

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت

Université De Ain Temouchent Belhadj Bouchaib  
Faculté de Science et Technologie  
Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : Science et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Electromécanique

Thème

*Contribution a l'étude d'un précipitateur électrostatique (PES)*

Présenté Par :

HACHEMI Abdelhakim

MEGHERBI Boucif

Devant le jury composé de :

M<sup>r</sup>. Zelmat.S

M<sup>me</sup>.Touhami.A

M<sup>r</sup>.Berrached.D

Pr

M.A.A

M.C.B

Président

Examinatrice

Encadrant

Année universitaire 2022/2023



## ***REMERCIEMENT***

*Je remercie tout d'abord « ALLAH » qui m'a donné la force*

*et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail. Je remercie mon*

*Encadreur «Mr. BERRACHED Djalloul » pour la confiance, les*

*encouragements, les précieux Conseils qu'il m'a accordés et prodigués*

*durant ce travail. Je remercie également Mr. AISSOU Masinissa. Mes chers*

*collègues pour tous les sacrifices consentis, pour leur soutien durant toutes*

*mes années d'études.*





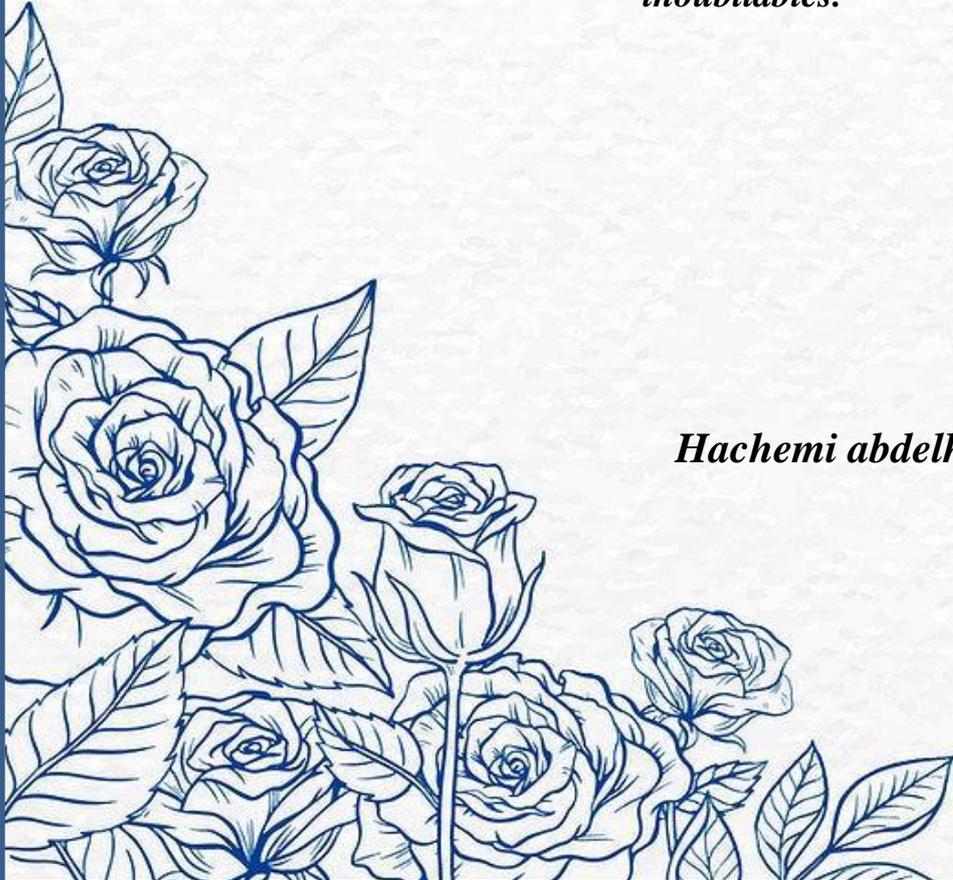
## ***DÉDICACES***

*Je dédie ce travail `a ma chère mère que je leurs doit tout l'amour de la vie. A*

*ma femme. A mon fis Adam Ibrahim A mes et sœur. A mes cousins. A mes*

*amis et amies qui ont fait de mon passage `à l'université'e des souvenirs*

*inoubliables.*



*Hachemi abdelhakim*



## DÉDICACES

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédi ce modeste travail à ceux qui, Quels que soient les termes embrasses, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon Amour sincère.*

*A L'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon Respect : mon cher père.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes Exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable maman.*

*A Mes chères sœurs SABRINE et MARWA « rabi Yarhamha » et mon cher frère OUSSAMA. qui n'ont cassé d'être pour moi des exemple de persévérance, de courage et de générosités*

*Au propriétaire de belle cœur qui partage Tous mes année de vie et mon bras droit, mon amie fidèle et la plus précieuse RAYAN NERMIN*

*A tous les membres des familles MEGHERBI et BOUKACEM.*

*Sans oublier mon binôme HACHEMI Hakim pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*



# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I Généralités sur la décharge électrique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1Introduction :</b> .....	<b>5</b>
<b>I.2Processus d'ionisation et d'excitation .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 Processus inverse.....</b>	<b>9</b>
<b>I.4Recombinaison et attachement .....</b>	<b>9</b>
<b>I.5 Processus Cathodiques .....</b>	<b>10</b>
<b>I.6. AVALANCHE ELECTRIQUE:.....</b>	<b>11</b>
<b>I.7. Mécanismes de claquage (Décharge autonome): .....</b>	<b>13</b>
<b>I.8. L'effet couronne :</b> .....	<b>18</b>
<b>I.9. Bruit génère par la décharge couronne :</b> .....	<b>22</b>
<b>I.10. Perturbations radioélectriques:.....</b>	<b>22</b>
<b>I.11. Loi de PEEK-CHAMP critique:.....</b>	<b>23</b>
<b>I.12. Pertes couronne: .....</b>	<b>23</b>
<b>I.13. Phénomène de régulation:.....</b>	<b>25</b>
<b>I.14.Applications utilisant de décharge couronne :</b> .....	<b>26</b>
<b>CHAPITRE II Les filtres électrostatiques .....</b>	<b>27</b>
<b>II.1 Construction et fonctionnement des filtres électrostatiques.....</b>	<b>28</b>
<b>II.2 Modèles du fonctionnement des filtres électrostatiques.....</b>	<b>37</b>
<b>II.3.Les avantages des filtres .....</b>	<b>49</b>
<b>II.4.Les inconvénients des filtres .....</b>	<b>49</b>
<b>II.5 Conclusion.....</b>	<b>50</b>
<b>CHAPITRE III Les précipitateurs électrostatiques.....</b>	<b>51</b>
<b>III.1.Introduction: .....</b>	<b>52</b>
<b>III.2. Précipitation électrostatique :</b> .....	<b>52</b>
<b>III.3. Principe de précipitation électrostatique :</b> .....	<b>52</b>
<b>III.4. Les types des précipitateur électrostatique :</b> .....	<b>53</b>
<b>III.5. Description d'un precipitateur électrostatique a plaque :</b> .....	<b>62</b>
<b>III.6. Avantages des précipitateurs électrostatiques :</b> .....	<b>65</b>
<b>III.7. Inconvénients des précipitateurs électrostatiques :</b> .....	<b>66</b>

<b>III.8. Rendement :</b> .....	66
<b>III. 9. Conclusion :</b> .....	66
<b>CHAPITRE IV Modélisation et optimisation d un filtre électrostatique a deux étages</b> .....	67
<b>VI.1. Introduction :</b> .....	68
<b>VI.2 Description du filtre électrostatique de laboratoire</b> .....	68
<b>VI.3 Principe de fonctionnement :</b> .....	70
<b>VI.4 Résultats obtenus :</b> .....	71
<b>IV.5 Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences :</b> .....	75
<b>IV.6 Résultats des expérimentations :</b> .....	77
<b>IV.7 Conclusion</b> .....	82
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	83

## Liste des figures

<b>Figure(I.1)</b> : <i>Collision entre un atome et un électron</i>	6
<b>Figure(I.2)</b> : <i>Emission d'électron secondaire par bombardement d'ion positive</i>	11
<b>Figure(I.3)</b> : <i>Déroulement de l'avalanche électronique</i>	12
<b>Figure(I.4)</b> : <i>Avalanche électrique</i>	13
<b>Figure(I.5)</b> : <i>Entretien de la décharge par les processus</i>	15
<b>Figure(I.6)</b> : <i>Etapas successives du développement du STREAMER</i>	16
<b>Figure(I.7)</b> : <i>Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique</i>	17
<b>Figure(I.8)</b> : <i>Ionisation d un atome par un électron</i>	19
<b>Figure(I.09)</b> : <i>Effet couronne en polarité négative par une configuration pointe-plan</i>	20
<b>Figure(I.10)</b> : <i>Apparence lumineuse en polarité négative</i>	20
<b>Figure(I.11)</b> : <i>Effet couronne en polarité positive, progression par photo-ionisation</i>	21
<b>Figure(I.12)</b> : <i>Apparence lumineuse en polarité positive</i>	22
<b>Figure(I.13)</b> : <i>Pertes couronne en fonction du champ superficic</i>	24
<b>Figure(I.14)</b> : <i>Influence de la pluie</i>	24
<b>Figure(I.15)</b> : <i>le phénomène du paratonnerre</i>	25
<b>Figure(I.16)</b> : <i>Filtre électrostatique cylindrique</i>	26
<b>Figure(II.1)</b> : <i>Les principales étapes qui interviennent dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique.</i>	29
<b>Figure (II.2)</b> : <i>Types d'électrofiltre plaque-fil</i>	30
<b>Figure (II.3)</b> : <i>Types d'électrofiltre plaque plate</i>	32
<b>Figure (II.4)</b> : <i>Types d'électro filtre fil-cylindre</i>	33
<b>Figure (II.5)</b> : <i>Types d'électro filtres à double étage avec des électrodes de collecte planes</i>	34

<b>Figure(II.6) :</b> <i>Types d'électro filtres à double étage</i>	35
<b>Figure(II.7) :</b> <i>variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules</i>	40
<b>Figure(II.8) :</b> <i>l'évolution de la charge des particules donnée par le modèle de Cochet en fonction du diamètre des particules.</i>	40
<b>Figure(II.9) :</b> <i>l'évolution de la vitesse de migration <math>w_{th}</math> en fonction du diamètre des particules.</i>	41
<b>Figure(II.10) :</b> <i>trajectoires des particules en écoulement uniforme laminaire.</i>	41
<b>Figure(II.11):</b> <i>représentation du modèle de Deutsch</i>	43
<b>Figure(II.12) :</b> <i>Schéma du problème considéré par LEONARD.</i>	47
<b>Figure(III.1):</b> <i>Principe de précipitateur électrostatique</i>	53
<b>Figure(III.2):</b> <i>Photographie d'un précipitateur industriel</i>	55
<b>Figure(III.3):</b> <i>Construction d'un précipitateur industriel</i>	56
<b>Figure(III.4):</b> <i>Construction des électrodes ionisantes</i>	56
<b>Figure (III.5):</b> <i>Construction des électrodes de collection</i>	57
<b>Figure (III.6):</b> <i>Chambre a douilles</i>	57
<b>Figure (III.7):</b> <i>Construction du système d évacuation de la poussière</i>	58
<b>Figure (III.8):</b> <i>Construction de base d un précipitateur électrostatique( type cylindrique vertical)</i>	60
<b>Figure(III.9):</b> <i>Les différents compartiments des précipitateurs électrostatiques à plaques</i>	61
<b>Figure (III.10):</b> <i>Précipitateur électrostatique industriel typique</i>	62
<b>Figure(III.11):</b> <i>Dessin descriptif d'un précipitateur électrostatique</i>	63
<b>Figure (III.12):</b> <i>Dimensions des électrodes collectrices et ionisantes</i>	64
<b>Figure(III.13):</b> <i>Mécanisme de précipitateur électrostatique</i>	64
<b>Figure (III.14):</b> <i>Dimensions de lé électrode collectrice grillagée</i>	65
<b>Figure (IV.1):</b> <i>photographe d'un diapositif de laboratoire</i>	68
<b>Figure (IV.2):</b> <i>photographe de la partie d'ionisation</i>	69
<b>Figure (IV.3):</b> <i>photographe de la partie de collection</i>	69
<b>Figure (IV.4):</b> <i>Variation du rendement en fonction de la vitesse du l'air.</i>	71
<b>Figure (IV.5):</b> <i>Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.</i>	72
<b>Figure (IV.6):</b> <i>Variation du rendement en fonction de la tension de collection.</i>	73
<b>Figure (IV.7):</b> <i>Variation du courant en fonction de la tension d'ionisation</i>	74
<b>Figure (IV.8):</b> <i>Variation du courant en fonction de la tension collection</i>	74

<b>Figure (IV.9):</b> <i>Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite</i>	76
<b>Figure (IV.10):</b> <i>Effets de chaque facteur sur la réponse pour le mélange</i>	78
<b>Figure (IV.11):</b> <i>Effets de chaque facteur sur la réponse pour le fine</i>	78
<b>Figure (IV.12):</b> <i>Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, en fonction des paramètres de tension et débit de l'air pour différentes distances</i>	79
<b>Figure(IV.13):</b> <i>Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE</i>	80

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau(I.1) : Energies d'ionisation de quelques gaz.....</b>	<b>06</b>
<b>Tableau(IV.1):influence de la tension sur le rendement.....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau(IV.2):influence de la tension d'ionisation sur le rendement.....</b>	<b>72</b>
<b>Tableau(IV.3):influence de la tension de collection sur le rendement.....</b>	<b>73</b>
<b>Tableau(IV.4): Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré.....</b>	<b>77</b>

# **INTRODUCTION GENERALE**

Depuis la prise de conscience politique d'une nécessaire préservation de l'équilibre climatique mondial et de l'impact sur cet équilibre des émissions de gaz à effet de serre, les gaz polluants et les particules solides sont les deux acteurs principaux responsables de la pollution atmosphérique.

Ils représentent respectivement 90% et 10% des masses globales de polluants rejetés dans l'atmosphère toute fois, parmi les facteurs dont les actions contribuent au développement et à la croissance de la pollution, on retrouve entre autres le développement des industries, la multiplication des moyens de transports et des flux qui en résultent, l'activité des ménages et l'exploitation intensive des énergies fossiles.

Chaque individu respire environ 11500 litres d'air par jour, en milieu urbain, la pollution atmosphérique prend une dimension particulière du fait de la concentration des activités humaines et du nombre n'important de personnes exposées Les particules ont un effet néfaste aussi bien sur la nature que sur l'homme Leur taille est par ailleurs un paramètre important. Plus fines elles sont, plus longtemps elles restent en suspension dans l'air Il en est de même de leur temps de séjour dans les poumons.

En effet, lorsqu'elles ont un diamètre supérieur à  $10\ \mu\text{m}$ , elles peuvent être expulsées des voies respiratoires ; de  $3\ \mu\text{m}$  à  $10\ \mu\text{m}$ , elles se déposent au niveau de la trachée et des bronches ; à moins de  $3\ \mu\text{m}$ , elles atteignent les alvéoles pulmonaires et peuvent pénétrer dans le sang.

Elles sont par ailleurs suspectées d'être à l'origine de toutes sortes de problèmes de santé : asthme, bronchites persistantes et cancer du poumon.

Parmi les moyens de filtration utilisés pour diminuer la quantité de produits libérés dans l'atmosphère, une place très importante revient aux précipitâtes (ou filtres, ou encore dépoussiéreurs) électrostatiques.

Ces installations de filtration sont largement utilisées depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle pour retenir les particules présentes dans les gaz résultants, par exemple, dans l'industrie métallurgique, l'industrie chimique ou celle de ciment ainsi que pour épurer les gaz produits par les centrales électriques brûlant du charbon.

Dans tous les cas lors d'une telle épuration, les particules parasites que l'on souhaite éliminer se déposent sur le filtre.

Le dépôt qui en résulte modifie les caractéristiques du filtre.

Ce colmatage est de toute évidence nuisible au bon déroulement du processus de filtration.

Résumé :

La pollution de l'air ambiant, due à des concentrations élevées de petite particule et des particules fines, et le principale risque environnementale pour la santé, provoque Beaucoup de décès prématurés chaque année dans le monde, pour cela les chercheurs poncent à une méthode de dépoussiérage pour sauver le monde c'est bien l'électro filtration. L'objectif principal de notre travail est approfondir les connaissances sur la décharge couronne dans un précipitateur fils-plan. Ce travail est constitué principalement de trois parties :La premier phase est consacrée pour l'étude théorique de la décharge couronne dans un EPS la deuxième partie est consacrée pour l'étude expérimentale qui a été réalisée afin de mesurer les paramètres électrique de cette décharge sur l'électrode de type plan et la caractéristique courant- tension, ainsi de mesurer l'efficacité de notre précipitateur.

Abstract:

Ambient air pollution, due to high concentrations of small particles and fine particles, and the main environmental risk for health, causes Many premature deaths each year in the world, for this researchers sand to a method of dust removal to save the world is indeed electro filtration. The main objective of our work is to deepen the

knowledge on the corona discharge in a son-plane precipitator. This work consists mainly of three parts: The first phase is devoted to the theoretical study of the corona discharge in an EPS the second part is devoted to the experimental study which was carried out in order to measure the electrical parameters of this discharge on the plane type electrode and the current-voltage characteristic, thus to measure the efficiency of our precipitator.

#### الملخص:

يتسبب تلوث الهواء المحيط ، بسبب التركيزات العالية للجزيئات الصغيرة والجزيئات الدقيقة ، والمخاطر البيئية الرئيسية على الصحة ، في حدوث العديد من الوفيات المبكرة كل عام في العالم ، لذلك فإن الرمال إلى وسيلة إزالة الغبار إنقاذ العالم هي بالفعل كهربائية. الترشيح. الهدف الرئيسي من عملنا هو تعميق المعرفة بتفريغ الإلكتروليت في المرسب على مستوى الطائفة. يتكون هذا العمل بشكل أساسي من ثلاثة أجزاء: المرحلة الأولى مخصصة للدراسة النظرية لتصريف الإلكتروليت في EPS، والجزء الثاني مخصص للدراسة التجريبية التي تم إجراؤها من أجل قياس المعلمات الكهربائية لهذا التفريغ على المستوى. اكتب القطب وخاصة الجهد الحالي ، وبالتالي لقياس كفاءة المرسب لدينا.

# **CHAPITRE I 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

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.

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

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

Molécules	$W_i$ (eV)
CO2	13.7
N2	15.5
O2	12.2
H2	15.4
H2O	12.6

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

### I.2.1 Ionisation par collision d'un atome

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

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

$m$  : masse de la particule

$v$  : vitesse de la particule

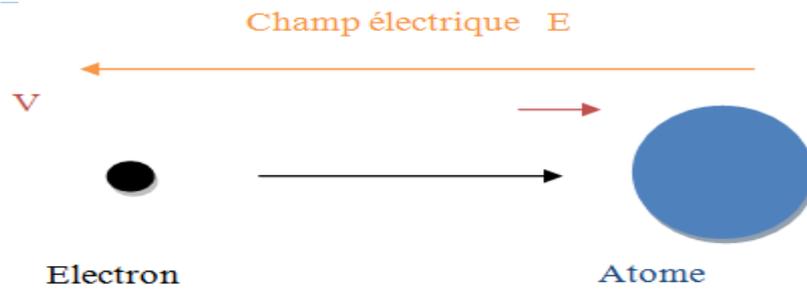
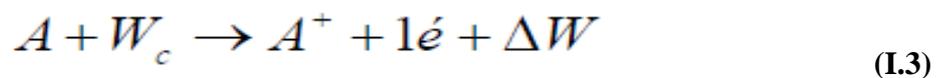


Figure (I.1) : Collision entre un atome et un électron

Si  $W_c \geq W_i$

- ionisation de l'atome



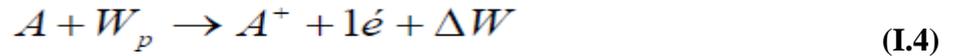
Avec  $\Delta W = W_c - W_i$  énergie supplémentaire cédée à l'électron libre sous forme d'énergie cinétique. C'est le processus d'ionisation le plus fréquent dans les gaz.

### I.2.2 ionisation par photon

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

$$\text{Si } W_p \geq W_i$$

- photo-ionisation



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

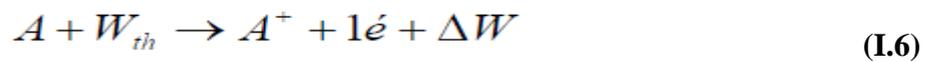
Si  $W_p$  légèrement inférieure à  $W_i$

- 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

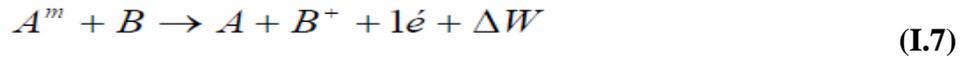
$$\Delta W = W_{th} - W_i$$

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 permettrait l'ionisation de ce dernier.



$A^m$ : Atome métastable.

$B$ : Atome neutre.

$A$  : métastable désexcité.

$B^+$  : Atome ionisé.

$e$ : électron libéré

$\Delta W$  : Énergie cédée à l'électron libéré

C'est le processus le moins fréquent.

### I.2.2 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  $W_{\text{ext}}$ :

$$W_{\text{ext}} = e V_{\text{ext}}$$

$V_{\text{ext}}$ : potentiel d'excitation

### I.2.3 Cause d'excitation et d'ionisation

L'excitation atomique est le processus qui se produit lorsqu'un atome absorbe de l'énergie et que ses électrons passent à des niveaux d'énergie plus élevés. L'ionisation, quant à elle, est le processus par lequel un électron est complètement arraché à l'atome, créant ainsi un ion chargé positivement et un électron libre.

La cause la plus courante d'ionisation est la collision entre un atome et un électron ou un photon à haute énergie. Lorsque l'atome est frappé avec suffisamment d'énergie, un électron est éjecté de l'atome et l'atome devient un ion chargé positivement.

### I.3 Processus inverse

Le processus inverse, où un électron est absorbé par un atome ionisé, s'appelle la recombinaison. Lorsque l'électron est capturé par l'ion, l'énergie est libérée sous forme de rayonnement électromagnétique, comme un photon. La recombinaison est un processus important dans les plasmas, où des ions et des électrons libres coexistent.

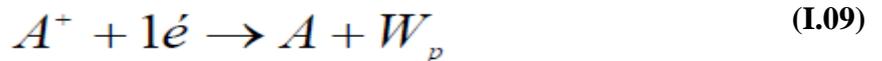
En résumé, l'excitation atomique peut conduire à l'ionisation d'un atome, tandis que la recombinaison inverse l'ionisation en libérant de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique

### I.4 Recombinaison et attachement

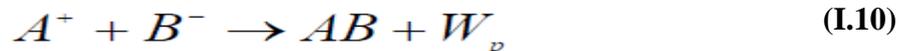
#### I.4.1 Recombinaison

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

a) Entre un ion positif et un électron :



b) Entre deux ions opposés



#### I.4.2 Attachement

Quand un électron s'attache à un atome pour former un ion négatif :  $A + 1e \rightarrow A^- + h\nu$

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 ( $\alpha$ ), on écrit :

$$\frac{dn}{n} = -\eta dx \quad \text{soit } n = n_0 e^{-\eta x} \quad (\text{I.11})$$

Avec :

$\eta$ : coefficient d'attachement,

$n_0$ : nombre d'électrons initial

**n**: nombre d'électrons attaches.

### I.4.3 Détachement

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



### I.4.4 Diffusion

La diffusion est le mouvement des particules d'un endroit à un autre en raison de l'agitation thermique.

