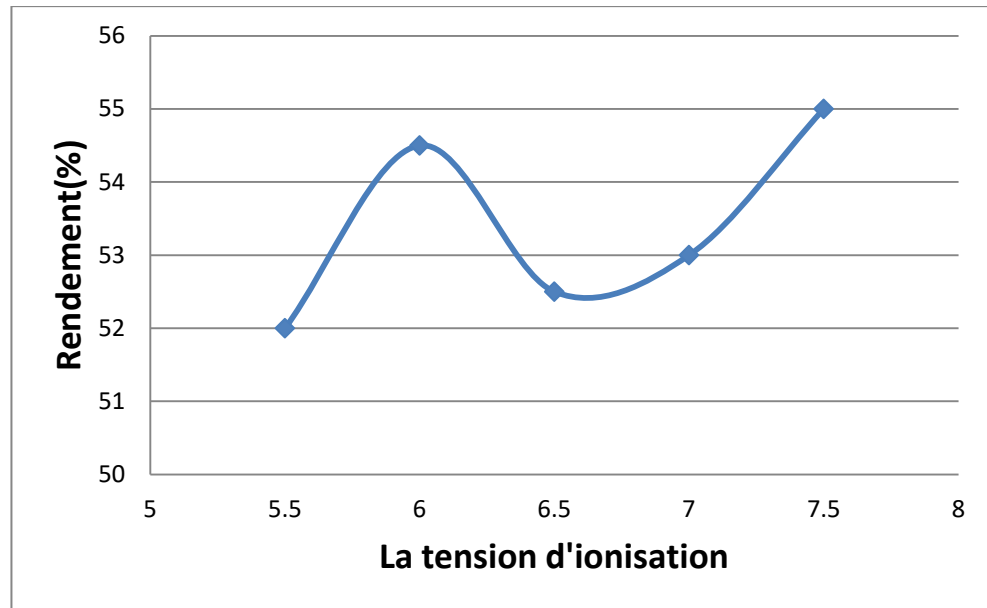


Figure (III.14): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.

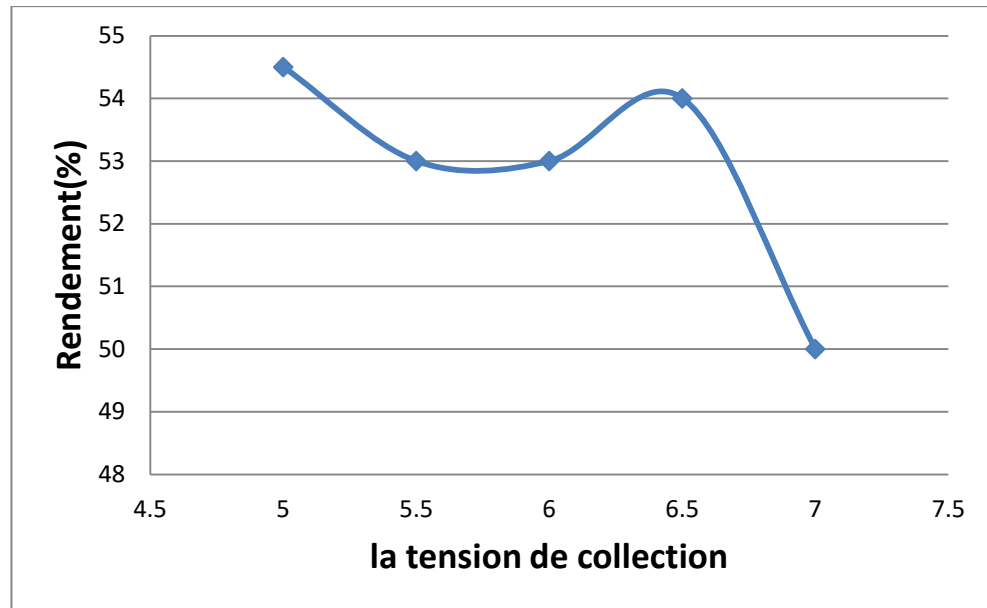
✚ Variation de la tension de collection

Tension d'ionisation (positive) constante = 7.5kv

La vitesse de l'air constante = 5.66m/s

Tableau(III.6): Influence de la tension de collection sur le rendement

U_c (kV)	M_e (g)	M_s (g)	η (%)
7	20	10	50
6.5	20	9.2	54
6	20	9.4	53
5.5	20	9.4	53
5	20	9.1	54.5



Figure(III.15): Variation du rendement en fonction de la tension de collection.

III.6 Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences

Le but de ce travail est de trouver les valeurs optimales des dimensions géométriques et électriques du filtre électrostatique qui donnent un taux de filtration maximal. Il n'est pas simple de réaliser de telle relation entre la réponse et les facteurs considérés et surtout, si on sait qu'il existe bel et bien des interactions entre ces derniers. A partir de ces considérations, la méthodologie des plans d'expériences s'est avérée être très adaptée pour les études expérimentales car elle sert à optimiser l'organisation des essais [28]. cette organisation nous a permis non seulement d'obtenir le maximum de renseignement mais aussi d'arriver à une meilleure précision possible sur la modélisation des résultats et par la suite l'optimisation de l'efficacité du filtre.

III.6.1 Choix des intervalles d'étude

Les intervalles d'étude des différents facteurs ont été choisis suivants les réponses obtenues à partir des essais préliminaires.

a) Intervalle d'étude de la vitesse de l'air

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la vitesse de l'air comme suit :

$$5.66 (m/s) \leq V \leq 6.33 (m/s) \quad \text{(III.1)}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la vitesse de l'air est donnée par :

$$V_c = (V_{max} + V_{min})/2 \quad \text{(III.2)}$$

D'où : $V_c = 6.33 \text{ m/s}$

b) Intervalle d'étude de la tension d'ionisation (positive)

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la tension d'ionisation comme suit :

$$5.5 (kV) \leq U \leq 7.5(kV) \quad \text{(III.3)}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{max} + U_{min})/2 \quad \text{(III.4)}$$

D'où : $U_c = 6.55 \text{ Kv}$

c) Intervalle d'étude de la tension de collection (Négative)

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la tension de collection comme suit :

$$-7(kV) \leq U \leq -5(kV) \quad \text{(III.5)}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{max} + U_{min})/2 \quad \text{(III.6)}$$

D'où : $U_c = -6 \text{ Kv}$

d) Intervalle d'étude de la tension de collection (Positive)

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la tension de collection comme suit :

$$5(kV) \leq U \leq 7(kV) \quad \text{(III.7)}$$

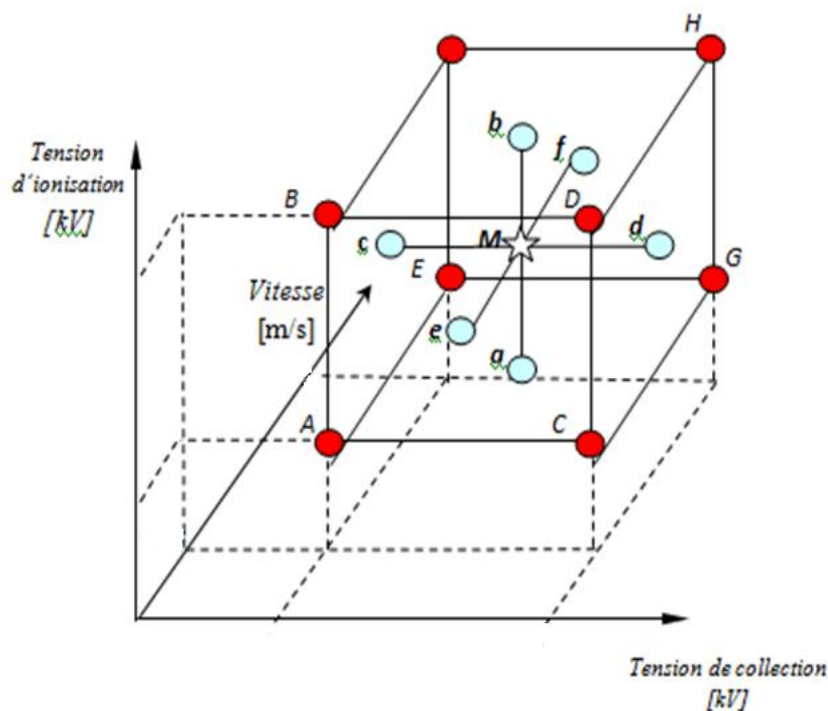
La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{max} + U_{min})/2 \quad \text{(III.8)}$$

D'où : $U_c = 6 \text{ Kv}$

III.6.2 Plan d'expériences composite et modèle de deuxième degré

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences qui correspondent aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble des expériences. Dans ce plan on doit faire 17 expériences composites données sur la figure (IV-16).



