

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2020

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Electrotechnique industrielle

Par :

Mr : GUEBAZ Ibrahim.

Mr : FACI Djamel.

Sujet

**Simulation des trajectoires des particules polluantes
dans un précipitateur électrostatique de type fil-cylindre
axisymétrique.**

Soutenu le septembre 2020 devant le jury composé de

Président :	Mr. SOLTANE BENALLOU Abdelkader.	MAA	Université de Mostaganem.
Examineur :	Mr. BEKADDOUR BENATIA Mostefa.	MAA	Université de ESG2E d'Oran.
Encadreur :	Mr. BARDADI BENDAHA Mourad.	MAA	Université de Mostaganem.

Année Universitaire 2019/2020

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur Dr. BARDADI BENDAHA Mourad ; pour le suivi continuuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.

Ensuite, je tiens à remercier Mlle. OUALID Imène Doctorante à l'Université d'Oran (USTOMB) qui ont contribué à ce travail grâce à ses conseils Valeur ; surtout la partie de simulation.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département Génie électrique qui a contribué à notre formation. Par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.

Que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail soient assurées de nos plus sincères remerciements.

Nous souhaitons associer à ce travail nos familles qui m'ont soutenu, nos parents qui ont permis de faire ces études. Nous souhaitons leurs dédier ce travail. Aussi à nos frères et nos sœurs.

Encore un grand MERCI.

الحمد والشكر لله.

Sommaire

SOMMAIRE

<i>Sommaire</i>	I
<i>Liste des figures</i>	IV
<i>Liste des tableaux</i>	VI
<i>Liste de référence bibliographie</i>	83
<i>Introduction générale</i>	1

Chapitre I : Généralités sur le précipitateur électrostatique

I.1 Introduction	3
I.2 Généralités sur La pollution Particulaire	3
I.2.1 La pollution atmosphérique	3
I.2.1.1 Les polluants	3
I.2.1.2 Les particules	4
I.2.1.3 Taille des particules (PM)	5
I. 3 Les différents procédés et techniques de traitement (épuration des gaz pollués) des effluents gazeux	5
I.4 Les électrofiltres (précipitateurs électrostatiques)	6
I.4.1 Historique	6
I.4.2 Principes de l'électrofiltration	6
I.4.3 Différents types d'électrofiltres.	7
I.4.3.1 Les électrofiltres à un seul étage	8
I.4.3.2 Les électrofiltres à double étage	9
I.4.3.3 Les électrofiltres humides	10
I.4.3.4 précipitateur électrostatique humide de type tubulaire	11
I.4.3.5 Précipitateur électrostatique de type électrode mobile (MEEP)	12
I.4.3.6 Précipitateur électrostatique de tube rotatif	13
I.4.4 La décharge couronne	15
I.4.4.1. En Polarité négative	16
I.4.4.2 En polarité positive	16
I.5.Applications des précipitateurs industriels	17
I.6 .Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique	17
I.6.1 Avantages des précipitateurs électrostatiques	18
I.6.2 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques	18
I.7 Nouvelles technologies des précepteurs électrostatiques	18
I.7.1.Exemple : précepteurs électrostatiques de cimenterie	18
I.7.2.Système de contrôle ESP	20
I.7.3.Caractéristiques et fonctions essentielles	21
I.7.4 .Equipment auxiliaire	21
I.7.4.1 l'isolateur	21
I.7.5 ESP processus Transport de particules de poussière	22
I.7.6.Schéma de Principe d'un transformateur-redresseur HT	23
I.7.6.1.Principe de base	25
I.8 Aperçu sur le marché mondial des précipitateurs électrostatiques	26

Sommaire

I.8.1.Principaux acteurs du secteur précipitateurs électrostatiques	27
I.9 Conclusion	28
 <i>Chapitre II .manipulation de particules en suspension dans un gaz au sein d'un précipitateur électrostatiques</i> 	
II.1 Introduction	30
II .2 Force de Coulomb	30
II .3 Force diélectrophorétique	31
II .3 Mécanismes de charge des particules	32
II.3.1 Charge « naturelle » par attachement des ions	32
II.3.2 Triboélectrisation	33
II.3.3 La charge par champ	34
II.3.4 Charge par diffusion	34
II.4. 4La charge mixte	35
II.5 Collecte de particules	35
II.5.1 Précipitation électrostatique	36
II.5.2 Efficacité de collecte	36
II.5.3 Vitesse de migration	37
II.5.4 Modèle laminaire	39
II.5.5 Modèle de Deutsch	40
II.6 Phénomènes détériorant l'efficacité de collecte	42
II.6.1 Effet de la résistivité apparente sur les performances de l'électrofiltre	42
II.6.2 Le ré-entraînement de particules	45
II.6.3 Le back corona	46
II.6.4 L'extinction de la décharge par la charge d'espace	47
II.6.5 Influence de la nature et de la taille des particules	47
II.7 conclusion	48
 <i>Chapitre III. Simulation et optimisation d'un précipitateur électrostatiques</i> 	
III.1 introduction	50
III .2 Introduction sur le logiciel Comsol Multiphysics et ces modules	50
III .2 .1 Plan de décisions et de construction	51
III.2.2 Méthode des éléments finis	52
III.3 Vue global du logiciel	53
III.3.1 Menu principale de COMSOL :	53
III.3.2 Définition des paramètres globaux et création de la géométrie	55
III.3.3 Ajouté des propriétés du matériau composant la plaque collectrice et le fil émissive	56
III .3.4 Ajout des conditions frontières	57
III. 3.5 Maillage	58
III.3.6 Simulation et traitement des résultats	58
III.4 Simulation fil-plaque 2D	62
III.4.1 Distribution de potentiel électrique	62
III.4.2 Distribution champ électrique	64
III.4.3 Distribution des lignes champ électrique	65
III-5 Simulation file/cylindre 2D	72

Sommaire

III-5.1. Distribution du potentiel électrique dans la zone de la décharge	72
III.5.2. La distribution du champ électrique	75
III.5.3 distributions des lignes de champ électrique	77
III.6 Simulation file cylindre 3D	78
III.6.1 Electrode tube sans pointe	78
III.6.2 Electrode tube 2point	79
III.6.3 Electrode tube 4pointe	80
III.6.4 Comparaison de champ entre les trois géométries	81
III.7 Conclusion	81
Conclusion général	82
Références bibliographiques	83

Figure I.1 : Les diverses origines de pollutions.	4
Figure I. 2 : Taille des particules (PM).	5
Figure I.4.1 Principe de la précipitation électrostatique dans les électrofiltres page.	6
Figure I.4.2 : Electrofiltre à un seul étage fil-cylindre à gauche, fil-plaque à droite.	8
Figure I.4.3 : Electrofiltre à deux étages fil-plaque.	9
Figure I.4.4 : Différentes géométries d'électrofiltres améliorés.	10
Figure I.4.5 : exemple filtre électrostatique humide.	11
Figure I.4.6 (a) : ESP humide de type tubulaire.	12
Figure I.4.6 (b) : ESP humides utilisant des plaques parallèles.	12
Figure I.4.7 ESP de type électrode mobile (MEEP)	13
Figure I.4.8 (a) les composants de ESP à tube rotatif	14
Figure I.4.8(b) ESP à tube rotatif pour four de cuisson à électrodes Hitachi	14
Figure I.4.9 présentation Schématique d'une décharge Couronne en géométrie fil-cylindre	15
Figure I.4.10 : Courbe caractéristique courant-tension d'un électrofiltre	16
Figure 1.7.1 : Procès de production de clinquer de ciment	19
Figure 1.7.2 : compositions ESP d'un certain nombre de groupes	19
Figure I.7.3.Système de contrôle ESP	20
Figure I.7.4. Equipment auxiliaire d'ESP	21
Figure .I.7.5 : les isolateur arbre moteur et isolateur électrode de décharge.	22
Figure I.7.6 : ESP processus de Transport de particules de poussière	22
Figure I.7.7 : Les électrodes de Décharge	23
Figure I.7.8. : Électrode de décharge en test réel	24
Figure I.7.9 : Schéma de Principe d'un transformateur-redresseur HT	24
Figure I.7.10 formes d'onde ESP	25
Figure I.7.11 Aperçu sur le marché mondial des ESP	26
Figure I.7.12 Diagramme part marcher mondiale par application	27
Figure I.7.13 logo des fabricants	28
Figure I.7.14 pourcentage de marche	28
Figure II.1 Variations de Fe et FDEP en fonction du diamètre de la sphère diélectrique Au rayon $r = 1,5$ cm du système fil-cylindre coaxiaux ($\epsilon_s = 4,5 \epsilon_0$, $\epsilon_m = \epsilon_0$).	32
Figure II.2 : variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules.	38
Figure II.3 : l'évolution de la charge des particules donnée par le modèle de Cochet en fonction du diamètre des particules 1-13	38
Figure II.4 : l'évolution de la vitesse de migration w_{th} en fonction du diamètre des particules	39
Figure II.5 : Trajectoires des particules en écoulement uniforme laminaire	39
Figure II.6 : représentation du modelé de Deutsch	40
Figure II .8 Effets de D_p sur l'efficacité fractionnaire pour un précipitateur électrostatique selon [41]	45
Figure II.9 : Effet de la résistivité apparente sur l'efficacité de collecte [42].	45
Figure II.10 – Illustration du phénomène de ré-entraînement anormal des particules [46].	46
Figure (III.1) : Représentation du domaine discrétisé Ω et d'un de ses sous-domaines	52
Figure (III.2) : Interface utilisateur de COMSOL 5.3	53
Figure (III.3) : Ajout de paramètres au modèle.	55
Figure (III.4) : Paramètres du modèle.	55
Figure (III.5) : Construction de la géométrie.	56
Figure (III.6) : Matériau composant fil et plaque	57
Figure (III.7) : Air occupe le vide	57

Figure (III .8) : Conditions frontières de fil	57
Figure (III.9) : Condition frontière de plaque	57
Figure(III.10) : État du modèle après le maillage.	58
Figure(III.11) : Compilation de modèle	58
Figure (III.12) : Progression de simulation.	59
Figure(III.13) : Distribution potentiel électrique.	59
Figure (III.14) : Distribution Champ électrique.	60
Figure (III.15) : modification du paramètre de sortie	60
Figure (III.16) : Ligne de champ électrique.	61
Figure (III.17) : le contour.	61
Figure (III.18) déférent géométrie pour simulation	62
Figure (III.19) : Géométrie et maillage simulation fil plaque	62
Figure (III.20) : Distribution 2-D du potentiel électrique pour les différentes tensions Appliquées Vdc= 10 kV a 45 kV	63
Figure (III.21) Distribution 2-D du champ électrique pour les différentes tensions appliquées Vdc= 10 kV-45 kV	65
Figure (III.22) distributions des lignes de champ électrique	66
Figure (III.22) : valeur de champ électrique au point milieu a 25kv	67
Figure (III.23) : coupe droite dans l'espace inter-électrodes	68
Figure (III.24) : Profil du potentiel électrique tout au long de la distance inter-électrode	68
Figure (III.25) : effet de pointe Sur le coin.	69
Figure (III.26) : Profil de potentiel jusqu'à point milieu.	70
Figure (III.27) : Représente le champ électrique sur la même coupe que la figure (III.26).	70
Figure (III.28) : Profil de potentiel jusqu'à point milieu.	71
Figure (III.29) : Profil de champ électrique jusqu'à point milieu	71
Figure(III.30) : Représentation 2D de la configuration file/cylindre	72
Figure.III.31 : Distribution 2-D du potentiel électrique pour les différentes Tensions appliquées	73
Figure (III. 32) : Profil du potentiel électrique tout au long de la distance inter-électrodes	74
Figure (III.33) : Profil de potentiel jusqu'à point milieu	75
Figure.III.34 : Distribution 2-D du champ électrique pour les différentes tensions appliquees Vdc= 10kV-45 Kv	76
Figure (III.35) : Profil de champ électrique jusqu'à point milieu pour déférent tensions	77
Figure III.36 : Distributions des lignes de champ électrique	78
FigureIII.37 : Forme de l'électrode tube sans pointe	78
Figure III 38 (a) : Géométrie 3D	80
Figures III. 38 (b) : Maillage	80
Figure III 38 (c) : Distribution de ligne de champ électrique électrode sans pointe	80
FigureIII.39 : Forme de l'électrode tube 2 pointes	81
FigureII.40 (a) : Géométrie 3d	81
FigureIII.40 (b) : Maillage	81
Figure III.40(d) effet de point sue les Pointes de l'électrode	81
FigureIII.40 (d) : Distribution de ligne de champ électrique électrode 2 pointes	81
FigureIII.41 .Forme d'électrodes tube 4 pointes	82
FigureII.41 (a) : Géométrie 3d	82
FigureIII.41 (b) maillage	82
Figure III.41(d) : Effet de point sue les Pointes de l'électrode	82
Figure III.41(d) : Distribution de ligne de champ électrique électrode 4 pointe	82

Tableau I.1: Courant et tensions avec 2 angles d'amorçage différents.	26
Tableau III.1 : valeur de potentiel et champ électrique	67
Tableau III.2 : valeur de potentiel et champ électrique	69
Tableau III. 3 : valeurs de potentiel au point milieu	75
Tableau III. 4 : valeurs de champ électrique la électrode et au point milieu pour les différentes tensions appliquées	77
Tableau III.5 : valeurs de champ électrique pour différentes type d'électrodes	81

Introduction général.

Les gaz d'échappement de différentes industries contiennent des particules de poussière de différents précipités chimiques nocifs pour l'environnement. Les précipitateurs électrostatiques sont très souvent utilisés dans les industries pour filtrer leurs gaz d'échappement et empêcher la pollution de l'atmosphère. Ces filtres électrostatiques sont très efficaces dans leur travail. Elles utilisent la force du champ électrique « la force du coulomb » pour séparer la poussière aux gaz d'échappement.

Les particules reçoivent une charge électrique en les forçant à traverser une couronne, une région dans laquelle circulent des ions gazeux. Le champ électrique qui force les particules chargées vers les parois provient d'électrodes de charge maintenues à haute tension au centre de la voie d'écoulement

Une fois que les particules sont sur les électrodes collectrices, ils doivent être retirés de la surface sans les réentraîner dans le flux gazeux. Ceci est généralement accompli en frappant les détacher des assiettes ; permettant à la couche de particules collectée de glisser vers le bas dans une trémie d'où ils sont évacués.

La conception d'un précipitateur électrostatique nécessite la connaissance de son principe de fonctionnement et des problèmes qui se posent souvent lors de son fonctionnement. Cette thèse est l'étude du fonctionnement et des problèmes des précipitateurs électrostatiques

Cette thèse comprend trois chapitres. Le premier chapitre présente les connaissances de base sur la pollution particulaire concernant les caractéristiques physicochimiques et les sources de pollution, les différents procédés et technique de traitement de cette pollution et lequel des plus importants est ESP, ainsi qu'une brève description sur les nouvelles technologies Pour ce dernier. Nous vous mis au courant sur Aperçu sur le marché mondial des précipitateurs électrostatiques

Le second chapitre nous avons parlé sur manipulation de particules en suspension dans un gaz au sein d'un précipitateur électrostatiques l'un des importants le Mécanismes de charge des particules, Phénomènes détériorant l'efficacité de collecte

La troisième partie est consacrée à la simulation. Le logiciel industriel Comsol Multiphysics est utilisé pour la simulation. Un vu globale sur Comsol Multiphysics est fourni en chapitre III de ce rapport de thèse qui fournit des informations sur l'utilisation de ce logiciel. Le potentiel électrique et le champ électrique d'un ESP sont modélisés dans un état idéal, quand aucun gaz ne circule à travers l'ESP

Chapitre I :
Généralités sur la précipitateurs électrostatique

I.1 Introduction :

La croissance économique rapide et l'industrialisation ont conduit à des réductions de la qualité de l'air ambiant de nombreux procédés industriels, de production d'énergie et chimiques produisent des particules fines indésirables en raison de leur fonctionnement des recherches sont en cours pour réduire les émissions des cheminées aux niveaux prescrits, et également pour répondre aux normes strictes de qualité de l'air à l'avenir. Précipitateur électrostatique (ESP, Electro Static Precipitator en anglais) est le dispositif le plus couramment utilisé pour réduire particulaires entraînés des gaz d'échappement. Bien que le précipitateur électrostatique (ESP) soit utilisé commercialement depuis plus de 60 ans, une compréhension approfondie de son fonctionnement reste sujet de débat.

Parallèlement à son acceptation commerciale rapide, la technologie a rapidement développé sa forme et ses caractéristiques de conception qui restent inchangées à ce jour.

Un précipitateur électrostatique est un dispositif antipollution atmosphérique qui élimine les particules d'un gaz en circulation avec des forces électriques

Le processus de précipitation consiste à 1) chargé des particules au moyen des ions produits dans une décharge corona, 2) séparant les particules chargées du flux de gaz dans un champ électrique imposé, 3) recueillir les particules sur une surface mise à la terre, et 4) éliminer les particules collectées soit par les faire tomber ou les laver avec de l'eau.

I.2 Généralités sur La pollution Particulaire :

I.2.1 La pollution atmosphérique :

1.2.1.1 Les polluants :

Le milieu naturel, façonné par notre écosystème et par l'intervention humaine, est formé par le biotope et la biocénose dont l'air fait partie. La préservation de ce milieu dans lequel l'homme évolue, est devenue un enjeu majeur dans ce siècle.

Selon l'organisation mondiale de la santé, « par pollution de l'air, on entend la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère ». La pollution peut être d'origines anthropiques ou naturelles. Elle est classifiable en deux catégories :

- Les polluants primaires provenant de sources connues,
- Les polluants secondaires issus de l'interaction entre les polluants et les éléments constituant l'atmosphère ou entre polluants primaires directement.

Ces polluants atmosphériques sont nombreux. Il existe notamment : les particules en suspension (Ps), le dioxyde de Soufre (SO₂), le dioxyde d'Azote (NO₂), l'ozone (O₃), les composés organiques volatils (COV), le monoxyde de Carbone (CO), les métaux toxiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les autres polluants.

I.2.1.2 Les particules :

Le terme de particules est employé pour définir les aérosols qui sont créés par la dispersion dans un milieu gazeux (ex : air) de solides (ex poussières) et de liquides de natures minérales ou organiques. Dans cette catégorie, il existe donc les poussières, les fumées, les suies, les brumes, les brouillards... Leurs origines sont diverses (Figure I.1). Elles peuvent être dues à des phénomènes naturels comme les éruptions volcaniques, les feux de forêts, le pollen, les érosions éoliennes ou d'origines anthropiques comme les combustions et les procédés industriels (sidérurgie, cimenterie...).

Certaines de ces matières particulaires (PM), majoritairement les poussières, demeurent en suspension dans l'atmosphère (vitesse de chute négligeable).



Naturelles primaires

- Poussier éoliennes
- Feux de foret
- Sels marins
- Volcans
- Aérosols organique

Conversion gaz particule

- DMS H₂S
- SO₂ Volcanique
- NO_z Biogéniques
- COV biogéniques
- NH₃ en NH₄

Anthropiques primaires

- Poussier industriel
- Suies
- Combinions
de biomasse
- Poussières éoliennes

Conversion gaz particule

- SO₂ (Chaudières, usines)
- NO_z (Trafic routier, usines)
- COV biogéniques
- COV anthropiques

Figure I.1 : Les diverses origines de la pollution.