La diffusion peut se produire dans les gaz, les liquides et les solides.

### I.4.5 Mobilité

La mobilité, en revanche, est la capacité des particules à se déplacer sous l'influence d'une force. Dans le contexte de la physique des semi-conducteurs, la mobilité se réfère à la capacité des électrons ou des trous à se déplacer dans un matériau en réponse à un champ électrique appliqué.

## I.5 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  $W_{\text{ext}} = 0,1 \text{ eV}$

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

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

### I.5.1 Emission par bombardement d'ions positifs

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

$W_c = \frac{1}{2}mv^2$  et la bombardent.

Si  $W_c \geq W_{\text{ext}}$ , 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.5.2 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.5.3 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 aboutissent à la libération d'un ou de plusieurs électrons situés à la surface du métal.

### I.5.4 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.5.5 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.6. AVALANCHE ELECTRIQUE:

On considère deux électrodes planes placées dans un gaz et soumises à une tension élevée. [2]

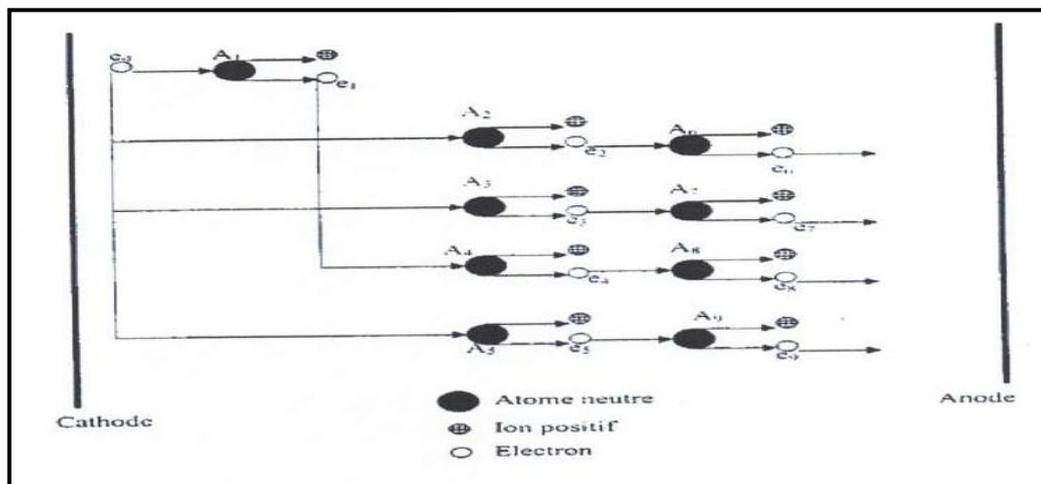
### I.6.1. Electrons primaires :

Ce sont des électrons produits principalement par des agents naturels tels que les rayonnements cosmiques ou la radioactivité de la terre ou bien par des agents artificiels. [1]

Par exemple: en bombardant la surface cathodique avec une source de rayonnement ultraviolet pour en extraire des électrons.

### I.6.2. Avalanche électronique :

La décharge couronne se produit entre deux électrodes ou l'une présente l'anode et l'autre la cathode ou un électron primaire situé près de ce dernier crée par ionisation grâce à des agents naturels tel que les rayonnements cosmiques et la radioactivité de la terre. [11.12]



**Figure 1.3:** Déroulement de l'avalanche électronique

L'électron primaire  $e_0$  accéléré par le champ électrique «E» (figure 1.3) entre en collision avec un atome A, et l'ionise, A, libère un électron e, et devient lui même un ion positif. Les électrons  $e_0$  et  $e_1$  ionisent par collision deux autres atomes A2 et A3 qui libèrent deux autres électrons  $e_2$  et  $e_3$  Ces quatre électrons entre on collision avec quatre autres atomes qu'ils l'ionisent. La multiplication des électrons se poursuit suivant ce processus jusqu'à ce que l'avalanche arrive à l'anode. [1]

Les électrons plus rapides sont absorbés par l'anode tandis que les ions positifs lourds et plus lents forment entre les électrodes un ensemble de charges qu'on appelle « charge d'espace »

Le nombre total de paires électrons-ions positifs créés dans une avalanche peut être calculé par :

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad (\text{I.13})$$

Où

$n_0$ : le nombre d'électrons émis de la cathode.

$d$ : la distance entre l'anode et la cathode.

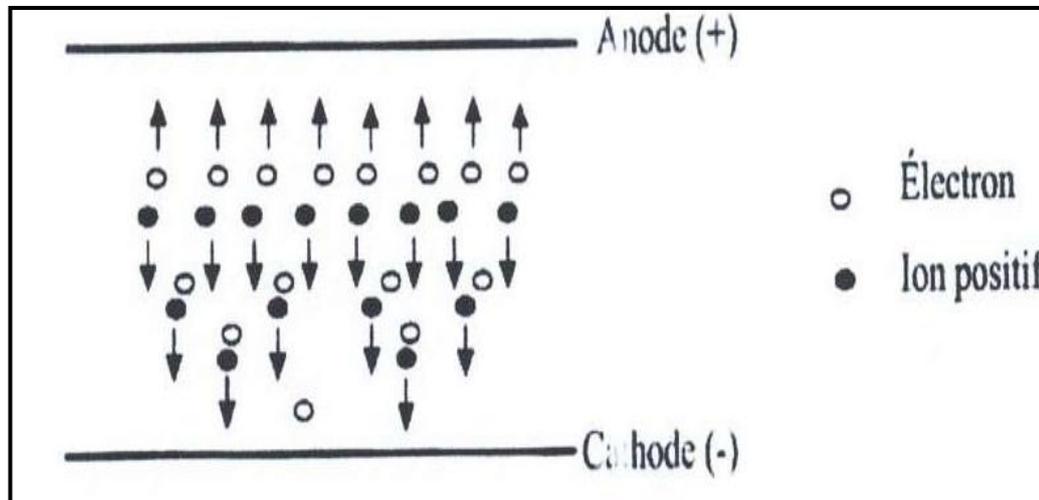
$\alpha$ : 1er coefficient de Townsend. c'est une constante qui ne dépend pas du nombre d'électrons.

Tous les électrons sont donc ionisants et chaque électron primaire est à l'origine d'une avalanche électronique à multiplication exponentielle.

### Remarque:

- L'avalanche prépare le chemin au claquage du gaz
- Un atome ionisé fournit un électron et devient lui-même un ion positif, il ya autant d'électrons créés par l'avalanche que d'ions positif. chaque collision ionisante produit une paire électron-ions positif.

L'avalanche progresse dans le sens opposé au champ électrique (Cathode anode).



**Figure 1.4:** avalanche électrique

### I.7. Mécanismes de claquage (Décharge autonome):

En partant l'équation (I.13) on peut écrire par analogie l'équation du courant électronique

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (\text{I.14})$$

L'étude expérimentale du courant électronique (1) effectuée par Townsend en fonction de la distance inter électrode ( $d$ ) montre que le courant augmente plus rapidement que prévue par l'équation (I.14). Ainsi lorsque la tension appliquée aux électrodes atteint un seuil minimal qui provoque une décharge autonome, ce courant ne dépend plus de l'intensité de l'ionisation extérieure, on dit que la décharge est auto-entretenu. Ce type de décharge se divise en deux groupes :

- 1) A pression élevée (processus de Streamer)
- 2) A pression moyenne ou faible (décharge de Townsend)

### I.7.1. Claquage de type TOWNSEND:

Le claquage étant le résultat d'une succession d'avalanches électronique, un électron germe bien positionné produit par rayonnement cosmique ou par radioactivité de la terre, provoque une avalanche électronique primaire. Les électrons sont vite absorbés par l'anode tandis que les ions positifs bombardent la cathode avec leur énergie cinétique.

Les électrons émis de la cathode par bombardement, appelés « électrons secondaire » créent de nouvelles avalanches secondaires. A ce moment on dit que la décharge a lieu. [2]

Le courant délivré par la décharge prend la forme suivante :

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha \cdot d)}{1 - \gamma(\exp(\alpha \cdot d) - 1)} \quad (\text{I.15})$$

$i$ : Courant total collecté à l'anode

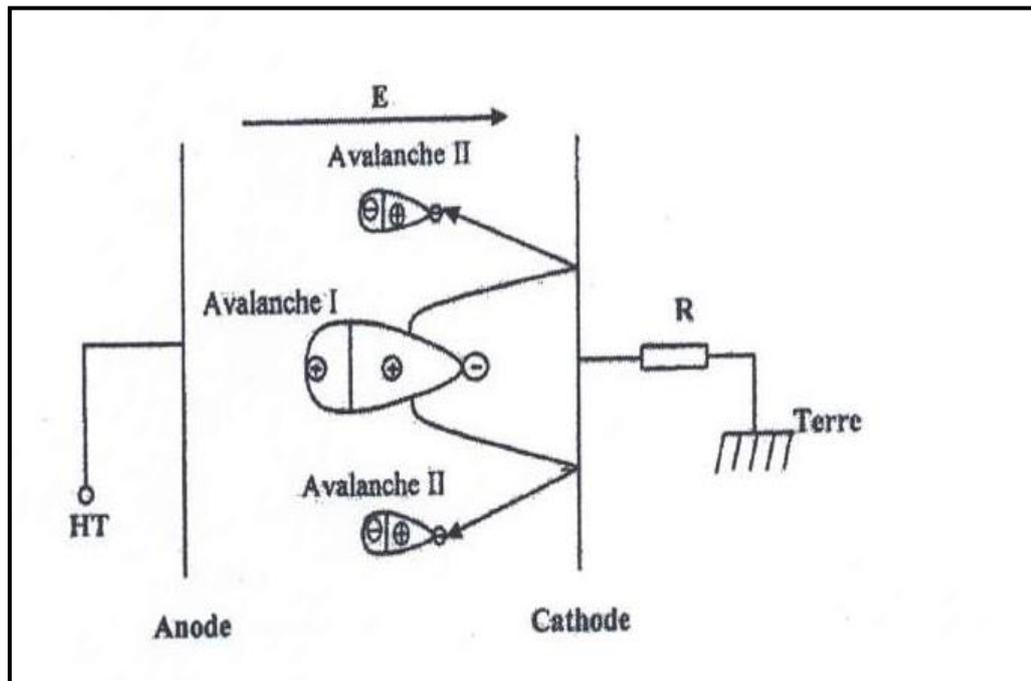
$i_0$ : Courant initial ( $d=0$ )

$\alpha$ : Coefficient d'ionisation, décrivant le nombre de paires électron-ion produites par collision d'un électron dans un centimètre de parcours.

$\gamma$ : Coefficient caractérisant le nombre moyen d'électrons arrachés de la cathode par l'impact d'un ion positif.

$d$ : Distance inter électrode.

$R$ : Résistance extérieure de protection.



**Figure 1.5:** Entretien de la décharge par les processus

La décharge est obtenue quand le dénominateur de l'expression s'annule, le courant n'est donc limité que par la résistance R du circuit extérieure, alors :

$$1 - \gamma(\exp(\alpha \cdot d) - 1) = 0 \quad (\text{I.16})$$

Comme  $(\exp(\alpha \cdot d) \gg 1)$ , l'expression (1. 24) devient :

$$\gamma(\exp(\alpha \cdot d) = 1 \quad (\text{I.17})$$

Cette expression représente le critère de claquage de type TOWNSEND en champ uniforme. Dans un champ non uniforme le coefficient d'ionisation ( $\alpha$ ) n'est plus constant, l'expression ( 1. 26) s'écrit:

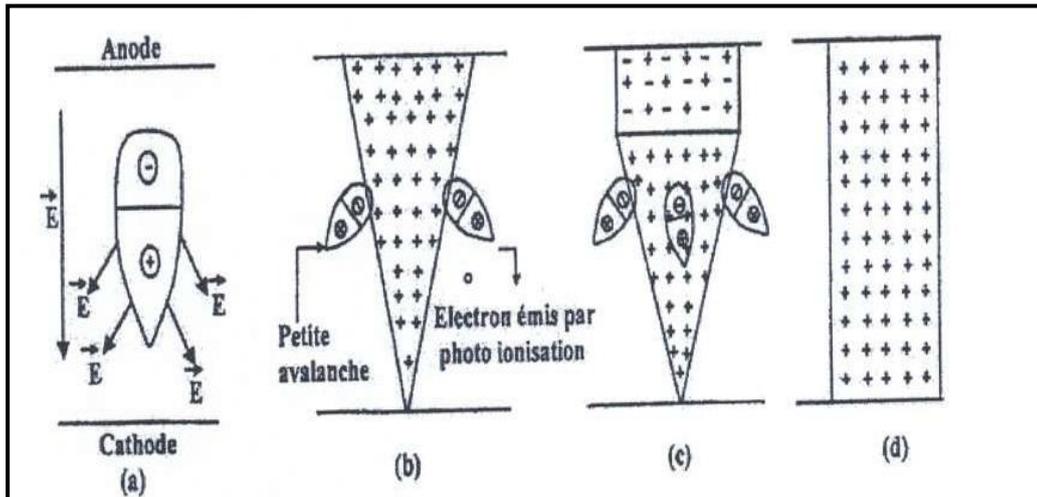
$$\gamma(\exp \int_0^D \alpha(x) dx = 1 \quad (\text{I.18})$$

### I.7.2. Claquage de type STREAMER (DARD):

En haute pression, contrairement à la décharge TOWNSEND, la concentration des ions positifs obtenue par l'avalanche primaire est importante. Le champ devient fortement inhomogène, ce champ est maximal en tête d'avalanche.

Comme la théorie de TOWNSEND fut insuffisante pour les hautes pressions, la propagation de la décharge fait intervenir quatre mécanismes chronologiquement successifs découverts par LOEB, MEEK et RATHER. [2]

- Modification électronique d'une avalanche de type TOWNSEND par électron primaire un électron primaire
- Modification du champ électrique local par la charge d'espace positif laissée par la première avalanche (figure 1.6.b).
- Photo ionisation du gaz en tête de l'avalanche (avalanche secondaire)
- Transition avalanche Streamer lors que le champ de la charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ appliqué (selon le critère de MEEK) (figure 1.6.d).



**Figure 1.6:** Etapes successives du développement du STREAMER

### I.7.3. Différence entre le décharge Townsend et Streamer:

Pour la théorie de Townsend, la pression utilisée dans le 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 avalanches secondaires.[13]

Pour la théorie Streamer, la pression utilisée dans le gaz est très élevée, les électrons secondaires sont libérée par photo ionisation dans le Volume du gaz et contribue à la formation du canal avec un champ intense ( $E_t = E + E_r$ ). [7]

**Avec :**

$E_t$ : Champ total.

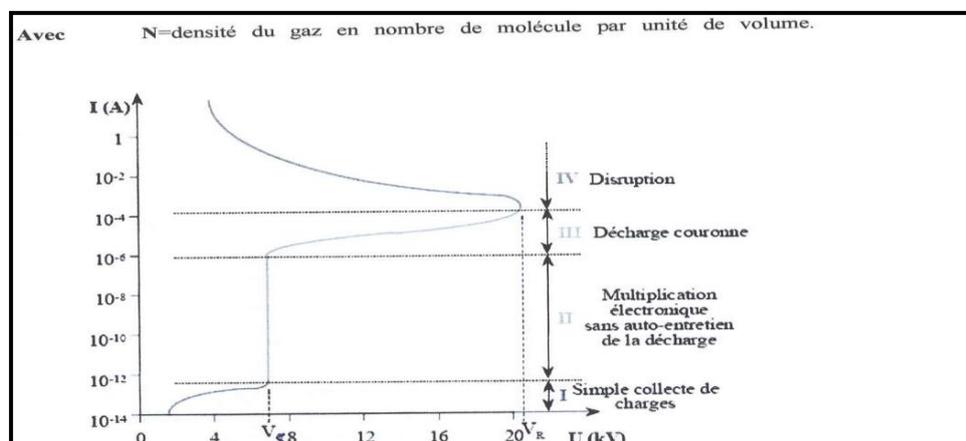
$E$ : Champ électrique.

$E_r$ : Champ radial.

### I.7.4. Caractéristique courant-tension et régime de décharge:

La caractéristique 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 1.7) [45]

- ❖ Le premier régime (I) consiste en la collecte des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impacte de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes.
- ❖ Le second régime (II) qui se produit à partir d'une tension seuil ( $V_s$ ), 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 extérieure : la décharge est auto-entretenu. C'est le régime de décharge couronne, ou apparaissent les dards (aussi appelés streamers) responsable de la composante impulsionnelle du courant. Au-delà d'une tension appliquée ( $V_a$ ), 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.



**Figure 1.7:** Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique

## I.8. L'effet couronne :

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 les plus propices au développement de ce phénomène sont celles qui présentent les plus grandes courbures: pointes, fil de petit diamètre. [1]

### I.8.1. La décharge couronne :

La décharge couronne est le phénomène de conduction électrique qui apparaît dans un champ non-uniforme entre deux électrodes de courbures non symétriques auxquelles on applique une différence de potentiel

Donc, le terme « décharge électrique » s'applique à tout mécanisme de passage de courant dans un diélectrique.

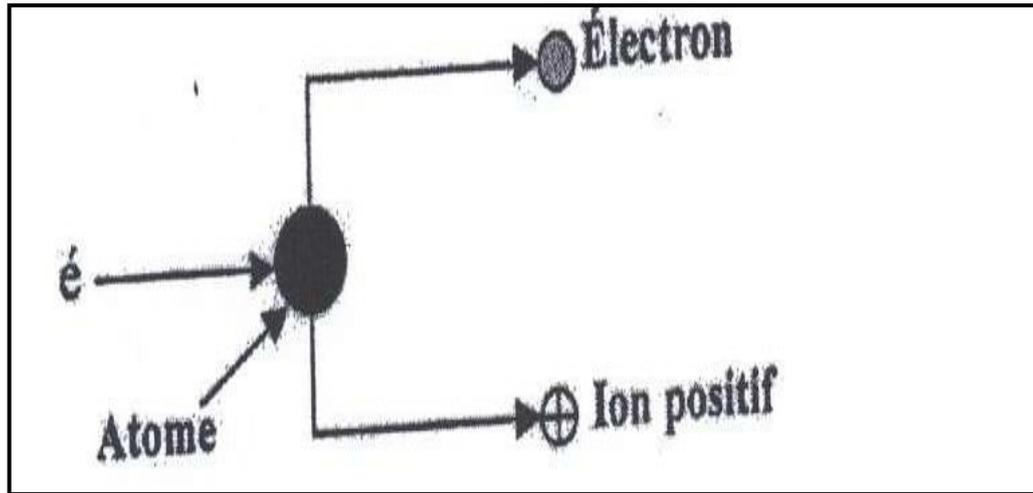
L'air est l'isolant le plus utilisé en électrotechnique, isolant par excellence disponible en quantité illimitée, il s'impose comme meilleur compromis pour un grand nombre d'application.

Il est nécessaire de donner un aperçu général sur la plupart des mécanismes fondamentaux qui conditionnent l'apparition de l'effet couronne dans les installations de transport d'énergie électrique haute tension et les différents modes à travers lesquels les deux types des particules granuleuses sont chargés dans les séparateurs électrostatiques L'aspect du phénomène est très différent suivant la polarité de la pointe(positive ou négative).[1]

#### I.8.1.1. Différents types d'émissions des décharges en effet couronne:

La plupart des études systématiques concernant l'émission de charges sont faites dans des géomètres dissymétriques, par exemple au voisinage d'une électrode pointue ou d'un conducteur cylindrique.

Sous l'effet du champ  $\vec{E}$  d'une tension appliquée, il en résulte une force  $\vec{F} = -e * \vec{E}$  l'électron se déplace à une vitesse ( $v$ ), donc ce dernier possède une énergie cinétique  $Wc = \frac{1}{2} * m * v^2$  Après sa collision avec un atome, et si  $Wc \geq W_i$  (énergie d'ionisation d'atome) on aura donc une ionisation (figure 1.8).



**Figure 1.8:** Ionisation d'un atome par un électron

La zone d'espace concernée par les processus d'ionisation est limitée au voisinage de l'électrode à petit rayon de courbure (l'effet de pointe), pratiquement à une certaine distance de la pointe.

On distingue deux types essentiels de décharge couronne.

### **I.8.1.2. Décharge couronne en polarité négative:**

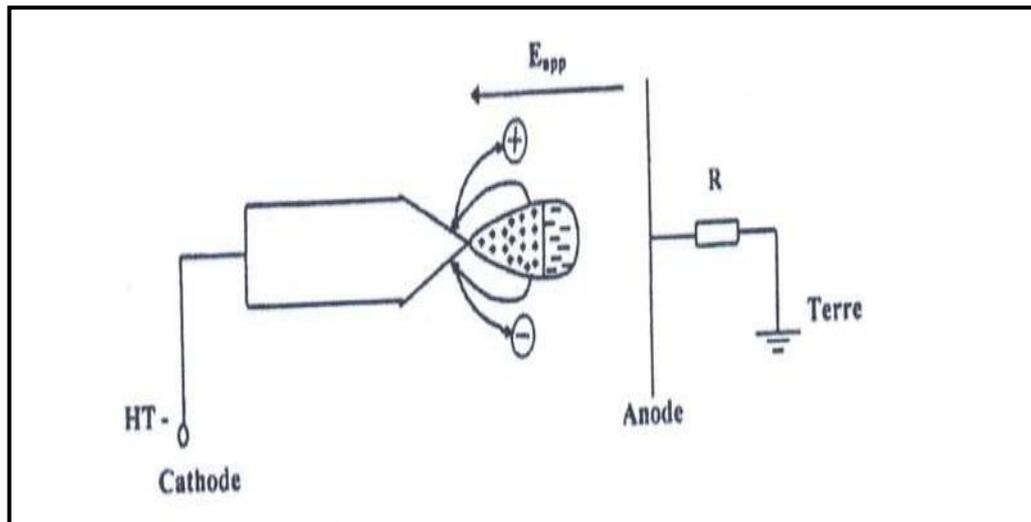
On considère le montage pointe-plante, tel que l'électrode pointe est portée à un potentiel (HT) négatif, alors que l'électrode plane est mis à la terre (voir la figure 1.9)

La décharge couronne se déroule comme suite:

Un électron germe voisin de la pointe crée une avalanche électronique selon le mécanisme de TOWNSEND.

L'impact des ions positifs laissés par l'avalanche primaire et les photons provenant de la zone d'ionisation sur la cathode libère d'électrons secondaires. Ces derniers donnent naissance à d'autres avalanches et le courant augmente d'intensité. Une dense charge d'espace d'ions positifs formés près de la pointe, alors que les électrons à cause de leur grande mobilité, sont vite éloignés et forment dans la zone à faible champ des ions négatifs par le processus de l'attachement.