Figure(III.16) : Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite.

III.7 Résultats des expérimentations

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportés au tableau(III.7):

Tableau(III.7): Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré.

N° Essais	U_i [kV]	U_c [kV]	V [m/s]	V [m/s]	U_i [KV]	U_c [KV]	Rendemen t [%]	V [m/s]	U_i [KV]	U_c [KV]	Rendemen t [%]	
Plan factoriel «2 ³ »	1	-1	-1	5.66	5.5	5	54	5.66	5.5	5	62	
	2	1	-1	6.33	5.5	5	52	6.33	5.5	5	65	
	3	-1	1	5.66	7.5	5	53	5.66	7.5	5	60	
	4	1	1	6.33	7.5	5	52	6.33	7.5	5	63	
	5	-1	-1	1	5.66	5.5	7	49	5.66	5.5	7	64.5
	6	1	-1	1	6.33	5.5	7	54	6.33	5.5	7	65
	7	-1	1	1	5.66	7.5	7	55	5.66	7.5	7	60
	8	1	1	1	6.33	7.5	7	50.5	6.33	7.5	7	61.5
Points en étoiles « 2x3 »	9	-1	0	0	5.66	6.5	6	54.5	5.66	6.5	6	58
	10	1	0	0	6.33	6.5	6	51	6.33	6.5	6	59
	11	0	-1	0	5.995	5.5	6	54	5.995	5.5	6	62
	12	0	1	0	5.995	7.5	6	55	5.995	7.5	6	67
	13	0	0	-1	5.995	6.5	5	54.5	5.995	6.5	5	58
	14	0	0	1	5.995	6.5	7	52.5	5.995	6.5	7	63
Points au Centre	15	0	0	0	5.995	6.5	6	53.5	5.995	6.5	6	62
	16	0	0	0	5.995	6.5	6	54	5.995	6.5	6	62
	17	0	0	0	5.995	6.5	6	53.5	5.995	6.5	6	61

	$U_{ionisation}$ [kV]	$U_{collection}$ [kV]	Vitesse [m/s]
Niveau -1	5.5	5	5.67
Niveau 0	6.25	6.25	6
Niveau 1	7	7.5	6.33

Diamètre D1	1.4mm
Diamètre D2	2 mm

A- Les modèles mathématiques :

a- Rendement(a)=91,9718+2,3*ten_{ion}-1,1*vit-0,950707*ten²_{col}-0,874997*vit*ten_{col}. (III.9)

Avec Q²=0,52 R²=0,58

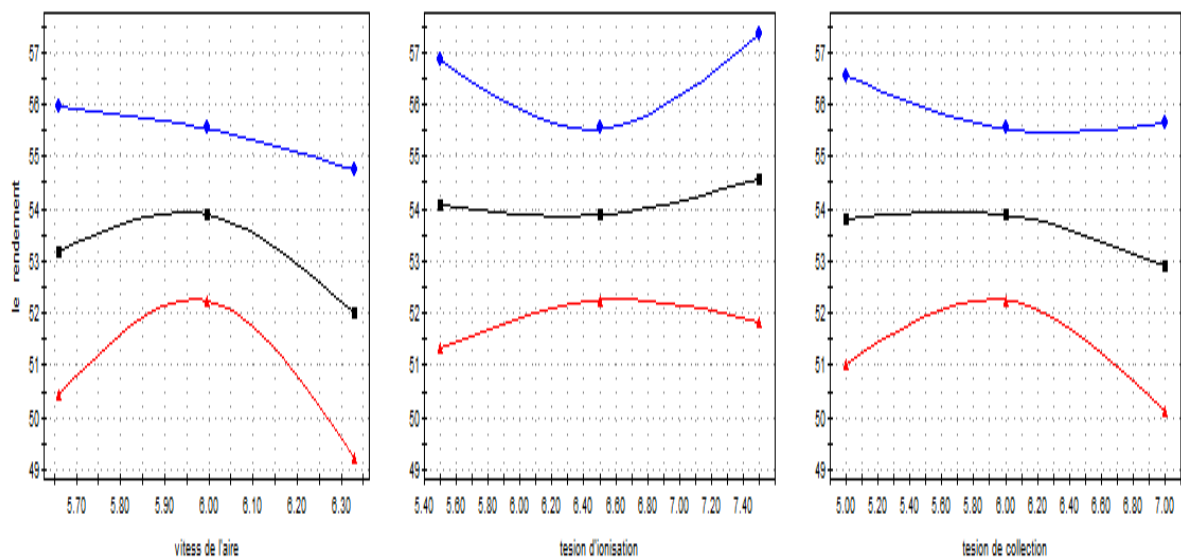
b- Rendement(b)=95,9296+1,5*ten_{ion}-0,5*ten_{col}+0,499993*vit-1,62676*ten²_{ion}-0,626756*ten²_{col}+1,37324*vit²-0,50001*ten_{ion}*ten_{col}. (III.10)

Avec Q²=0,63 R²=0,67

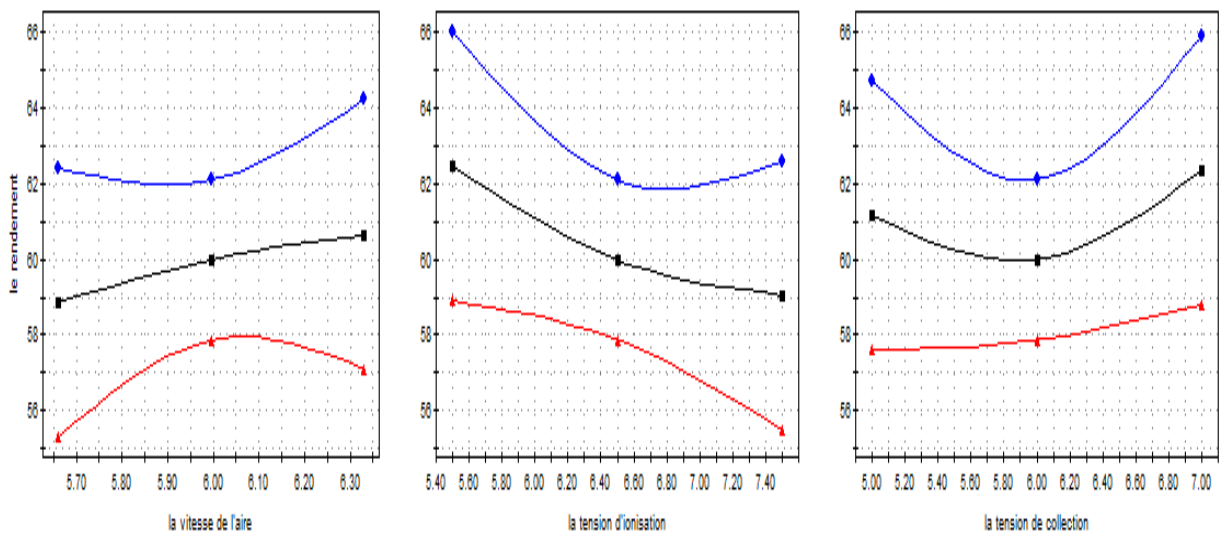
B- Influence des facteurs choisis sur les réponses :

A partir des modèles mathématiques obtenus, on peut déterminer l'influence de chaque facteur sur la réponse, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis. Si on veut par exemple déterminer l'influence d'un facteur (X_i) sur le rendement, on représente sa variation pour les trois niveaux du facteur choisi.

En procédant de la même manière, on peut démontrer facilement que les facteurs les plus influents sur le rendement sont respectivement la tension d'ionisation, la vitesse de l'air et la tension de collection.