I.2.1.3 Taille des particules (PM) :

La taille des particules en suspension s'étend sur plusieurs ordres de grandeur. Cette étendue est illustrée dans la Figure I.2. Cette taille joue un rôle important dans leur physicochimie et donc dans leur impact sur l'environnement et la santé.

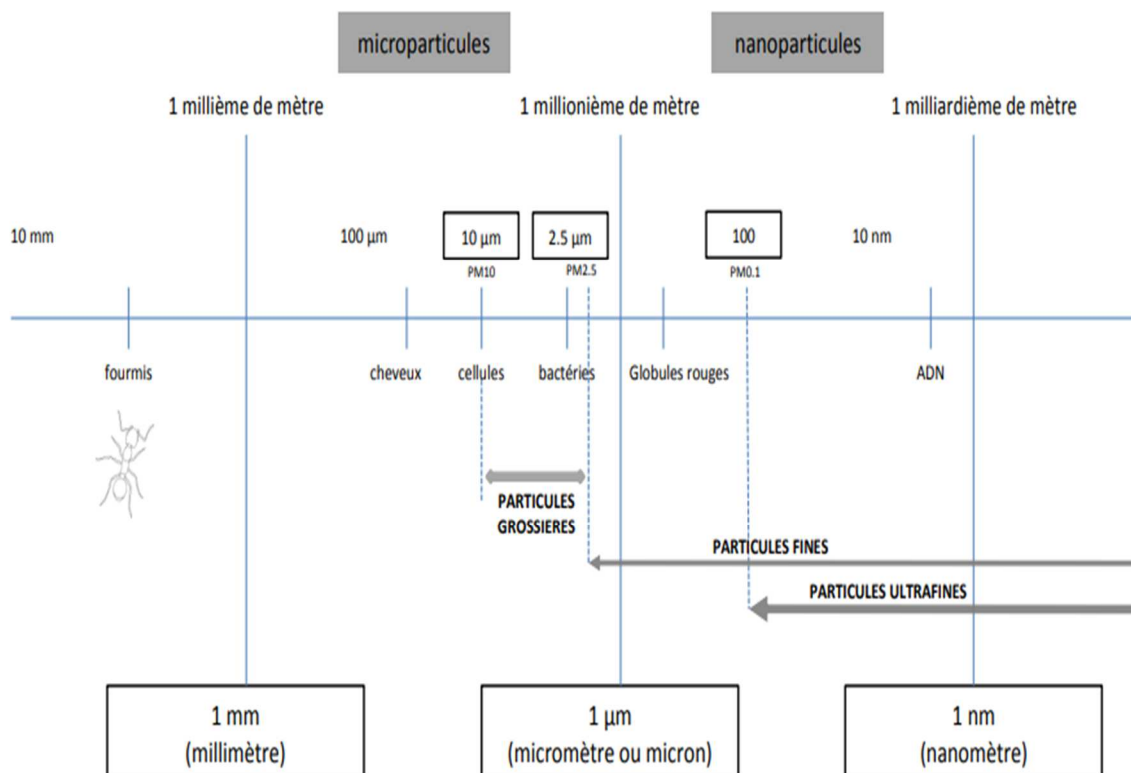


Figure I. 2 : Taille des particules (PM)

I. 3 Les différents procédés et techniques de traitement (épuration des gaz pollué) des effluents gazeux :

Les systèmes de filtration Selon la nature du gaz, la taille ou la concentration des particules, il existe deux grandes familles de systèmes d'élimination de poussières :

- les filtres humides, qui regroupent les laveurs venturils, les épurateurs centrifuges, les électrofiltres humides...
- les filtres secs, comme par exemple les filtres céramiques, les filtres à haute efficacité (HEPA) ou encore les précipitateurs électrostatiques secs, objet de cette thèse [1]

I.4 Les électrofiltres (précipitateurs électrostatiques)

I.4.1 Historique

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

De nombreux rapports sur les effets électrostatiques voient le jour au début du 19^{ème} siècle.

Le premier appareil expérimental utilisant ces phénomènes est issu des travaux de Hohlfeld (Cité par [2]). Il a montré qu'une étincelle électrique pouvait dissiper la fumée contenue dans une bouteille. En 1850, Guitard avait observé qu'une décharge couronne produisait les mêmes effets sur la fumée. En 1883, Lodge propose de purifier l'air dans les salles des fumeurs et dans les tunnels. Ce n'est qu'en 1907 que le premier électrofiltre conçu par Cottrell fonctionna de manière efficace. Le premier précipitateur électrostatique est né et depuis, de nombreux travaux sont consacrés aux électrofiltres.

I.4.2 Principes de l'électrofiltration

L'électrofiltration ou précipitateur électrostatique est basée sur trois étapes fondamentales (Figure «I.4.1») :

- Charger électriquement les particules en suspension dans les gaz à traiter ;
- Collecter les particules chargées sous l'action d'un champ électrique ;
- Récupérer les particules collectées.

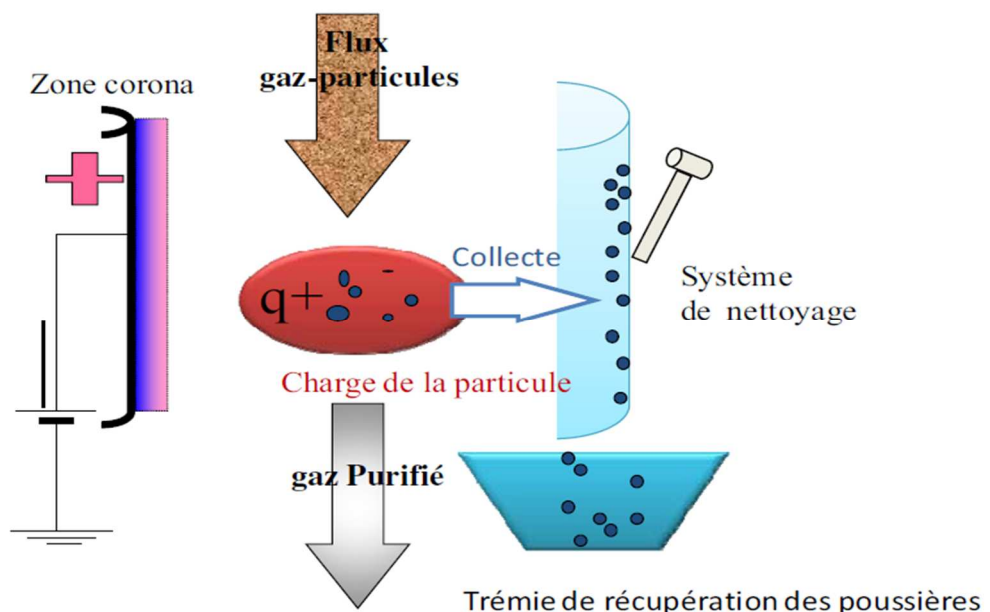


Figure I.4.1 : Principe de la précipitation électrostatique dans les électrofiltres.

Dans les électrofiltres les plus simples, fil-cylindre concentriques, un potentiel électrique très élevé est appliqué au fil, appelé électrode émettrice, il est placé dans l'axe du cylindre, appelé électrode collectrice, qui lui est relié à la terre.

Le gaz chargé en particules traverse l'espace inter-électrodes. Une décharge couronne se forme autour du fil, les ions qui ont la même polarité que le fil, sont repoussés vers le cylindre. Une zone bi-ionisée se forme à proximité du fil, tandis que la quasi-totalité de l'espace inter-électrodes est rempli par les ions mono polaires.

Ces ions sont attirés vers les particules en raison de la distorsion locale du champ électrique, causée par la différence de permittivité relative entre les particules et le gaz.

Les particules captent les ions positifs et se chargent jusqu'à atteindre une charge limite lorsque le champ électrique de répulsion, dû aux charges acquises, est équilibré par le champ électrique de distorsion.

Les particules chargées positivement subissent alors une force due au champ électrique qui les conduit vers l'électrode reliée à la terre.

Les particules isolantes ne peuvent pas perdre leur charge au contact de cette électrode. Elles adhèrent ainsi à la paroi jusqu'à ce qu'elles soient enlevées par lavage, grattage ou frappe. Les particules conductrices, quant à elles, perdent leur charge au contact de la paroi et se chargent en polarité opposée.

La précipitation électrique n'est donc utilisable que pour des particules relativement isolantes.

Il existe donc un intervalle de résistivité dans lequel doivent se situer les particules qu'on veut traiter par électrofiltration. Des études théoriques et expérimentales ont montré que la conductivité maximum requise est de l'ordre de 10^{-6} S/m [9] et la résistivité maximum ne doit pas dépasser $10^{12} \Omega \text{ m}$

Afin d'obtenir des voltages élevés sans création d'arcs lors du dimensionnement d'un électrofiltre, de nombreux paramètres sont pris en considération : la résistivité, la granulométrie et la nature des poussières, la concentration en poussières, la vitesse, la température et la composition de l'effluent gazeux et la tension appliquée aux électrodes.

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

I.4.3 Différents types d'électrofiltres :

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

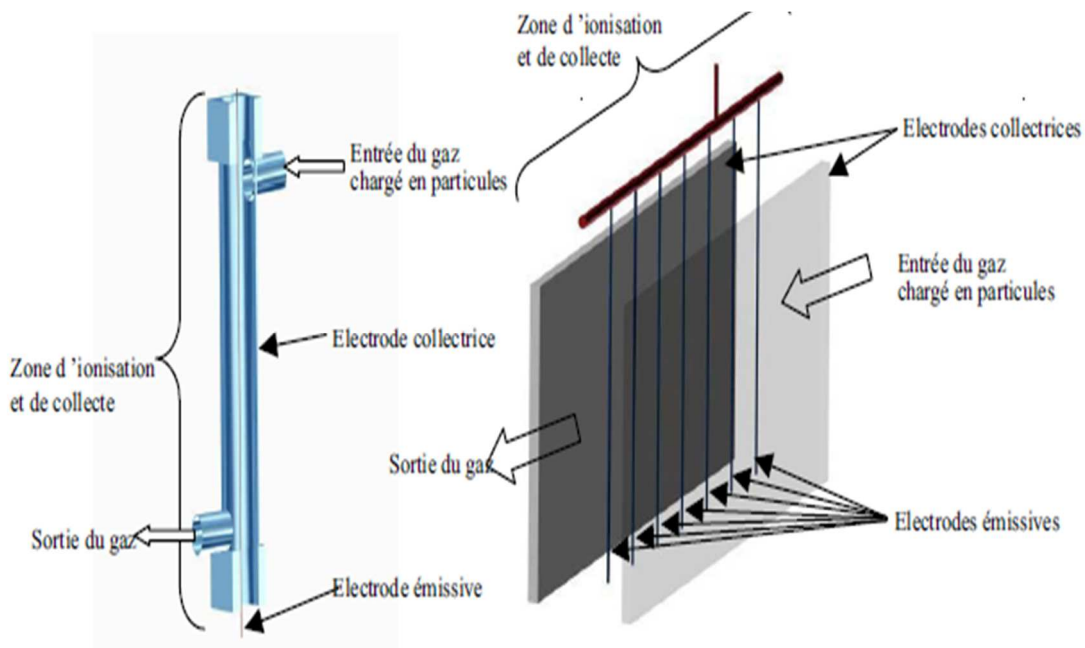
- Electrofiltres sec
 - Les électrofiltres à un seul étage,
 - Les électrofiltres à double étage,
- Les électrofiltres humides

I.4.3.1 Les électrofiltres à un seul étage :

Les électrofiltres à un seul étage sont les plus utilisés dans les applications industrielles. L'ionisation et la collecte des particules sont réalisées simultanément tout au long de l'électrofiltre (Figure I.4.2)

Les électrofiltres à un seul étage n'occasionnent que de faibles pertes de charge (50-100 Pa) et sont donc recommandés pour traiter les grands débits gazeux (80 000 m³/h par exemple). Le rendement d'épuration peut atteindre 99 % pour des particules fines de l'ordre du micromètre.

Le minimum d'efficacité apparaît pour des poussières de diamètre égal à 0,2 µm. Cependant le coût d'investissement est très élevé et la dépense électrique est de l'ordre de 1 Wh/m³ traité. Les électrofiltres secs comportent les éléments suivants : un caisson, des électrodes émissives (fils ou grille) et collectrices (plaques), des systèmes de battage des électrodes et d'extraction des poussières (souvent un frappage périodique des électrodes par marteaux), un dispositif de répartition des gaz. Leur efficacité est maximale pour des vitesses d'écoulement de l'ordre 1 à 4 m/s (en général des grilles ou des chicanes placées en amont) et une alimentation haute tension (de 30 à 120 kV pour un courant de 20 à 600 mA). Un précipitateur électrostatique peut être alimenté par une haute tension de polarité positive ou négative. Cependant, pour une configuration d'électrofiltre donnée, la valeur électrique de l'amorçage de la décharge couronne, ainsi que celle de claquage entre les électrodes sont plus grandes en polarité négative qu'en polarité positive. C'est la raison pour laquelle la polarité négative est souvent utilisée dans les électrofiltres en un seul étage.



I.4.2 : Electrofiltre à un seul étage fil-cylindre à gauche, fil-plaque à droite

I.4.3.2 Les électrofiltres à double étage

Les filtres électrostatiques à double étage sont équipés d'un premier étage ionisant dans lequel les particules sont chargées suivi d'un filtre électrostatique proprement dit. Ils ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement dans des

installations de conditionnement d'air. Les deux étages d'un tel filtre sont alimentés séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de haute tension.

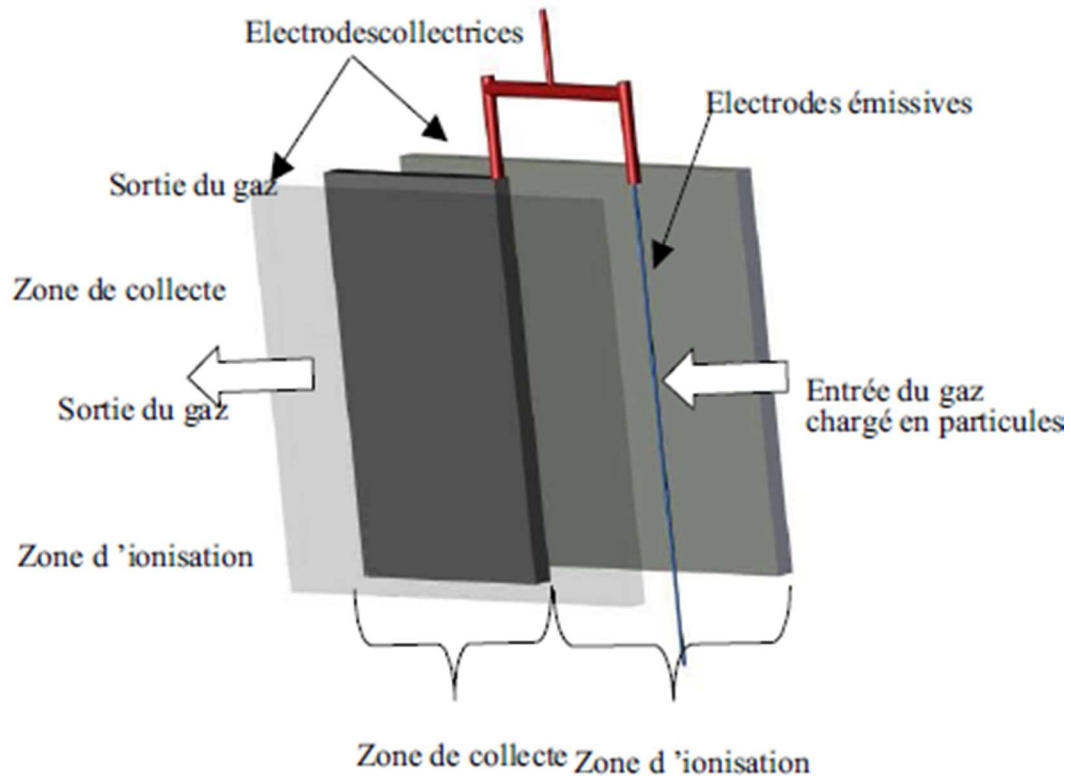


Figure I.4.3 : Electrofiltre à deux étages fil-plaque

Le premier étage constitue la zone d'ionisation, comporte des électrodes de décharge en forme de fil ou de tube. Les électrodes de collecte peuvent être soit des plaques parallèles, soit des cylindres coaxiaux. La figure I.4.3, présente une vue schématique d'un électrofiltre à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme de plaques. Ce type de précipitateur ne dispose pas de système de battage par frappe car le risque de ré envol des poussières est trop important. La récupération des particules se fait souvent par lavage des électrodes. Afin d'avoir une production faible d'ozone, une haute tension de polarité positive est appliquée aux électrodes ionisantes

Les recherches réalisées dans le domaine de la filtration électrostatique ont abouti au développement de géométries de plus en plus complexes. Certains chercheurs [3] – [4] travaillent, par exemple, sur des électrofiltres dits par décharges à barrière diélectrique (DBD) [5] – [6]. Cela consiste à interposer un matériau diélectrique entre les deux électrodes, afin de limiter la formation d'arcs électriques néfastes au fonctionnement (Figure I.4.4 (a))

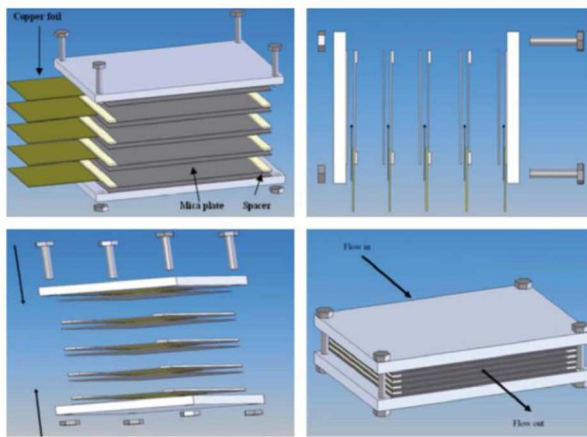
Dans la même idée, des travaux portent sur des électrofiltres recouverts d'une surface super-hydrophobe [7] ou encore de carbone [8], qui permettent d'améliorer leurs performances

D'autres études consistent à utiliser des ondes acoustiques couplées au champ électrique afin d'optimiser l'élimination des particules fines. Ce procédé n'influence pas la caractéristique courant / tension des décharges électriques mises en jeu, mais va modifier la trajectoire des particules en favorisant leur agglomération par collision et donc leur capture

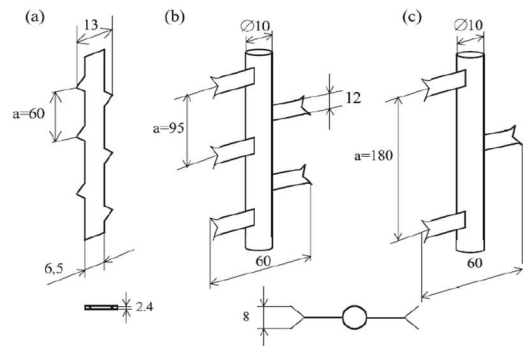
[9], [10] (Figure I.4.4.-(d)). Certains chercheurs ont opté pour l'ajout d'un champ magnétique qui favorise la collecte des particules submicroniques [11] (Figure I.4.4(c)).

Dans un souci constant d'améliorer les précipitateurs électrostatiques, des études ont également porté sur la géométrie des électrodes. Par exemple, il est envisageable de modifier l'espacement entre les plans [12], d'ajouter des pointes sur l'électrode émissive [13], ou de modifier le nombre de pointes (Figure I.4.4-(b)) [31].