Le champ de la charge d'espace affaiblit le champ principal, ceci réduit fortement les chances qu'un électron pour provoquer d'autres ionisations, la décharge s'arrête. Au fur et à mesure que la charge d'espace se neutralise à la cathode, le champ principal retrouve sa valeur initiale, dès lors des derniers ions positifs restants de la charge d'espace peuvent extraire des électrons par leurs impact sur la cathode et le processus recommence de nouveau. [2]



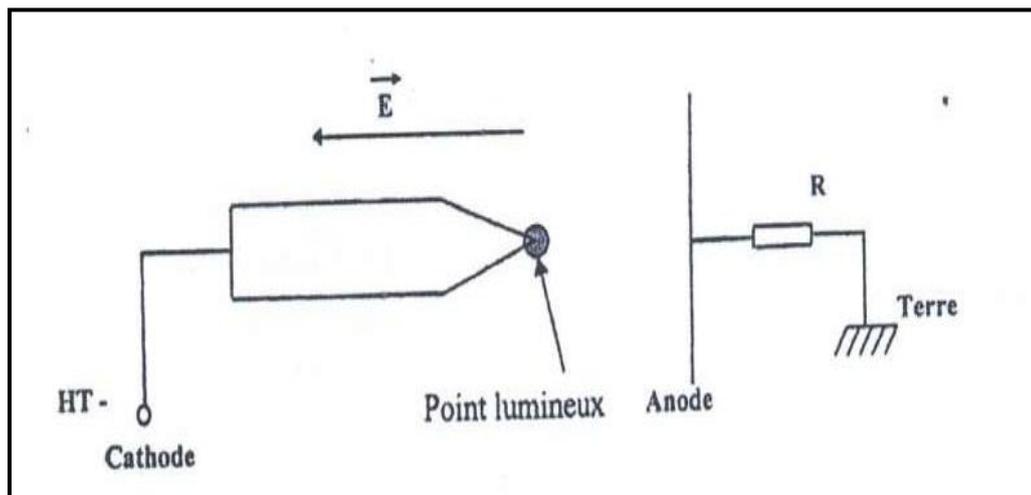
**Figure 1.9:** Effet couronne en polarité négative par une configuration pointe-plan

### I.8.1.2.1. Nature du courant:

Seuls les électrons traversent toute la longueur inter électrode, le courant est donc électronique. Mais en cas d'un gaz électronégatif (air, SF<sub>6</sub>,.....), les électrons s'attachent aux atomes pour former des ions négatifs, le courant est alors ionique.

### I.8.1.2.2. Apparence lumineuse :

L'apparence lumineuse prend une forme d'un petit champignon (figure 1.10) qui dans l'air est de couleur bleu violette, due au spectre de l'azote et de ses composés oxygène.



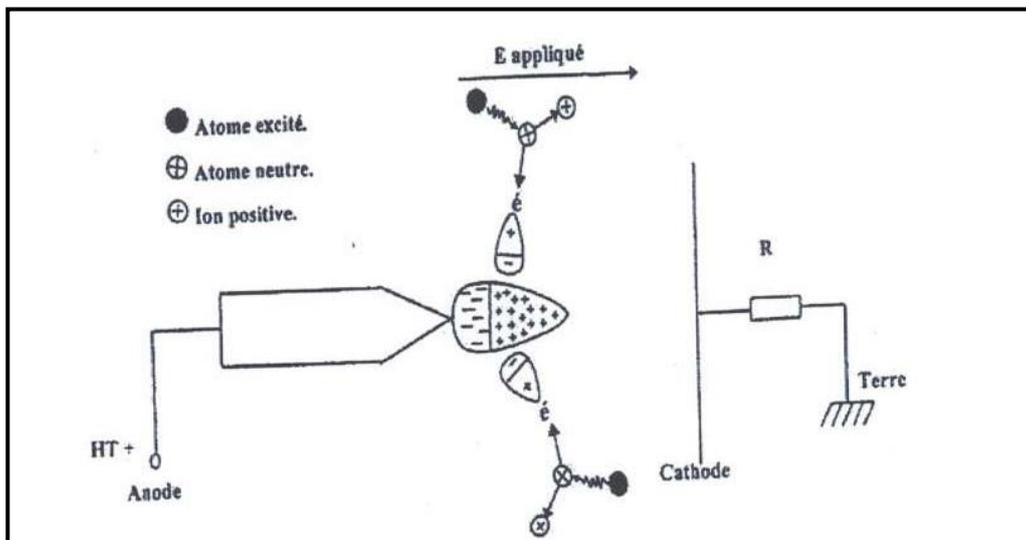
**Figure 1.10:** Apparence lumineuse en polarité négative

### I.8.1.3. Décharge couronne en polarité positive:

On considère le même montage sachant que l'électrode pointe est portée à un potentiel positif (figure 1.11).

Dans ce cas la zone de champ intense n'est pas juxtaposée à la source d'électrons et le phénomène est plus complexe. Un électron libre qui se trouve près de la pointe produit une avalanche près de l'onde, car le champ électrique appliqué y est intense mais quand les électrons arrivent sur la pointe ils ne produisent rien qui puisse entretenir le phénomène, la cathode située stop loin de la zone de champ intense ne joue plus le rôle de pourvoyeuse d'électrons. La progression de la décharge est essentiellement entretenue par un apport d'électrons créés par photo ionisation favorisé par le champ d'espace positif.

Pour cette polarité, contrairement à la polarité négative, le champ de la charge d'espace positive renforce le champ principal, les décharges ont l'aspect de ramifications partant de la pointe, ils tendent un pont entre électrodes.



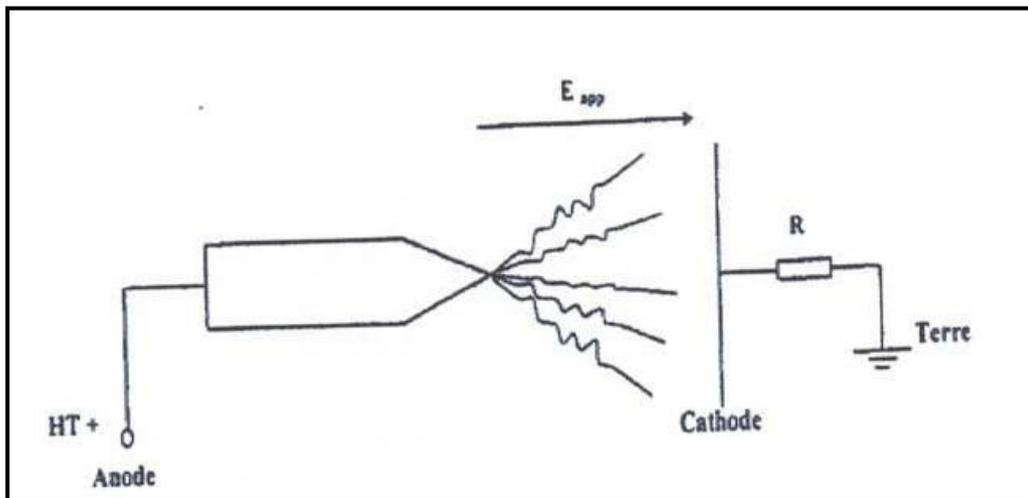
**Figure 1.11:** Effet couronne en polarité positive, progression par photo-ionisation

### I.8.1.3.1. Nature du courant:

Seuls les ions positifs traversent la région inter électrode donc le courant est ionique.

### I.8.1.3.2. Apparence lumineuse :

On voit des canaux partant de la pointe et se ramifiant comme le montre la figure (1.12), ils tendent à former un pont entre les électrodes, cette apparence est dénommée décharge brosse ou bien décharge plume.



**Figure1.12: Apparence lumineuse en polarité positive**

### I.9. Bruit génère par la décharge couronne :

Le bruit d'abeille que l'on entend est dû à la superposition aléatoire des claquements produits par toutes les aigrettes d'ionisation dont la surface des conducteurs est le siège.

Ces claquements étant en fait des ondes de choc acoustiques émises lors de la chasse du champ électrique aux ions brusquement formés. [2]

### I.10. Perturbations radioélectriques:

L'effet couronne est à l'origine des perturbations des ondes radio. Les charges créées par ionisation sont brusquement mises en mouvement par le champ superficiel. Le courant qui en résulte crée un champ électromagnétique variable qui se propage dans l'air et provoque la perturbation des ondes radio. L'effet couronne n'est pas à l'origine de la perturbation des ondes TV, ce sont plutôt les claquages qui se produisent dans l'appareillage de haute tension (isolateur, disjoncteur,.....) qui sont à l'origine de ces interférences. Lors des décharges couronne, les avalanches s'arrêtent puis de nouvelles charges sont créées. Ces charges créent à leurs tours des avalanches et ainsi de suite. On est alors en présence d'un régime très variable.

### I.11. Loi de PEEK-CHAMP critique:

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

#### I.11.1. Conducteur lisse :

$$E_{CC} = E_C \delta(1 + K/\sqrt{\delta r}) \quad \text{valeur maximum ou amplitude.}$$

Avec :  $\delta = \frac{3,92 P}{273t}$  densité relative de l'air.

#### Remarque:

P 76 cm et t = 25°C  $\delta=1$

Ou  $E_s=30$  kV/cm champ superficiel, r (cm) rayon du conducteur

P (cm Hg) pression (1 atm = 76 cm, t (C°) température, k = 0.308

En général, l'effet de couronne commence dès que le champ à la surface du conducteur atteint la valeur de 30 k V/cm comme valeur maximal ou 21,2 KV /cm comme valeur efficace.

#### I.11.2. Conducteur réel :

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

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

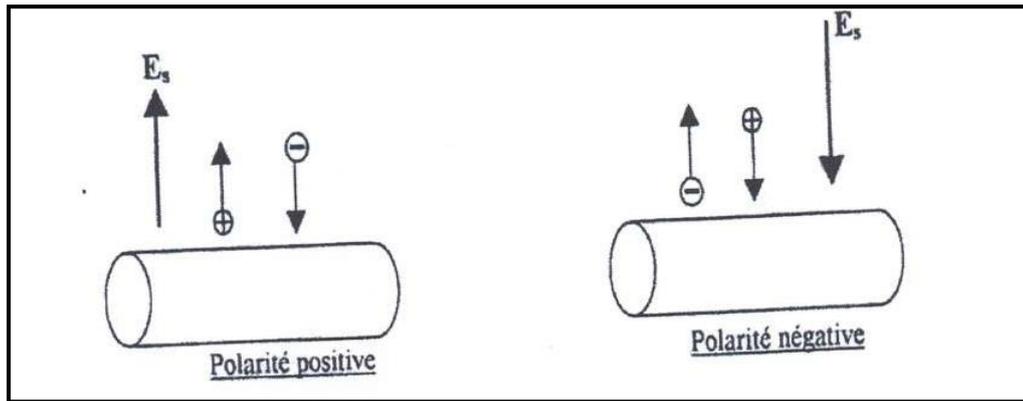
Avec  $0 < m < 1$ : coefficient de l'état de surface.

### I.12. Pertes couronne:

#### I.12.1. Nature des pertes:

Soit un conducteur HT alimenté en courant alternatif.

- ❖ **Alternance positive:** tout se passe comme si le conducteur émettait des ions positifs.
- ❖ **Alternance négative:** tout se passe comme si le conducteur émettait des ions négatifs



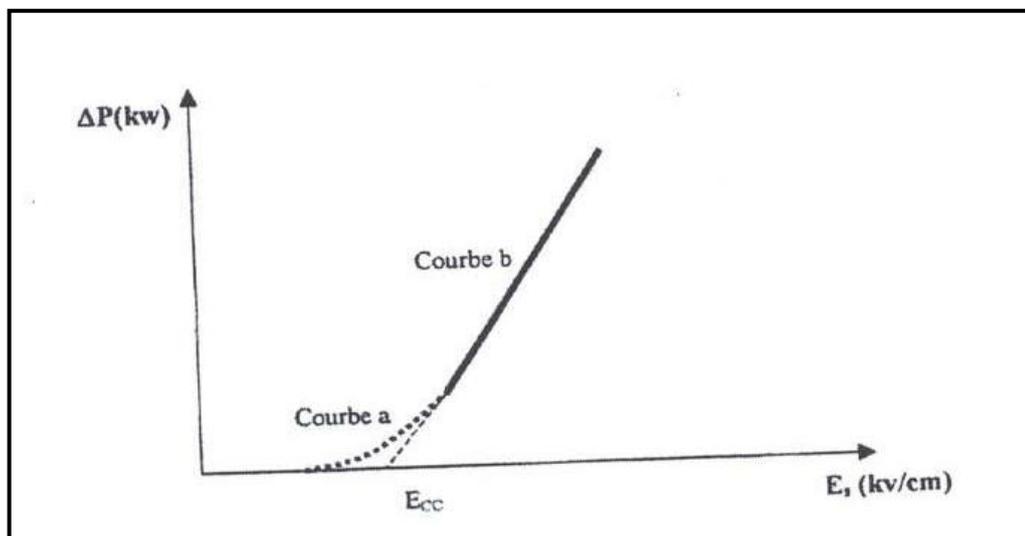
**Perte:** le mouvement des ions provoque une dissipation d'énergie par échauffement suite au frottement avec les atomes de l'air Cette énergie qui est prélevée du réseau représente les pertes couronne.

### I.12.2. Etude des pertes:

**AP (kW):** Pertes couronne

**Es (KV/cm):** Champ superficiel du conducteur.

**Ecc (KV/cm):** Champ critique (loi de PEEK).



**Figure 1.13:** Pertes couronne en fonction du champ superficiel

**Courbe b:**  $E_s > E_{cc}$

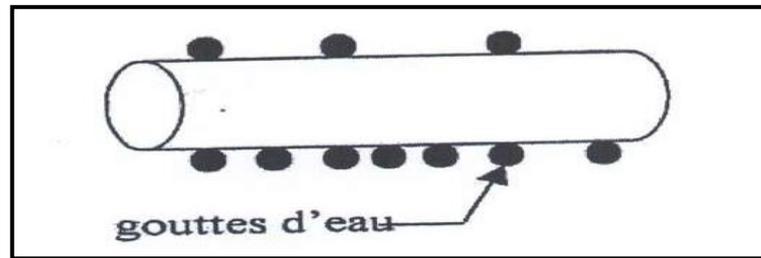
Dès que  $E_s$  dépasse la valeur critique, l'effet couronne se passe sur toute la surface du conducteur, et les pertes augmentent facilement.

**Courbe a:**  $E_s < E_{cc}$

Comme la surface d'un conducteur réel présente des aspérités, l'effet couronne se produit uniquement sur ces aspérités, comme lorsque le champ est inférieur à la valeur critique.

### I.12.3. Influence de la pluie

Les gouttes sur la surface du conducteur forment de véritables pointes qui rendent l'effet couronne beaucoup plus intense et les pertes considérables.



**Figure 1.14:** Influence de la pluie

#### Remarque:

- Les lignes haute tension sont conçues de telle façon que l'effet couronne ne devrait pas poser de problèmes par temps sec, c'est lorsque le temps est pluvieux qu'il devient vraiment gênant.

Lorsque la pluie est forte, elle provoque au contraire le lavage du conducteur

- Le temps améliore l'état de surface du conducteur, car une bonne partie des aspérités est brûlées au fur et à mesure par la décharge elle-même
- Les pertes sont plus grandes pour un conducteur neuf, car la graisse favorise l'accumulation des particules.

### I.13. Phénomène de régulation:

L'un des principales caractéristiques de l'effet couronne est le phénomène de régulation qui peut être utilisé comme régulateur (soupape électrique).

L'augmentation considérable du nombre d'aigrette est due à l'accroissement de la tension appliquée ou bien à la pluie, le brouillard et la neige qui multiplient les aspérités du conducteur en déposant sur sa surface des gouttes d'eau.

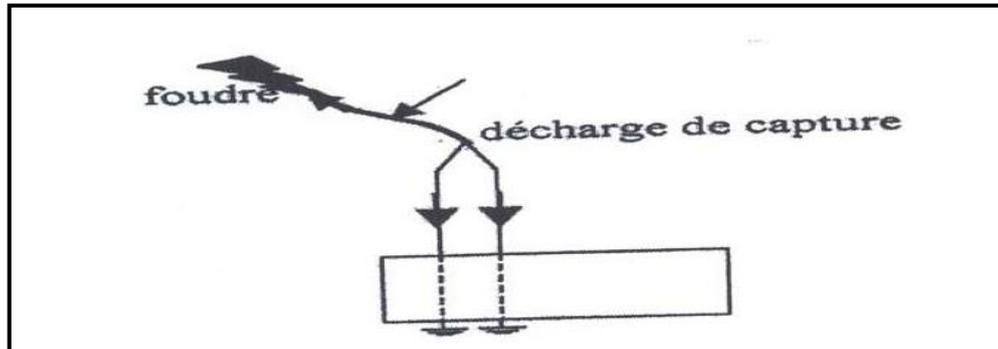
La charge d'espace créée devient suffisamment dense, il se produit alors une recombinaison entre les charges par conséquent la densité superficielle du conducteur diminue et le champ électrique superficiel ne peut dépasser une certaine valeur critique légèrement supérieure au seuil d'ionisation.

La croissance du champ électrique est limitée par la génération de nouveaux ions.

## I.14.Applications utilisant de décharge couronne :

### I.14.1. Paratonnerre :

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.



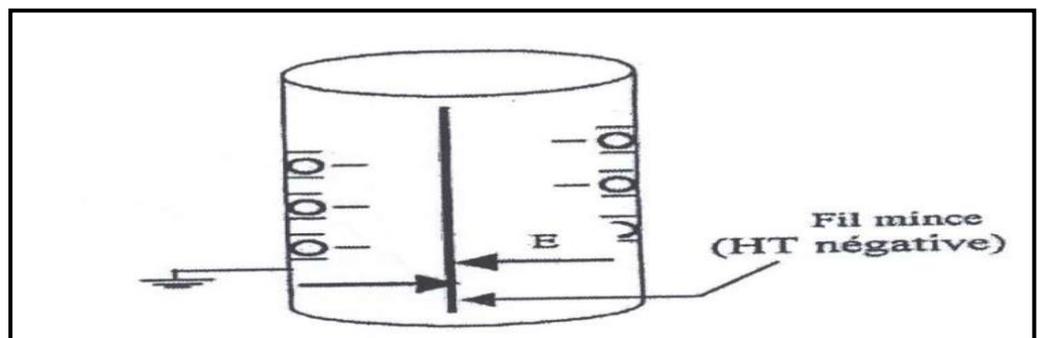
**Figure 1.15:** le phénomène du paratonnerre

### I.14.2. Neutralisation :

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

### I.14.3. Précipitation de poussières :

Le fil central produit par effet couronne des charges électriques négatives. Les grains de poussières qui se chargent négativement sont attirés et captés par le cylindre qui les empêche de ressortir, car il joue le rôle d'un filtre de poussière, qui une fois saturée sera remplacée par un nouveau filtre.



**Figure 1.16:** Filtre électrostatique cylindrique

**CHAPITRE II**  
**Les filtres électrostatiques**

## II.1 Construction et fonctionnement des filtres électrostatiques

### II.1.1 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 électrofiltre).

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.

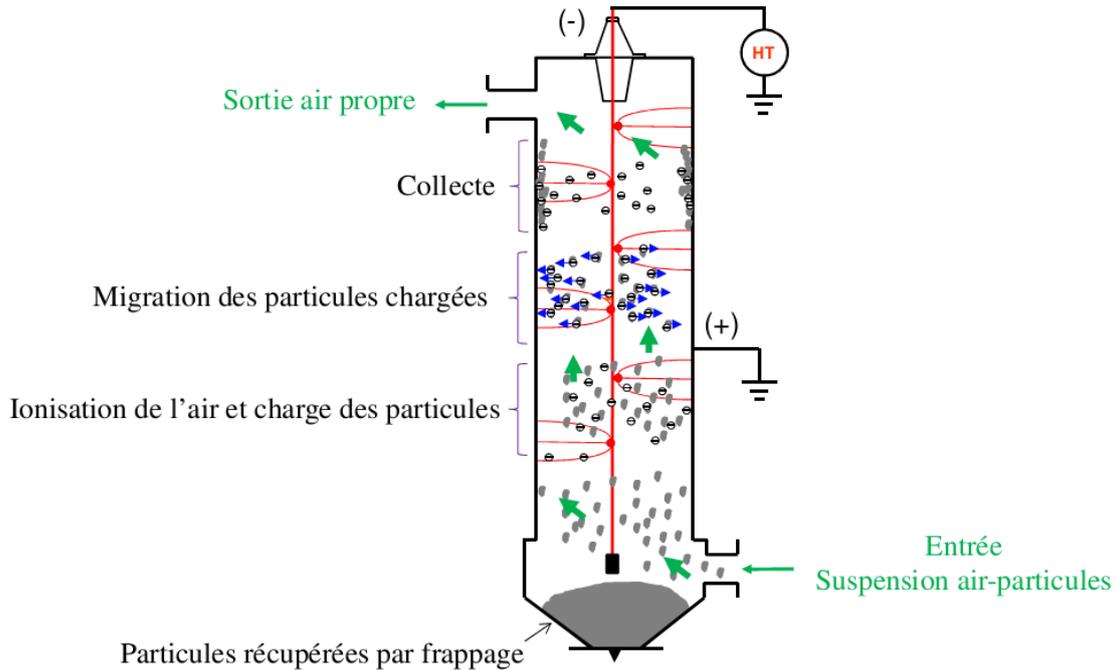
Certains de ces ions sont captés par les poussières en raison de la distorsion locale du champ électrique, causée par la différence de la valeur entre la permittivité relative des particules et celle du gaz. Ainsi, les particules se chargent en captant les ions, jusqu'à atteindre une charge maximale (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.1).

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.

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.[ 14]



**Figure (II.1):** 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.

### II.1.2 Types de filtres électrostatiques

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

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

Les types qui seront décrits ici sont :

- 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.1.2.1 Electro filtre Plaque – Fil

Les Electro filtres Plaque - Fil sont employés dans une grande variété d'applications industrielles, y compris les chaudières à charbon, les fours à ciment, les chaudières derétablissement 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.2). En général, les électrodes de collectes 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. .[ 14.15]

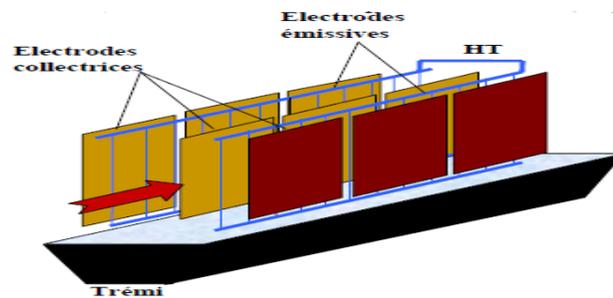


Figure (II.2): Types d'électrofiltre plaque-fil

L'électrofiltre 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 électrofiltres 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 se 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. .[ 15]

La tension appliquée aux électrodes cause le claquage électrique de l'air entre les électrodes, une action connue sous le nom de « décharge couronne ». Les électrodes habituellement sont données une polarité négative parce qu'une décharge couronne négative soutient une tension plus élevée 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.

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.

[14.16] Comme les particules passent successivement chaque fil. Elles sont conduites de plus en plus près des plaques de collectes. La turbulence dans le gaz, cependant, tend à les maintenir uniformément mélangées au gaz. Le processus de collection est donc une concurrence entre les forces électriques et forces dispersives. Par la suite, les particules s'approchent assez étroitement aux plaques de sorte que les baisses de turbulence aux niveaux bas et les particules soient collectées.

Si les particules collectées pourraient être délogées dans le distributeur sans pertes, l'électrofiltre soit extrêmement efficace. Le frappage déloge la couche accumulée projette également certaines des particules (en général 12 pour cent pour les cendres volantes de charbon) de nouveau dans le jet de gaz. Ceux-ci repousse des particules qui sont alors traités encore par les sections postérieures, mais les particules pas repoussées dans la dernière section de l'électrofiltre non aucune chance d'être repris et ainsi échappent à l'unité.