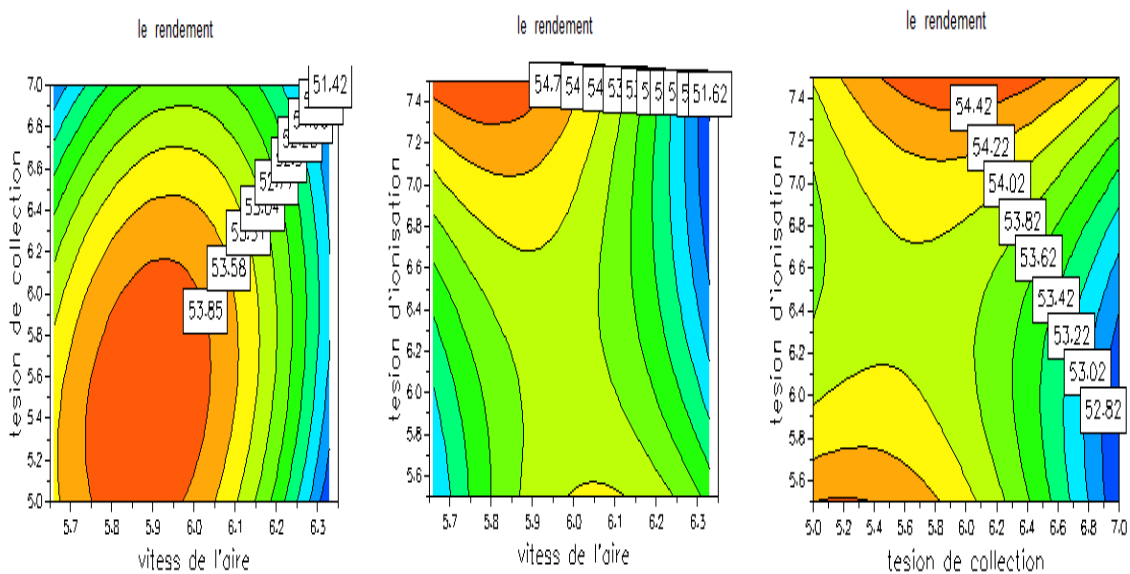
Figure(III.17): Effets de chaque facteur sur la réponse pour D1=2mm.



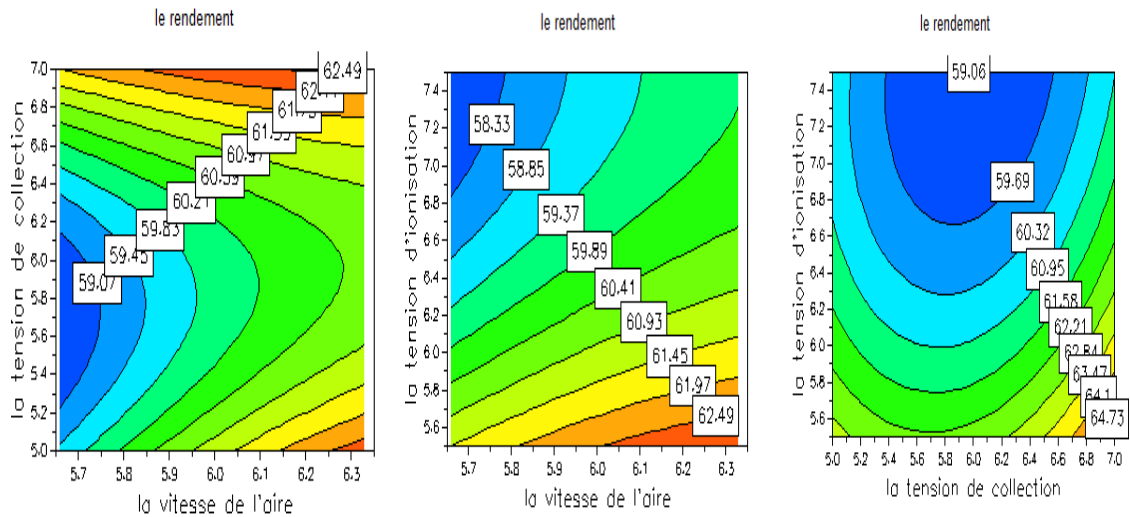
Figure(III.18): Effets de chaque facteur sur la réponse pour $D2 = 1.4mm$.

C- Détermination du point de fonctionnement optimale :

En utilisant la fonction de réponse, le logiciel MODDE 5.0 (MODELing and DESIGN) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par Umetrics AB, Umea, Suède) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences. Il donne les réponses prédites en fonction des paramètres : la tension d'ionisation, la vitesse de l'air et la tension de collection.



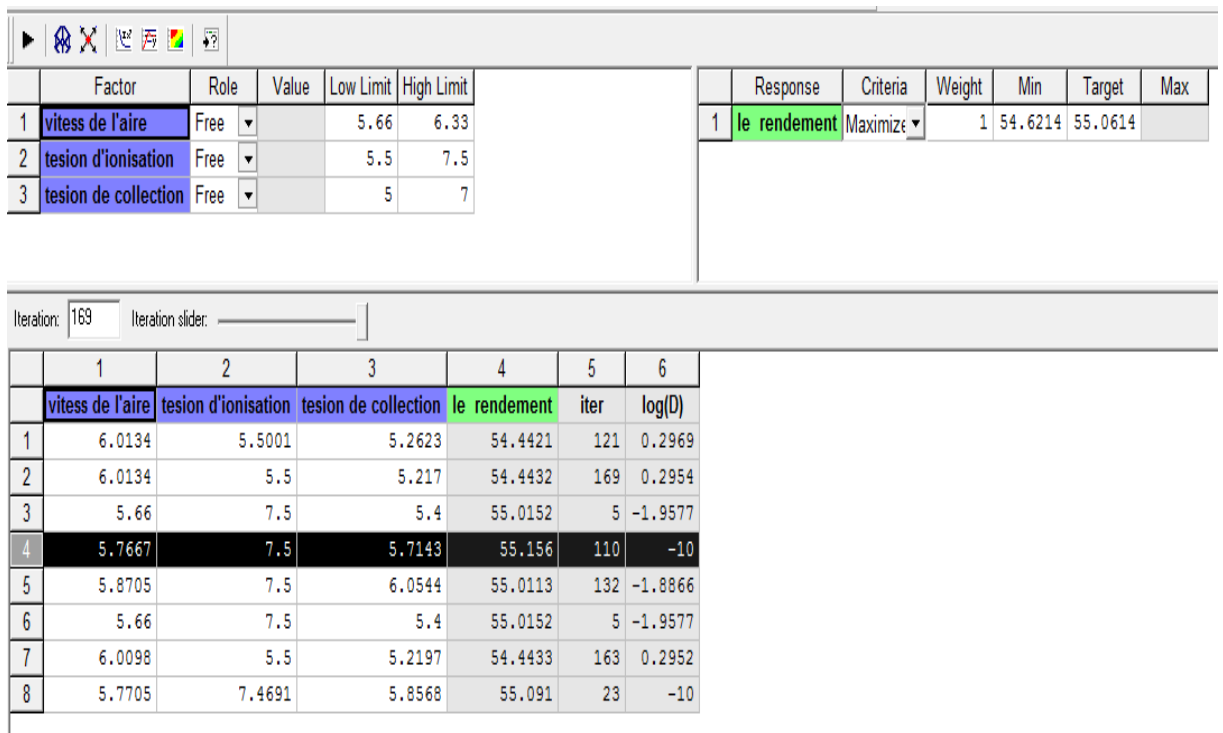
Figure(III.19): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour $D1=2mm$.



Figure(III.20): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour D2=1.4mm.

Pour le Diamètre D1=2mm :

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur rendement correspond aux valeurs optimales suivantes : une tension d'ionisation de 7.5kv, une vitesse du l'air de 5,76m/s et une tension de collection de 5.714kV comme le montre la figure (III.21) du logiciel MODDE 5.



Figure(III.21): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0, pour D1=2mm.

Pour Diamètre D2=1.4mm :

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur rendement correspond aux valeurs optimales suivantes : une tension d'ionisation de 5.5kv, une vitesse de l'air de 6,196m/s et une tension de collection de 7kV comme le montre la figure (III.22) du logiciel MODDE 5.