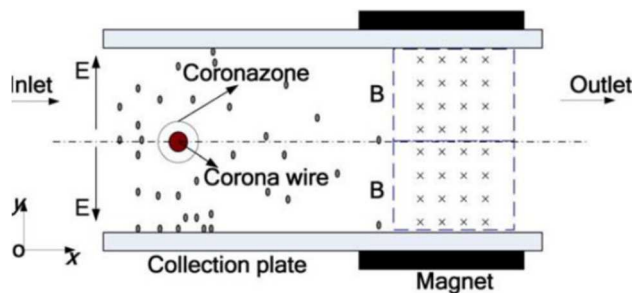
(a) ESP avec des DBD



(b) Electrode émissive



(c) Champ magnétique couplé à l'électrofiltre



(d) Ondes acoustiques ajoutées à l'ESP

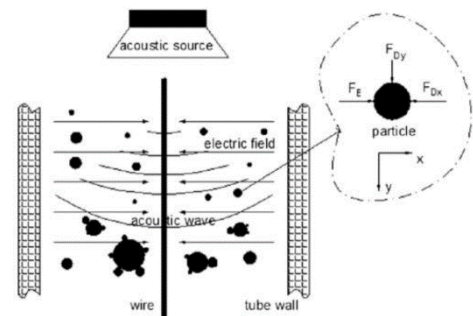


Figure I.4.4 Différentes géométries d'électrofiltres améliorés

I.4.3.3 Les électrofiltres humides

Le principe de base montré sur la figure (I.4.5). Est similaire à électrofiltres secs. La différence provient de la présence d'un film humide ruisselant sur l'électrode collectrice L'effluent à traiter est saturé en vapeur d'eau qui permet, par l'intermédiaire de la condensation d'augmenter la taille des particules.

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

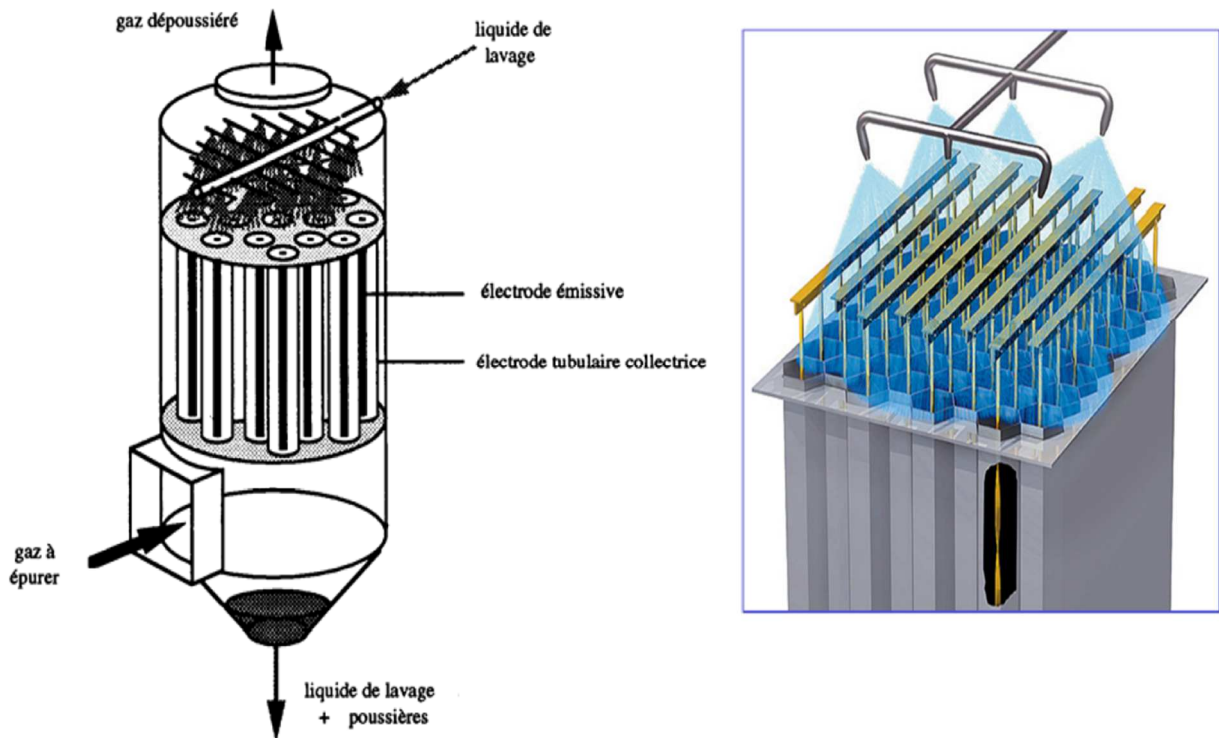


Figure I.4.5 : exemple filtre électrostatique humide [18]

I.4.3.4 précipitateur électrostatique humide de type tubulaire

Le précipitateur électrostatique humide de type tubulaire Figure I.4.6 (a) utilise des électrodes cylindriques pour l'électrode collectrice. Le précipitateur électrostatique humide de type tubulaire a une structure étanche à l'air et résistante à la pression qui est utilisée pour le captage de poussières provenant de gaz explosifs, de gaz combustibles, de gaz toxiques et de gaz saturés d'humidité générés par les industries du gaz, de la sidérurgie et des produits chimiques. Industrie

Les précipitateurs électrostatiques humides utilisant des plaques parallèles pour les électrodes de collecte sont utilisés dans les systèmes de collecte de poussières humides pour de grandes quantités de gaz de procédé. L'utilisation d'une buse spéciale pour les plaques collectrices permet de former un film d'eau uniforme avec une petite quantité d'eau. En sélectionnant des matériaux efficaces en fonction des propriétés du gaz de traitement et de la poussière, le précipitateur électrostatique de type humide peut être adapté à diverses applications

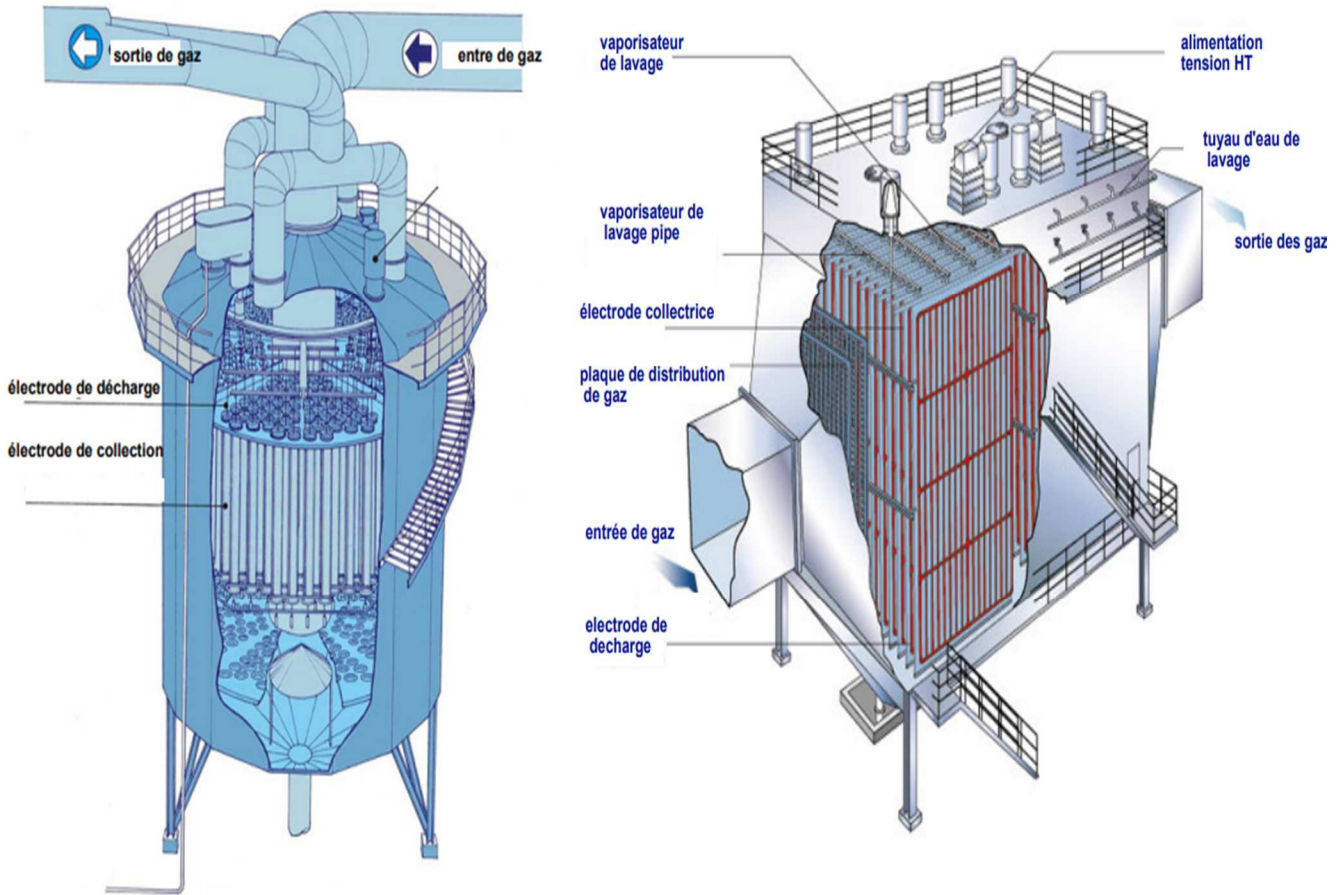


Figure I.4.6 (a) ESP humide de type tubulaire

figure I.4.6 (a) ESP humides utilisant des plaques parallèles

I.4.3.5 Précipitateur électrostatique de type électrode mobile (MEEP)

L'électrode collectrice, divisée en plaques rectangulaires en forme de bande, est déplacée lentement vers le rouleau inférieur par la rotation de la roue motrice. La poussière chargée électrostatiquement est capturée sur les plaques collectrices dans la zone de collecte de poussière. Ensuite, la poussière collée est enlevée par deux brosses rotatives positionnées de chaque côté des plaques collectrices. Les brosses rotatives tournent dans le sens opposé du mouvement de la plaque collectrice, empêchant ainsi le réentraînement de la poussière et son envoi dans la trémie.

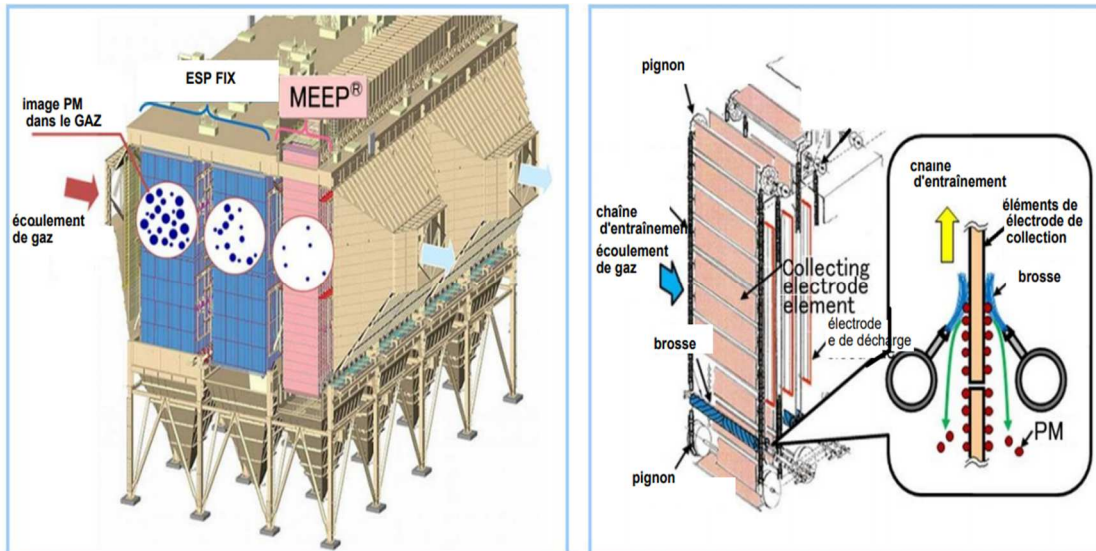
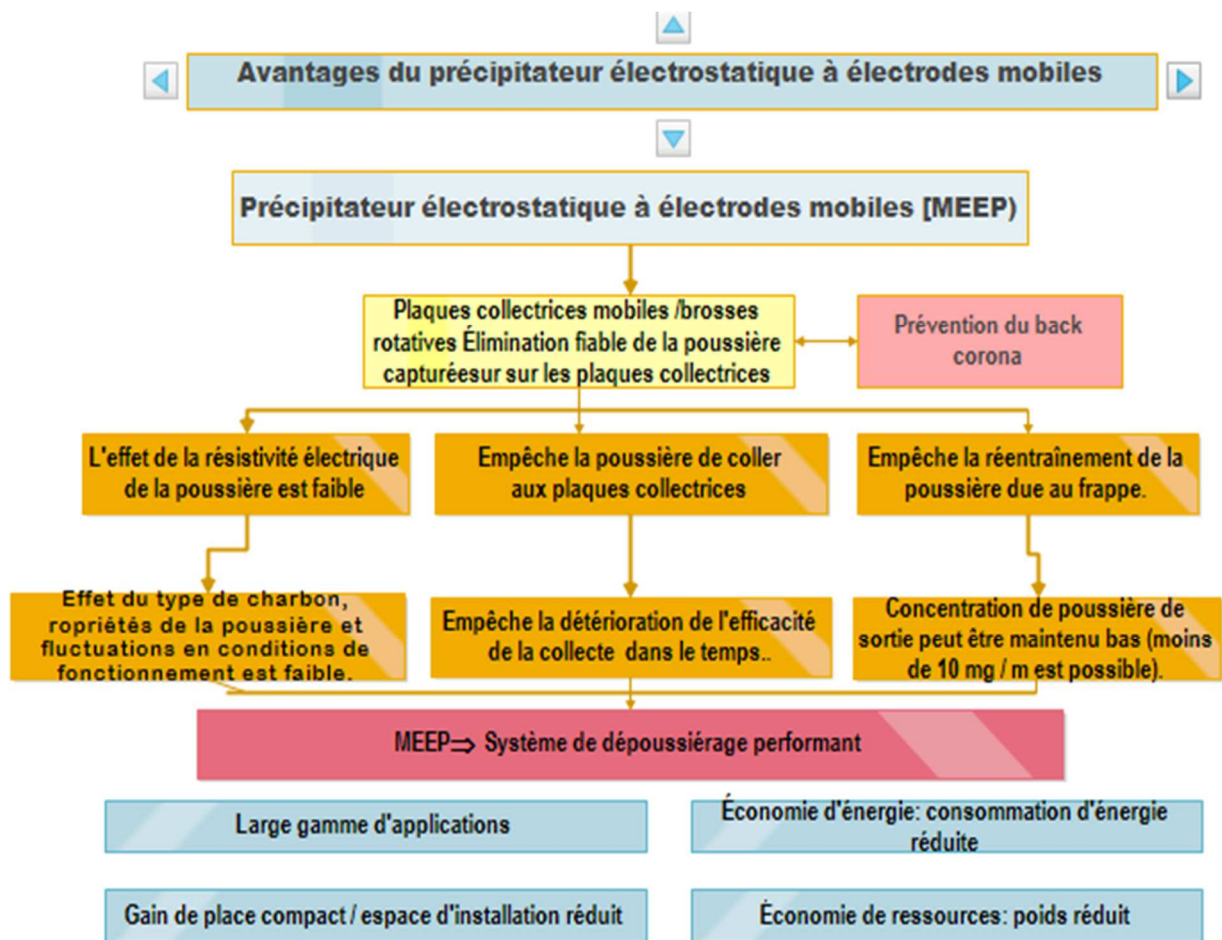


Figure I.4.7 ESP de type électrode mobile (MEEP)



I.4.3.6 Précipitateur électrostatique de tube rotatif

Le précipitateur électrostatique de type à tube rotatif est utilisé pour collecter le goudron de haute viscosité généré par les fours de cuisson à électrodes de carbone, ou par les procédés de fabrication

de coke, d'asphalte ou de matériaux réfractaires, ou les brouillards d'huile générés lors des processus de fabrication de caoutchouc, de pneus, etc.

L'électrode collectrice de poussière du précipitateur électrostatique du type à tube rotatif est combinée avec l'enveloppe extérieure et tourne lentement sous la forme d'un four rotatif.

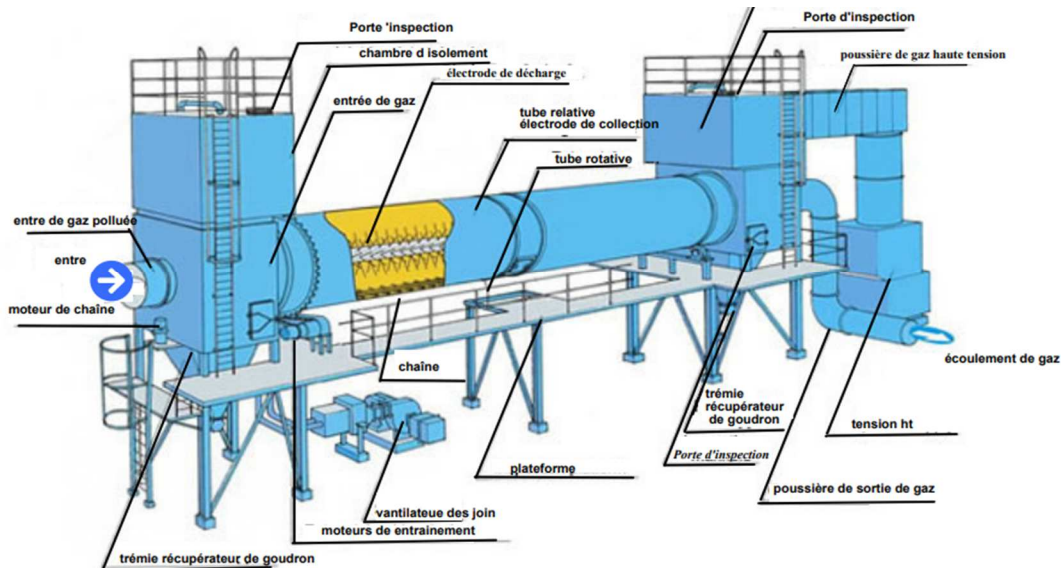


Figure I.4.8 (a) les composants de ESP à tube rotatif



Figure I.4.8 (b) ESP à tube rotatif pour four de cuisson à électrodes Hitachi

Les racleurs installés sur les surfaces internes du tube retirent en continu le goudron de haute viscosité qui s'accumule sur l'électrode de collecte sur toute la surface du tube. Par conséquent, cela convient à la collecte des aérosols difficiles à traiter avec un précipitateur électrostatique de type sec classique

I.4.4. La décharge couronne

L'effet couronne représente l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure, porté à une tension suffisante.

Ce phénomène a été découvert au début du XX^{ème} siècle. En effet, les premières expériences sur les fils conducteurs minces portés à des tensions suffisantes, ont montré qu'il se forme autour d'eux une gaine lumineuse, de couleur bleu-violet, dont l'épaisseur augmente avec la tension. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, universellement employée, de décharge couronne ou effet corona.