L'ensemble de ces pertes un rôle significatif dans la performance globale d'un électrofiltre autre facteur principal est la résistivité de la matière collectée. Puisque les particules forment une couche continue sur les plaques de l'électrofiltre, tout courant d'ion doit passer par la couche pour atteindre les plaques reliées à la terre. Ce courant crée un champ électrique dans la couche, et il peut devenir assez grand pour causer le claquage électrique local. Quand ceci se produit, de nouveaux ions de la polarité inverse sont injectés dans l'espace inter fil-plaque où ils réduisent la charge sur les

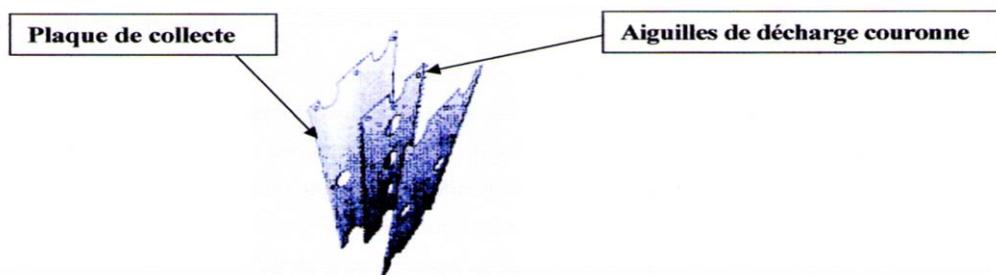
particules et peuvent causer le claquage. Cet état de panne s'appelle « la corona arrière ». Le jeu de ces pertes un rôle significatif dans la performance globale d'un électro porteur.

### II.1.2.2 Electrofiltre de plaque plate

Un nombre significatif de plus petits précipitateurs emploient des plaques plates (figure II.3) 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 électrofiltre 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 frappement élevées. .[ 15]



**Figure (II.3):** Types d'électrofiltre plaque plate

### II.1.2.3 Electrofiltre fil-cylindre :

Dans le cas des électrofiltres fil-cylindre, l'électrode ionisante est tendue le long de l'axe du cylindre placé verticalement (figure II.4). 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. .[ 14.15]

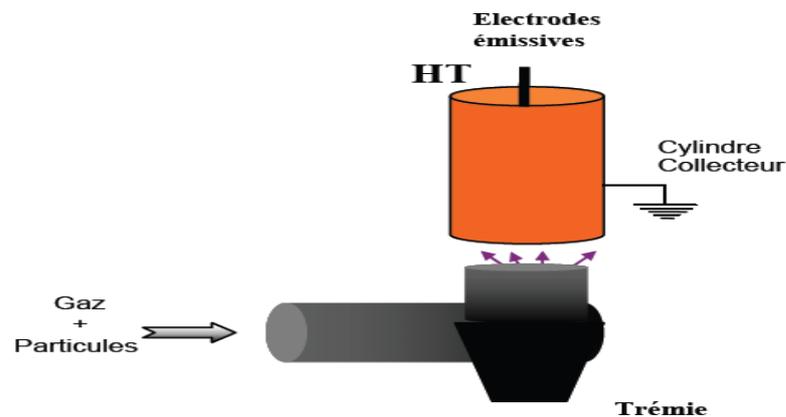


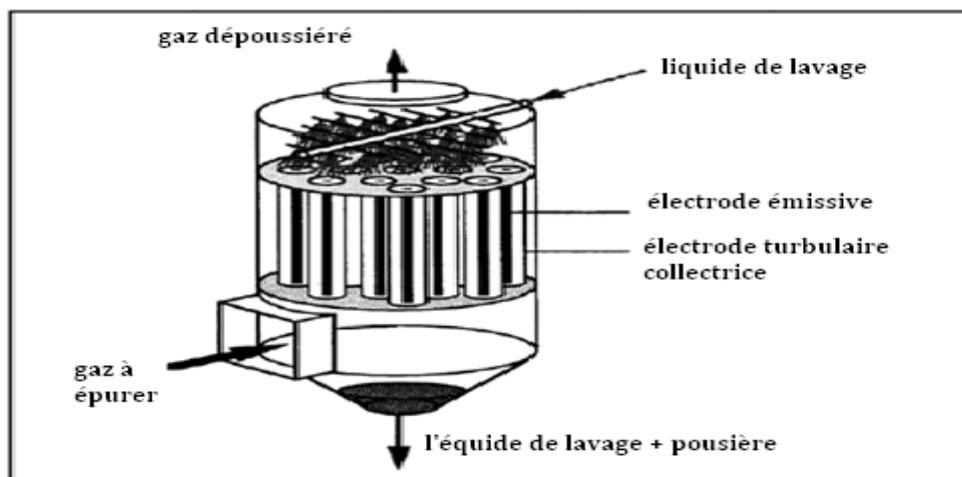
Figure (II.4): Types d'électrofiltre fil-cylindre

### II.1.2.4 Electrofiltres 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 électrofiltres dits humides (figure II.5). En comparaison avec les électrofiltres 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 électrofiltres humides sont présents dans certaines applications pratiques en raison de quelques avantages, parmi lesquels les plus importantes sont : .[ 17.18]

- les rendements de filtration sont supérieurs à ceux des électrofiltres secs ;
- le réentraînement des particules collectées est inexistant ;

- les performances de séparation sont indépendantes de la résistivité des poussières.

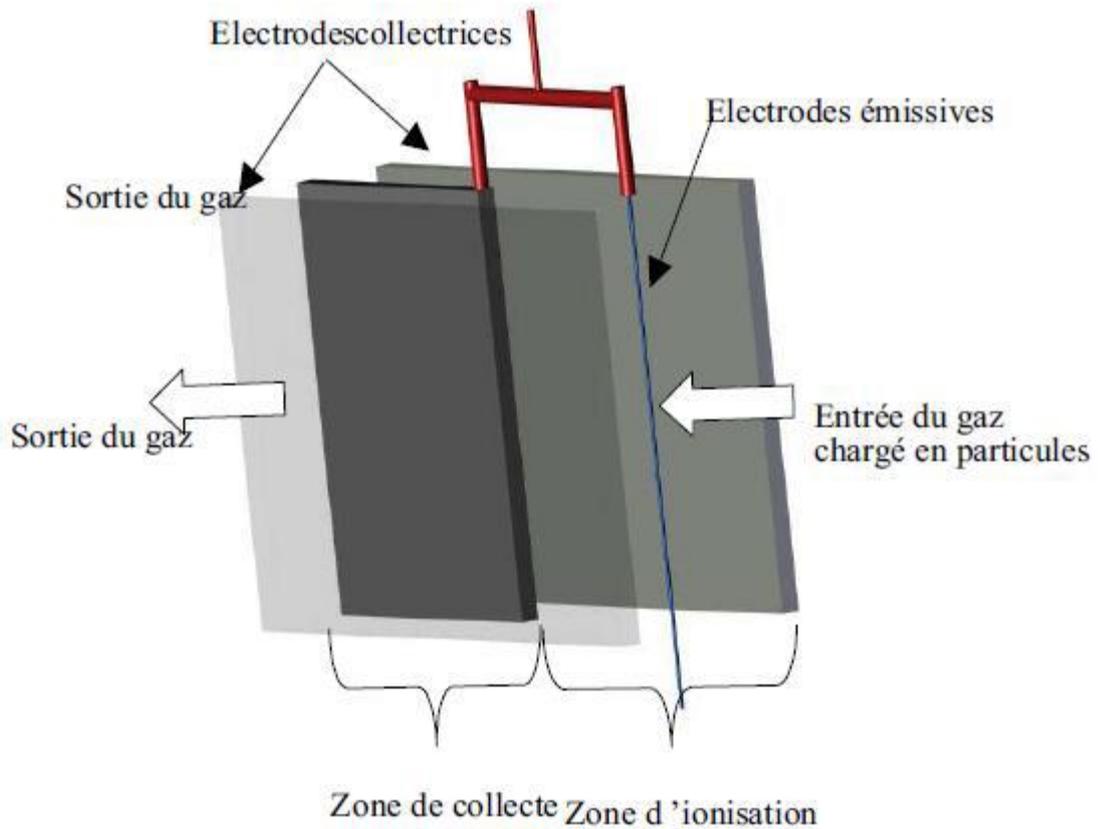


**Figure (II.5):** *Un électrofiltre humide*

### II.1.2.5 Electrofiltres 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.6) 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. [ 14.15.17]



**Figure (II.6) :** Types d'électrofiltres à double étage.

### II.1.3 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 électrofiltre 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.

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, en chaque 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. 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 électrofiltre 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.2 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 on tété 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 de mettre au point des modèles numériques, basés sur la simulation des phénomènes produits au sein d'un électro filtre.

### II.2.1 Efficacité d'un électro filtre :

L'efficacité fractionnaire de filtration  $\eta_f$  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 :

$$\eta_f = \frac{N_{ci}}{N_{ca}} \text{ Ce qui donne en terme de concentration : } \eta_f = 1 - \frac{C_{cs}}{C_{ca}} \quad (\text{II.1})$$

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  $C_{cs}$ .

### II.2.2 Vitesse de migration des particules :

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. [21.22]

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,

$\mu_g$  : la viscosité dynamique du gaz,

$d_p$  : le diamètre de la particule.

### II.2.3 Facteur de Cunningham $C_c$ :

Ce pendant, 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. [23] appelé facteur de Cunningham.

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.

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (\text{II.5})$$

Avec

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

Le coefficient A a l'expression suivante :

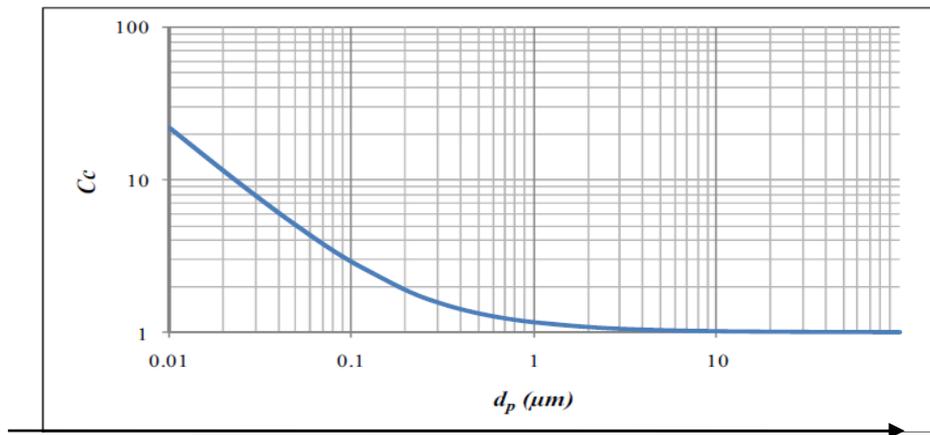
$$A = \alpha_1 + \alpha_2 \exp\left(-\frac{\alpha_3}{Kn}\right) \quad (\text{II.6})$$

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

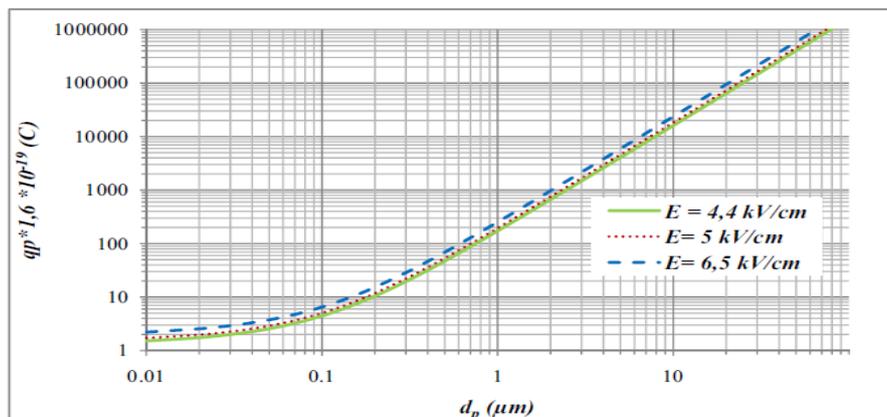
Si la particule mobile est considérablement plus grande que le libre parcours moyen alors, elle se déplace dans le fluide comme si le fluide était un milieu continu. Mais si la particule a une taille comparable ou plus petite que le libre parcours moyen des molécules, la particule est affectée par les collisions avec les molécules et glisse parfois entre elles. Un tel mouvement s'appelle écoulement moléculaire libre. La Figure (II.7) 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 :  $\alpha_1=1,246$ ,  $\alpha_2=0,42$ ,  $\alpha_3=0,87$ . [ 24]

L'équation(II.4) devient :

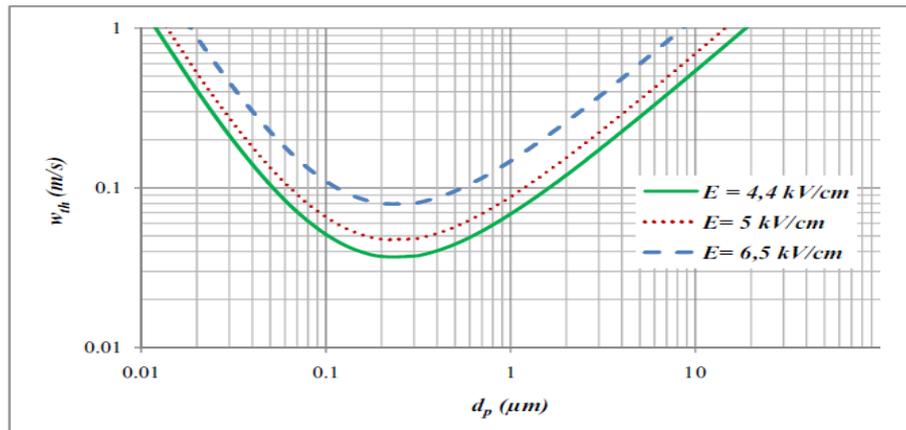
$$C_c(Kn) = 1 + 1,246 \cdot Kn + 0,42 \cdot Kn \cdot \exp\left(-\frac{0,87}{Kn}\right) \tag{II.7}$$



**Figure(II.7) :** variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules



**Figure(II.8) :** l'évolution de la charge des particules donnée par le modèle de Cochet en fonction du diamètre des particules.

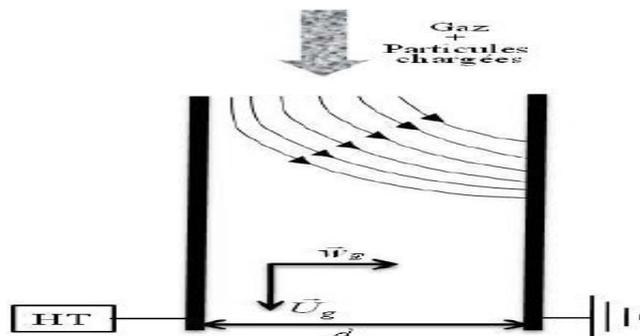


**Figure (II.9) :** l'évolution de la vitesse de migration  $w_{th}$  en fonction du diamètre des particules.

La Figure(II.8), 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.9). On remarque que cette vitesse  $W_{th}$  en fonction du diamètre des particules passe par un minimum pour  $d_p$  égale à environ  $0,25 \mu\text{m}$ . Donc on peut prédire que pour les électrofiltres, le minimum de l'efficacité de filtration est obtenu pour les particules dont le diamètre est compris entre  $0,1$  et  $1 \mu\text{m}$ . .[ 25]

#### II.2.4 Modèle laminaire :

Lorsque l'écoulement est laminaire dans un précipitateur fil-cylindre, les particules subissent l'action axiale de l'écoulement et l'action radiale du champ électrique. Les particules ont donc des trajectoires rectilignes portées par le vecteur de composante  $\vec{u}$  et (Figure II.10).



**Figure (II.10) :** trajectoires des particules en écoulement uniforme laminaire.

Une particule chargée qui rentre dans la zone du champ à une distance de la cathode collectrice sera collectée au bout d'un temps ; pendant ce temps, la particule se déplace dans la direction du gaz, elle aura parcouru une distance :

$$L = \bar{U}_g \cdot \frac{d}{w_E} \quad (\text{II.8})$$

L'efficacité laminaire  $\eta_L$  est proportionnelle à la vitesse de migration et la longueur du précipitateur rapportée à la vitesse du gaz.

$$\eta_L = \frac{w_E \cdot L}{\bar{U}_g \cdot d} \quad (\text{II.9})$$

Dans les précipitateurs industriels, l'écoulement est rarement laminaire à cause de la complexité des installations. Le fluide est en contact avec différents obstacles qui peuvent être à l'origine du caractère fluctuant de l'écoulement. La charge d'espace créée d'une part par l'effet couronne et d'autre part par la présence de particules, accentue ce caractère turbulent.

### II.2.5 Modèle de Deutsch :

En 1919, les travaux expérimentaux d'Andersen ont montré qu'à la sortie des ESP, il existait une décroissance exponentielle du nombre de particules en fonction de leur longueur.

S'appuyant sur cette constatation et afin de prendre en compte l'effet de la turbulence, Deutsch propose en 1922, un modèle pour le calcul de l'efficacité de collecte d'un ESP.

Ce modèle est basé sur des hypothèses simples. Le précipitateur est constitué de deux zones (Figure II.11).

Une couche limite laminaire  $\delta$  très fine s'appuyant sur les électrodes.

Dans l'espace entre les deux couches limites, le cœur de l'écoulement est suffisamment turbulent avec une vitesse moyenne uniforme  $\bar{U}_g$ .

De plus, Il suppose que la densité des particules soit uniforme dans la direction transversale, ceci revient à admettre que la diffusivité turbulente  $D_t$  est infinie et que la particule ne peut être piégée que lorsqu'elle entre dans la couche limite laminaire  $\delta$ .

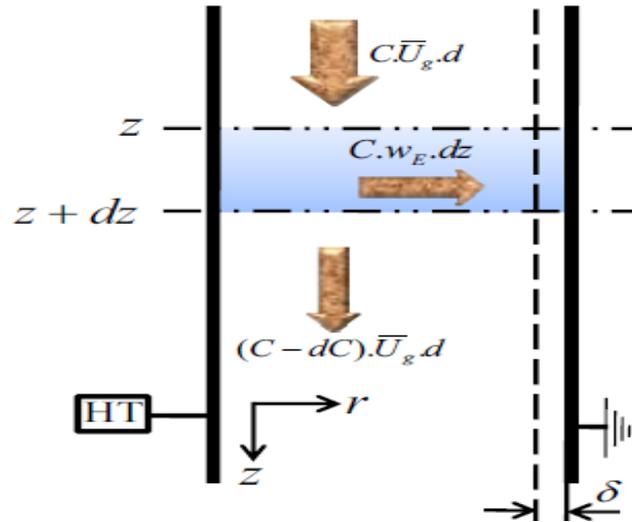


Figure (II.11):représentation du modèle de Deutsch

Si nous considérons deux sections transversales situées à une distance dz l’une de l’autre dans la direction d’écoulement du gaz, l’expression du bilan de concentration de particules entre les sections d’entrée et de sortie s’exprime.

$$C \cdot \bar{U}_g \cdot d = (C - dC) \cdot d \cdot \bar{U}_g - C \cdot w_E \cdot dz \quad (\text{II.10})$$

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

$$c_s(d_p) = c_e(d_p) \cdot \exp \left[ -\frac{2 \cdot w_E(d_p) \cdot L}{r_c \cdot U_g} \right] \quad (\text{II.11})$$

Ce qui conduit à la formule de Deutsch-Anderson

$$\eta_D(d_p) = 1 - \exp \left[ -\frac{2 \cdot w_E(d_p) \cdot L}{r_c \cdot \bar{U}_g} \right] = 1 - \exp \left[ -w_E(d_p) \cdot \frac{S}{D_g} \right] \quad (\text{II.12})$$

Où

$S$  : la surface totale des électrodes collectrices.

$D_g$  : le débit volumique du gaz.

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

Le terme suivant est appelé le nombre de Deutsch  $D_e$  avec :

$$D_e = \frac{w_E \cdot L}{r_c \cdot \bar{U}_g} \quad (\text{II.13})$$

L'équation de Deutsch peut aussi s'écrire sous la forme suivante:

$$\eta_D = 1 - \exp(-w_{th} \cdot SCA) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$SCA = \frac{2 \cdot L}{r_c \cdot U_g} \quad (\text{II.15})$$

Le terme **SCA** (Specific Collection Area), qui correspond à l'aire spécifique de collection, est souvent utilisé pour le dimensionnement des précipitateurs et pour la comparaison des ESP de formes géométriques différentes.

Quelques formes de l'équation de Deutsch modifiée existent dans la littérature, la plus répandue étant

$$\eta_D = 1 - \exp(-w_{ek} \cdot (SCA)^k) \quad (\text{II.16})$$

Ou :

**K** : un exposant empirique, approximativement égal à 0,5

$W_{ek}$  : la vitesse de migration effective liée à l'exposant **k**

Fondamentalement, cette relation n'est pas très différente de celle de Deutsch.

L'équation de Deutsch a été étudiée rigoureusement par White afin de lui donner un sens physique et la compléter. Néanmoins, certains auteurs ont émis des réserves sur cette formulation.

En pratique, si l'efficacité  $\eta_D$  et la valeur du **SCA** sont connues par des tests alors l'équation de Deutsch permet de déterminer la vitesse de migration effective  $w_E^{eff}$  en écrivant :

$$\eta_D = 1 - \exp(-w_E^{eff} \cdot (SCA)) \quad (\text{II.17})$$

Le modèle de Deutsch est donc assimilé à un modèle de similitude qui présente un inconvénient majeur. En effet, deux électrofiltres d'apparence semblable peuvent avoir des vitesses de migration effectives différentes si les conditions de fonctionnement ne sont pas semblables. Cela conduit à un

dimensionnement erroné des précipitateurs.

L'utilisation de la vitesse théorique conduit à des précipitateurs surdimensionnés. En effet, la vitesse de précipitation théorique est de 2 à 10 fois supérieure à la vitesse de migration effective. La différence entre la vitesse de migration théorique et la vitesse de migration effective, réside dans le caractère turbulent et irrégulier de l'écoulement, le réentraînement et d'autres processus physiques qui ne sont pas pris en compte.

Afin de pallier aux inconvénients du modèle de Deutsch, Friedlander et Williams & Jackson introduisent le concept de coefficient de diffusion turbulent. Ils estiment que la

concentration n'est pas homogène au cœur de l'écoulement, hypothèse reprise également par d'autres auteurs. Le gradient de concentration observé entre le centre et la paroi conduit à un modèle s'appuyant sur le transport convectif et diffusif de la particule Cooper man. Le modèle permet de prendre en compte les effets de réentraînement par un coefficient empirique difficile à évaluer.

### II.2.6 Modèle de Léonard, Mitchner et Self

Le modèle de DEUTSCH utilise l'hypothèse de répartition uniforme des particules dans chaque section transversale, ce qui est contestable. Une autre méthode plus précise, le modèle de LEONARD, consiste à résoudre dans la géométrie donnée l'équation de conservation pour les particules (de concentration  $c$ )

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \text{div}(c \cdot \vec{v}_p) = 0 \quad (\text{II.18})$$

Où

$\vec{V}_p$  : la vitesse des particules.

$$\vec{V}_p = \vec{U}_g + \vec{U}_E = \begin{cases} v_g + v_E \\ u_g + u_E \\ w_g + w_E \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$\vec{U}_E$  : la vitesse de migration.