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max	
1	la vitesse de l'aire	Free		5.66	6.33	1	le rendement	Maximize	1	65.0586	65.711
2	la tension d'ionisation	Free		5.5	7.5						
3	la tension de collection	Free		5	7						

Iteration: 276 Iteration slider: _____

	1	2	3	4	5	6
	la vitesse de l'aire	la tension d'ionisation	la tension de collection	le rendement	iter	log(D)
1	6.33	5.5	5	64.1848	143	0.7382
2	6.2046	5.5058	6.9851	65.3338	58	-0.4758
3	6.3294	5.5	5.0516	64.0359	276	0.8191
4	6.3299	5.5001	6.9629	65.2332	148	-0.2706
5	6.3298	5.5112	7	65.3442	168	-0.5001
6	6.33	5.5	5	64.1848	143	0.7382
7	6.2046	5.5058	6.9851	65.3338	58	-0.4758
8	6.196	5.5	7	65.419	19	-0.6984

Figure(III.22): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0 pour D2=1.4mm.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par une description générale de notre montage expérimental et de son principe de fonctionnement, nous avons montré que les électro filtres demeurent des systèmes particulièrement complexes ; un grand nombre de phénomènes électriques et mécaniques apparaissent.

Nous avons présenté une étude expérimentale sur le filtre électrostatique à deux étages commençant par voir la relation tension pour les deux étages et aussi voir l'influence de quelque paramètre sur l'efficacité de notre dispositif (par refoulement).

Les résultats obtenus approuvent que les paramètres étudiée (la tension d'ionisation, la tension de collection et la vitesse du l'air) ont une influence considérable sur la masse des particules collectées et donc sur l'efficacité de notre système.

Cette procédure basée sur la méthode des plans d'expériences, permet de délimiter les intervalles de variation des facteurs variables et en suite de modéliser le rendement du filtre en proposant un modèle mathématique qui est validé en vérifiant des critères bien définis. Les modèles obtenus ont été ensuite utilisés pour déterminer les valeurs optimales des différents facteurs et pour prédire le rendement du filtre qui serait obtenu pour n'importe quelles valeurs des facteurs.

Chapitre IV

Modélisation et optimisation d'un filtre électrostatique à aspiration

Modélisation et optimisation d'un filtre électrostatique à aspiration

IV.1 Introduction

Dans le but de concevoir et réaliser notre filtre électrostatique a deux étages, nous avons mené nos expériences dans le laboratoire d'IRECOM. Les filtres électrostatiques à deux étages comme nous avons vus au (chapitre III)

, on des performances qui dépendent des conditions de fonctionnement liées aux présences de trois générateurs haut tension.

Au début nous avons commencé par réalisation d'un filtre électrostatique avec une possibilité de varier la tension d'ionisation et de collection et la vitesse du l'air par aspirations.

VI.2 Description du filtre électrostatique de laboratoire



Figure (IV.1) : Photographie d'un dispositif de laboratoire.

Le schéma descriptif de notre dispositif expérimental représenté dans la photographie de la figure (IV.1) permet de faire ressortir les différentes parties du dispositif qui seront décrit par la suite.

1-vibreur.

2- Entrée de la poussière.

3-filtre électrostatique.

4-aspirateur.

5- autotransformateur.

6-générateur de haute tension de polarité négative.

7-générateur de haute tension de polarité positive.

8-générateur de haute tension de polarité négative.

VI.3 Etude expérimentale

Il y a trois facteurs que nous avons étudiés dans ce travail:

- ✓ Tension d'ionisation.
- ✓ Tension de collection.
- ✓ La vitesse de l'air.

L'expérience se fait comme suit :

On met 20g de poussière fine (poussière de bois) dans le vibreur dont le rôle est d'uniformiser la répartition de la poussière, on met les générateurs sous tension ensuite on actionne l'aspirateur et le vibreur, et on récupère la poussière sortante par l'un sac.

VI.3.1 Les expériences préliminaires

VI.3.1.1 Diamètre de poussier D1=2mm

 *Variation de la vitesse de l'air*

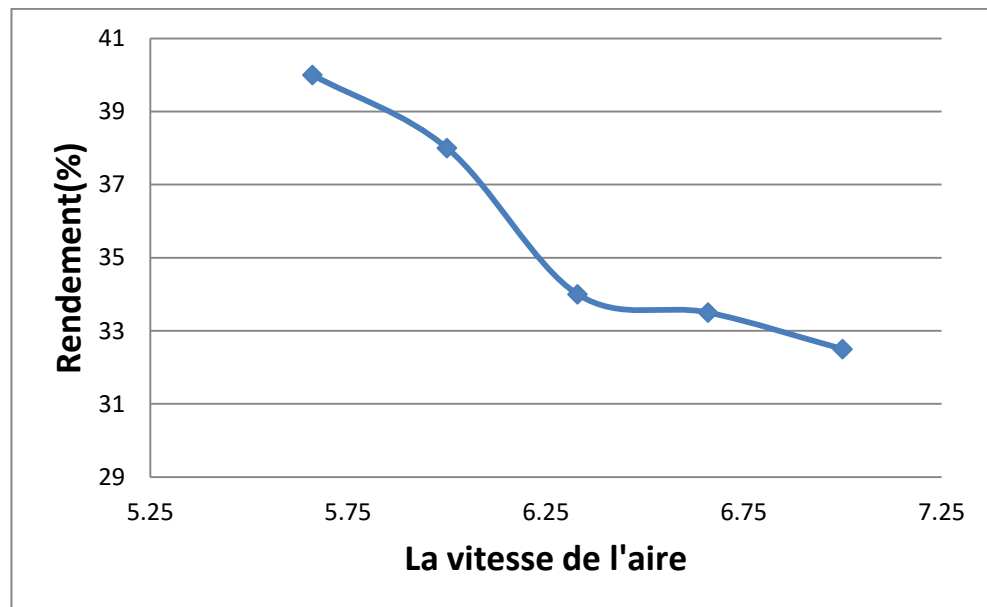
Tension d'ionisation (positive) constante=7.5kv

Tension de collection (négative) constante=-7kv

Tension de collection (positive) constante=7Kv

Tableau(IV.1): Influence de la vitesse de l'air sur le rendement

Vitesse (m/s)	M_e (g)	M_s (g)	η (%)
5.66	20	12	40
6	20	12.4	38
6.33	20	13.2	34
6.66	20	13.3	33.5
7	20	13.5	32.5



Figure(IV.2) : Variation du rendement en fonction de la vitesse de l'air.

✚ Variation de tension d'ionisation

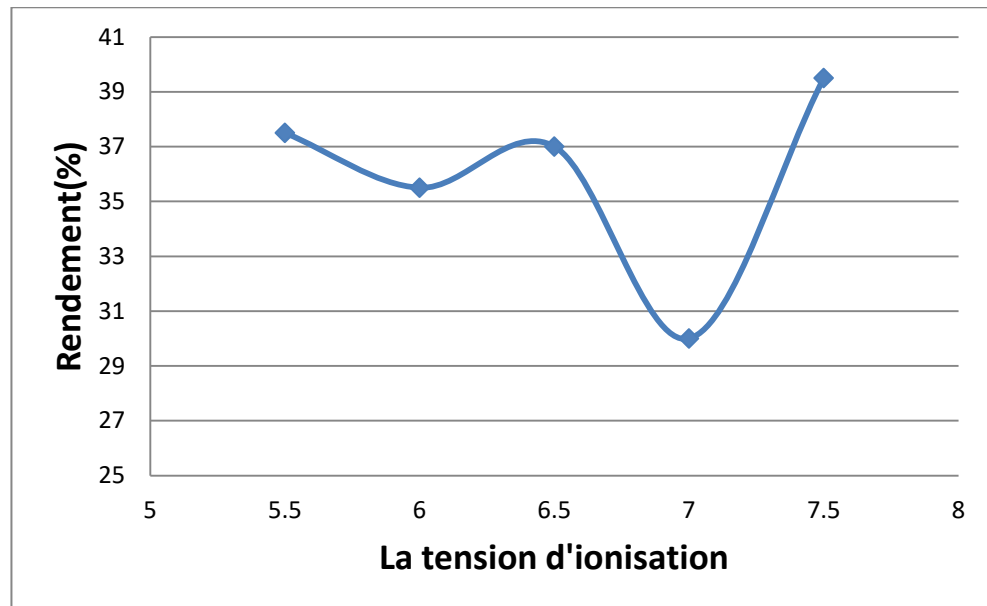
La vitesse de l'air constante=5.66m/s

Tension de collection (négative) constante=7kv

Tension de collection (positive) constante=7kv

Tableau(IV.2): Influence de la tension d'ionisation sur le rendement

U_i (kV)	Me(g)	Ms(g)	η (%)
7.5	20	12.1	39.5
7	20	14	30
6.5	20	12.6	37
6	20	12.9	35.5
5.5	20	12.5	37.5



Figure(IV.3): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.