Cette décharge a lieu généralement dans un milieu gazeux, soumis à des champs électriques intenses mais non disruptifs, séparant deux électrodes. Les géométries les plus courantes sont les suivantes : pointe-plan, fil-cylindre, fil-plan, sphère-plan, etc. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique qui dépendent de trois classes de paramètres :

- Électriques tels que la nature et la polarité de la tension appliquée à l'électrode active.
- Géométriques tels que la forme, et les dimensions des électrodes ainsi que la distance inter-électrodes.
- Physiques, liés à la nature du gaz inter-électrodes, à sa densité, à sa pression, à sa

Température et à sa teneur en vapeur d'eau et en impuretés. Le (ou les) matériau(x) constituant les électrodes jouent également un rôle non négligeable. L'une des géométries les plus simples d'électrodes pour l'étude de la décharge couronne en laboratoire est le système d'électrodes cylindriques (fil-cylindre concentriques) car on connaît les solutions analytiques de toutes les équations régissant les phénomènes électriques, de transport des particules et d'écoulement. En outre, ce système offre une symétrie de révolution permettant de simplifier l'expression du champ électrostatique existant entre les électrodes et de mener une étude simple en vue de l'élaboration d'une simulation numérique de la décharge couronne. Comme l'indique la Figure I.4.9,

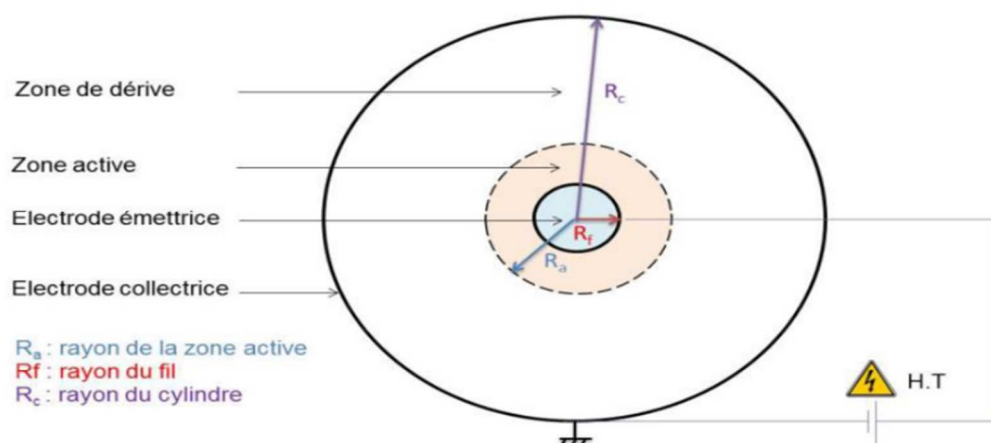


Figure I.4.9 présentation Schématique d'une décharge Couronne en géométrie fil-cylindre
Ce système consiste en une électrode cylindrique de faible rayon, dite active, mise sous haute tension continue. Elle est centrée dans l'axe d'un cylindre conducteur de rayon r_c et de longueur L , mis à la terre.

L'application d'une tension continue suffisante sur le fil, amorce une décharge couronne. De ce fait, l'espace inter-électrodes se trouve réparti en deux zones : la première, voisine du fil où le champ électrique et son gradient sont intenses. Dans cette zone l'ionisation du gaz peut avoir lieu, on l'appelle la zone active. La seconde zone, le champ électrique n'y est plus suffisant pour produire une ionisation supplémentaire, elle constitue la zone de dérive des ions et des électrons. La zone de dérive constitue une décharge d'espace mono-polaire. Les deux zones actives et de dérive, sont délimitées par une frontière circulaire de rayon R_0 dit rayon critique d'ionisation.

I.4.4.1. En Polarité négative.

Dans le cas d'une décharge négative, l'avalanche électronique se développe depuis la cathode vers l'extérieur. Elle s'arrête au rayon critique R_0 (figure I.4.9). Les électrons fournis par l'avalanche s'attachent aux molécules neutres de la zone de dérive pour former des ions négatifs. Les ions positifs, se concentrent au voisinage immédiat de l'électrode active. Cette décharge présente l'inconvénient de produire des molécules d'ozone

I.4.4.2 En polarité positive

Pour une décharge positive, les avalanches électroniques prennent naissance dans zone interne au rayon R_0 critique et se développent vers la cathode. Au-delà du rayon critique il ne reste qu'un nuage d'ions positifs. Ces derniers beaucoup moins mobiles (400 fois moins mobiles que les électrons [16] ne peuvent générer une ionisation supplémentaire.

En polarité positive, les ions produisent une charge d'espace importante dans la zone de fort champ électrostatique, il en résulte un claquage plus rapide ainsi pour un gaz donné, la décharge électrique négative est la plus stable [17,18]

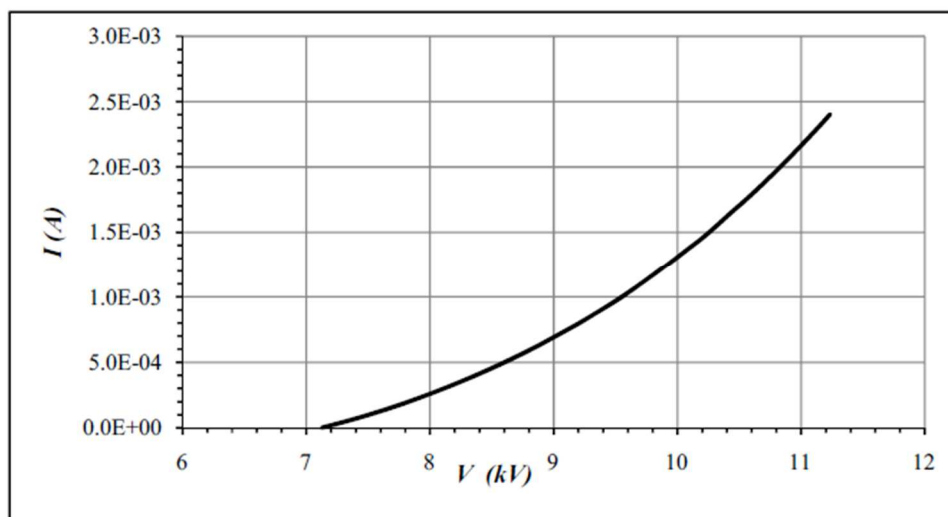


Figure I.4.10 : Courbe caractéristique courant-tension d'un électrofiltre

I.5.Applications des précipitateurs industriels

La précipitation électrostatique est un procédé couramment utilisé pour éliminer les particules polluantes solides (telles que la poussière et les cendres) contenues dans les gaz rejetés dans l'atmosphère. Des applications importantes des précipitateurs électrostatiques dans les industries sont énumérées ci – dessous :

1. Cimenteries

- a) Nettoyage des gaz d'échappement des fours de ciment.
- b) Récupération des fines particules des fours.

2. Moulins à pulpe et à papier

- a) Récupération des fumées de soude dans les moulins à pulpe de Kraft.

3. Aciéries

- a) Nettoyage des gaz des hauts fourneaux afin de pouvoir les utiliser comme Combustible.
- b) Elimination des goudrons du gaz des fours à coke.
- c) Nettoyage des gaz de foyers ouverts et des fourneaux électriques

4. Industrie de métaux non ferreux

- a) Récupération des matières valorisables des gaz d'échappement.
- b) Collecte de la brume acide.

5. Industrie chimique

- a) Collecte des brumes d'acides sulfurique et phosphorique.
- b) Nettoyage de divers types de gaz, tels que l'hydrogène, le CO₂ et le SO₂.
- c) Elimination des fines particules du phosphore élémentaire en état vapeur.

6. Industrie pétrolière

- a) Récupération des fines particules des catalyseurs.

7. Industrie du carbone noir

- a) Agglomération et collecte du carbone noir.

8. Centrales électriques

- a) Collecte des cendres volantes des chaudières chauffées à la houille

I.6.Conditions du choix d'un précipitateur électrostatique

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

- Caractéristiques des particules :
 - ✓ Dimension, forme réelles et densité des particules.
 - ✓ Propriétés physico-chimiques : adhésivité, hygroscopie, tendance à l'agglomération, fluidité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicité, etc.
- Caractéristiques du gaz porteur :
 - ✓ Température, pression et humidité.
 - ✓ Propriétés physique : densité, point de rosée des composés condensables, viscosité, conductivité électrique, inflammabilité, toxicités, etc.
- Caractéristique du procédé :
 - ✓ Flux de gaz constant ou variable.

- ✓ Débit volumique gazeux.
- ✓ Concentration des particules.
- ✓ Rendement de captation exigé.
- ✓ Perte de charge permise.
- ✓ Qualité exigée pour les produits.
- ✓ Ca Entretien et continuité du fonctionnement.
- ✓ Sécurité et protection sanitaire.
- ✓ Utilisation finale des substances recueillies. caractéristique de fonctionnement :

I.6.1 Avantages des précipitateurs électrostatiques

- ✓ Les particules aussi petites que $0,1\mu\text{m}$ peuvent être éliminées.
- ✓ Faible coûts de maintenance et de fonctionnement.
- ✓ Faible chute de pression (0,25 à 1,25)
- ✓ Manipulation satisfaisante d'un large volume de gaz à haute température
- ✓ Le temps de traitement est négligeable (0,1 ,10 s).
- ✓ Nettoyage facile en mettant hors service certaines unités
- ✓ Aucune restriction en ce qui concerne l'utilisation de produits chimiques solides liquides ou corrosifs.
- ✓ Filtre lavable, économie, efficacité, préservation de l'environnement Avant que la salissure du filtre devienne trop importante, et pour qu'il continue à assurer la même force d'attraction sur les particules nécessite de le nettoyer. Le filtre électrostatique se lave alors, simplement, avec de l'eau et du détergent

I.6.2 Inconvénients des précipitateurs électrostatiques

- ✓ Coûts d'investissement élevés les précipitateurs électrostatiques ont un coût d'investissement initial élevé, ce qui le rend prohibitif pour les petites industries. Ils sont chers à l'achat et à l'installation.
- ✓ Nécessite un grand espace en plus d'être coûteux, ils nécessitent un grand espace pour être mis en place. Encore une fois, la proposition de valeur pour les petites industries est réduite car elles sont coûteuses et nécessitent beaucoup d'espace pour être mises en place.
- ✓ Pas flexible une fois installés les précipitateurs électrostatiques n'offrent pas la souplesse de fonctionnement. Une fois installé, il est difficile de modifier la capacité de l'ESP ou de le déplacer vers un autre emplacement. Il faut donc bien planifier la capacité, le type et l'emplacement de l'installation de l'ESP.
- ✓ Ils ne peuvent pas être utilisés pour collecter des polluants gazeux un dépoussiéreur électrostatique peut être utilisé pour collecter uniquement des polluants secs et humides et non pour des polluants gazeux. C'est un inconvénient majeur des ESP

I.7.Nouvelles technologies des précepteurs électrostatiques

I.7.1.Exemple : précepteurs électrostatiques de cimenterie

Les évolutions des techniques de dépoussiérage sont poussées par les législations qui contraignent les industriels à mettre en œuvre les techniques les plus efficaces pour les particules fines, et donc à

rechercher des solutions technologiques pour contourner les inconvénients des techniques disponibles actuellement, à savoir leur coût et leur encombrement. Le ESP se trouve à l'aval du processus de production

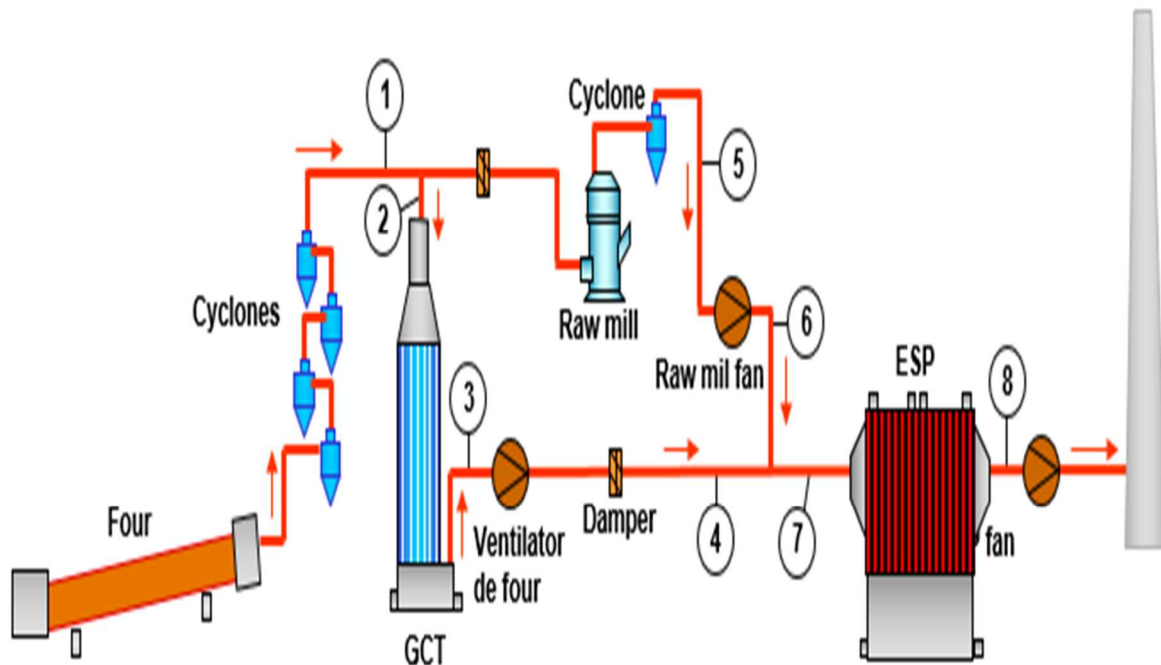


Figure 1.7.1 : Procès de production de clinker de ciment

L'ESP se compose d'un certain nombre de groupes. L'électro filtre est constitué de plaques métalliques verticales de grande dimension entre lesquelles circulent les fumées chargées en poussières. Les plaques sont alternativement reliées à une source électrique continue (pour les plaques émettrices) et à la masse (pour les plaques réceptrices). Le champ électrique qui en résulte exerce sur les poussières chargées

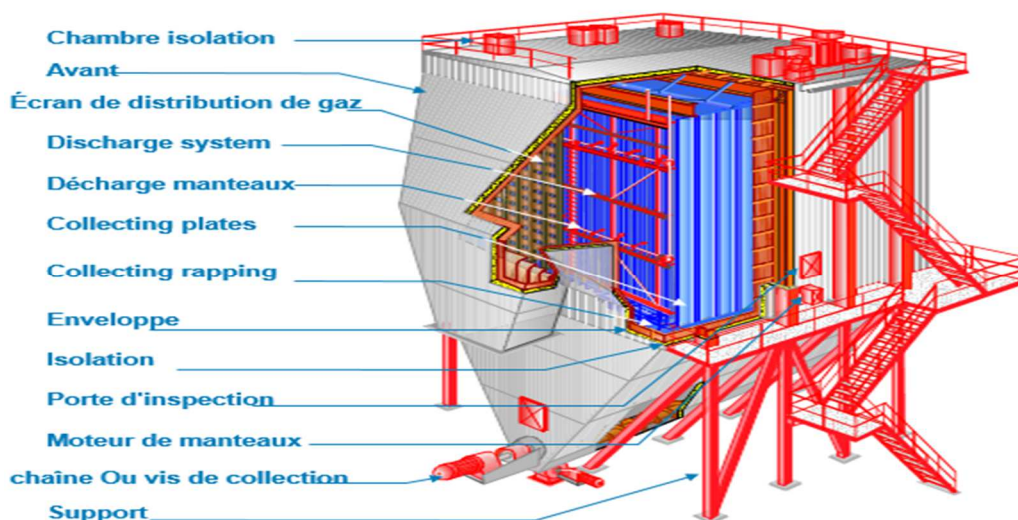


Figure 1.7.2 : compositions ESP d'un certain nombre de groupes

Électriquement une force qui les précipite sur les plaques réceptrices où elles viennent s'accumuler. Des marteaux frappent régulièrement les plaques pour décoller les poussières qui tombent dans des trémies à la base du caisson de l'électrofiltre.

Les effluents gazeux débarrassés des poussières sont évacués par la cheminée via le ventilateur de tirage qui met en dépression la ligne de traitement. Pour éviter les risques de colmatage la trémie et l'ensemble du dispositif d'évacuation doivent être parfaitement bien calorifugés et équipés d'un dispositif de chauffage par cordons électriques, comme pour le filtre à manches.

Le gaz de fumée chargé en poussière entre horizontalement dans le filtre via les déflecteurs de gaz et est divisé de manière uniforme en plusieurs « gaz », qui sont formés par les parois des électrodes collectrices mises à la terre. Au milieu de chacun de ces « gaz » se trouvent des électrodes émettrices, sur lesquelles est présente une tension négative élevée et qui ionisent le gaz par une décharge en couronne. La figure 13 présente les composantes de l'électrofiltre

I.7.2. Système de contrôle ESP

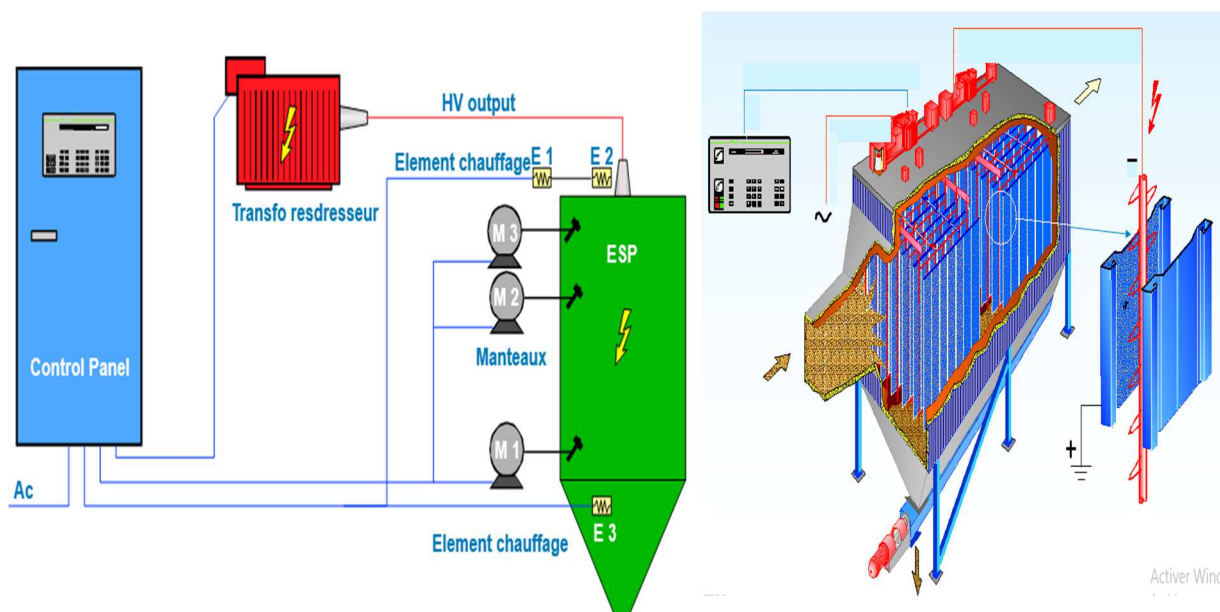


Figure I.7.3 : Système de contrôle ESP

Précipitations en utilisant un contrôle qui gère. Les alimentations modernes à haute tension (HV) basées sur des dispositifs de commutation rapides tels que les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) augmentent les performances de la puissance corona des électrofiltres (ESP), améliorant ainsi le nettoyage des gaz et les performances de l'ESP intègre également la commande intelligente des éléments suivants :

- L'alimentation HT des électrodes de décharge par une unité de transformateur-redresseur T/R
- Les secoueurs ou vibreurs des électrodes ou écrans de nettoyage
- Les radiateurs des isolateurs des supports, des arbres et des trémies de fond

I.7.3. Caractéristiques et fonctions essentielles :

- ✓ Optimisation automatique de la puissance (effet couronne) par :
 - détection du phénomène de contre-émission (« **Back Corona** »),
 - Optimisation du niveau de courant moyen en fonction de la CVC (Current Voltage Characteristic, caractéristique de tension du courant).
- ✓ Commande avancée dans les périodes **transitoires** causées par différents facteurs tels que L'activation fréquente des fonctions d'optimisation Commande adaptative de la fréquence d'étincelles
- ✓ La réduction relative du courant en fonction des étincelles et la commande de fréquence d'étincelles progressive permettent d'optimiser le niveau et la vitesse d'accélération del'ICC.
- ✓ Commande facile de frappe continu.
- ✓ Commande intégrale du groupe CHAUFFAGE.