$\vec{U}_g$  : la vitesse du gaz,

En développant (II.18) et (II.19) on obtient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (V_p)_x \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + (V_p)_y \cdot \frac{\partial c}{\partial y} + (V_p)_z \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + c \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{U}_E = 0 \quad (\text{II.20})$$

En décomposant en valeurs moyennes et fluctuantes :

$$u_g = \overline{u_g} + u_g', \quad v_g = \overline{v_g} + v_g', \quad w_g = \overline{w_g} + w_g', \quad c = \overline{c} + c' \quad (\text{II.21})$$

Et en prenant la moyenne temporelle de l'équation (II.20), on obtient :

$$\overline{U}_g \cdot (\overline{\nabla} \overline{c}) + \overline{U}_E \cdot (\overline{\nabla} \overline{c}) + \frac{\overline{\partial c' u_g'}}{\partial x} + \frac{\overline{\partial c' v_g'}}{\partial y} + \frac{\overline{\partial c' w_g'}}{\partial z} + \overline{c} \cdot \overline{\nabla} \cdot \overline{U}_E = 0 \quad (\text{II.22})$$

Les deux premiers termes représentent le transport des particules par convection et par migration tandis que les trois termes suivants représentent le transport par diffusion turbulente.

Le dernier terme peut être négligé si le champ électrique n'est pas influencé par la charge d'espace (dans les approches théoriques, le champ est presque toujours supposé uniforme). On peut modéliser les termes de transport par diffusion à l'aide du concept de diffusivité turbulente :

$$\overline{c' u_g'} = -D_{t_x} \cdot \frac{\partial \overline{c}}{\partial x'}, \quad \overline{c' v_g'} = -D_{t_y} \cdot \frac{\partial \overline{c}}{\partial y'}, \quad \overline{c' w_g'} = -D_{t_z} \cdot \frac{\partial \overline{c}}{\partial z'} \quad (\text{II.23})$$

Si on suppose que la diffusivité turbulente  $\mathbf{D}_t$  est homogène et isotrope et que le champ électrique est constant et parallèle à l'axe  $\mathbf{O}_z$ . L'équation se réduit à la forme suivante :

Avec les conditions aux limites

$$\begin{cases} \frac{\partial \overline{c}}{\partial z} = 0 \quad \text{ou} \quad \overline{c} = 0 \quad \text{à} \quad z = 0 \\ \frac{\partial \overline{c}}{\partial z} - \frac{\overline{c} \cdot w_E}{D_t} = 0 \quad \text{à} \quad z = d \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

En introduisant des variables adimensionnelles dans l'équation (II-20), il apparaît un terme important appelé nombre de  $P_e$  électrique :

$$P_e = \frac{w_E \cdot d}{D_t} \quad (\text{II.25})$$

Qui mesure l'importance de la migration des particules par rapport à l'entraînement dû aux fluctuations de l'écoulement du fluide porteur.

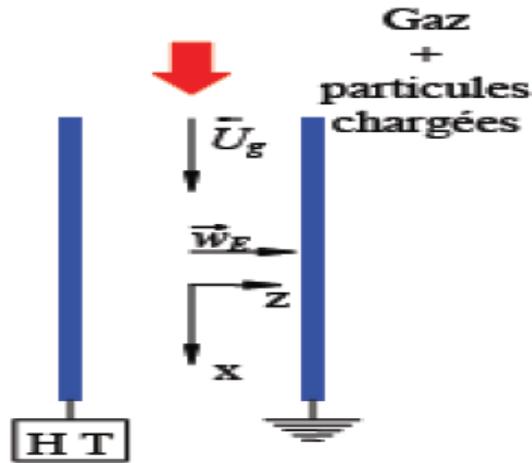


Figure (II.12) : Schéma du problème considéré par LEONARD.

Le modèle de DEUTSCH correspond alors à une valeur de  $P_e = 0$  tandis que le cas d'un écoulement laminaire peut se retrouver pour  $P_e \rightarrow \infty$

Une relation permettant de prédire l'efficacité de collecte à partir des vitesses de migration et du coefficient de diffusion turbulente est alors proposée.

En pratique, quand la valeur  $D_t$  est finie, le nombre  $P_e$  devient fini et donc l'efficacité fractionnaire ( $\eta_f$ ) Leonard > ( $\eta_f$ ) Deutsch.

### II.2.7 Modèles numériques

La modélisation numérique du fonctionnement des électrofiltres a commencé dans les années 70 ; c'est l'époque où les moyens électroniques de calcul ont commencé à se répandre rapidement. Avec l'augmentation de la capacité et de la vitesse de calcul des ordinateurs, des algorithmes de plus en plus complexes sont mis en œuvre avec succès par McDonald en 1978, Lawless en 1989, Lawless & Altman en 1994, etc... Le principe de base de ces modèles consiste à prendre en compte les phénomènes physiques le plus important mis en jeu au sein des électrofiltres en simplifiant dans le même temps l'équation mathématique qui décrivent ces phénomènes.

Les premiers modèles numériques ont été développés en utilisant l'équation de Deutsch pour caractériser le transport des particules à l'intérieur du filtre. La vitesse de migration était calculée en tenant compte des distributions locales du champ électrique et de la charge d'espace ionique déterminées numériquement.

Avec la vitesse de migration déterminée à partir de ces résultats, l'efficacité de collection était calculée par le modèle de Deutsch, pour chaque classe granulométrique. La comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus sur des installations industrielles conduisait à déterminer des

coefficients de correction pour prendre en compte les effets qui tendent à diminuer le rendement de séparation (ré entraînement, frappage, etc...).

D'autres modèles numériques plus élaborés ont vu le jour dans les années plus récentes. En 1995 Cristina et Feliziani ont développé un modèle numérique prenant en compte les effets électro aérodynamiques. Sans résoudre les équations pour le champ de vitesse du gaz, ils introduisent une composante de vitesse dans la direction perpendiculaire aux plaques proportionnelle à la racine carrée de l'intensité du courant ionique, hypothèse validée seulement dans le cas du vent électrique généré par un seul fil ionisant. En 1997 Meroth et Tochon ainsi que Medlin en 1999 ont développé des travaux en essayant de considérer aussi l'effet de la dynamique du gaz et des poussières, l'évolution de la charge des particules le long de leur trajectoire, le taux de turbulence du flux gazeux, etc....

L'ensemble de ces modélisations implique toujours les mêmes composantes :

- Résolution du problème électrique qui donne les distributions de champ électrique et de charge d'espace ionique ;
- Calcul des grandeurs mécaniques caractérisant l'écoulement du gaz avec prise en compte ou non de l'effet de la turbulence ;
- Détermination des trajectoires des particules discrètes et de l'évolution de la charge électrique de celles-ci (approche lagrangienne) ou calcul des distributions de concentration des particules pour diverses classes de taille (approche eulérienne).

Cependant, il ne faut pas perdre de vue qu'entre les phénomènes qui se produisent lors du fonctionnement d'un électrofiltre, il existe des couplages et des interdépendances réciproques qui alourdissent la résolution numérique des équations. Les forces électriques s'exerçant sur les charges d'espace dues aux ions et aux particules chargées doivent être prises en compte pour déterminer l'écoulement moyen, l'écoulement secondaire à grande échelle et le taux de turbulence. En général, la technique empruntée consiste à introduire dans les équations de Navier-Stokes un terme source de nature électrique. A cause de la complexité du problème, dans la très grande majorité des cas, les approches utilisées sont bidimensionnelles.

La distribution du champ électrique en présence de la charge d'espace est calculée à partir de l'équation de Poisson. Les conditions aux limites qui fixent le potentiel électrique sont des conditions de tension imposées aux électrodes ionisantes et aux plaques collectrices.

La méthode numérique utilisée est souvent celle des éléments finis mais il existe aussi un nombre important d'auteurs qui utilisent les techniques de différences finies ou celle d'éléments de frontière. Medlin utilise une méthode de relaxation pour calculer la répartition du champ et de la charge

d'espace. Par l'introduction d'un terme artificiel qui représente la dérivée par rapport au temps du potentiel électrique, il transforme l'équation de Poisson en une équation de type parabolique. La solution stationnaire de cette équation donne la distribution du potentiel électrique à partir de laquelle un maillage est généré pour permettre alors la résolution de l'équation de conservation de la charge électrique. Concernant le calcul de la distribution spatiale de la charge ionique, la méthode laplus répandue est celle des caractéristiques. Une autre condition au contour est alors nécessaire pour calculer la répartition de la charge d'espace.

Le champ de vitesse est obtenu à partir des équations de *Navier-Stokes* incluant le terme source dépendant du temps. Les méthodes numériques comme les différences finies, les éléments finis ou les volumes finis sont utilisées pour accéder aux valeurs locales du champ de vitesse. Le taux de turbulence est estimé en général à partir du modèle  $k-\varepsilon$ .

*Yamamoto et al.* Ou *Yabe et al.* Ont simplifié le problème de la dynamique du gaz en considérant seulement l'équation elliptique de la vorticité. Certains auteurs tiennent compte de la turbulence du gaz porteur en termes de diffusivité turbulente qui intervient dans calcul des trajectoires des particules (et influence donc leur charge).

Le calcul de la charge des particules est essentiel pour déduire les trajectoires de celles-ci fin d'accéder à l'efficacité de collection. Il existe plusieurs modèles qui combinent la charge par champ et la charge par diffusion ; les plus utilisés sont ceux de Smith & McDonald, McDonald, Lawless et al. , etc....

### II.3. Les avantages des filtres

- Haut rendement de collecte pour toutes tailles de particules, spécialement pour les particules d'un diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$ .
- Construction et fonctionnement simples.
- Consommation d'énergie nominale.
- Elimination à sec du matériel collecté.

### II.4. Les inconvénients des filtres

- 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 à maintenir, d  à 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.5 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 filtres leur avantage et ces inconvénients.

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

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 Les précipitateurs électrostatiques**

### III.1.Introduction:

Le précipitateur est un véritable challenge de modélisation car il requiert la connaissance dans plusieurs domaines: électrostatique, physique, mécanique des fluides, génie électrique et mécanique, ainsi que des notions de cohésion, d'adhésion et de Pulvérisation de particules. L'objectif est de trouver les valeurs optimales de chaque paramètre.

Le précipitateur est avant tout un procédé électrique et doit être caractérisé par ses grandeurs électriques en premier lieu. Il est conçu pour collecter les petites particules qui restent suspendues dans le gaz pendant une durée allant jusqu'à dix secondes. Le flux de gaz est important, en particulier le niveau de turbulence, car les forces électrostatiques sur les particules ne sont pas très grandes et peuvent être vaincues par les forces aérodynamiques. Finalement, puisque le précipitateur peut éliminer des tonnes de poussières par jour, d'autres méthodes (non électriques) pour ranger le matériel collecté doivent être considérées et modelées..

### III.2. Précipitation électrostatique :

L'air à traiter passe à travers un champ électrique qui confère aux particules une charge électrique. On utilise cette charge pour capter les particules sur des plaques dont le signe électrique est opposé.

Les précipitateurs 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.

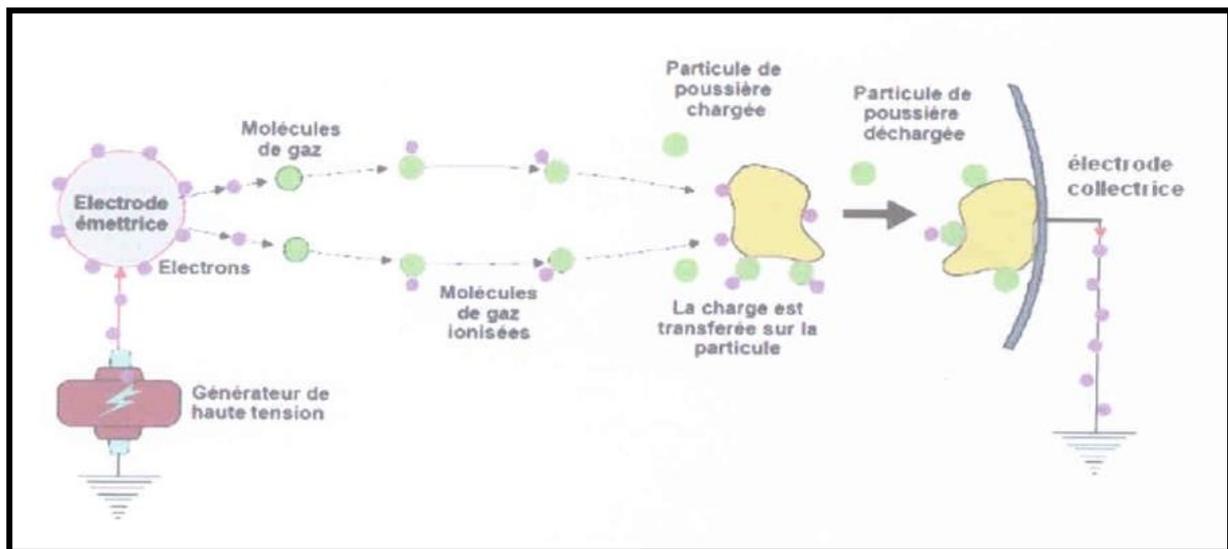
### III.3. Principe de précipitation électrostatique :

Dans les précipitateurs électrostatiques, le flux de gaz est amené entre deux électrodes, dans lesquelles une grande différence de potentiel est maintenue. L'une des deux est l'électrode de décharge et l'autre l'électrode de collecte. Grâce à la grande différence de potentiel et au système de décharge, un puissant champ ionisant se forme. Les potentiels de 100 kV (normalement 40-60 kV) sont utilisés. Par conséquent, l'ionisation crée une zone active rayonnante (décharge électrique bleue), appelée « corona » ou « rayonnement corona ».

L'ionisation du gaz est la dissociation des molécules de gaz en ions libres. Quand les fines particules dans le gaz porteur traversent ce champ, elles se chargent et se déplacent vers l'électrode de collecte inversement chargée. Une fois déposées sur l'électrode de collecte, les particules perdent

leur charge et sont éliminés par voie mécanique (grattage, vibration) ou par lavage dans un récipient qui se trouve en bas. Par conséquent, le processus se déroule en quatre étapes: [46]

- lacer la charge sur la particule à être collectée.
- Déplacer la particule vers le collecteur.
- Neutraliser la charge au collecteur
- Enlever la particule collectée.
- Electrode émettrice



**Figure 3.1:** Principe de précipitation électrostatique

### III.4. Les types des précipitateur électrostatique :

Il existe plusieurs types de précipitateurs électrostatiques. Ils sont principalement utilisés en industrie, mais aussi pour la purification de l'air dans des bâtiments publics, des salles de cinéma.

#### III.4.1. Précipitateurs à étage unique ou à deux étages :

Les précipitateurs électrostatiques peuvent être dimensionnés à étage unique ou à deux étages. Dans un précipitateur à étage unique, l'ionisation du gaz et la collecte de fines

particules sont combinés en un seul étage. Alors que dans le cas d'un précipitateur à deux sections, les particules sont ionisées dans la première chambre et collectés dans la deuxième chambre.

Presque tous les précipitateurs industriels sont de type à étage unique. Normalement, le précipitateur à deux étages est utilisé pour les gaz faiblement chargés, et le précipitateur à étage unique pour les gaz industriels à plus haute charge.

### III.4. 2. Précipitateurs industriels :

Le champ d'applications le plus répandu de la filtration électrostatique est de piéger les particules polluantes contenues dans les fumées de gaz dégagées par les usines, en particulier les gaz de combustion à température élevée (chaudières, usines d'incinération de

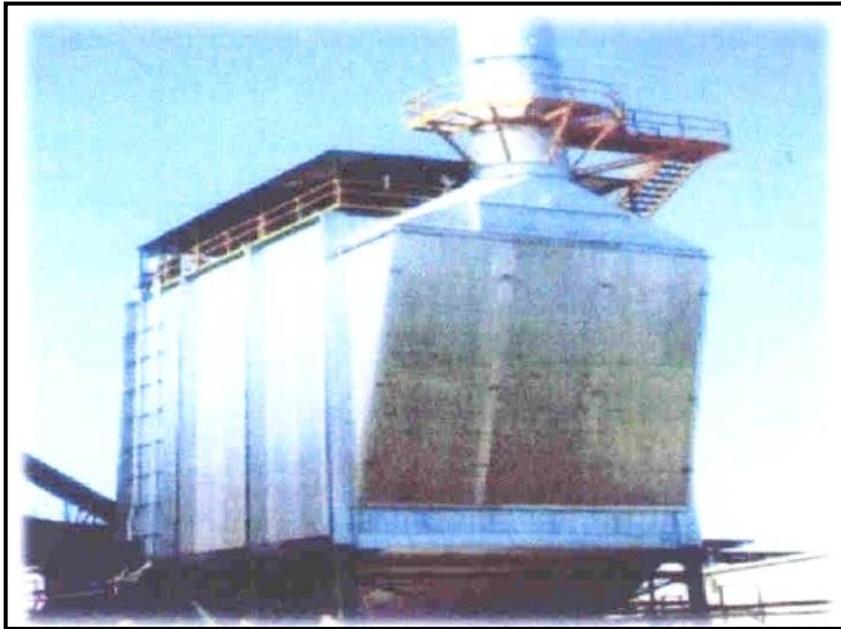
déchets industriels, fours à ciment et hauts fourneaux dans les aciéries, usines métallurgiques).

L'écoulement de gaz dans ces précipitateurs est généralement horizontal, comportant plusieurs espaces de collection en série, chaque espace est équipée avec des électrodes collectrices planes reliées à la terre, qui sont placées parallèlement au flux du gaz lui aménageant (pour le gaz) un chemin de passage.

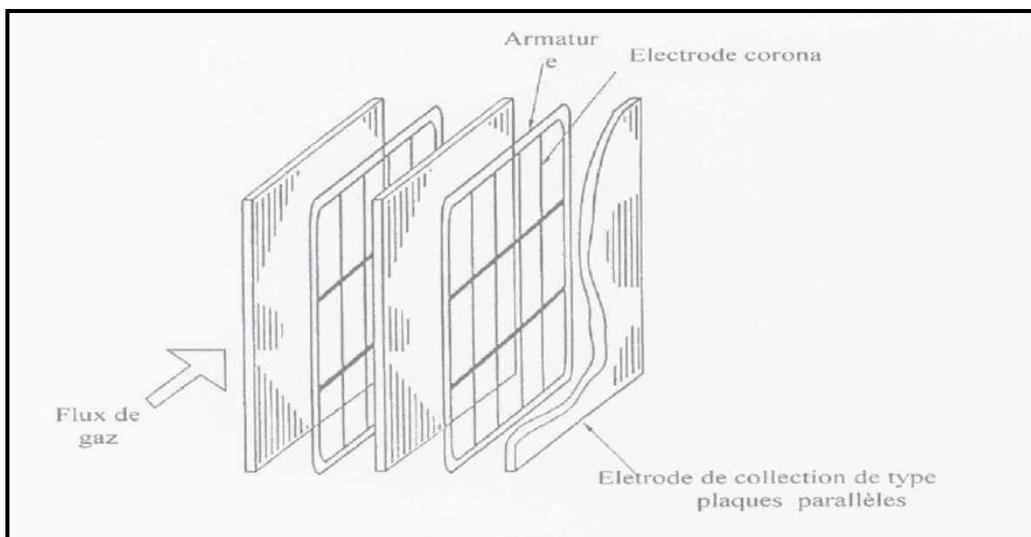
Les électrodes couronne sont disposées au plan milieu du chemin de passage du gaz, à égales distances des électrodes collectrices (figures 3.2 - 3.3). Ce type de précipitateur est appelé « précipitateur de type horizontal », et il peut traiter un grand volume de gaz sans détériorer la distribution uniforme du gaz. Le précipitateur à un étage est généralement utilisé en industrie pour éviter trop de ré- entraînement de la poussière à cause de la réduction de la cohésion entre particules due à la température et l'adhésion.

Les figures 3.4 et 3.5 montrent, respectivement, les électrodes ionisantes et collectrices les plus utilisées dans l'industrie. Les électrodes ionisantes sont attachées à une armature, laquelle est fixée dans un raccord (« douille ») isolant placé dans une chambre prévue à cet effet et dans laquelle ne circule pas la poussière (chambre à raccords; figure 3.6).

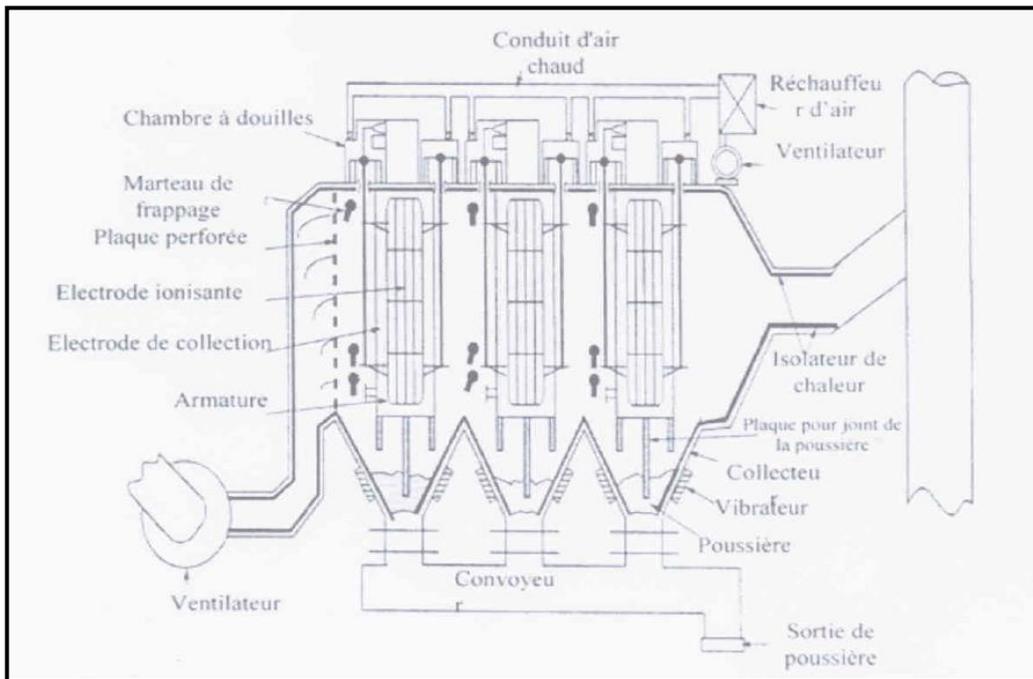
Cette chambre est purgée par de l'air propre électriquement chauffé afin de sécuriser l'isolation des raccords contre l'humidité. Les électrodes collectrices sont pourvues d'une bonne rigidité mécanique dans le sens de la verticale, avec un profil approprié ou des renforts adéquats adjoints sur les électrodes. Comme le précipitateur fonctionne de préférence avec une pression légèrement inférieure à la pression ambiante afin d'éviter les fuites de poussière vers l'extérieur, les collecteurs de poussière sont vidés en utilisant de l'air comprimé (figure 3.7), pour éviter l'entrée d'air et le ré- entraînement de la poussière.