✚ Variation de la tension de collection

Tension d'ionisation (positive) constante =7.5kv

La vitesse de l'air constante=5.66m/s

Tableau(IV.3): Influence de la tension de collection sur le rendement.

U_c (kV)	Me(g)	Ms(g)	η (%)
7	20	12.4	38
6.5	20	12.4	38
6	20	13.1	34.5
5.5	20	14.8	26
5	20	14.3	28.5



Figure(IV.4): Variation du rendement en fonction de la tension de collection.

VI.3.1.2 Diamètre de poussier $D_2 = 1.4\text{mm}$

✚ Variation de la vitesse de l'air

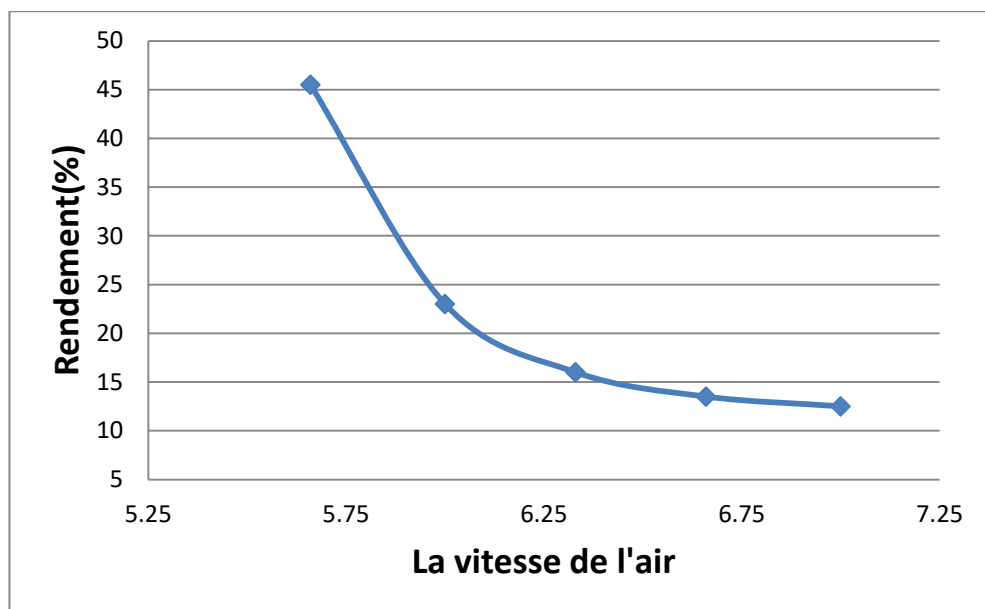
Tension d'ionisation (positive) constante = 7.5kv

Tension de collection (négative) constante = -7kv

Tension de collection (positive) constante = 7kv

Tableau(IV.4): Influence de la vitesse de l'air sur le rendement.

Vitesse (m/s)	M_e (g)	M_s (g)	η (%)
5.66	20	9.1	54.5
6	20	15.4	23
6.33	20	16.8	16
6.66	20	17.3	13.5
7	20	17.5	12.5



Figure(IV.5): Variation du rendement en fonction de la vitesse de l'air.



Variation de tension d'ionisation

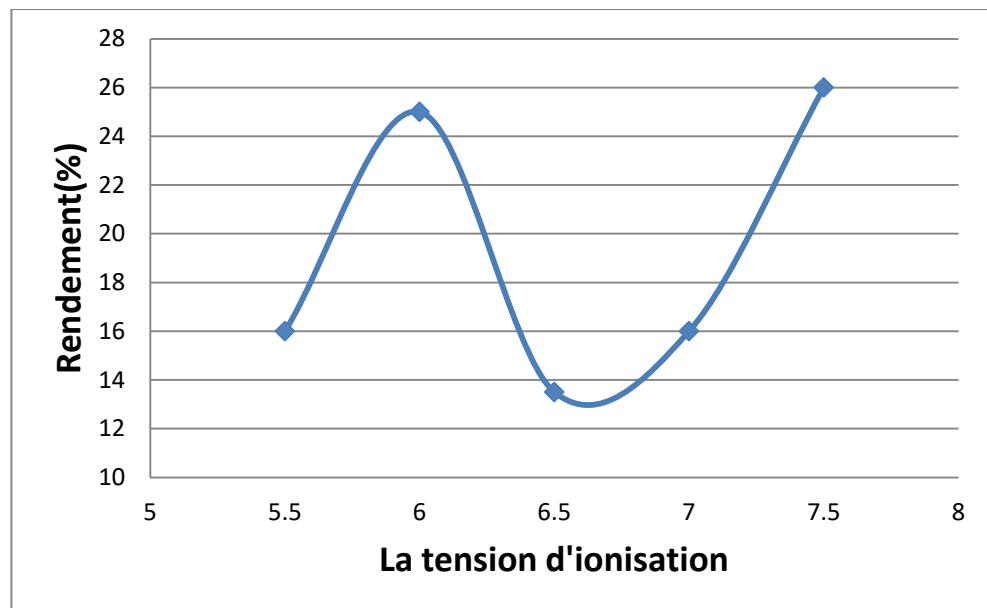
La vitesse de l'air constante=5.66m/s

Tension de collection (positive) constante=7kv

Tension de collection (négative) constante=-7kv

Tableau(IV.5): Influence de la tension d'ionisation sur le rendement.

U_i (kv)	M_e (g)	M_s (g)	η (%)
7.5	20	14.8	26
7	20	16.8	16
6.5	20	17.3	13.5
6	20	15.7	25
5.5	20	16.8	16



Figure(IV.6): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.



Variation de la tension de collection

Tension d'ionisation (positive) constante =7.5kV

La vitesse de l'air constante=5.66m/s

Tableau(IV.6): Influence de la tension de collection sur le rendement.

U_C (KV)	M_e (g)	M_s (g)	η (%)
7	20	14.1	29.5
6.5	20	13.8	31
6	20	14.1	29.5
5.5	20	16.5	17.5
5	20	15.8	21



Figure(IV.7): Variation du rendement en fonction de la tension de collection.

IV.4 Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences

IV.4.1 Choix des intervalles d'étude

Les intervalles d'étude des différents facteurs ont été choisis suivants les réponses obtenues à partir des essais préliminaires.

a) Intervalle d'étude de la vitesse de l'air

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la vitesse de l'air comme suit :

$$5.66 \text{ (m/s)} \leq V \leq 6.33 \text{ (m/s)} \quad \text{(IV.1)}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la vitesse de l'air est donnée par :

$$V_c = (V_{max} + V_{min})/2 \quad \text{(IV.2)}$$

D'où : $V_c = 6.33 \text{ m/s}$

b) Intervalle d'étude de la tension d'ionisation (positive)

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la tension d'ionisation comme suit :

$$5.5 \text{ (kV)} \leq U \leq 7.5 \text{ (kV)} \quad \text{(IV.3)}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{max} + U_{min})/2 \quad \text{(IV.4)}$$

D'où : $U_c = 6.50 \text{ Kv}$

c) Intervalle d'étude de la tension de collection (Négative)

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la tension de collection comme suit :

$$-7(kV) \leq U \leq -5(kV) \quad \text{(IV.5)}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{max} + U_{min})/2 \quad \text{(IV.6)}$$

D'où : $U_c = -6 \text{ Kv}$

d) Intervalle d'étude de la tension de collection (Positive)

D'après le tableau des expériences préliminaires, on a choisi l'intervalle d'étude de la tension de collection comme suit :

$$5(kV) \leq U \leq 7(kV) \quad \text{(IV.7)}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{max} + U_{min})/2 \quad \text{(IV.8)}$$

D'où : $U_c = 6 \text{ Kv}$

IV.5 Résultats des expérimentations

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportés au le tableau (IV.7) :

Tableau(IV.7): Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré.