I.7.4 .Equipment auxiliaire

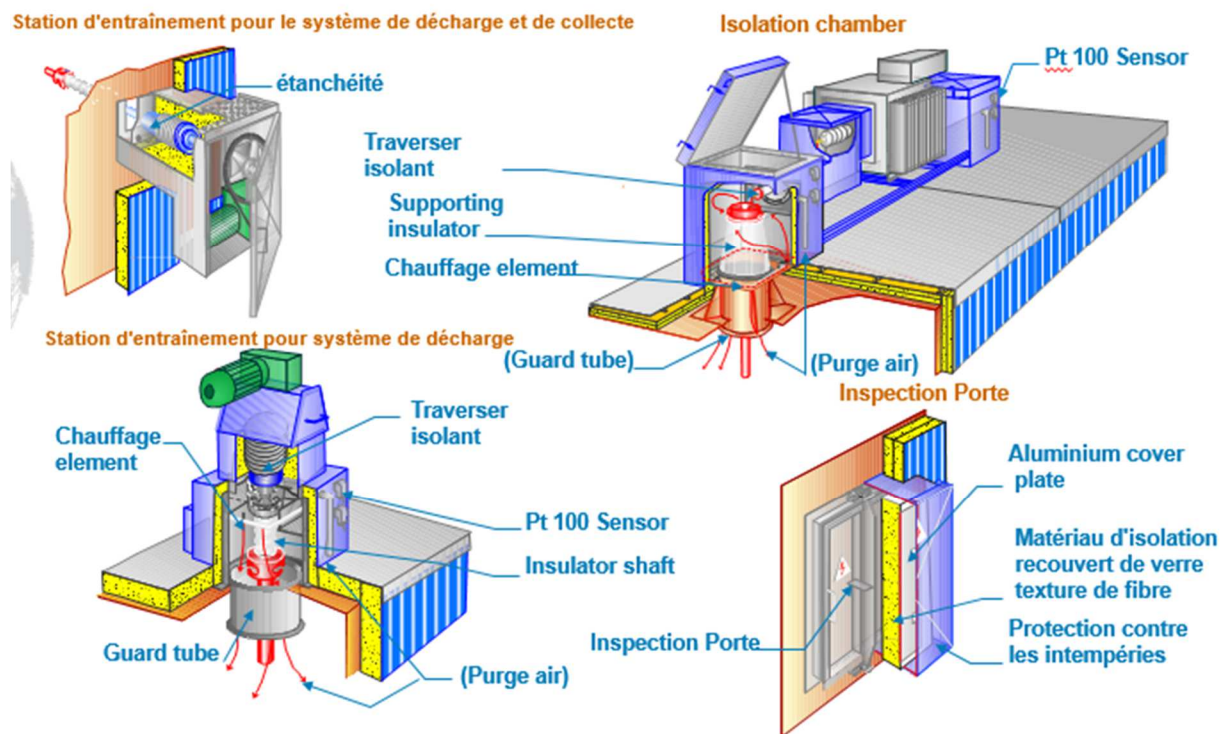


Figure I.7.4 : Equipment auxiliaire de ESP

Les stations d'entraînement, les chambres d'isolateur et les portes d'inspection sont conçues pour un minimum d'entretien dans le respect de la fonction optimale

I.7.4.1. Isolateurs

Les Isolateurs serre a isoler les entre l'enveloppe du ESP et les et les électrodes

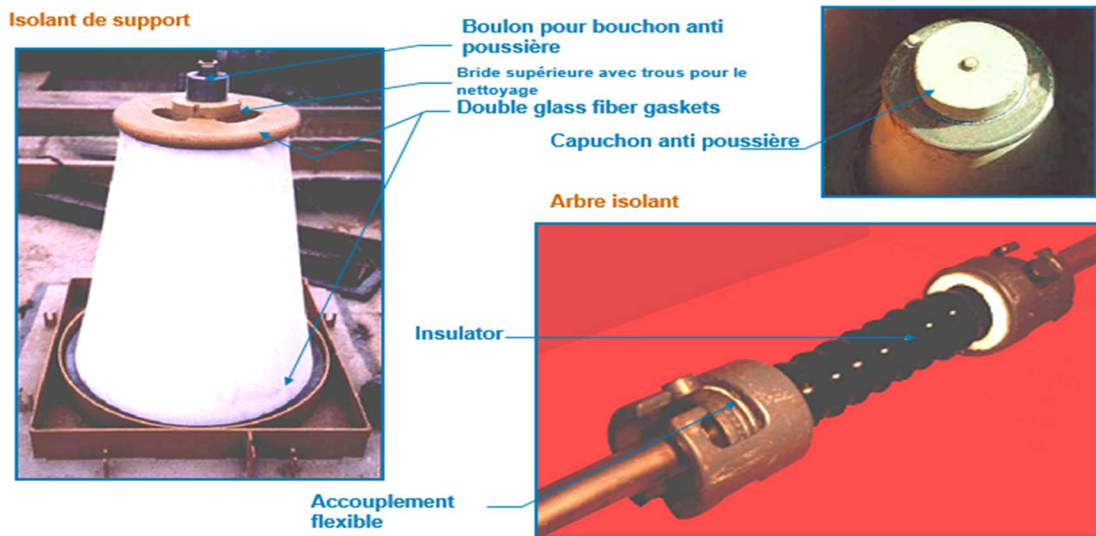


Figure I.7.5 : les isolateur arbre moteur et isolateur électrode de décharge

I.7.5 ESP processus Transport de particules de poussière

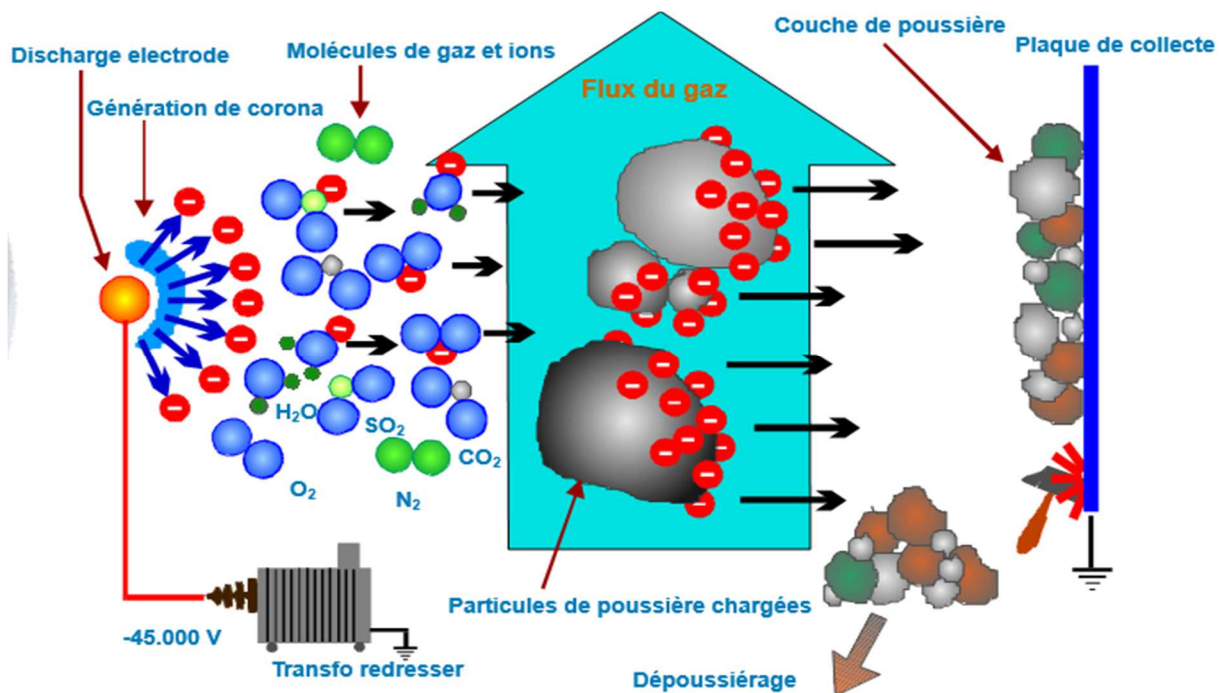


Figure I.7.6 : ESP processus de Transport de particules de poussière

Un électrofiltre, ESP, est un appareil électrique qui utilise des forces électriques pour filtrer les particules de poussière des gaz d'échappement des installations industrielles.

Le principe de fonctionnement d'un précipitateur peut être divisé en 3 étapes fondamentales :

- Charge électrique des particules de poussière

- Extraction des particules au moyen d'un champ électrique
- Enlèvement de la poussière collectée sur les plaques

Un ESP industriel comporte un certain nombre de conduits à travers lesquels passent les gaz. Les conduits sont formés par des rangées parallèles de plaques collectrices montées verticalement et par un nombre d'électrodes de décharge suspendues verticalement entre les plaques collectrices.

La section horizontale d'un seul conduit illustre la manière dont les plaques collectrices et les électrodes de décharge sont reliées à l'alimentation, traditionnellement un transformateur-redresseur et une régulatrice haute tension, comme illustré

ici. Figure I.7.7

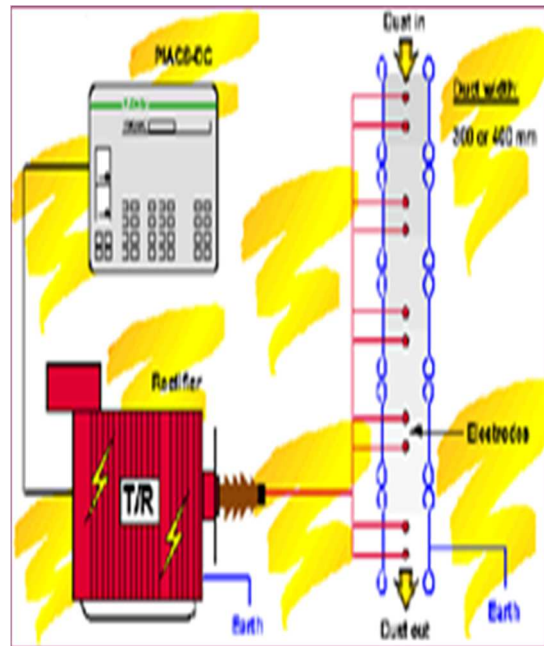


Figure I.7.7 : Les électrodes de Décharge

Les électrodes de décharge sont des fils minces ou des tuyaux munis de fils soudés, tous deux d'un diamètre de 1,5 à 3 mm. Les plaques collectrices sont longues et fines, spécialement conçues pour des lamelles d'une épaisseur de 1 à 1,5 mm. L'image ci-dessous montre le principe de base du fonctionnement de l'ESP.

La tension négative élevée appliquée aux électrodes de décharge isolées crée un champ électrique fort entre les électrodes de décharge et les plaques collectrices mises à la terre.

La plus grande résistance se produit à proximité des électrodes de décharge. Au fur et à mesure que la tension augmente, un claquage électrique du gaz à proximité de la surface de l'électrode se produit. Ce claquage appelé Corona, apparaît comme une lueur bleuâtre s'étendant dans le gaz à une courte distance au-delà de la surface des électrodes de décharge. La couronne produit un grand nombre d'ions gazeux ; les ions positifs étant immédiatement attirés par les électrodes de décharge tandis que les ions négatifs migrent vers les plaques collectrices positives. Les ions de gaz négatifs transporteront tous les deux le courant de précipitation, qui maintient le champ électrique et ajoute une charge négative aux particules de poussière. Les particules chargées négativement migrent vers les plaques collectrices auxquelles elles adhèrent pendant leur évacuation. Lorsqu'une certaine quantité de poussière s'est accumulée à la surface des plaques collectrices, elle tombe dans la trémie ESP et est extraite.

Électrode de décharge

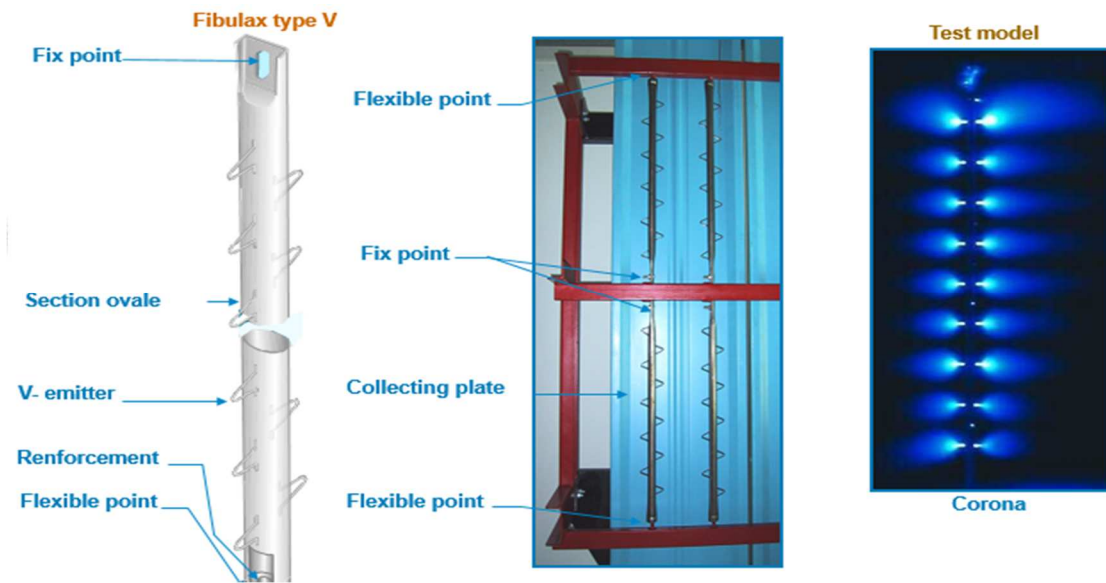
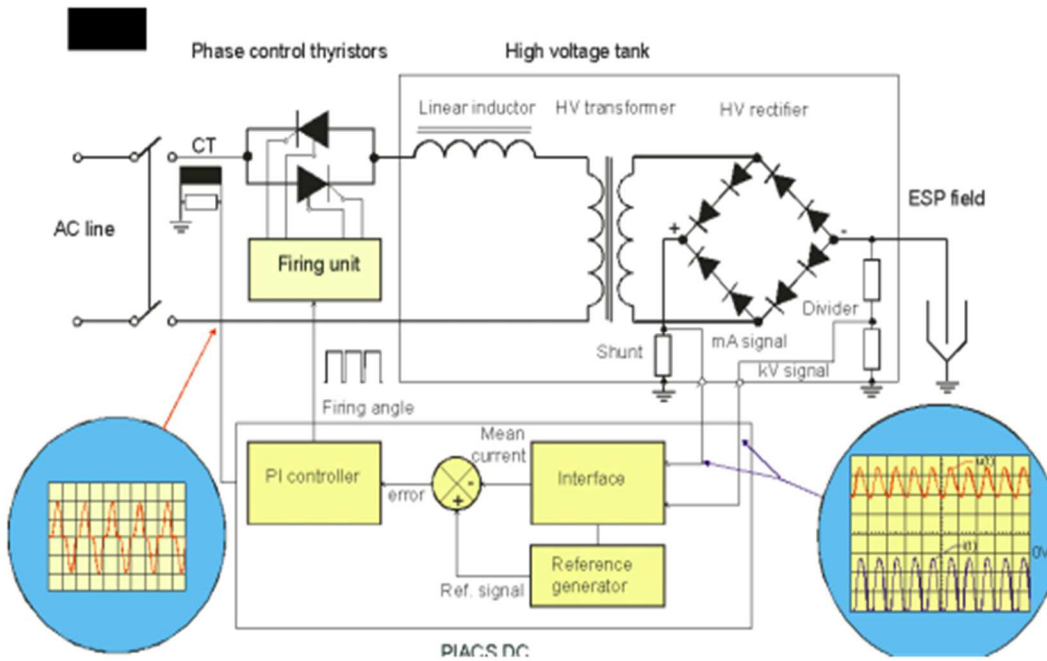


Figure I.7.8. : Électrode de décharge en test réel

I.7.6. Schéma de Principe d'un transformateur-redresseur HT

La filtration des particules représente un travail mécanique et l'énergie requise est fournie par une alimentation HT. Il s'agit d'un transformateur-redresseur immergé dans un réservoir d'huile interconnecté avec un contrôle de phase à thyristor monté dans une armoire de commande comme indiqué ci-dessous



I.7.9 : Schéma de Principe d'un transformateur-redresseur HT

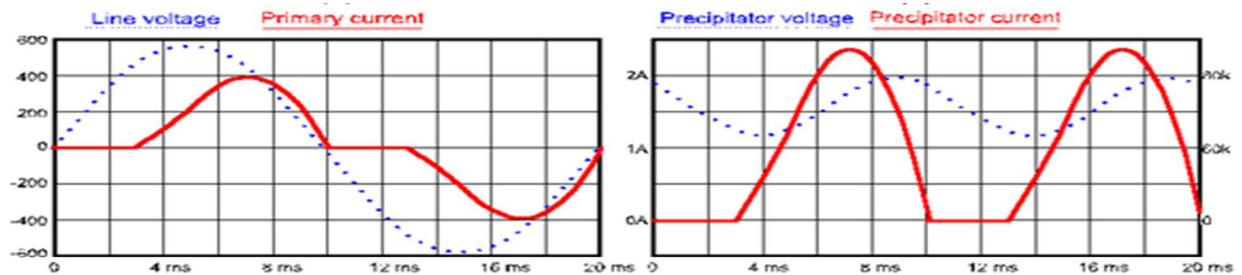
I.7.6.1.Principe de base !

La tension de sortie de l'alimentation, appliquée à une section de bus de précipitation, est contrôlée en faisant varier l'angle de d'amorçage des thyristors, c'est-à-dire en retardant ou en avançant l'instant de déclenchement par rapport au passage par zéro de la tension de ligne.