**Figure 3.2:** photographie d'un précipitateur industriel

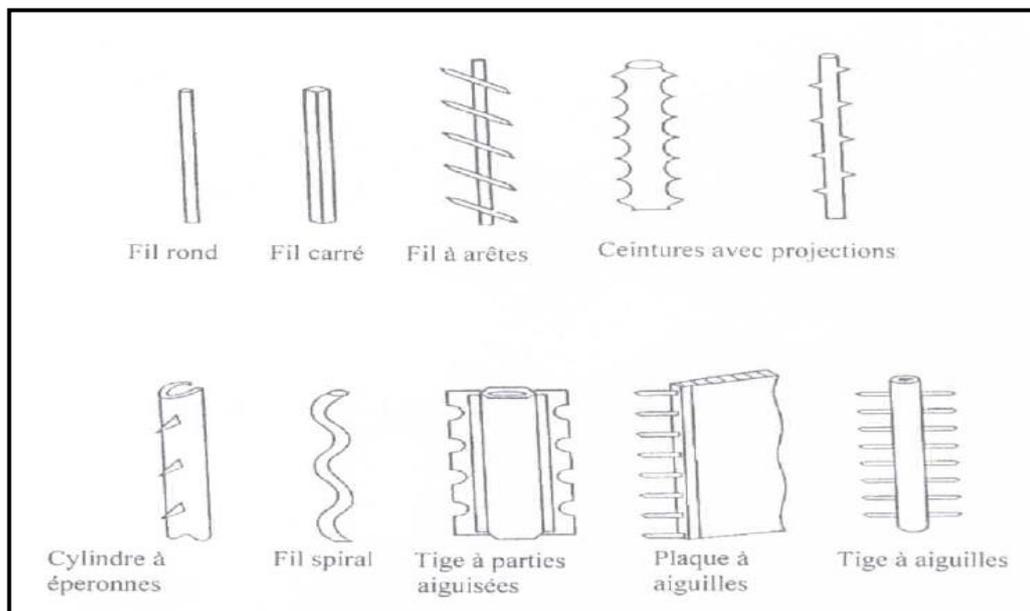


(a)

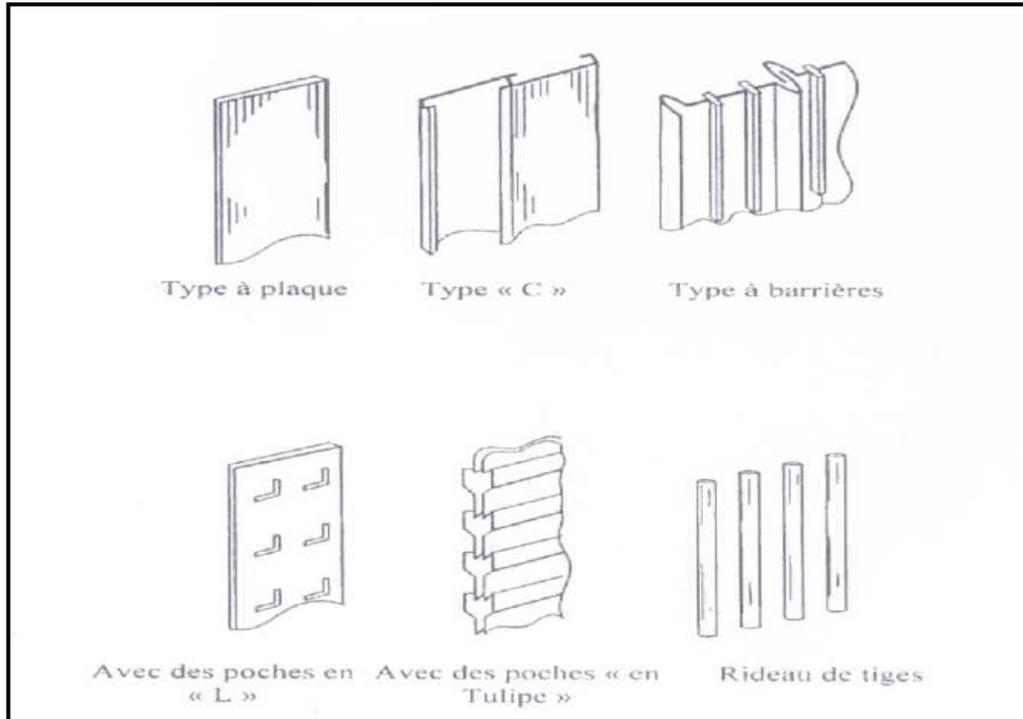


(b)

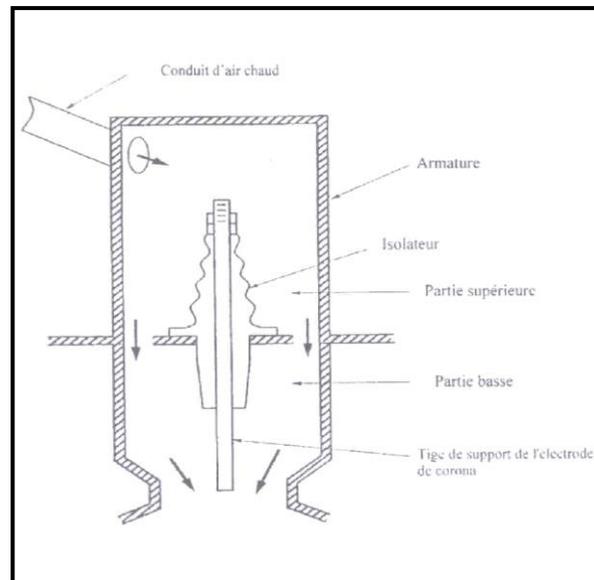
**Figure 3.3** Construction d'un précipitateur industriel. (a) Région de collection (un étage à plaque de type horizontal); (b) Coupe transversale



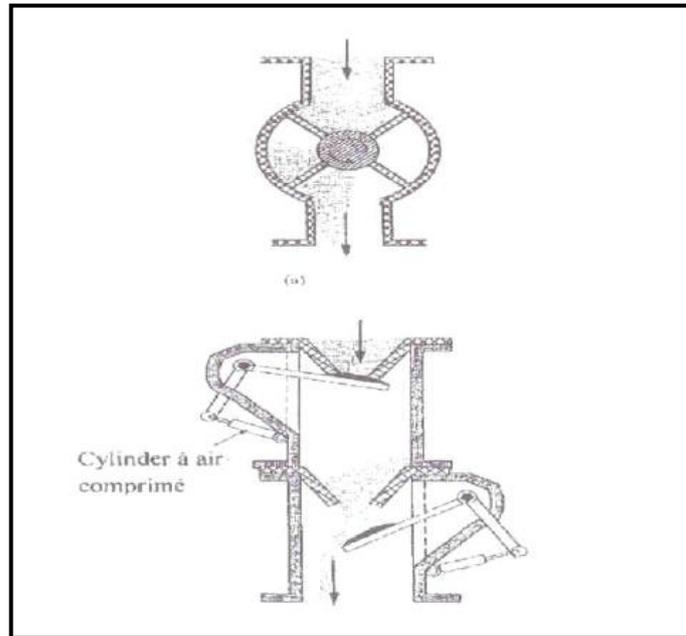
**Figure 3.4** Construction des électrodes ionisantes



**Figure 3.5** Construction des électrodes de collection



**Figure 3.6** Chambre à douilles



**Figure 3.7:** Construction du système d'évacuation de la poussière (a) fonctionne à une pression d'air légèrement inférieure à la pression ambiante pour éviter les fuites de poussière (b) la poussière est déchargée en utilisant une sortie étanche du gaz

### III.4. 3. précipitateurs humides:

L'air à traiter passe à travers une pulvérisation ou un écoulement de liquide qui va pouvoir fixer les particules ou les gaz en fonction de la composition chimique du liquide utilisé.

La perte de charge de ces équipements est très variable en fonction de leur constitution mais reste constante au cours du temps.

La précipitation humide est également utilisée dans différents secteurs de l'industrie là où l'élimination de la couche de poussière déposée sur l'électrode collectrice devient difficile. Les deux types de précipitateurs vertical (à cylindre) et horizontal (à plans) sont utilisés dans la précipitation humide.

L'irrigation en eau est assurée par des becs à jet d'eau dans la direction horizontale et verticale, et la poussière collectée ainsi dans un film d'eau est entraînée par l'eau dans le collecteur. La boue est évacuée du collecteur à travers une ouverture, alors que la quantité d'eau propre qui est au dessus de la poussière récupérée est réinjectée dans le précipitateur après un conditionnement au PH pour éviter la corrosion des électrodes.

Une certaine quantité d'eau doit être continuellement remplacée avec de l'eau pure pour maintenir une certaine concentration des sels dissous inférieure à un seuil déterminé, afin d'éviter la formation de cristaux de minerais. Quand ce type de cristaux se forme, ils constituent de véritables pointes engendrant ainsi des étincelles, rendant un fonctionnement stable du précipitateur impossible. Les

applications de la précipitation humide sont généralement limitées à des volumes de gaz faibles et moyens.

L'espace entre les électrodes collectrices traditionnellement pratiqué est  $D = 20-25$  cm, mais de plus grands précipitateurs sont actuellement utilisés pour lesquels l'espace inter-électrodes  $D = 40-60$  cm et les tensions appliquées  $U = 100-120$  k V. Cela est dû à plusieurs avantages:

- L'efficacité de la filtration demeure inchangée malgré l'augmentation de l'espace  $D$ , conduisant à la diminution du coût du précipitateur.
- Les étincelles de claquage se produisent plus rarement, le fonctionnement est donc plus stable.
- L'effet de dépôt des particules sur la surface des électrodes collectrices est considérablement diminué, ce qui permet une durée de fonctionnement plus longue sans arrêt de maintenance (3 à 6 mois).
- Les grands espaces permettent l'accès facile aux agents de la maintenance à travers le chemin inter-électrodes (de passage du gaz) rendant les frais de la maintenance moins onéreux.

### **III.3. 4. Précipitateur de type tubulaires et de type à plaques :**

- Il existe deux types de base de précipitateur à étage unique : le précipitateur de type tubulaires et les précipitateurs de type à plaques.

#### **III.3. 4.1. Précipitateur tubulaires :**

- Le principe de fonctionnement peut mieux être expliqué avec le modèle tubulaire (figure 3.8). Il est constitué par un cylindre métallique vertical relié à la terre (l'électrode collectrice) et un fil (l'électrode ionisante) suspendu suivant l'axe du cylindre par une douille isolante. L'électrode ionisante est connectée à une source de HT continue tandis que l'électrode collectrice est reliée à la terre.
- Le gaz pollué est introduit dans le précipitateur à travers une ouverture située en bas du cylindre et circule vers le haut à travers l'espace inter-électrodes. Les particules polluantes sont bombardées par les ions mono-polaires de la décharge couronne et se chargent fortement, elles sont ensuite entraînées par le champ électrostatique en direction de l'électrode collectrice et sont déposées sur la surface interne du cylindre. Le gaz filtré sort par une ouverture située en haut du cylindre, tandis que les particules « piégées » s'accumulent sur la surface interne du cylindre où elles forment une couche de poussière.

- Un frappe mécanique (également appelé battage) sur l'électrode collectrice permet de déloger la couche de poussière qui tombe pour être récupérée dans un collecteur de poussière. Le collecteur est ensuite vidé grâce à une ouverture située en bas de celui-ci. [46]

### Remarque:

- Dans un champ bionisé (alternatif) de la décharge corona, les particules sont bombardées par des ions positifs et négatifs, de sorte qu'ils acquièrent une charge nette beaucoup moins grande, et l'effet de la force électrostatique est considérablement diminué.

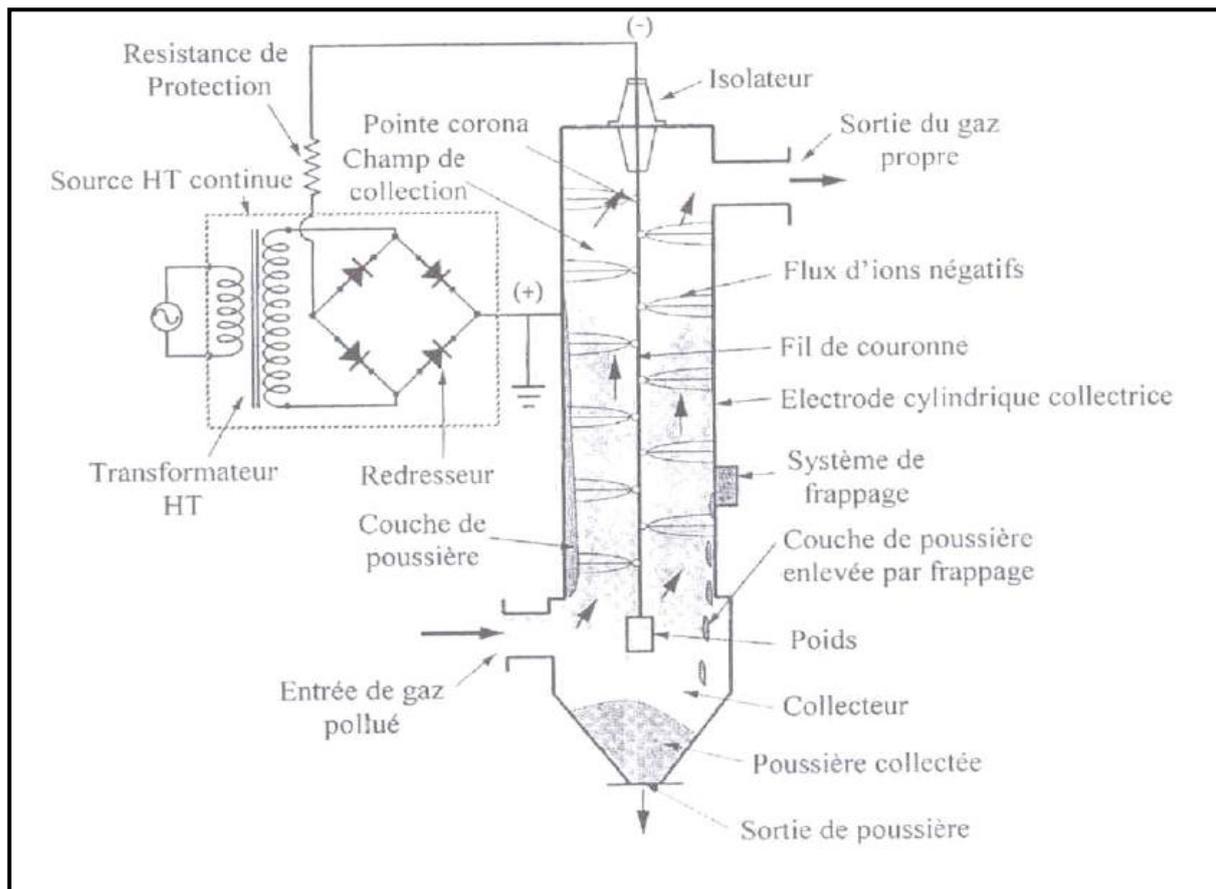
Mais elles subissent un autre genre de force électrostatique, la force de gradient, qui agit sur n'importe quel corps diélectrique, avec ou sans charge électrique, pour les entraîner vers une région de champ électrique plus élevé, à savoir vers la surface de l'électrode ionisante.

La force de gradient est prépondérante dans la région de champ fortement non-uniforme.

Ainsi le dépôt de particules sur la surface de l'électrode couronne entraîne avec le temps

l'augmentation de son épaisseur apparente, stoppant finalement la décharge corona.

Par conséquent,



**Figure 3.8 :** Construction de base d'un précipitateur électrostatique ( type cylindrique vertical)

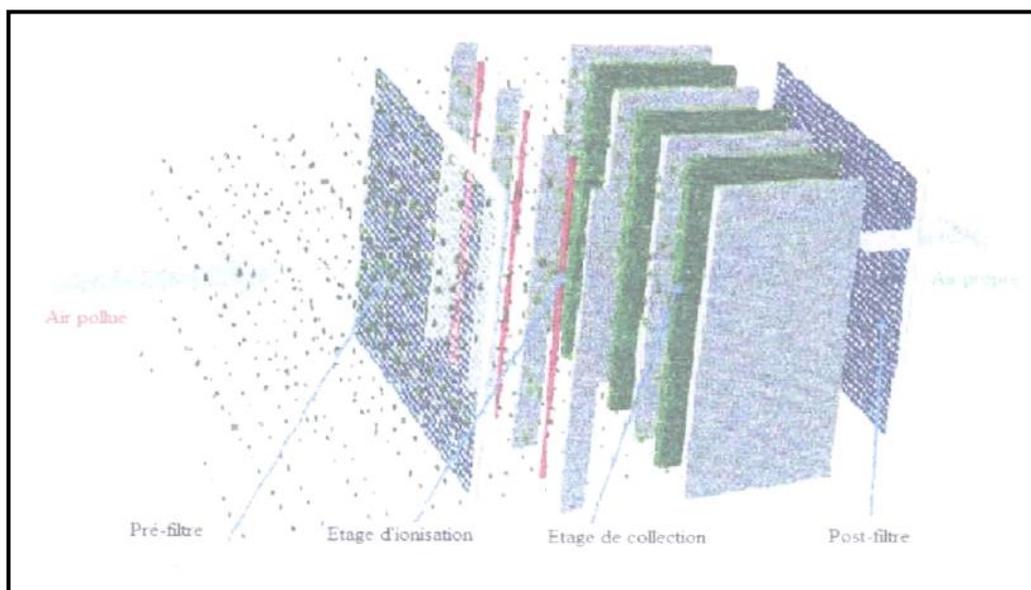
Les électrodes du tuyau peuvent être d'une hauteur de 2 - 5 m. L'espacement entre l'électrode de décharge et l'électrode de collecte varie de 8 - 15 cm ou même 20 cm.

La précipitation des particules d'aérosol a lieu sur les parois du tuyau intérieur, d'où la matière peut être évacuée par grattage périodique des tuyaux ou par rinçage à l'eau. Généralement, le précipitateur de type tuyau est utilisé pour l'élimination de fines particules liquides.

### III.3. 4.2. Précipitateurs à plaques :

Dans le précipitateur horizontal, les électrodes de collecte sont composées de plaques parallèles. Les électrodes de décharge sont semblables à celles utilisées dans les précipitateurs cylindriques, des fils à petit rayon de courbure. On utilise très souvent des tiges carrées (environ 4,8 mm); des tiges carrées entortillées (de 3,2 à 6,4 mm) sont aussi utilisées. Les fils sont suspendus mi-chemin entre les électrodes de collecte parallèles (figure 3.9).

Les électrodes de décharge sont fabriquées de matières non corrosives telles que le tungstène et les alliages d'acier et de cuivre. Le gaz circule parallèlement aux plaques. La collecte des aérosols a lieu sur les côtés internes des plaques parallèles. Les matières collectées peuvent être enlevées par grattage soit périodiquement ou continuellement. Les fines particules ainsi enlevées tombent dans les récipients au fond du précipitateur. Les électrodes de collecte doivent avoir une surface maximale de collecte. Ils doivent résister aux grands volumes et à la corrosion, et ils doivent être dimensionnés de manière économique et logique.

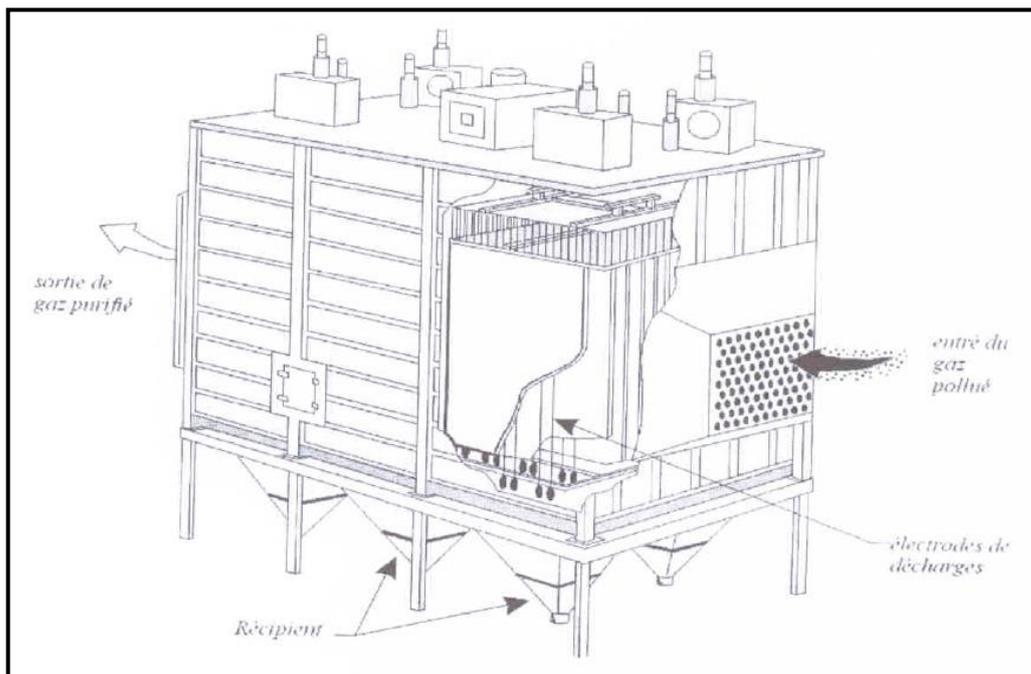


**Figure 3.9:** Les différents compartiments des précipitateurs électrostatiques à plaques

Les différents éléments des précipitateurs électrostatiques sont:

- Pré-filtres;
- Ioniseur;
- Collecteur;
- Post-filtre;

Ces précipitateurs sont généralement employés pour la collecte des particules solides. La figure 3.10 montre un précipitateur électrostatique industriel typique.

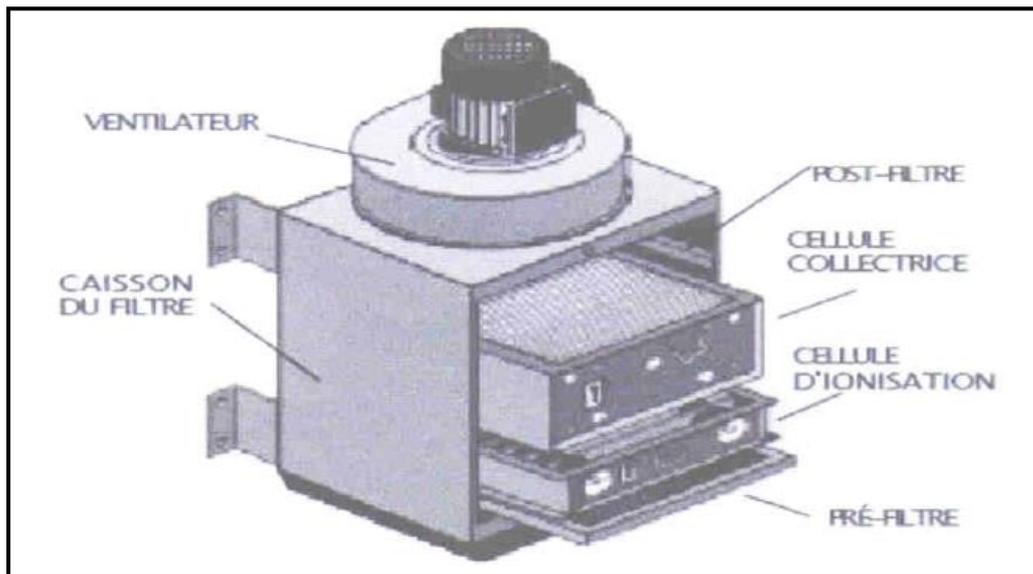


**Figure 3.10:** Précipitateur électrostatique industriel typique

### III.5. Description d'un précipitateur électrostatique a plaque :

Le schéma descriptif global de l'appareil représenté à la figure 3.11 Permette de faire ressortir les différentes parties du dispositif qui seront décrites par la suite:

- ✓ le caisson du filtre électrostatique;
- ✓ pré-filtre;
- ✓ post-filtre;
- ✓ cellule de collection;
- ✓ cellule d'ionisation;
- ✓ ventilateur.