N° Essais		U _i [kV]	U _c [kV]	V [m/s]	V [m/s]	U _i [KV]	U _c [KV]	Rendemen t [%]	V [m/s]	U _i [KV]	U _c [KV]	Rendemen t [%]
Plan factoriel «2 ³ »	1	-1	-1	-1	5.66	5.5	5	35.5	5.66	5.5	5	30.5
	2	1	-1	-1	6.33	5.5	5	33.5	6.33	5.5	5	17.5
	3	-1	1	-1	5.66	7.5	5	35.5	5.66	7.5	5	34
	4	1	1	-1	6.33	7.5	5	34	6.33	7.5	5	21
	5	-1	-1	1	5.66	5.5	7	38.5	5.66	5.5	7	33
	6	1	-1	1	6.33	5.5	7	36.5	6.33	5.5	7	20.5
	7	-1	1	1	5.66	7.5	7	39	5.66	7.5	7	36.5
	8	1	1	1	6.33	7.5	7	37	6.33	7.5	7	23.5
Points en étoiles « 2x3 »	9	-1	0	0	5.66	6.5	6	37	5.66	6.5	6	32.5
	10	1	0	0	6.33	6.5	6	35	6.33	6.5	6	20
	11	0	-1	0	5.995	5.5	6	38	5.995	5.5	6	33.5
	12	0	1	0	5.995	7.5	6	36	5.995	7.5	6	36.5
	13	0	0	-1	5.995	6.5	5	33	5.995	6.5	5	34
	14	0	0	1	5.995	6.5	7	37	5.995	6.5	7	38
Points au Centre	15	0	0	0	5.995	6.5	6	36	5.995	6.5	6	34
	16	0	0	0	5.995	6.5	6	36	5.995	6.5	6	34.5
	17	0	0	0	5.995	6.5	6	37	5.995	6.5	6	34

	U _{ionisation} [kV]	U _{collection} [kV]	Vitesse [m/s]
Niveau -1	5.5	5	5.67
Niveau 0	6.25	6.25	6
Niveau 1	7	7.5	6.33

Diamètre D1	2mm
Diamètre D2	1.4mm

A- Les modèles mathématiques :

c- Rendement(a)=91,9718+2,3*ten_{ion}-1,1*vit-0,950707*ten²_{col}-0,874997*vit*ten_{col}. (IV.9)

Avec Q²=0,32 R²=0,46

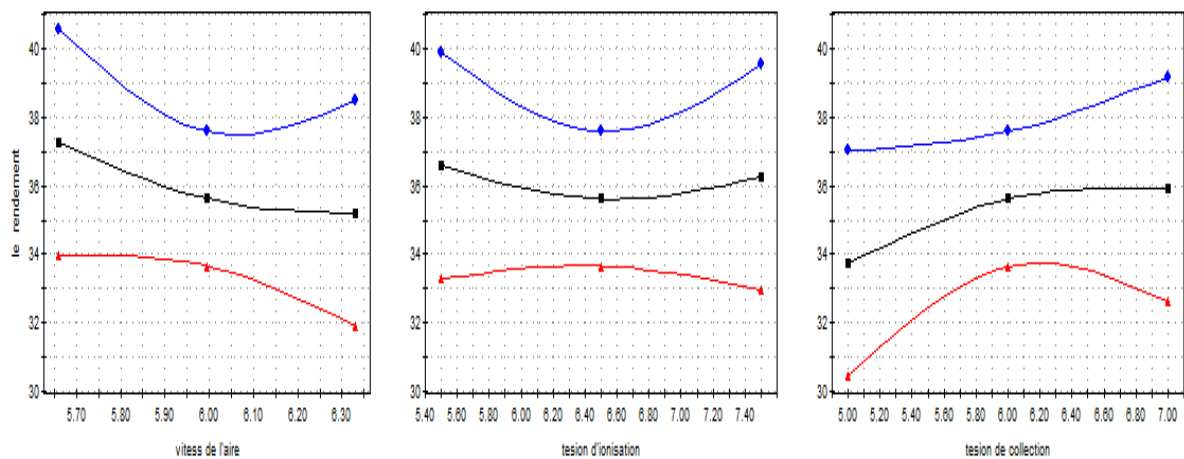
d- Rendement(b)=95,9296+1,5*ten_{ion}-0,5*ten_{col}+0,499993*vit-1,62676*ten²_{ion}-0,626756*ten²_{col}+1,37324*vit²-0,50001* ten_{ion}* ten_{col}. (IV.10)

Avec Q²=0,35 R²=0,41

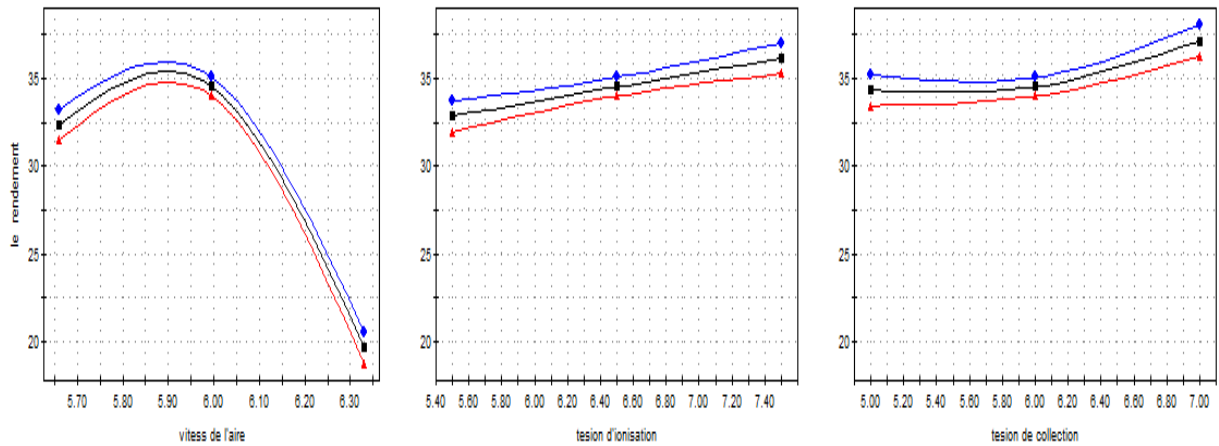
B- Influence des facteurs choisis sur les réponses :

A partir des modèles mathématiques obtenus, on peut déterminer l'influence de chaque facteur sur la réponse, en traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis. Si on veut par exemple déterminer l'influence d'un facteur (X_i) sur le rendement, on représente sa variation pour les trois niveaux du facteur choisi.

En procédant de la même manière, on peut démontrer facilement que les facteurs les plus influents sur le rendement sont respectivement la tension d'ionisation, la vitesse de l'air et la tension de collection.



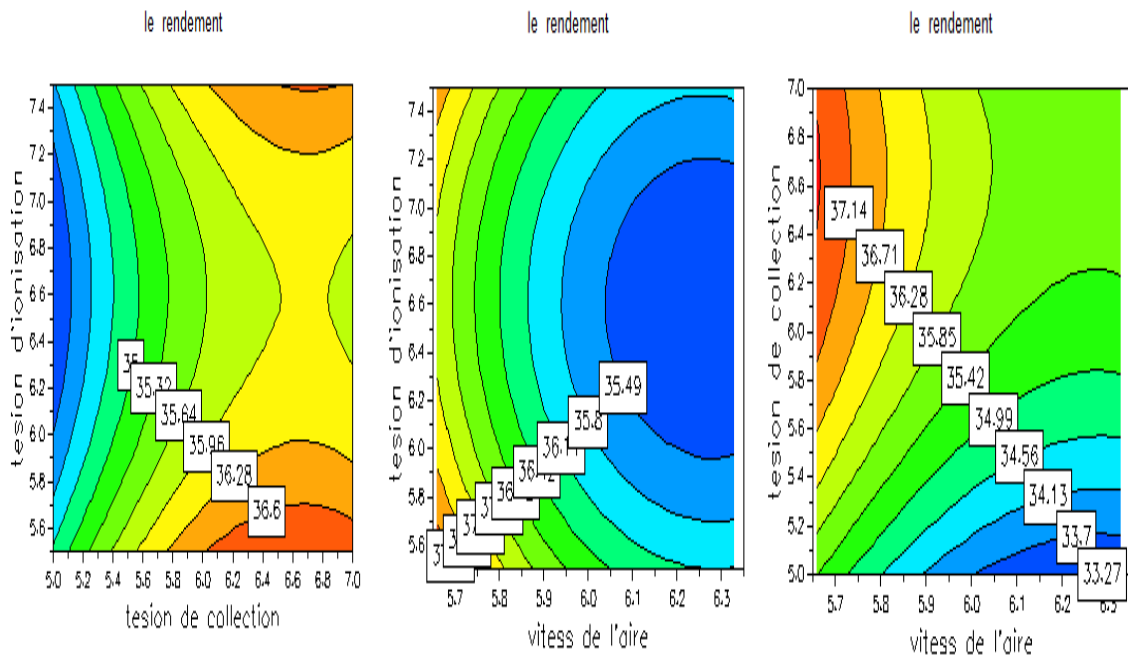
Figure(IV.8): Effets de chaque facteur sur la réponse pour D1=2mm.