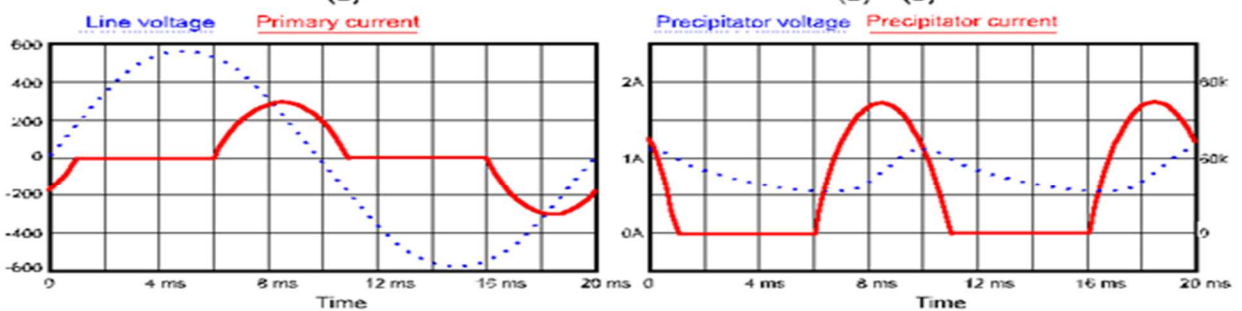
Le principe est illustré à la figure I.7.9 .pour une alimentation 50 Hz. Ceci montre les formes d'onde obtenues lorsque les thyristors sont amorçages à un instant égal à 3 ms après le passage à zéro de la tension secteur. La figure I.7.9.(a) montre la tension de ligne et le courant primaire tandis que la figure 1.7.9.(b) montre le courant de précipitation et la valeur absolue de la tension du précipitateur.

La tension du précipitateur a une ondulation considérable en raison de la capacité inhérente de la section de bus et du fait qu'aucun filtrage n'est utilisé. La tension de précipitation est caractérisée par :

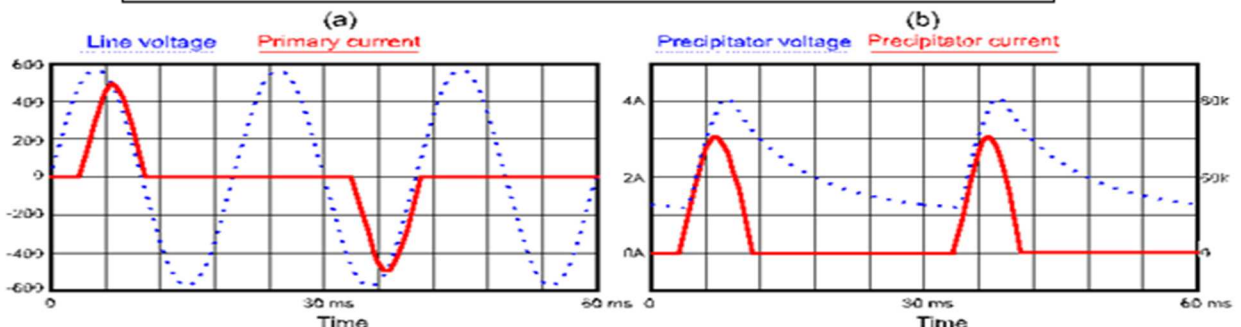
- valeur crête (pic de V_o)
- valeur moyenne (V_o moyen)
- valeur minimale (V_o min)



Forme de tension et courent avec temps amorçages 3 ms



Forme de tension et courent avec temps amorçages 6 ms



Forme de tension et courent avec Énergisation intermittente

Figure I.7.10 formes d'onde ESP

Les niveaux de courant et de tension peuvent être diminués en retardant l'angle d'amorçage α_0 , ce qui entraîne une tension de précipitation inférieure à celle illustrée à la figure 21. Ces formes d'onde correspondent à un temps de l'amorçage de 6 ms après le passage par zéro. Le tableau 1 indique les valeurs des quantités les plus pertinentes pour les deux angles de déclenchement. On voit clairement que la tension de précipitation et le courant de précipitation sont tous deux réduits lorsqu'on utilise un allumage retardé

Temps	t_o [ms]	3	6
Courant primaire	$I_{p\ rms}$ [A]	223	145
Courant de précipitation	$I_{o\ rms}$ [mA]	1400	920
	$I_{o\ peak}$ [mA]	2350	1800
	$I_{o\ mean}$ [mA]	1030	576
Tension de précipitation α_0	$V_{o\ peak}$ [kV]	78	47
	$V_{o\ mean}$ [kV]	61	35
	$V_{o\ min}$ [kV]	46	23

Tableau I.1: Courant et tensions avec 2 angles d'amorçage différents.

I.8 Aperçu sur le marché mondial des précipitateurs électrostatiques

Selon ce rapport, le marché mondial des précipitateurs électrostatiques représentait 11,78 milliards de dollars en 2017 et devrait atteindre 19,76 milliards de dollars en 2025, avec un taux de croissance annuel composé de 5,3% au cours de la période de prévision. Les normes internationales de plus en plus strictes en matière de réduction des émissions atmosphériques, associées à une industrialisation rapide dans les économies émergentes, sont les principaux moteurs de la croissance du marché. Cependant, l'émergence de différentes sources d'énergie alternatives et renouvelables pour les centrales électriques freine la croissance du marché.

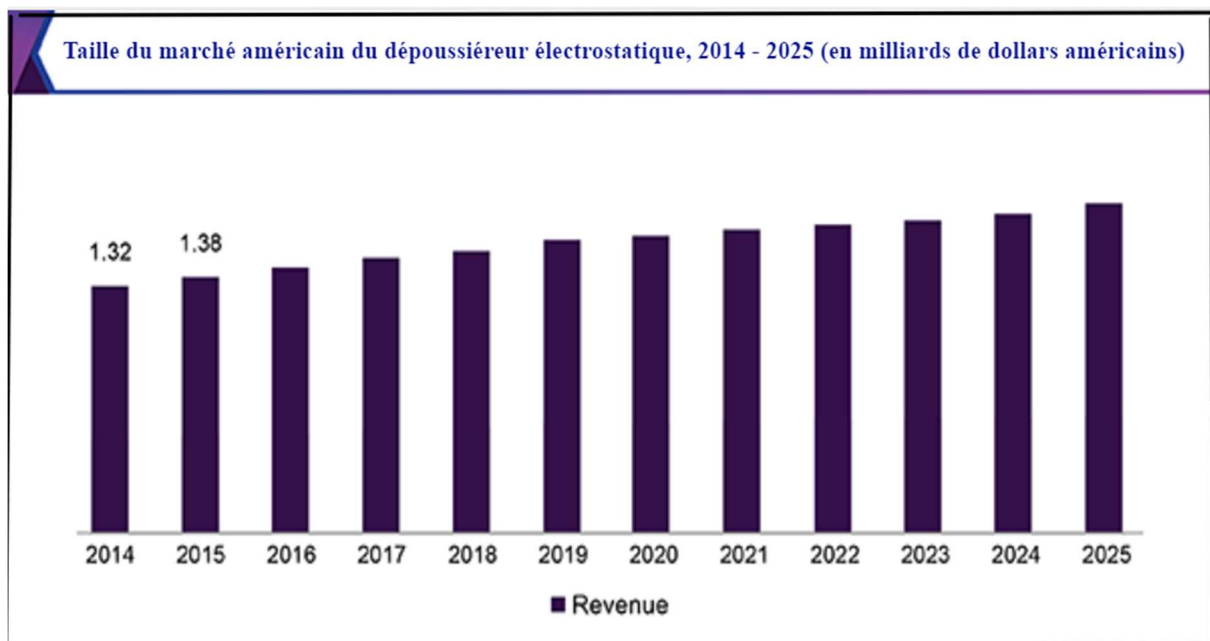


Figure I.7.11 .Aperçu sur le marché mondial des ESP [19]

Selon l'utilisateur final, la production d'électricité représentait une part de marché considérable au cours de la période de prévision. L'augmentation de la demande en électricité des économies émergentes et la nécessité de réduire les émissions de SO₃ stimuleront la demande de produits dans les centrales électriques. L'adoption de plusieurs mesures de contrôle des émissions dans les centrales au charbon alimentera l'adoption du produit. L'augmentation des investissements dans les capacités de raffinage, conjuguée à la forte demande de produits pétroliers de qualité supérieure, augmentera considérablement l'adoption de produits. Le fort potentiel de conversion en un large éventail de produits industriels et de consommation, notamment les plastiques, les engrais, les détergents, les textiles et les solvants, viendra compléter le scénario du marché mondial. Par géographie, le marché de l'Asie-Pacifique sera probablement l'un des plus attractifs au cours de la période de prévision. L'Asie est le leader du marché pour les nouveaux systèmes ainsi que pour la réparation et la mise à niveau des PSE existants. Cela est principalement dû à l'ajout d'un grand nombre de centrales en Chine et à d'autres économies émergentes de cette région. Une demande importante est également attendue en Inde, où la production au charbon occupe une part prépondérante de l'ensemble des sources de production d'énergie.

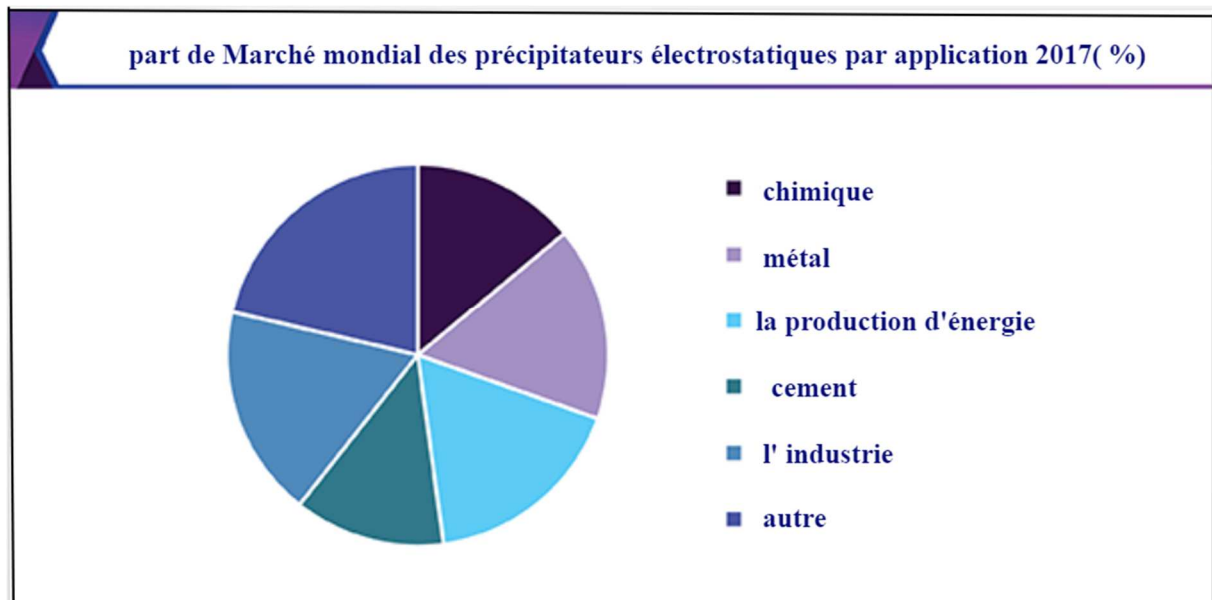


Figure I.7.12 Diagramme part marcher mondiale par application [19]

En termes d'applications, le marché des précipitateurs électrostatiques a été classé dans les domaines des produits chimiques, des métaux, de la production d'énergie, du ciment, de la fabrication, etc. Le secteur de la fabrication

I.8.1.Principaux acteurs du secteur précipitateurs électrostatiques :

Air pol, Amec Foster Wheeler, Babcock & Wilcox, Balcke-Durr, Beltran Technologies, Ducon Technologies, EWK Umwelttechnik, FLSmidth, Fujian Longking, GE Power, Hitachi, Johnson Controls et PPCAIR et Siemens.



Figure I.7.13 Logo des fabricants

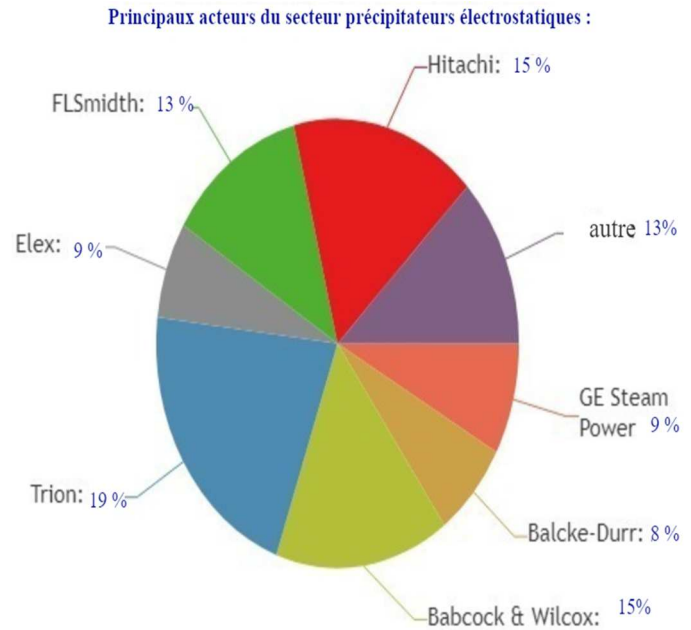


Figure I.7.14 Pourcentage de marche

La considération la plus importante dans l'ESP pour les applications de chaudière à charbon est de maintenir et d'augmenter les performances de dépoussiérage des poussières à haute résistivité. Plusieurs améliorations visant à lutter contre les poussières de haute résistivité ont été mises au point sur la base d'une étude du mécanisme du phénomène de corona arrière. Les technologies sont présentées dans le tableau suivant. Et des technologies adaptées aux applications et opérations des installations et réaliser à la fois une conception compacte et un rendement élevé

I.9 Conclusion

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

Dans ce chapitre nous avons traité les phénomènes physiques de la Précipitation Électrostatique tels que la décharge couronne dans le gaz. Les différents procédés et techniques de traitement de l'épuration des gaz. Nous avons parlé sur principe de fonctionnement d'ESP leurs types et leur application. Nous avons aussi parlé sur les conditions de choix d'un ESP leurs avantages et inconvénients. Et finalement en a été parlé sur un nouveau modèle d'ESP

Après ce premier chapitre de la généralité sur la précipitation électrostatique, nous aborderons à présent le deuxième chapitre consacré à la Manipulation de particules en suspension dans un gaz au sein d'un précipitateur électrostatiques testés dans le cadre de nos travaux.

Chapitre II .

*manipulation de particules en suspension dans
un gaz au sein d'un précipitateur électrostatiques*

II.1 Introduction

Migration des particules chargées généralement, les forces qui s'exercent sur les particules sont de différentes natures : les forces de volume (force de flottabilité, force électrique, force magnétique, force thermo-phorétique) et les forces de surface (force diélectrophorétique, force de traînée, force de portance, force de masse ajoutée, force due au gradient de pression).

L'aptitude à transporter et manipuler des particules en suspension dans l'air est souhaitée pour beaucoup d'appareils tels que les équipements d'épuration de l'air, les appareils d'échantillonnage d'aérosols et certains instruments de mesure. Il y a de nombreuses manières différentes de déplacer les particules de taille supérieure à 10 μm : le jet d'air forcé, les centrifugeuses et d'autres moyens mécaniques.

Pour les particules allant de 1 à 10 μm , il ne reste en revanche aucune manière efficace de contrôler le déplacement parce que des forces extérieures complexes dominent la force de la gravitation ou d'inertie.

Dans les manières de déplacer les particules en suspension dans un fluide, un effet très important est la force exercée sur une particule chargée par un champ électrostatique.

La plupart des particules en suspension portent un certain nombre de charges électriques élémentaires, et peuvent parfois être fortement chargées.

Pour des particules fortement chargées, la force électrostatique peut être des milliers fois plus grande que la force de gravitation. Moesner et Higuchi [21] et Balachandran et al. [22] ont par exemple réalisé la mise en mouvement de grosses particules avec des tensions de quelques kilovolts dans l'air.

Malheureusement, dans la gamme de dimension de $\sim 10 \mu\text{m}$ les forces électrostatiques qui peuvent être exercées sur les particules sont du même ordre de grandeur que les forces d'adhésion entre les particules et les surfaces solides.

Le but de notre travail, est de proposer et de qualifier une installation de transport de type électrostatique des particules capable de déplacer des particules de quelques μm dans un gaz avec de basses tensions. Examinons dans un premier temps les deux forces électriques mises en jeu.

II .2 Force de Coulomb

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique E, les particules ayant acquis une charge électrique q subissent la force de Coulomb F_e proportionnelle à la charge :

$$F_e = q.E \quad (1-1)$$

L'expression (1-1) est l'équation de base pour la force électrostatique agissant sur les particules en suspension dans les précipitateurs électrostatiques, dans lesquels les particules peuvent être captées par les électrodes collectrices. Nous allons présenter les caractéristiques principales de ces précipitateurs électrostatiques, ainsi que la migration des particules, chargées par effet couronne, sous l'effet du champ électrique.

II .3 Force diélectro-phorétique

Beaucoup de travail a été effectué sur la force diélectro-phorétique (DEP) agissant sur des particules allant de la poussière aux cellules biologiques. La force diélectro-phorétique s'exerce sur une particule non chargée dans un gradient de champ électrique. Elle est proportionnelle au volume de la particule ($\propto d_p^3$) et au gradient du champ électrique qui lui est appliqué ($\nabla \cdot E^2$). Pour une sphère diélectrique de diamètre d_p l'expression [22] est (1-1)

$$F_{DEP} = \frac{\pi}{4} \varepsilon_m d_p^3 K \nabla E^2 \quad (1-2)$$

La constante K est définie par

$$K = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_m}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_m} \quad (1-3)$$

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

Nous avons estimé les forces F_e et F_{DEP} dans la configuration simple fil-cylindre coaxiaux pour laquelle le champ a l'expression

$$E(r) = \frac{V_{appl}}{r \ln(R_{cylindre} / r_{fil})} \quad (1-4)$$

$R_{cylindre}$ et r_{fil} sont respectivement les rayons du cylindre et du fil.

En prenant les valeurs typiques $r_{fil} = 0,25$ mm et $R_{cylindre} = 10$ cm,

Les forces F_e et F_{DEP} , calculées au rayon $r = 1,5$ cm, varient en fonction du diamètre de la sphère diélectrique comme présenté dans la Figure (1-2).

Cette figure montre que le rapport entre la force diélectro-phorétique F_{DEP} et la force de Coulomb F_e sur la sphère chargée est inférieure à 10^{-4} (ici pour la relation (1-1) on a pris

la charge q donnée par la relation de Cochet (1-8)). Par conséquent, dans nos études la force F_{DEP} peut toujours être négligée.

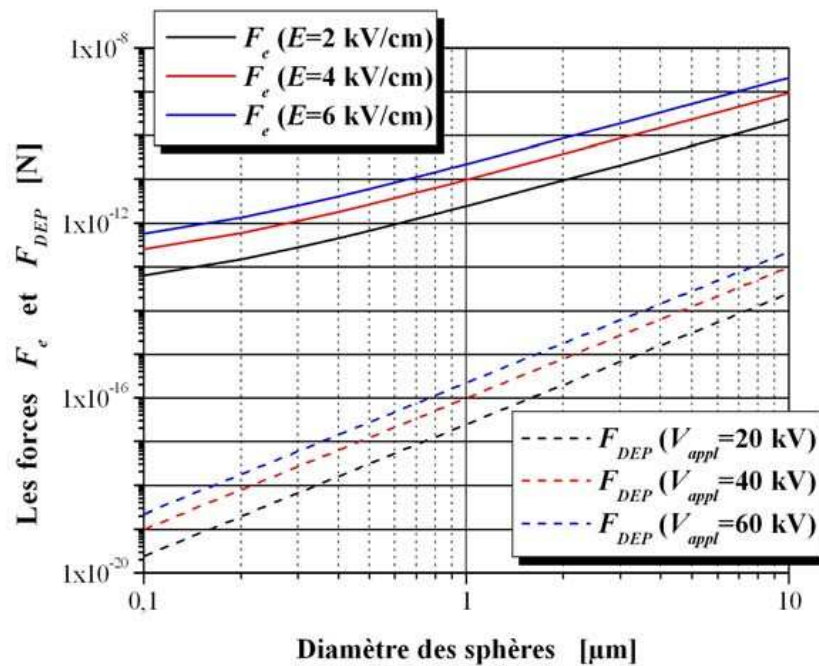


Figure II.1 Variations de F_e et F_{DEP} en fonction du diamètre de la sphère diélectrique au rayon $r = 1,5 \text{ cm}$ du système fil-cylindre coaxiaux ($\epsilon_s = 4,5 \epsilon_0$, $\epsilon_m = \epsilon_0$).