**Figure 3.11:** Dessin descriptif d'un précipitateur électrostatique

- Le filtre que nous étudions est un filtre à deux étages:

**Etage 1:** est l'étage d'ionisation qui comprend le système d'électrodes « fil-plan », ce système d'électrodes est fixé par des passages électriques isolants. Les électrodes ionisantes constituées par des fils fins, bien tendus qui sont reliées à l'alimentation électrique à travers des passages haute tension, tandis que les électrodes plaques sont reliées à la masse et constituées par des plaques rectangulaires en tôle galvanisée.

**Etage 2:** est constituée par l'électrode à maille (grillage fin) qui permet la collection des particules de fumée, cette électrode est reliée à la terre.

Deux ouvertures qui permettent l'entrée et la sortie du gaz: une ouverture en bas pour l'entrée du gaz pollué et une autre ouverture en haut pour la sortie du gaz filtré.

### III.5.1. Etage d'ionisation :

Le système d'électrodes « fil- plan » choisi permet d'obtenir dans certaines conditions expérimentales des décharges couronne.

La configuration utilisée tout le long des manipulations est telle que le fil est à l'anode et le plan est à la cathode, on parle de décharge couronne positive. La distance inter électrodes « d » est variable (de 1 à 5 cm).

Le fil doit être conducteur et fabriqué d'un matériau résistant à l'érosion et à l'oxydation: des fils en tungstène ont été choisis. La décharge doit avoir lieu pour des tensions délivrées par le générateur (entre 0 et 30 kV).

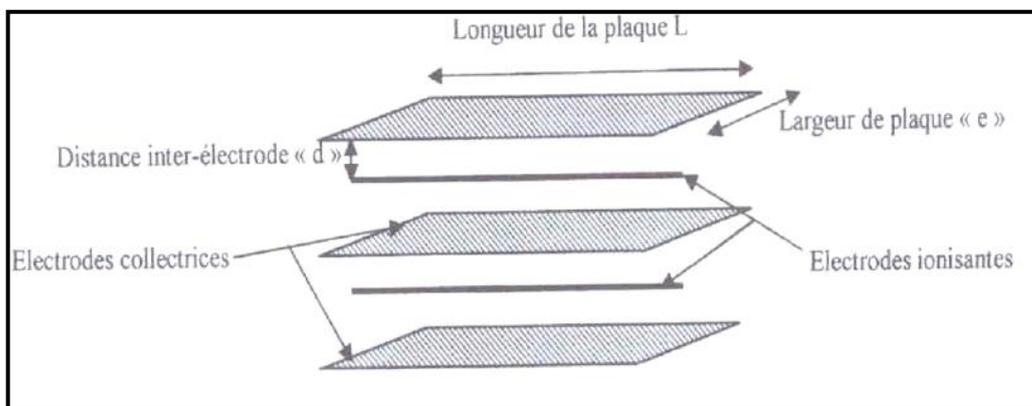
L'électrode plaque doit être elle aussi conductrice et doit être résistante à l'oxydation provoquée par la décharge couronne (présence d'oxygène et production d'ozone). C'est une plaque rectangulaire de 20 cm de longueur, et de largeur déterminée. Lors de chaque manipulation, Les électrodes sont changées systématiquement entre chaque série d'expériences.

Les paramètres variables étudiés sont (figure 3.12):

l'amplitude de la tension d'alimentation,

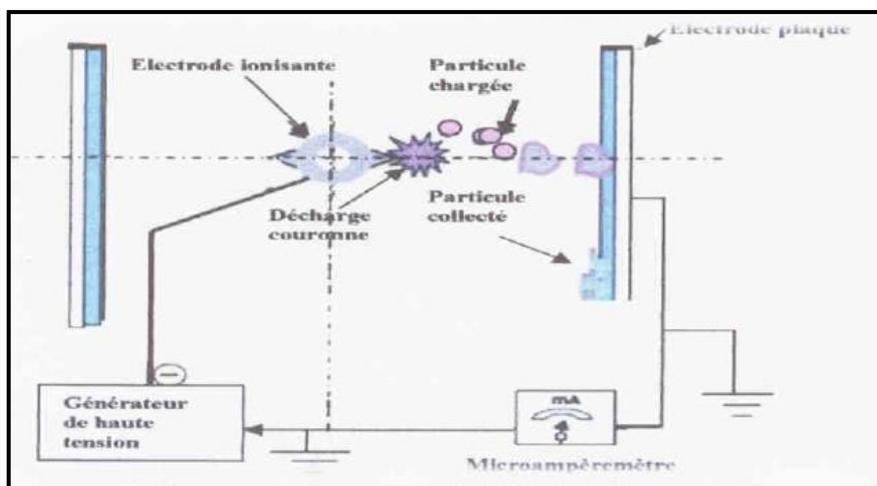
la distance inter- électrodes « d »,

la largeur « e » de l'électrode plaque mise à la terre.



**Figure 3.12:** Dimensions des électrodes collectrices et ionisantes

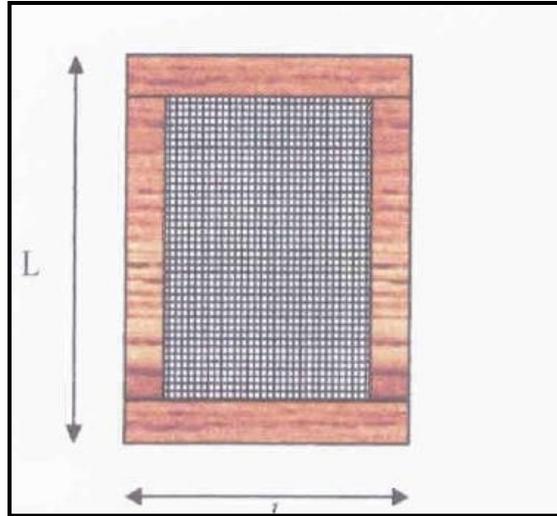
Lorsque les particules polluantes traversent l'intervalle inter-électrodes et sous l'action de la décharge couronne, elles acquièrent une charge électrostatique puis se dirigent sous l'action du champ électrique vers les électrodes plaques où elles seront collectées, suivant le mécanisme décrit dans la figure (3. 13)



**Figure 3.13:** Mécanisme de précipitation électrostatique

### III.5.2. Etage de collection:

Cet étage est constitué d'une plaque de métal grillagée à petites mailles d'environ 1 mm de côté (figure 3.14).



**Figure 3.14:** Dimensions de l'électrode collectrice grillagée

Dans la plus part d'expériences présentées dans ce mémoire, nous n'avons pas utilisé cette électrode car nous avons surtout étudié l'étage d'ionisation en mesurant le courant de décharge couronne.

### III.6. Avantages des précipitateurs électrostatiques :

La réalisation de tel précipitateurs a semblé nécessaire aux yeux des industriels du domaine du dépolluage, plusieurs sociétés ont réalisées des précipitateurs électrostatiques pour traiter les brouillards d'huile et les fumées plus ou moins grasses. Ces émanations présentent des nuisances incompatibles avec les principes actuels de conditions de travail et de sécurité. L'air pollué peut avoir des effets nocifs sur l'organisme, notamment sur le système respiratoire et le système gastro-intestinal (résorption par la peau, manifestations allergiques). D'autre part, les vapeurs et les brouillards d'huile se condensent sur les murs, les plafonds, les vitres, dans les canalisations électriques, provoquant le vieillissement prématuré de toutes les installations industrielles. De plus, ces émanations rendent les sols glissants, ce qui peut être à l'origine d'accidents.

Ces purificateurs éliminent efficacement les fumées et les brouillards d'huile en les aspirants directement à la source ou dans l'ambiance des ateliers. L'air est traité par précipitation électrostatique puis refoulé à l'extérieur ou dans les locaux en période de chauffage, ce qui évite une

perte de calories considérable, Les servitudes sont minimales pas de matières filtrantes à changer. Un simple nettoyage suffit.

Il peut éliminer des particules aussi petites que 0,1 µm avec faibles coûts de maintenance et de fonctionnement. Le nettoyage des précipitateurs est facile en mettant hors service certaines de ces unités.

### **III.7. Inconvénients des précipitateurs électrostatiques :**

- ❖ Hauts coûts d'installation.
- ❖ Haut besoin en espace, dû aux dimensions larges de l'équipement.
- ❖ Risque d'explosions pendant la collecte de gaz combustibles ou de fines particules.
- ❖ Pendant l'exploitation, des mesures de sécurité sont nécessaires.

La distribution appropriée du flux de gaz, la résistivité du gaz, la conductivité de fines particules.

Pendant l'ionisation du gaz, de l'ozone (gaz nocif) est produit par les électrodes de décharge à charge négative,

### **III.8. Rendement :**

Généralement, le rendement de collecte du précipitateur électrostatique est haut, approchant les 100%. Quelques matières s'ionisent plus facilement que d'autres et sont ainsi plus appropriées pour l'élimination par précipitation électrostatique. Pour les brumes d'acide et les unités de récupération catalytiques, les rendements dépassent souvent 99 %.

### **III. 9. Conclusion :**

Les précipitateurs électrostatiques possèdent de nombreux avantages par rapport aux autres moyens de filtration mécanique à cause de leur faible consommation d'énergie due à la faible valeur du courant de corona, une grande efficacité de filtration (99,91%) même pour les particules submicroniques (0,3 µm et moins) et la facilité de maintenance. Ce sont des avantages très importants dans l'industrie. La précipitation électrostatique est également utilisée pour la filtration de l'air dans les établissements viables (maisons, bureaux, systèmes de climatisation -air conditionné-, hôpitaux, véhicules) et les ateliers.

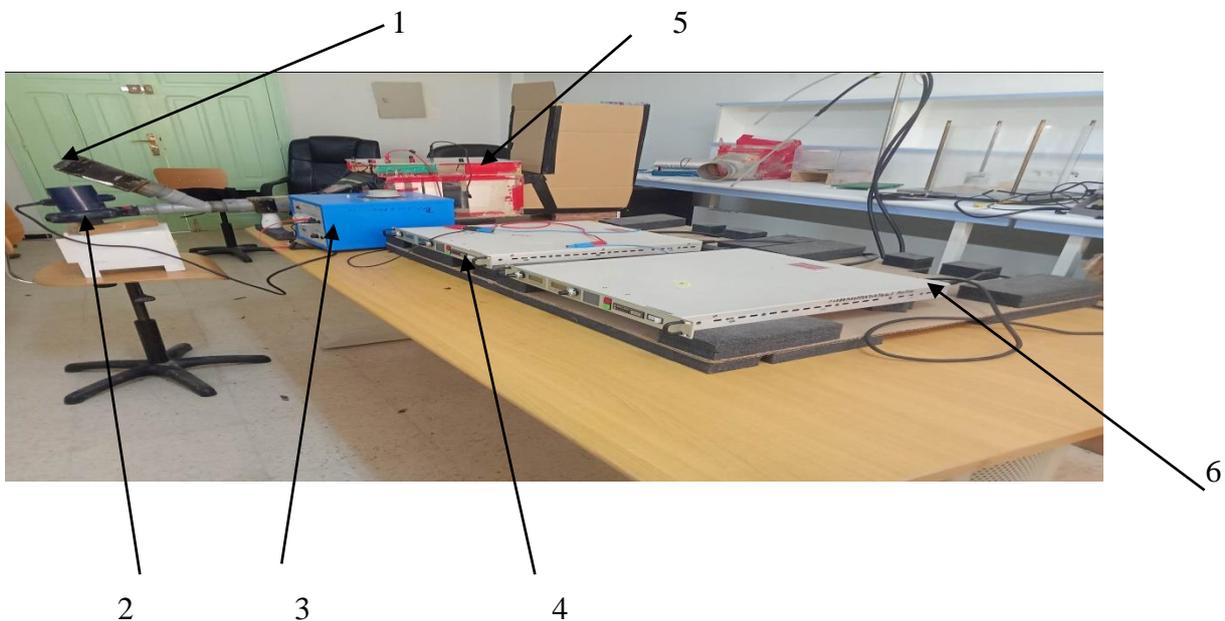
**CHAPITRE IV Modélisation et  
optimisation d'un filtre électrostatique  
a deux étages**

### VI.1. Introduction :

Dans le but de concevoir et réaliser notre filtre électrostatique a deux étages, nous avons mené nos expériences dans notre laboratoire(Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib). Les filtres électrostatiques à deux étages comme nous avons vus au chapitre II, on des performances qui dépendent des conditions de fonctionnement liées aux présences de deux 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.

### VI.2 Description du filtre électrostatique de laboratoire



**Figure(IV.1) :** *dispositif de laboratoire*

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

**1**-Entrée de la poussière.

**2**-souffleur.

**3**-autotransformateur.

**4**-générateur de haute tension de polarité positive.

**5**-filtre électrostatique.

**6**-générateur de haute tension de polarité négative.

Matériel utilise :



*la balance*



*autotransformateur*



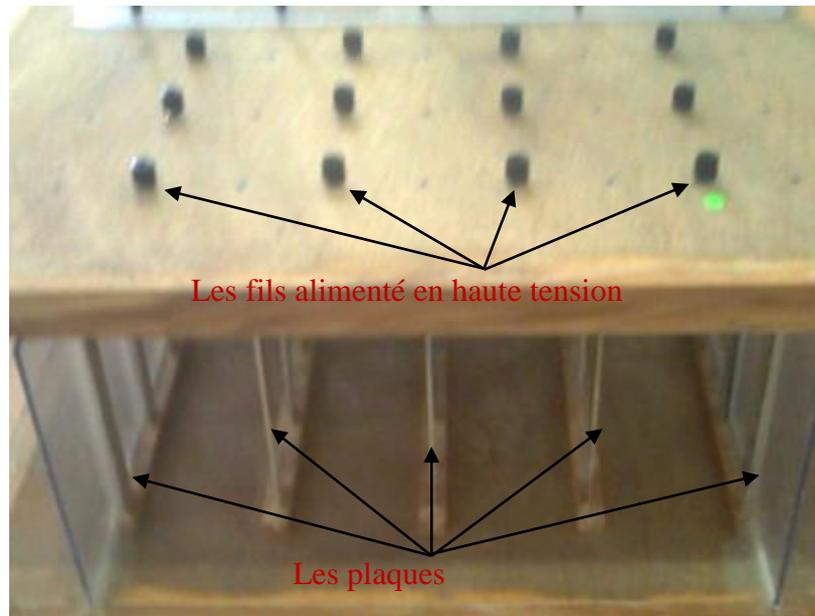
*souffleur*



*02 générateurs de  
laboratoire utilisé*

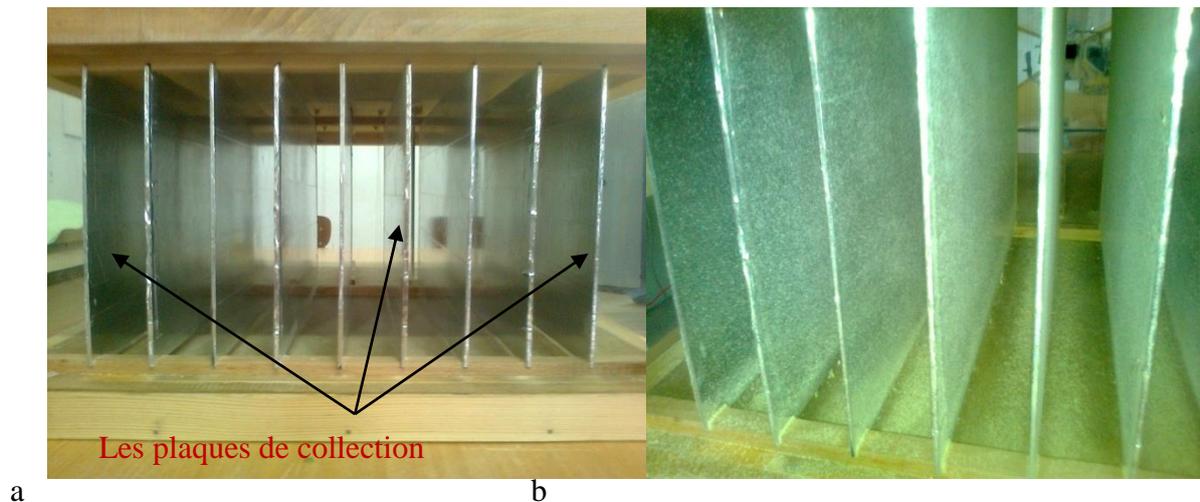
-le filtre électrostatique consiste de deux parties:

- ✓ La première partie : la partie d'ionisation composée des fils et des plaques.



**Figure(IV.2):** *la partie d'ionisation*

- ✓ La deuxième partie : la partie de collection composée seulement des plaques.



**Figure (IV.3): la partie de collection**

a) les plaques à vide

b) les plaques après collection

### VI.3 Principe de fonctionnement :

Le premier étage noté ionisateur est constitué d'une cage de fil de faible rayon alimenté par un générateur de haute tension positive, les plaques de largeur 2cm sont relié à la terre.

Les électrodes d'ionisation sont régulièrement espacées ( $h=10\text{cm}$ ) placées a mi-distance entre les plaques ( $D=5\text{cm}$ ).

Dans cet étage nous avons écoulé un gaz dépoussiéré à traiter c'est l'air qui porte les poussières dois mise dans une gauge et refoulé à l'aide d'un souffleur.

L'augmentation du potentiel électrique appliqué conduit à un champ intense près de l'électrode haute tension ou 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 électrique grâce à plusieurs mécanismes qui sont : la charge naturelle par attachement des ions existant dans l'atmosphère, la triboélectrisation (regroupant la charge par contact et la charge par frottement) et la charge par charge d'espace ionique (regroupant la charge par champ et la charge par diffusion).

Deuxième étage noté collecteur consiste des plaques collectrices, alimenté par un générateur de haute tension négative et les autres plaque sont reliev a la terre la distance entre ces plaque (D=5cm).les particules chargés dans le premier étage sont accumulées sur les plaques de collections.

**VI.4 Résultats obtenus :**

**VI.4.1 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.

**VI.4.2 Les expériences préliminaires:**

 *Variation de la vitesse du l'air*

Tension d'ionisation constante=16kV

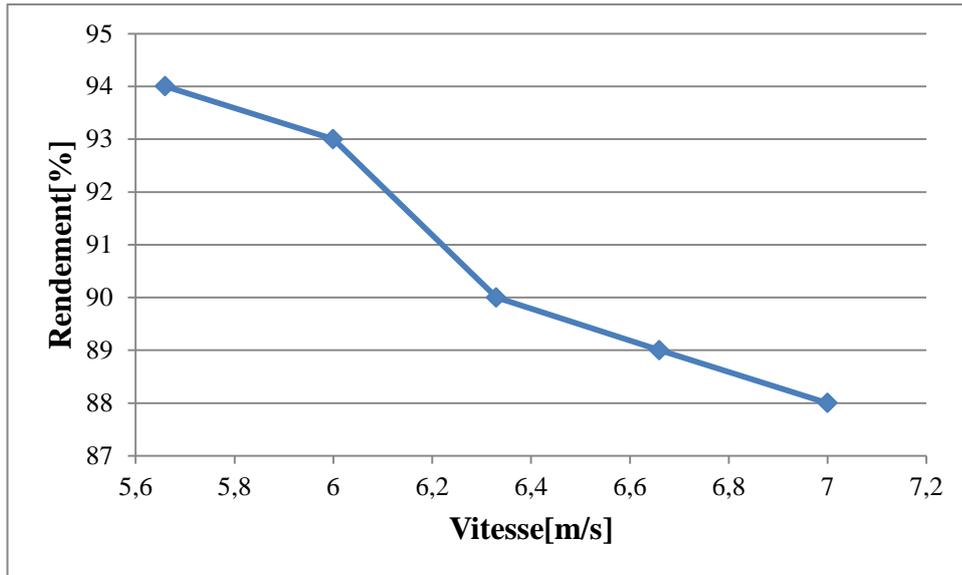
Tension de collection constante=23kV

Vitesse (m/s)	$M_e(g)$	$M_s(g)$	$\eta( \%)$
5.66	20	1.07	94
6	20	1.28	93
6.33	20	1.92	90
6.66	20	2.06	89
7	20	2.28	88

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

**Remarque :**

la formule de calcul du rendement est :  **$100-(M_s/M_e)*100$**



Figure(IV.4) : Variation du rendement en fonction de la vitesse de l'air.

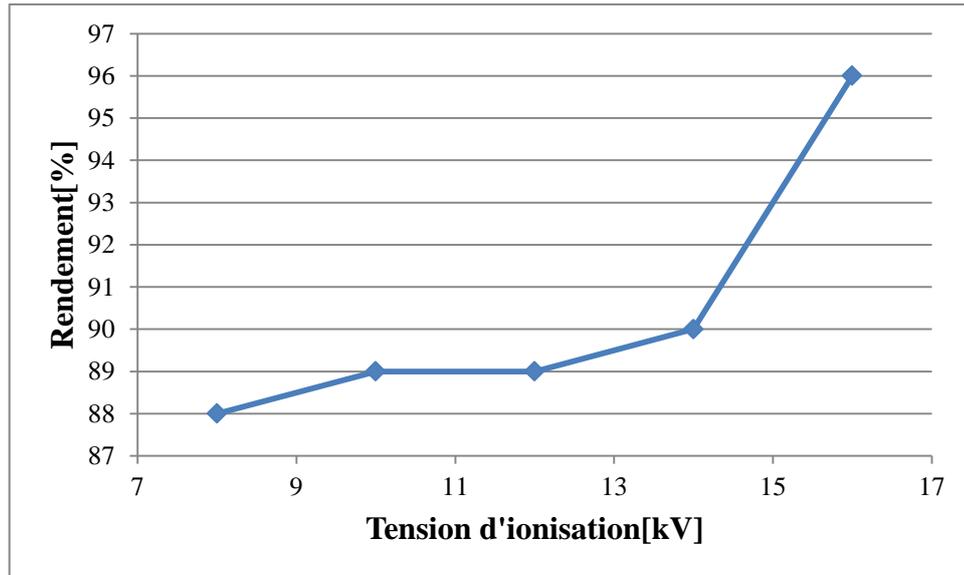
✚ Variation de tension d'ionisation

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

Tension de collection constante=23kV

$U_I$ (kV)	$I_{vide}$ (mA)	$I_{charge}$ (mA)	$M_e$ (g)	$M_s$ (g)	$\eta$ (%)
16	1.523	1.741	20	0.74	96
14	1.476	1.650	20	2.00	90
12	1.030	1.315	20	2.04	89
10	0.871	1.031	20	2.06	89
8	0.494	0.784	20	2.30	88

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



Figure(IV.5): Variation du rendement en fonction de la tension d'ionisation.