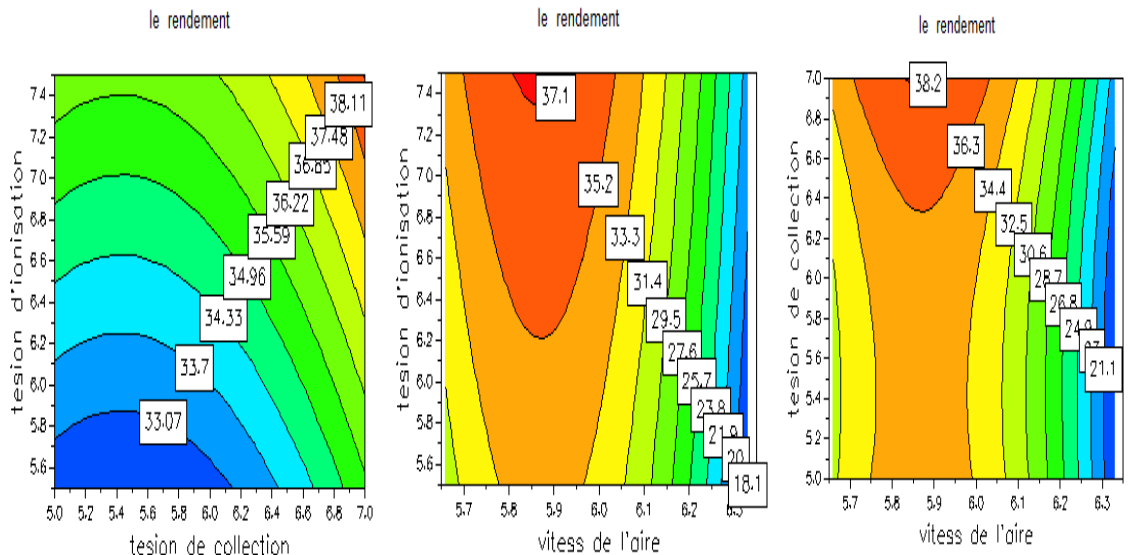
Figure(IV.9): Effets de chaque facteur sur la réponse pour $D2=1.4mm$.

C- Détermination du point de fonctionnement optimale :

En utilisant la fonction de réponse, le logiciel MODDE 5.0 (MODELing and DESIGN) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par Umetrics AB, Umea, Suède) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences. Il donne les réponses prédites en fonction des paramètres : la tension d'ionisation, la vitesse de l'air et la tension de collection.



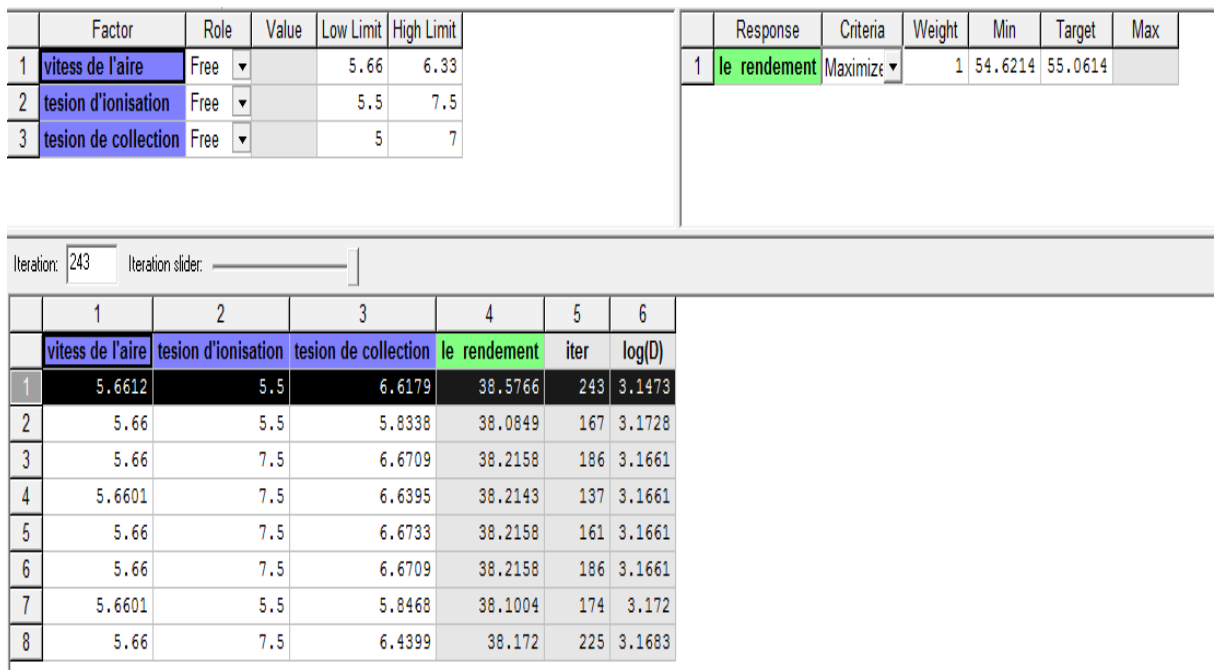
Figure(IV.10): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour $D1=2mm$.



Figure(IV.11): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, pour D2=1.4mm.

Pour le Diamètre D1 =2mm :

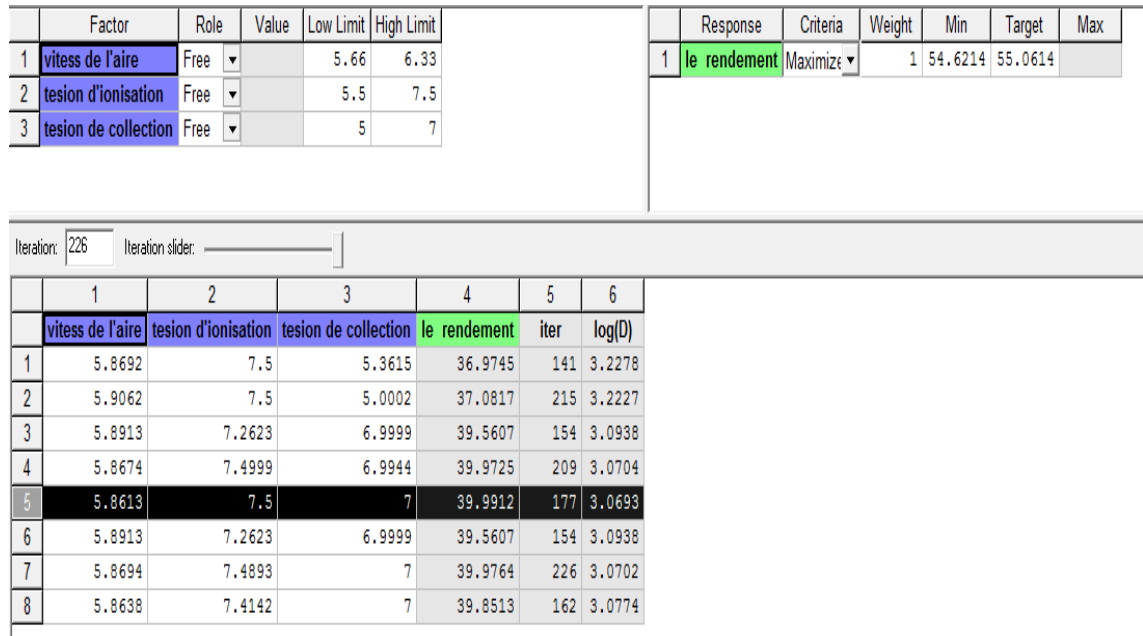
Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur rendement correspond aux valeurs optimales suivantes : une tension d'ionisation de 5,5kv, une vitesse du l'air de 5,617m/s et une tension de collection de 6.612kV comme le montre la figure (IV.12) du logiciel MODDE 5.



Figure(IV.12): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0, D1=2mm.

Pour Diamètre D2 =1.4mm :

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur rendement correspond aux valeurs optimales suivantes : une tension d'ionisation de 7.5kv, une vitesse du l'air de 5,86 m/s et une tension de collection de 7kV comme le montre la figure (IV.13) du logiciel MODDE 5.