II.3 Mécanismes de charge des particules

Mécanismes de charge des particules Les fines particules 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 tribo-électrisation (regroupant la charge par contact et la charge par frottement) et la charge par charge d'espace ionique (regroupant la charge par champ et la charge par diffusion; les ions gazeux étant produit dans ce cas principalement à l'aide d'une source radioactive ou d'une décharge électrique). La densité d'ions peut être unipolaire (positive ou négative utilisée pour la charge des particules) ou bipolaire (utilisée pour la neutralisation de l'aérosol).

II.3.1 Charge « naturelle » par attachement des ions

Dans l'atmosphère terrestre, il existe des ions positifs et négatifs générés sans interruption par l'action des radiations cosmiques et des gaz radioactifs émanant du sol. Comme présenté par Hinds [23], l'air contient environ 1000 ions/cm³ ; avec en première approximation un nombre égal d'ions positifs et négatifs. Les particules d'aérosol qui sont initialement neutres, peuvent acquérir une charge par collision (due à leur mouvement thermique aléatoire) avec des ions. Les particules chargées vont avoir tendance à perdre leur charge lentement en attirant des ions de signe opposée. Donc, ce processus tend vers un état d'équilibre appelé « distribution de charge en équilibre de Boltzmann ». Cet équilibre de

Boltzmann représente la distribution de charge d'un aérosol en présence d'ions bipolaires. Pour des concentrations égales d'ions positifs et négatifs dans l'air, en première approximation la fraction des particules f_n de taille donnée ayant n charges élémentaires positives ou négatives est donnée par Tout

appareil doit fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique. Ce signifie qu'il doit résister aux agressions (perturbations)

$$f_n = \left[\frac{K E e^2}{\pi d p k_B T} \right] \exp \left[\frac{-K E n^2 e^2}{d p k_B T} \right] \quad (1-5)$$

Où

K_E , constante électrostatique ; e , charge élémentaire ; d_p , diamètre de particule ; k_B , constante de Boltzmann ; T , température. Le Tableau 1.1 montre le pourcentage de particules de taille donnée ayant la charge indiquée. La distribution est symétrique ; la fraction des particules avec n charges positives étant égale à la fraction avec n charges négatives.

Tableau 1.1 Distribution de charge sur une particule en équilibre de Boltzmannn [23]

d_p (µm)	Pourcentage des particules portant le nombre indiqué de charges								
	< -3	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	> +3
0,01				0,3	99,3	0,3			
0,02				5,2	89,6	5,2			
0,05			0,6	19,3	60,2	19,3	0,6		
0,1		0,3	4,4	24,1	42,6	24,1	4,4	0,3	
0,2	0,3	2,3	9,6	22,6	30,1	22,6	9,6	2,3	0,3
0,5	4,6	6,8	12,1	17,0	19,0	17,0	12,1	6,8	4,6
1,0	11,8	8,1	10,7	12,7	13,5	12,7	10,7	8,1	11,8
2,0	20,1	7,4	8,5	9,3	9,5	9,3	8,5	7,4	20,1
5,0	29,8	5,4	5,8	6,0	6,0	6,0	5,8	5,4	29,8
10,0	35,4	4,0	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2	4,0	35,4

II.3.2 Triboélectrisation

La triboélectrisation regroupe deux causes d'électrisation : le frottement et le contact. Dans la charge par frottement, c'est-à-dire quand deux particules (ou particule/substrat) différentes frottent l'une contre l'autre, il y a un transfert d'électrons (charges) à partir de la surface d'une particule vers celle de l'autre. Ce processus utilise la différence de structure électronique des deux surfaces en fonction desquelles une des particules devient positivement chargée et l'autre négativement chargée. Ce phénomène fait que dans les nuages de particules entraînées par un flux d'air, une forte proportion des particules est chargée par contact avec les parois ou par collisions. La charge par contact se produit pendant la séparation de particules sèches et non conductrices de surfaces solides [23] [24] [25]. Dans ce processus, quand une particule touche une surface, des charges sont transférées, si bien que la particule acquiert une charge nette positive ou négative quand elle se sépare de la surface. La polarité de la particule chargée et le nombre de charges sur celle-ci dépendent des matériaux et de leurs positions relatives dans les séries triboélectriques [23]. Le frottement augmente le nombre de charges acquises. Parce qu'il requiert des surfaces sèches, le phénomène de charge par contact devient inefficace en conditions d'humidité relative plus grande que 65% environ.

II.3.3 La charge par champ

Comme le suggère son nom, ce mécanisme de charge est relié à l'action du champ électrique. Une particule présente dans un gaz provoque une distorsion locale du champ électrique ; les lignes de champ aboutissent à la surface de celle-ci. Cette distorsion locale du champ dépend de la nature de la particule : lorsque la particule est conductrice la distorsion du champ est maximale. Pour une particule non-conductrice (isolante), la perturbation du champ dépend de sa permittivité. Ainsi, l'intensité du champ électrique augmente à la surface de la particule. Dans ce cas, les ions présents dans le gaz qui se déplacent le long des lignes de champ électrique, peuvent atteindre la surface de la particule. Chaque ion qui atteint la particule change la distribution locale du champ électrique. Tant que le champ électrique créé par la charge de la particule est inférieur au champ électrique maximum qui existe à la surface de la particule lorsqu'elle n'est pas chargée, les ions continuent d'atteindre la surface de celle-ci. Lorsque la charge acquise est suffisante, les lignes de champ contournent la particule ; on dit que la particule a acquis la charge de saturation par champ q_s [17]. Une première théorie concernant la charge par champ a été développée en 1923 par Rohmann cité par [26] et elle a été complétée par Pauthenier [27][28] en 1932. Ces auteurs montrent que les ions arrivent sur une particule tant que la charge de celle-ci n'est pas suffisante pour les repousser ; on parle alors d'une charge limite par champ q_s . Pauthenier a montré qu'à cause du phénomène de répulsion électrostatique, seule une partie réduite de la surface des particules est atteinte par les ions. Continuant dans le même esprit, d'autres auteurs ont apporté des contributions complémentaires [29][13][14]. D'après McDonald [15], ce mécanisme de charge est prépondérant tant que la taille des particules est supérieure à environ $0,5 \mu\text{m}$. La quantité de charge acquise par les particules dépend de leur diamètre, du champ électrique, de la densité d'ions présents, du temps de présence des particules dans le champ électrique, de la mobilité des ions et de la constante diélectrique ϵ_p de la matière constituant les particules. Ce processus de charge par champ cesse lorsque la particule porte une charge de saturation qui s'écrit [23]

$$q_s = \left(\frac{3 \epsilon_p}{\epsilon_p + 2} \right) \left(\frac{E d_p^2 p}{4 K_E e} \right) \quad (1-6)$$

Où

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

II.3.4 Charge par diffusion

Le concept de charge par diffusion décrit la charge des particules lorsque le champ électrique appliqué est faible ou même nul et lorsque la taille des particules est suffisamment petite (Quelques libres parcours moyens). Il est alors nécessaire de prendre en compte le phénomène de diffusion des ions dans le processus de charge [17, 31, 32]. Ce mécanisme dépend de la probabilité de collision entre les particules et les ions animés d'un mouvement aléatoire d'agitation thermique. Dans une zone où le champ électrique appliqué est nul, les ions ont une répartition uniforme autour des particules. Dans ces conditions, tous les éléments de surface d'une particule ont la même probabilité de choc avec les ions et la particule peut accumuler une certaine charge électrique. Ce mécanisme de charge par diffusion concerne les particules très fines, de diamètres inférieurs à $0,2 \mu\text{m}$ [17]. Dans la charge par diffusion, la quantité de charge accumulée dépend de la taille des particules, de la densité des ions, de la vitesse moyenne d'agitation thermique des ions, de la constante diélectrique de la

particule, de la température absolue du gaz, du temps de présence des particules au sein du champ. White [17] montre que l'évolution au cours du temps de la charge acquise par une particule sous l'effet du processus de diffusion est :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_i = \sqrt{\frac{3 \cdot k_B \cdot T}{m_i}} \\ \frac{dq_p}{dt} = \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \cdot v_i \cdot \rho \cdot \exp\left(-\frac{q_p \cdot e}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot k \cdot t}\right) \end{array} \right. \quad 1-7$$

Où

$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K représente la constante de Boltzmann, v_i est la vitesse d'agitation Thermique des ions et avec m_i la masse de l'ion. En considérant une densité d'ions ρ uniforme, l'expression (1-7) après intégration conduit à :

$$q_p = (t) = q^* \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_d}\right) \quad 1-8$$

Avec ; $q^* = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p \cdot k_B \cdot T / e$ Représente la constante de charge par diffusion et $\tau_d = 8 \cdot \epsilon_0 \cdot k_B \cdot T / d_p \cdot v_i \cdot \rho \cdot e$ le temps caractéristique de charge par diffusion. Nous observons que l'équation (1-8) ne conduit pas à une limite de charge pour $t \rightarrow \infty$ Cependant, l'expression (1-7) montre que le processus de charge par diffusion est influencé d'une façon continue par la charge d_p déjà acquise par la particule.

II.4. 4 La charge mixte

Les deux mécanismes opèrent simultanément pour les particules dont la taille est comprise entre 0,5 et 1 μm . La charge totale acquise par une particule à l'issue du processus n'est cependant pas la somme des charges apportées par chacun des deux mécanismes. Des travaux ont été réalisés sur la charge mixte, en particulier par Lawless et Altman [49] qui ont modifié des modèles préexistants et ont abouti à des relations assez simples qui prennent en compte les interactions des deux mécanismes de charge. Les particules présentes à l'intérieur d'un électrofiltre, une fois chargées par ces différents mécanismes, subissent la force de Coulomb lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique. Cette force électrostatique est responsable de leur mouvement vers les électrodes collectrices.

II.5 Collecte de particules

Dans l'industrie, il existe un grand nombre de procédés d'épuration des gaz que l'on peut classer en 4 catégories suivantes (Tableau II.1) selon principalement des caractéristiques du gaz porteur (composition, température, débit...), des poussières à filtrer (concentration, composition...), et de l'efficacité recherchée d'après des règlements locaux. Précédemment, les mécanismes de décharge électrique et de charge des particules ont été tour à tour étudiés. A partir de ces acquis, la précipitation

électrostatique et la vitesse de migration ou de précipitation des particules vont être évaluées théoriquement.

Tableau II.1 Catégories des précipitateurs industriels

Type de précipitation	Principe d'épuration
Séparateur mécanique	Forces d'inertie, de pesanteur et de centrifugation
Séparateur hydraulique	Mise en contact de la particule avec l liquide de lavage (forces d'inertie, de pesanteur et de centrifugation)
Séparateur filtrant	Le flux traverse une couche de matière solide ou un granulaire consiste en un empilement de grains (sable ; gravier alumine ...)
Séparateur électrique	Charger les particule dans le gaz : collecter les particules chargées par le champ électrique enlever les poussier capte

II.5.1 Précipitation électrostatique

La précipitation électrostatique est basée sur trois principes :

- charger électriquement les particules en suspension ;
- collecter les particules chargées par l'intermédiaire d'un champ électrique ;
- enlever les poussières précipitées sur les plaques de collecte.

Les précipitateurs électrostatiques sont utilisés pour filtrer les particules, aussi bien en sortie d'usine de production que dans les centrales thermiques brûlant du charbon pulvérisé.

Le principe repose sur le passage du gaz porteur de particules entre deux électrodes (fil cylindre ou fils-plans), où est appliquée une forte différence de potentiel. Due à la dissymétrie des électrodes, une décharge électrique est générée, utilisée comme source d'ions gazeux qui va permettre de charger les particules en suspension dans le gaz. Les particules chargées sont ensuite déviées par le champ électrique, et migrent vers la contre-électrode où elles sont collectées. L'accumulation de particules sur l'électrode de collecte nuisant à l'efficacité du procédé, le nettoyage des plaques est effectuée régulièrement. Si les particules sont liquides, le liquide tombe de l'électrode par gravitation. Si les particules sont solides, la couche de poussière collectée sur l'électrode est périodiquement enlevée en frappant les électrodes.

Dans les installations industrielles, la décharge électrique est souvent négative, et donc les particules sont chargées négativement.

Ce choix est dû à la tension de passage à l'arc, plus grande, pour une géométrie donnée, en polarité négative qu'en polarité positive.

II.5.2 Efficacité de collecte

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

$$\eta_f = \frac{N_{ci}}{N_{ca}} \text{ ce qui donne en terme de concentration } \eta_f = 1 - \frac{C_{cs}}{C_{ca}} \quad 1-9$$

Avec C_{ca} concentration en particules en amont du filtre et C_{cs} en aval.

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_{ca} .

II.5.3 Vitesse de migration

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

$$W_{th} = \frac{q_p E}{3\pi\mu_g d_p} \quad 1-10$$

Où

q_p Est la charge de la particule, μ_g est la viscosité dynamique du gaz, E est le champ électrique et d_p est le diamètre de la particule.

Cependant, pour des particules de diamètre inférieur à $1\mu m$, 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 C_c appelé facteur de Cunningham (Figure 9) [17]. La relation (1-10) devient

$$W_{th} = \frac{q_p E}{3\pi\mu_g d_p} \cdot C_c \quad 1-11$$

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

$$C_c(Kn) = 1 + A \cdot Kn \quad 1-12$$

α Qui dépend du nombre de Knudsen Kn caractérisant les différents régimes de mouvement de la particule dans le gaz :

$$Kn = \frac{2\lambda}{d_p} \quad 1-13$$

Avec λ est le libre parcours moyen des molécules de gaz ($\lambda \sim 0.065 u_m$ pour l'air dans les conditions normales de température et de pression). Le coefficient A l'expression suivante

$$A = \alpha_1 + \alpha_2 \exp\left(-\frac{\alpha_3}{Kn}\right) \quad 1-14$$

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 1.15 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 : $\alpha_1=1,246$, $\alpha_2=0,42$. $\alpha_3=0,87$ [31]. L'équation 1-12 devient :

$$c_c = 1 + 1,246 \cdot Kn + 0,42 \cdot Kn \cdot \exp\left(-\frac{0,87}{Kn}\right) \quad 1-14$$

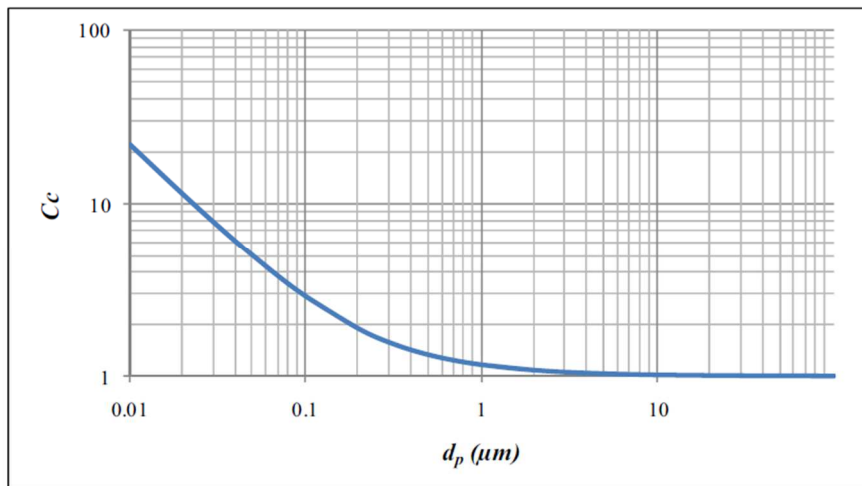


Figure II.2 : variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules.

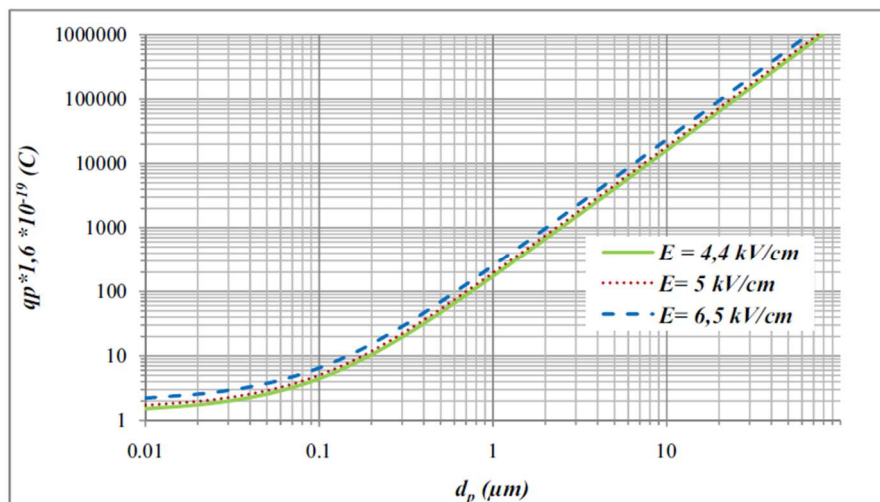


Figure II.3 : l'évolution de la charge des particules donnée par le modèle de Cochet en fonction du diamètre des particules 1-13

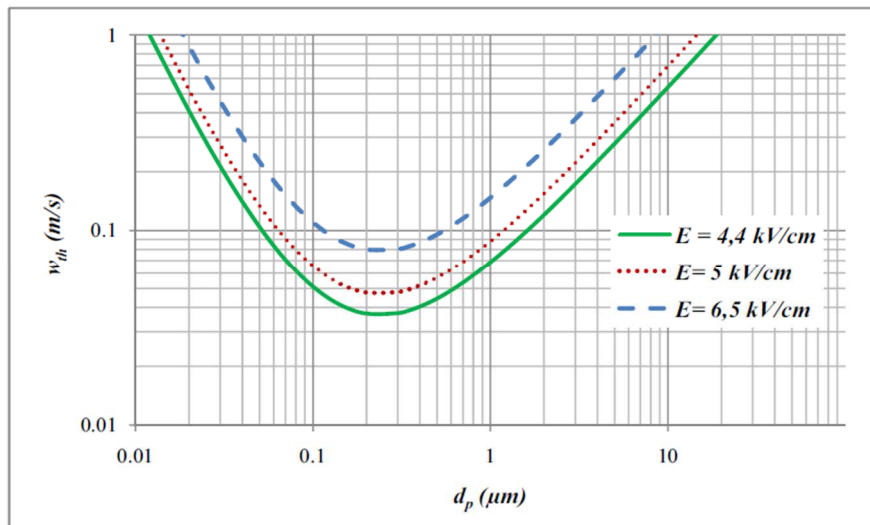


Figure II.4 : l'évolution de la vitesse de migration w_{th} en fonction du diamètre des particules

La Figure II.3, 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.4). 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 $1 \mu\text{m}$.