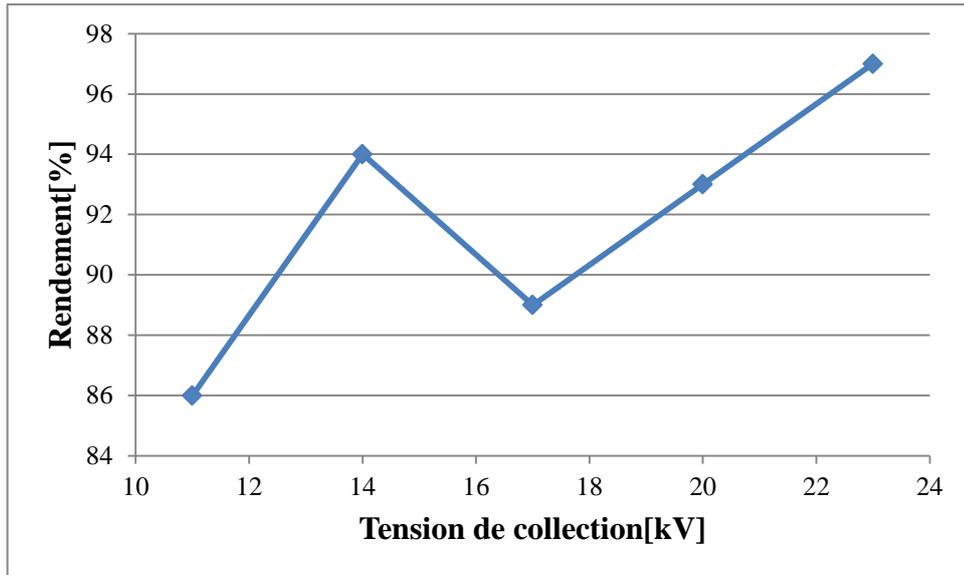
✚ Variation de la tension de collection

Tension d'ionisation constante = 16kV

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

$U_I$ (kV)	$I_{vide}$ (mA)	$I_{charge}$ (mA)	$M_e$ (g)	$M_s$ (g)	$\eta$ (%)
-23	1.666	2.011	20	0.49	97
-20	1.254	1.467	20	1.30	93
-17	0.757	0.875	20	2.08	89
-14	0.346	0.410	20	1.06	94
-11	0.210	0.310	20	2.62	86

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



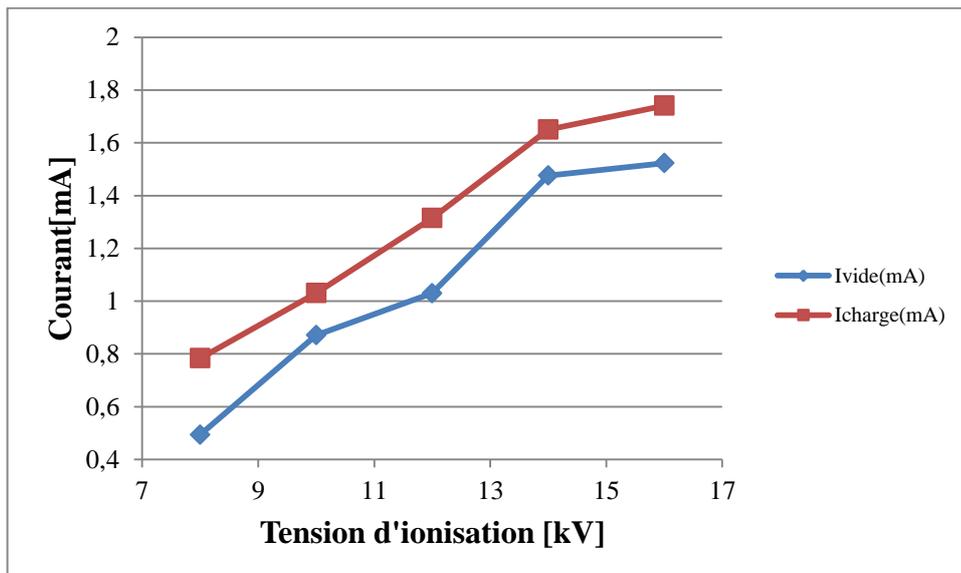
Figure(IV.6): Variation du rendement en fonction de la tension de collection.

### Caractéristique courant-tension

#### 1<sup>ere</sup> étage

Nous avons tracé la caractéristique courant-tension en variant la tension de 8 à 16kV

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure suivante

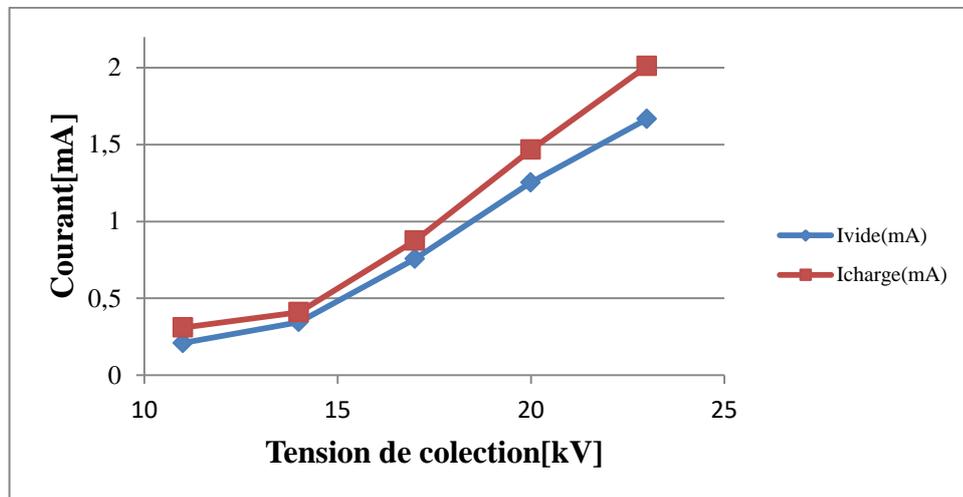


Figure(IV.7) : Variation du courant en fonction de la tension d'ionisation.

**2<sup>eme</sup> étage**

Nous avons tracé la caractéristique courant-tension en variant la tension de 11 à 23kV

Les résultats obtenus sont représentés dans la figure suivante



**Figure(IV.8):** Variation du courant en fonction de la tension collection.

**IV.5 Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences :**

**IV.5.1 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 choisit l'intervalle d'étude de la vitesse de l'air comme suit :

$$5.67 (m/s) \leq V \leq 6.33 (m/s) \tag{IV.1}$$

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

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

D'où :  $V_c = 6m/s$

**b) Intervalle d'étude de la tension d'ionisation:**

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

$$13(kV) \leq U \leq 16(kV) \tag{IV.3}$$

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

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

D'où :  $U_c = 14.5 \text{ kV}$

**c) Intervalle d'étude de la tension de collection:**

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

$$-16(\text{kV}) \leq U \leq -13(\text{kV}) \quad (IV.5)$$

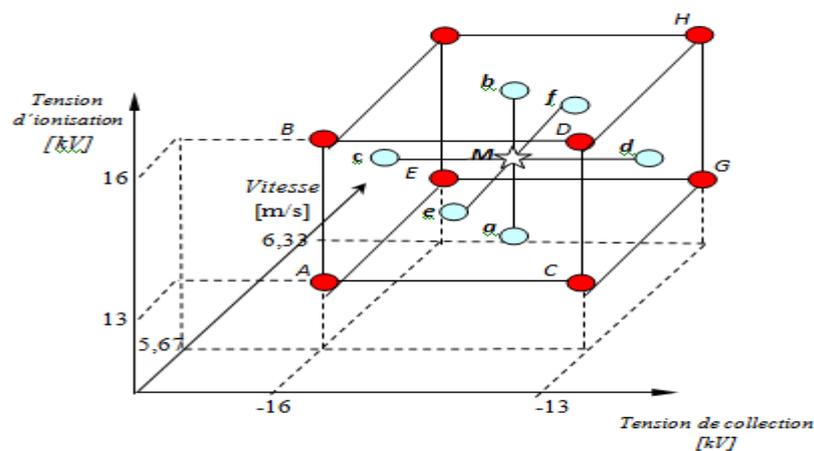
La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

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

D'où :  $U_c = -14.5 \text{ kV}$

**IV.5.2 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-9.



**Figure(IV.9) :** Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite

**IV.6 Résultats des expérimentations :**

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportées au tableau :

N° Essais	U <sub>ionisation</sub> [kV]	U <sub>collection</sub> [kV]	Vitesse [m/s]	I <sub>ionisation</sub> [mA]	I <sub>collection</sub> [mA]	Rendement [%]	I <sub>ionisation</sub> [mA]	I <sub>collection</sub> [mA]	Rendement [%]	
Plan factoriel « 2 <sup>3</sup> »	1	-1	-1	0,597	0,389	89	0,616	0,470	93	
	2	1	-1	1,336	0,709	94	1,341	0,791	97	
	3	-1	1	0,453	0,226	90	0,498	0,323	93	
	4	1	1	1,033	0,362	96	1,752	0,473	95	
	5	-1	-1	1	0,635	0,430	89	0,708	0,568	94
	6	1	-1	1	1,129	0,598	93	1,501	0,858	98
	7	-1	1	1	0,454	0,228	87	0,487	0,303	94
	8	1	1	1	1,077	0,341	91	1,341	0,527	96
Points en étoiles « 2×3 »	9	-1	0	0,471	0,252	90	0,582	0,417	93	
	10	1	0	1,195	0,454	94	1,371	0,670	96	
	11	0	-1	0,837	0,473	91	0,977	0,67	96	
	12	0	1	0,694	0,246	91	0,765	0,877	95	
	13	0	0	0,683	0,304	93	0,809	0,510	97	
	14	0	0	0,774	0,315	91	0,887	0,52	98	
Points au Centre	15	0	0	0,683	0,301	92	0,792	0,440	96	
	16	0	0	0,767	0,314	91	0,796	0,441	95	
	17	0	0	0,839	0,354	93	0,863	0,440	96	

**Tableau(IV.4):**Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré.

	U <sub>ionisation</sub> [kV]	U <sub>collection</sub> [kV]	Vitesse [m/s]
Niveau -1	13	-16	5.67
Niveau 0	14.5	-14.5	6
Niveau 1	16	-13	6.33

A	Mélange
B	Fine

**A- Les modèles mathématiques :**

a- Rendement(a)= $91,9718+2,3*ten_{ion}-1,1*vit-0,950707*ten_{col}^2-0,874997* vit* ten_{col}$ . (IV.7)

Avec

$$Q^2=0,895$$

$$R^2=0,969$$

b- Rendement(b)= $95,9296+1,5*ten_{ion}-0,5*ten_{col}+0,499993*vit-1,62676*ten_{ion}^2-0,626756*ten_{col}^2+1,37324*vit^2-0,50001*ten_{ion}*ten_{col}$ . (IV.8)

Avec

$$Q^2=0,934$$

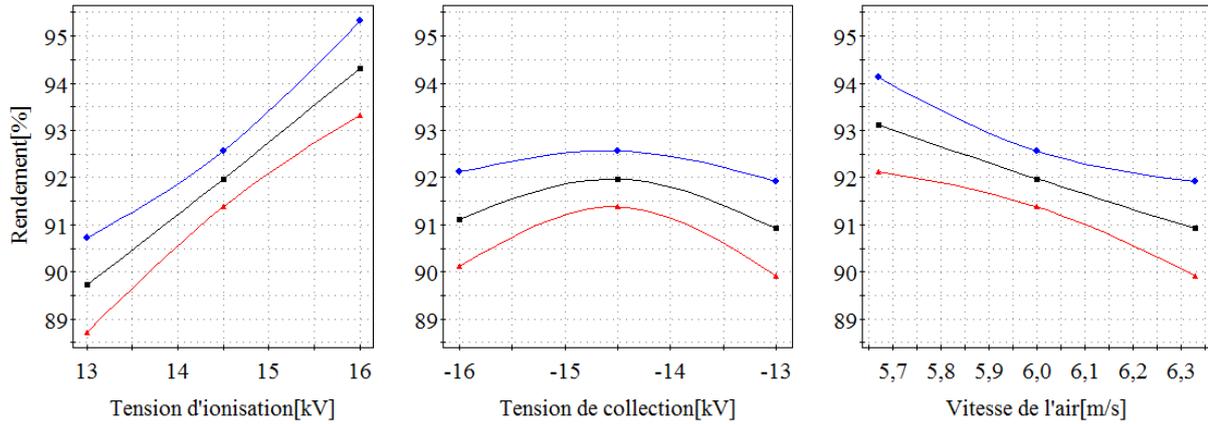
$$R^2=0,973$$

**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<sub>i</sub>) 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.10), (Figure IV.11).

a-



Figure(IV10): Effets de chaque facteur sur la réponse pour le mélange.

- ✚ Augmentation du rendement avec l'augmentation du tension d'ionisation.
- ✚ Augmentation du rendement avec l'augmentation de la tension de collection jusqu'à une valeur de tension de -14,5kV puis elle diminue.
- ✚ Le rendement décroît considérablement avec l'augmentation de la vitesse de l'air.

b-

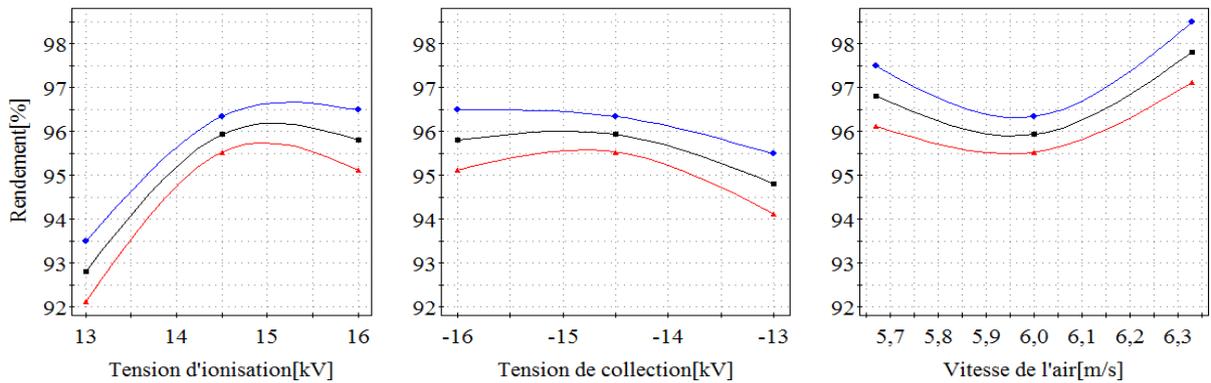


Figure (IV.11): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la fine.

- ✚ Augmentation du rendement jusqu'à une valeur de tension de 14.5 kV puis il devient constant.
- ✚ Le rendement décroît considérablement avec l'augmentation de la tension de collection.
- ✚ Le rendement décroît considérablement avec l'augmentation de la vitesse de l'air jusqu'à une valeur de 6m/s puis il augmente.



## CHAPITRE IV : Modélisation et optimisation d'un filtre électrostatique a deux étages

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1	positive	Free	13	16
2	negative	Free	-16	-13
3	vitesse	Free	5,67	6,33

Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	rendement(a)	1	95,3547	96,2347	
2	Rendement(b)	1	97,7869	98,3116	

Iteration: 5001    Iteration slider: \_\_\_\_\_

	1	2	3	4	5	6	7
	positive	negative	vitesse	rendement(a)	Rendement(b)	iter	log(D)
1	15,8882	-14,8374	5,67	95,3906	96,9826	829	0,5644
2	15,8547	-14,7918	5,67	95,3685	96,9921	5001	0,5619
3	15,9998	-15,229	6,3136	93,1311	97,8561	395	0,8193
4	16	-15,2225	6,3181	93,1186	97,8975	668	0,8183
5	16	-15,1949	6,3217	93,1095	97,9242	633	0,8181
6	15,8113	-14,6761	5,67	95,3805	96,9723	5001	0,5716
7	16	-15,2327	6,3138	93,1305	97,8588	492	0,8191
8	16	-15,2544	6,3147	93,1259	97,8732	693	0,8188

**Figure(IV.13): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0**

### IV.7 Conclusion

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

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 ensuite 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<sup>ème</sup> 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 premiers chapitres sont dédiés à la recherche bibliographique, on a consacré le premier chapitre à l'étude sur les généralités sur la décharge électrique est comprise la décharge couronne qui est le paramètre principal pour le fonctionnement du précipitateur électrostatique.

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

Dans le troisième chapitre nous avons aussi cité quelques notions sur les précipitateurs électrostatiques, leurs principes de fonctionnement, leurs efficacités et les différents types des précipitateurs leurs avantages et inconvénients, et la description du dispositif expérimental.

Pour le quatrième chapitre est consacré à 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.

**RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] A. Bendaoud, « Modélisation du champ électrique et de l'effet couronne dans les installations de haute tension » thèse de doctorat d'état en électrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, pp. 21-23, novembre 2006.
- [2] S.Touia, H.Righi « Modélisation expérimentale d'un précipitateur cylindrique » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, pp. 3-8 2005-2006. [3] B.Hasrouf, Y.Saber « Modélisation expérimentale de la décharge électrique (claquage) » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, pp.9-12, 2006-2007.
- [4] H.Bellifa B.Boummédiene « Etude et mesure du courant de la décharge couronne » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, pp.6, 1996-1997.
- [5] White H.J., Industrial electrostatic precipitation, Wesley Publishing Company, Inc., 1963
- [6] Les propriétés diélectrique de l'air et les très haute tension, Claud Gary. Eyrolles 1984.
- [7] D.Ziani,M.Mehdad « Décharge électrique dans les gaz » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, pp.22-24, 1994 - 1995.
- [8] C.Gary « Effet couronne sur les réseaux électrique aériens », Technique de l'ingénieur,D 4440,pp. 1-9, juin 1993
- [9] Les renardières « L'Amorçage des grands intervalles de l'air en polarité positive » conférence internationale des grands réseaux, 1997.
- [10] Les renardières « Analyse de la première impulsion d'effet couronne » électrotat 2 pp. 105-120,1972.
- [11] B.Engquist,A.Greenbaum,WD.Murphy « Global boundary conditions and fast helmholtz solvers », IEEE transactions on Maynetics, Vol 25,Na, pp. 2804-2806 july 1989.
- [12] A.Nicolaide « A Method of distributed charges for solving problems of électromagnétique field in non- homogeneous media » ,IEEE transactions on power appartus and systems, Vol .PAS - 98,No.2,pp. 493-497, march/april 1979.
- [13] A. Tilmatine, « Etude et réalisation d'un séparateur électrostatique des mélanges granulaires » thèse de doctorat d'état en électrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, 2004.
- [14] L. M. Dumitran, « Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique », thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 2001.
- [15] James H. Turner et all Particulate Matter Controls Triangle Institute Research Triangle Park, NC 27709 U.S. Environmental Protection Agency September 1999.
- [16] Axel VINCENT, « Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre Décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope » thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie CURIE PARIS 2002.

- [17] A.Mizuno. Electrostatic Precipitation Department of Ecological Engineering Toyohashi University of Technology Aichi, Japan IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 7 No. 5, October 2000.
- [18] <http://www.wapc.com/index.htm> Wet Electrostatic Precipitators.
- [19] Parker K.R., Electrostatic precipitation, Chapman & Hall, 1997, pp. 1-24. [20] Oglesby S. & Nichols G.B., Electrostatic precipitation, Marcel Dekker Inc., 1978 Riehle C., Basic and theoretical operation of ESPs. Electrostatic precipitation, Chapman & Hall, London, 1997.
- [21] Cunningham, E., "On the Velocity of Steady Fall of Spherical Particles through Fluid Medium", Proc. R. Soc. Lond. Vol. 83, 357-365, 1910.
- [22] Knudsen M. and Weber S., "Resistance to motion of small spheres", Ann. Phys., Vol. 36(5), pp. 981-994, 1911.
- [23] Rader D.J., "Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases", J. Aerosol Sci., Vol. 21. No. 2, pp. 161-168, 1990.
- [24] Parker K. R., "Electrostatic precipitation", Chapman & Hall, pp. 1-24, 1997.
- [25] W.C. Hinds, Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles, 2nd Edition, New York, 1999 (Wiley-Interscience).
- [26] L. M. Dumitran, "Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique", Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 2001.
- [27] G. Leonard, M. Mitchner & S. A. Self, "Particle transport in electrostatic precipitators", Atmospheric environment, Vol. 14, pp. 1289-1299, 1980.
- [28] White H. J., "Industrial electrostatic precipitation", Wesley Publishing Company, Inc., 1963.
- [29] Cochet R., Lois de charge des fines particules (submicroniques). Etudes théoriques - Contrôles récents. Spectres de particule. Colloque Intern. n° 102: "La physique des forces électrostatiques et leurs applications", pp. 331-338, CNRS, Paris, 1961.
- [30] Masuda S., Proc. 1971 Conf. Electrostat. Soc. Amer. (Albany, NY: Electrostat. Soc. Amer.), p. 27, 1971.
- [31] Lawless P.A., Numerical solution of Laplace's equation and ion current flow by the use of flux-tube/equipotential relaxation. 1989 IEEE-JAS annual meeting, San-Diego, pp. 1999-2006, 1-5th oct., 1989.
- [32] Gooch J.P. & Francis N.L., A theoretically based mathematical model for calculation of electrostatic precipitator performance. Journal of the Air Pollution Control Ass., 25, 2, pp. 108-113, 1975.
- [33] Cristina S. & Feliziani M., Calculation of ionised fields in dc electrostatic precipitators in the presence of dust and electric wind. IEEE Trans. Ind. Appl., IA31,(6), pp. 1446-1451, 1995.

- [34] Meroth A.M., Numerical Electrohydrodynamics in Electrostatic Precipitators. Ph.D. Thesis, Karlsruhe University 1, 1997.
- [35] Hailong PANG, « dépolluissage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (terre) et parefiée (planète mars), thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 2006.
- [36] Egli W. R. & Grumber R., Computation of the charge density distribution in a 3D electric field. 6th Joint EPS-APS Intern. Conf on Phys., pp. 535-541, 1994.
- [37] Houlgreave I.A., Bromley K.S. & Fothergill J.C., A finite element method for modelling 3D field and current distributions in electrostatic precipitators with electrodes of any shape. Proceedings of 6th International Conference on electrostatic Precipitation, Budapest, pp. 154-159, 1996.
- [38] Goo J.H. & Lee I.W., Monte-Carlo simulation of turbulent deposition of charged particles in a plate-plate electrostatic precipitator. Aerosol Science and Technology, 25, (1), pp. 31 - 45, 1996.
- [39] Gallimberti L, Gazzani A., Tromboni U., Lami E., Mattachini F. & Trebbi G., Physical simulation of particle migration in ESP. Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on electrostatic Precipitation, Budapest, pp. 452-459, 1996.
- [40] Adamiak K., Adaptive approach to finite element modelling of corona fields. IEEE Trans. Ind. Appl., IA30, (2), pp. 387-393, 1994.
- [41] Medlin A.J., Electrohydrodynamic Modelling of Fine Particle Collection in Electrostatic Precipitators. Ph. D. Thesis, University of New South Wales, 1998.
- [42] McDonald J.R., A mathematical model of electrostatic precipitators. Southern Research Institute, Alabama, EPA report 680022114, 1976.
- [43] McDonald J.R, Smith W.B. & Spencer H.W., A mathematical model for calculating electrical conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices. Journal Applied Physics, 48, 6, pp. 2231-2243, 1978.
- [44] Belinda Whelband, Influence of Coal Blending on Electrostatic Precipitator Performance at Tarong Power Station, University of Queensland, 1999.
- [45] A. Vincent, « Conception et simulation d'un réacteur fil-cylindre à décharge couronne avec barrière diélectrique adapté au traitement des oxydes d'azote dans des effluents marqués par un isotope », thèse de doctorat en Génie Des Procèdes et Haute Technologie, Université Paris VI Pierre et Marie CURIE, 2002.
- [46] C.Mimouni « etude et réalisation d'un banc expérimental de précipitation électrostatique de fumée » thèse de magistere d'état en électrotechnique, Université de Sidi Bel Abbés, pp. 33-45, novembre 2006.