Figure(IV.13): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0 pour D2=1.4mm.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale sur le filtre électrostatique à deux étages commençant par voir la relation tension pour les deux étages et aussi voir l'influence de quelque paramètre sur l'efficacité de notre dispositif (par aspiration).

Les résultats obtenus approuvent que les paramètres étudiée (la tension d'ionisation, la tension de collection et la vitesse du l'air) ont une influence considérable sur la masse des particules collectées et donc sur l'efficacité de notre système.

Cette procédure basée sur la méthode des plans d'expériences, permet de délimiter les intervalles de variation des facteurs variables et en suite de modéliser le rendement du filtre en proposant un modèle mathématique qui est validé en vérifiant des critères bien définis. Les modèles obtenus ont été ensuite utilisés pour déterminer les valeurs optimales des différents facteurs et pour prédire le rendement du filtre qui serait obtenu pour n'importe quelles valeurs des facteurs.

CONCLUSION GENERALE

La pollution atmosphérique représente un problème sérieux pour l'environnement. Néanmoins, plusieurs solutions ont été proposées pour la lutte contre la pollution de l'air, grâce aux travaux de recherche qui continuent dans ce domaine.

Parmi ces solutions on trouve la filtration électrostatique pour diminuer la quantité de produits libérés dans l'atmosphère par différents dispositifs industriels. En effet, le précipitateur électrostatique occupe un emplacement important dans la filtration. Ce filtre est largement utilisé depuis le début du 20^{ème} siècle pour retenir les particules présentes dans les gaz résultants, comme l'industrie chimique ou celle de ciment ou dans les gaz produits par les centrales électriques utilisant du charbon. Les précipitateurs électrostatiques peuvent traiter les fumées de fort débit mais aussi de faible débit.

Les particules se trouvant dans la fumée portent des charges électriques acquises soit par frottement soit par effet thermique, soit par un rayonnement naturel. Ces charges sont trop faibles pour qu'un champ électrique puisse exercer sur elles une force suffisante. Par conséquent, il faut une force capable de modifier leur trajectoire pour provoquer leur collecte. Une action efficace du champ d'un électrofiltre exige que les particules de la fumée reçoivent une charge de signe unique aussi élevée que possible. Cette charge est une ionisation intense due à un champ électrique intense.

Les deux premiers chapitres sont dédiés à la recherche bibliographique, on a consacré le premier chapitre à l'étude de la décharge couronne qui est le paramètre principal pour le fonctionnement du filtre électrostatique.

Après au deuxième chapitre, nous avons cité quelques notions sur les filtres électrostatiques, leurs principes de fonctionnement, leurs efficacités et les différents types de filtres.

Dans le troisième chapitre nous avons donné une description générale d'un filtre « à deux étages ». Nous sommes basés sur les trois paramètres essentiels (la tension d'ionisation , la vitesse d'air et la tension de collection) , après une étude expérimentale avec la méthode du plan d'expérience pour la modélisation et l'optimisation l'efficacité de ce dispositif.

Pour le quatrième chapitre est consacré a l'explication du modèle d'électrofiltre « à deux étages » réalisé, les différentes composantes de notre filtre (partie d'ionisation et partie de collection), après une étude expérimentale avec la méthode du plan d'expérience pour la modélisation et l'optimisation l'efficacité de ce dispositif.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] TILMATINE Amar . « Phénomènes d'ionisation dans les gaz ; » cours ingénieur, faculté des sciences de l'ingénieur , université de Sidi – bel –Abbés, 2008.
- [2] Abdelber BENDAOU . « Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée », thèse de Doctorat , Université de Sidi-bel- Abbés, 2006.
- [3] ARNE-RODERMAN H. _ effes sur la santé de l'exposition professionnelle aux poussières de bois et de liège : a propos d'un cas_ thèse de médecine , Nancy , pp 169,2004
- [4] GOLDMAN M., GOLDMAN A. _ Corona discharges _ Gaseous electronic,Merles,hirsh, N.& Oskam, H.J., Academic Press, chapter 4,1978.
- [5] MEEK J.M.,CRAGGS J.D. _Electrical breakdown of gases _ A Wiley-Interscience publication, John Wiley et sons, New-York,1978.
- [6] FJELD, R.A & MCDARLAND, A.R. Evaluation of select approximation for calculating particle charging rates in the continuum regime.Aerosol Science and technology 10,535-549,1989.
- [7] HINZE J.O. _ Turbulence_ McGraw-Hill, 1975.
- [8] BLANCHARD D. Collection des fines particules et caractérisation des couches de poussière dans un précipitateur électrostatique _ Thèse ,Université joseph Fourier ,Grenoble 2001 .
- [9] RAMADAN O.E . ,SOO S.L. _ Elctrohydrodynamic secondary flow-Phys. Fluids,12, pp 1943-1945, 1969.
- [10] WHITE H.J. _ Industrial electrostatic precipitation_ addison Wesley Publishding company, New York, 1963 .
- [11] NF X 44-052 _ Prélèvement de poussières dans une veine gazeuse document de défense.
- [12] CONTAL P._Les techniques du dépolluissage_Document de synthèse de la journée sur le sépolluissage 1993 à ESIGEC, Chambéry, 1993 .
- [13] D.Dubois “Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur dépollution des gaz d'échappement “ Thèse de l'Université de toulouse 3.
- [14] P.A.Lawless & R.F.Altman “ESPM :an advanced electrostatic precioitator model “ IEEE Ind.Appl.Conf.29th IAS Annul Meeting Denver,pp.1519-1566,2-5 Oct,1994.
- [15] B.Benamer “La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois ; étude expérimentale et numérique novembre“ thèse de l'Université Henry Poincaré, Nancyl , 2008 .

- [16] T.Benaissa “contribution a l’Etude d’un filtre Electrostatique “ thèse de Magister de l’Université des science et de Technologie d’Oran ,2008 .
- [17]NF 44-061 _Méthodes d’essai de filtres à air utilisés en ventilation générales_AFNOR ,1992 .
- [18]DAVIDSON J.H._Ph.D.Dissertation,Duke Univ, 1984.
- [19]CEN/EN779 _filtres à air de ventilation générale pour l’élimination des particules_Exigences, essais et marquages , norme européenne, Juillet 1993.
- [20]DUMITAN L. M., Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique _ thèse de l’Université Joseph Fourier, Grenoble 1,2001.
- [21]ROBINSON M._Turbulent gas flow and electrostatic _J.Air.Pollut.control Ass., 18,pp.235-239,1968
- [22]LAMI,F .MATTACHINI F.,SALA , R & VIGL , H.- A mathematica model of electrostatic field in wires-plate electrostatic precipitation – Journal of Electrostatics vol 39 , pp .1-21 , 1997.
- [23]CEN/TC 195/N22 _ filtre à air à très haute efficacité à air à très faible pénétration (HEPA et ULPA).Partie 1 : prescriptios , essais et marquages _Norme européenne , 1994.
- [24]NELSON D.A.,OHADI M.M.,ZIA S.AND WHIPPLE R.L.-Electrostatic effect on pressure drop in tube flow _ Int .J.heat and flow ,vol.11 N° 4 , December 1990.
- [25]BENEMAR B.,DONNOT A. & RIGO M.O.—Wood Dust Congress Strasbourg,2006.
- [26]PARKER K.R., Electrostatic precipitation ,chapman & hall ,1997, pp . 1-24 .
- [27]BROCK J.R. , Non continuum unipolar charging of aerosol : the role of external electric field ._ journal applied Physics , Vol .41 , 5,pp . 1940-1944 ,1970.
- [28]N.L Frigon, D.Mathews, Practical Guide to Experimental Design, New York : Wiley, 1996.

Résumé

Ce travail est le début d'une approche expérimentale sur les filtres électrostatiques (configuration : fil / plaque, deux étages), Dans ce mémoire notre attention a été focalisée sur l'influence des paramètres électriques et géométriques sur l'efficacité du filtre électrostatique que nous avons conçu.

Comme application nous avons fait une étude par la méthode des plans d'expériences(PE) consiste à caractériser plus rapidement le filtre électrostatique en réduisant au possible le nombre d'essais, à déterminer les plus influents et d'apporter des éléments d'information facilement interprétables et d'obtenir les points de fonctionnement optimal de notre montage.

Mot clé : Précipitateur électrostatique – décharge couronne.