II.5.4 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 W_E et μ_g (Figure II.5).

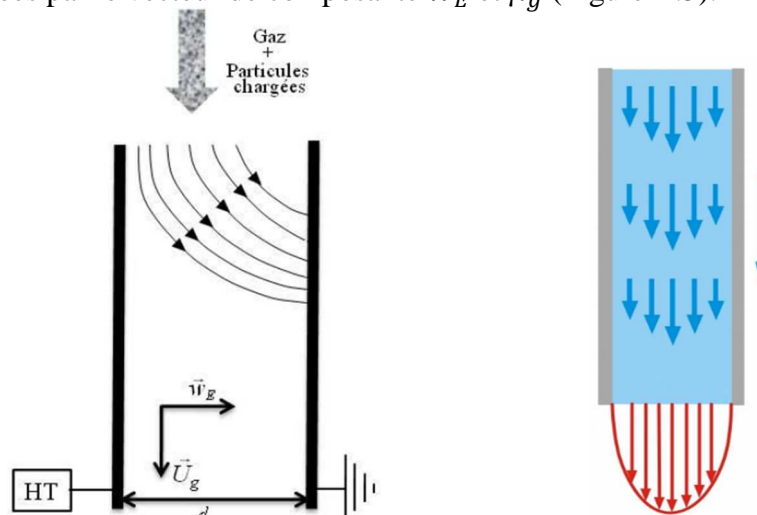


Figure II.5 : trajectoires des particules en écoulement uniforme laminaire

Une particule chargée qui rentre dans la zone du champ à une distance d de la cathode collectrice sera collectée au bout d'un temps $t=d/w_E$; pendant ce temps, la particule se déplace dans la direction du gaz, elle aura parcouru une distance :

$$L = \bar{U}_g \cdot \frac{d}{w_E}$$

1-16

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

$$\eta_L = \frac{w_E \cdot L}{\bar{U}_g \cdot d}$$

1-17

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.5.5 Modèle de Deutsch

En 1919, les travaux expérimentaux d'Andersen [33] 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 [34] 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.6) :

Une couche limite δ laminaire 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 δ .

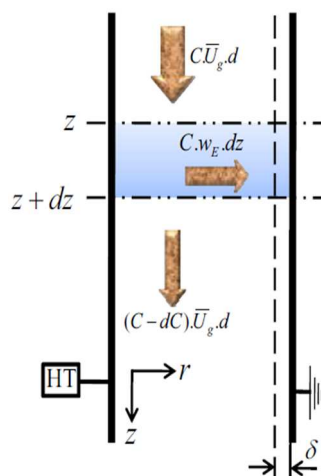


Figure II.6 : représentation du modelé de Deutsch

Si nous considérons deux sections transversales situées à une distance D_z 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

$$C \cdot \bar{U}_g \cdot d = (C - dC) \cdot d \cdot \bar{U}_g - C \cdot w_E \cdot dz \quad 1-18$$

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 :

$$C_S(d_p) = C_e(d_p) \cdot \exp\left[-\frac{2 \cdot w_E(d_p) \cdot L}{r_c \cdot U_g}\right] \quad 1-19$$

Ce qui conduit à la formule de Deutsch-Anderson (1.20) :

$$\eta_d(d_p) = 1 - \exp\left[-\frac{2 \cdot w_E(d_p) \cdot L}{r_c \cdot U_g}\right] = 1 - \exp\left[-w_E(d_p) \cdot \frac{S}{D_g}\right] \quad 1.20$$

Où S est la surface totale des électrodes collectrices et D_g est 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 [35],...

Le terme suivant est appelé le nombre de Deutsch D_e

$$\text{avec} \quad D_e = \frac{w_E \cdot L}{r_c \cdot \bar{U}_g} \quad 1-21$$

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

$$\text{Avec} \quad \eta_D = 1 - \exp(-w_{th} \cdot SCA) \quad 1-22$$

$$SCA = \frac{2 \cdot L}{r_c \cdot u U_g}$$

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 [36] :

$$\eta_D = 1 - \exp(-W_{ek} \cdot (SCA)^k) \quad 1-23$$

Où k est un exposant empirique, approximativement égal à 0,5 et 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 [9] afin de lui donner un sens physique et la compléter. Néanmoins, certains auteurs ont émis des réserves sur cette formulation [37, 38].

En pratique, si l'efficacité η_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

$$\eta_D = 1 - \exp(-W_E^{eff} \cdot (SCA)) \quad 1-24$$

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 [39] et Williams & Jackson [40] 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 Cooperman [38]. Le modèle permet de prendre en compte les effets de réentraînement par un coefficient empirique difficile à évaluer.

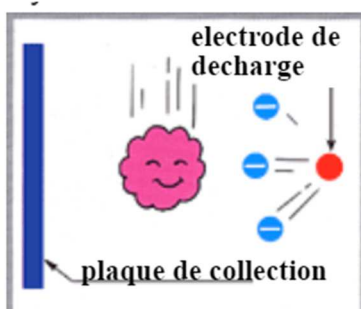
II.6 Phénomènes détériorant l'efficacité de collecte

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

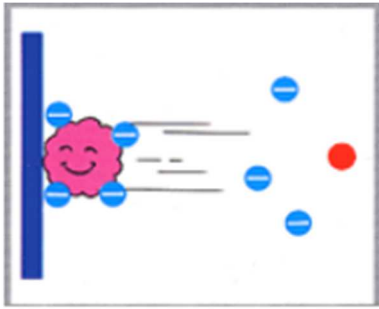
II.6.1 Effet de la résistivité apparente sur les performances de l'électrofiltre

La poussière à haute résistivité est tenace. Normalement, la poussière dans la plage de 10^4 à $10^{11} \Omega \text{ cm}$ peut être collectée facilement parce que :

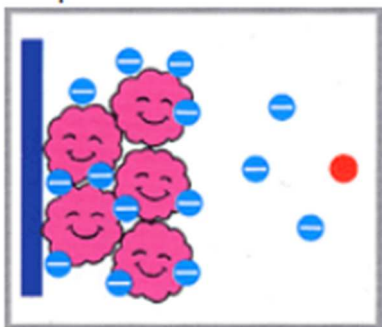
Ayant été facilement chargé par les ions négatifs de l'électrode de décharge,



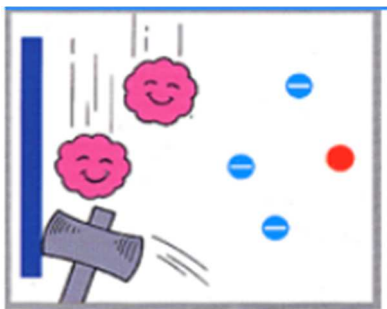
La poussière est attirée vers la plaque collectrice par la force de Coulomb.



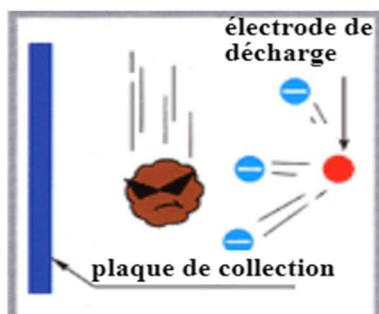
La poussière collectée est



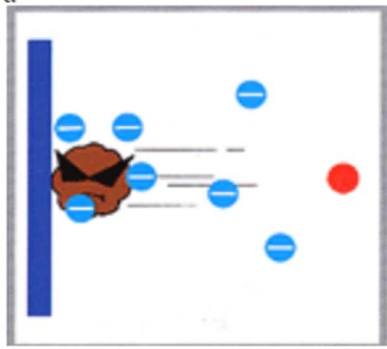
Facilement séparé de la plaque de collecte en frappant.



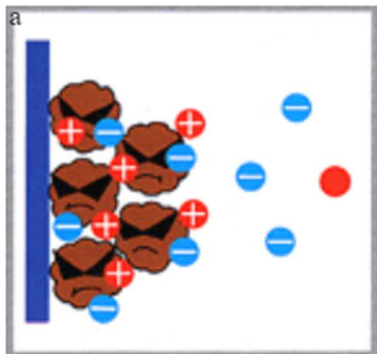
La poussière à haute résistivité ($10^{11} \Omega\text{cm}$ ou plus) est difficile à éliminer car :
Ayant été facilement chargé par les ions négatifs de l'électrode de décharge,



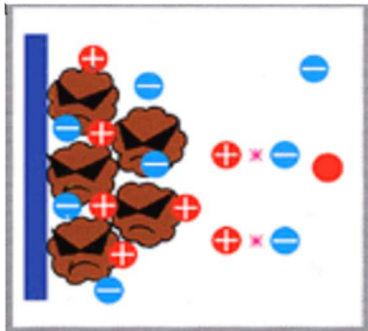
La poussière est attirée vers la plaque collectrice. Jusqu'à ce point, il est flexible et contrôlable.



En raison de sa forte force d'adhésion, la poussière à haute résistivité n'est pas facilement séparée par le choc du rap



De plus, cette couche de poussière commence à libérer des ions positifs qui annulent les ions négatifs de l'électrode de décharge, ce qui rend le processus de charge instable (**Le back corona**). Il en résulte une détérioration de l'efficacité de collecte des poussières.



II.7

L'efficacité de collecte d'un électrofiltre dépend de la résistivité apparente ρ_p des particules traitées.

La mesure de ρ_p est donc importante pour une bonne estimation de l'efficacité de collecte.

La résistivité des particules dépend elle même de la température du gaz porteur, de son taux d'humidité et de sa composition. La présence de SO_3 par exemple, diminue la résistivité

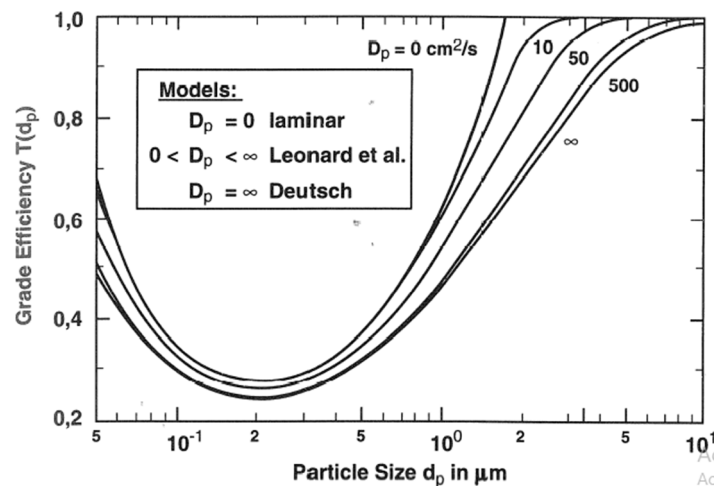


Figure II .8 Effets de D_p sur l'efficacité fractionnaire pour un précipitateur électrostatique selon [41]

L'effet de ρ_p sur l'efficacité de collecte est montré sur la figure 1.15. On y voit également les évolutions du courant et de la tension. Pour les valeurs de ρ_p comprises entre 10^2 et $5 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}$, un électrofiltre de type sec est dans les conditions optimales de fonctionnement. Le phénomène de réentraînement des particules, à l'origine des faibles valeurs de rendement, survient lorsque $\rho_p < 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, tandis que le "back corona" conduit à une chute de l'efficacité de collecte lorsque $\rho_p \leq 5 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$.

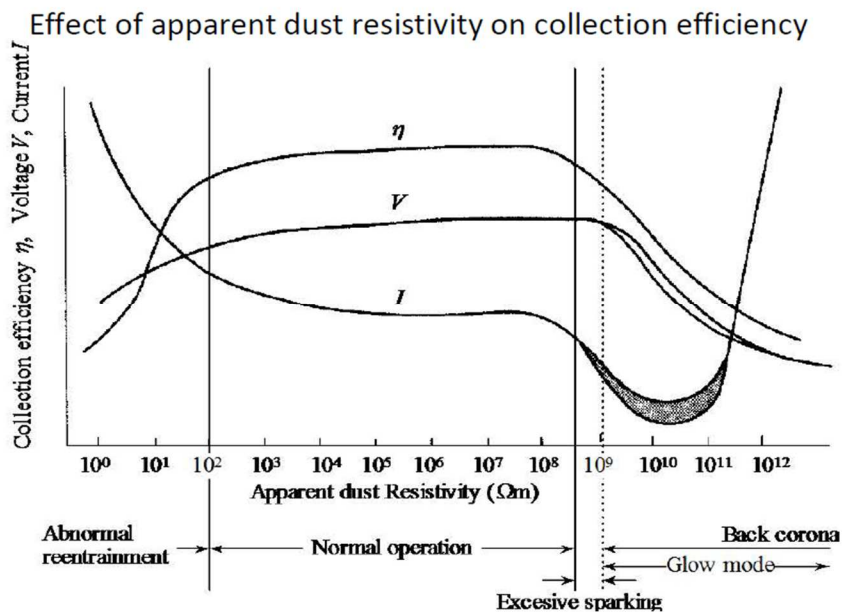


Figure II.9 – Effet de la résistivité apparente sur l'efficacité de collecte [42].

II.6.2 Le ré-entraînement de particules

Le phénomène de ré-entraînement des particules consiste à la ré-introduction des particules collectées dans l'espace inter-électrodes [43]. Dans un électrofiltre en fonctionnement normal, le ré-entraînement de particules survient pendant l'opération de frappe de l'électrode de collecte ou du

fait de la vitesse élevée du gaz près de celle-ci. Lorsque la résistivité des particules devient inférieure à $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$, l'adhésion est faible et une importante contre-émission se produit.

Par conséquent, l'efficacité de collecte diminue. La figure 1.16 illustre le phénomène. En effet, les particules conductrices perdent leurs charges lorsqu'elles sont collectées, puis elles acquièrent des charges de signe opposé par induction. Ces particules sont alors ramenées dans l'espace inter-électrodes par la force due au champ électrique et sont à nouveau chargées par la décharge couronne. Elles font ainsi des sauts à la surface de l'électrode de collecte et parviennent à sortir de l'électrofiltre sans être captées.

Le ré-entraînement peut être supprimé par les mesures suivantes [44] :

- l'injection d'agents adhésifs tels que l'ammoniaque, le sulfate d'ammonium ou les brunes d'huile,
- l'utilisation de filtre de type humide,
- le nettoyage périodique de l'électrode de collecte par frappage ou brossage [45].

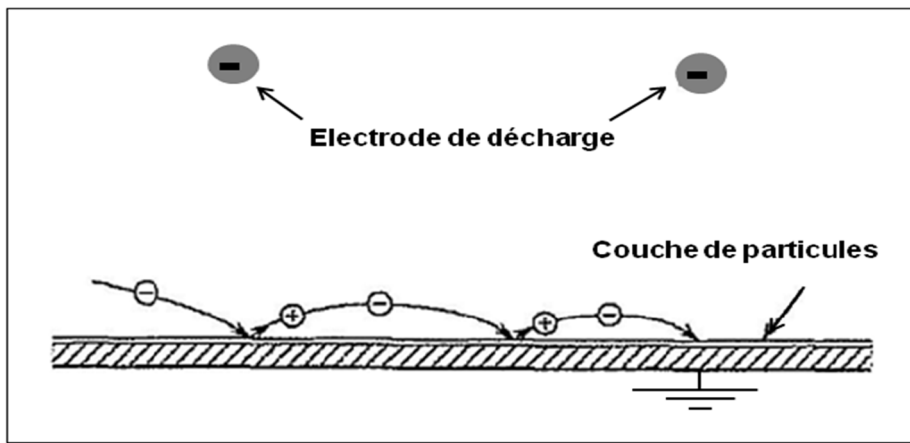


Figure II.10 – Illustration du phénomène de ré-entraînement anormal des particules [46].

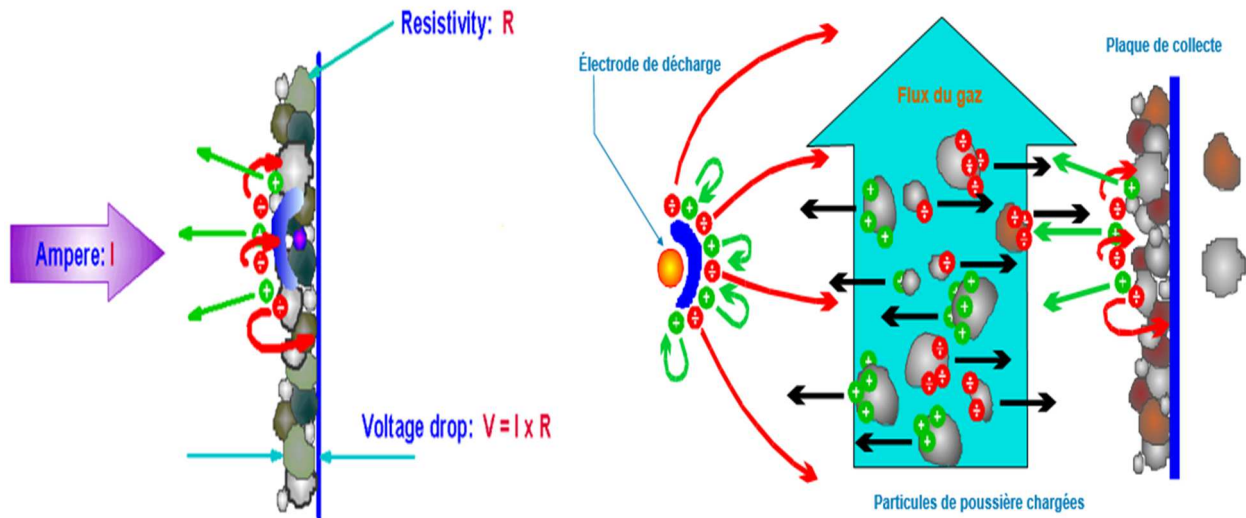
II.6.3 Le back corona

Le dépôt de particules sur l'électrode de collecte se comporte comme une couche diélectrique lorsque sa résistivité ρ_p dépasse une valeur seuil comparable à la valeur de la résistivité du gaz dans l'espace inter-électrodes. La tension à travers la couche de particules devient alors assez élevée pour causer localement des claquages, aux endroits les plus vulnérables de la couche. Les points de claquage émettent des ions de signe opposé vers l'électrode de décharge, ce qui dégrade l'efficacité de collecte. C'est ce phénomène qui est appelé back corona. C'est l'un des plus complexes au sein des électrofiltres

Le back corona survient lorsque $\rho_p > 5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ [47]. A l'intérieur de la couche de particules déposées sur l'électrode de collecte, un champ électrique E_p s'établit à cause du courant de décharge. Son expression est

$$E_p = \rho_p \cdot J_p \leq E_{pd}$$

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



II.6.4 L'extinction de la décharge par la charge d'espace

Lorsque la taille des particules est très petite et la densité élevée, la charge d'espace formée par les particules chargées réduit la force du champ à la pointe de l'électrode de décharge. Il en résulte l'extinction de la décharge. Parfois, la charge d'espace augmente la force du champ au niveau de l'électrode de collecte et entraîne la formation d'étincelles.

Les mesures pour y remédier sont entre autres, l'utilisation de dispositifs de pré-charge, de pré-filtres ou de électrofiltres montés en cascade.

L'étude de ce dernier facteur de détérioration de l'efficacité de collecte est très instructive. On se rend compte que lorsqu'elle est soumise à certaines conditions d'utilisation, la décharge peut être à l'origine de sa propre extinction. Il serait donc convenable de comprendre sa physique. Dans la partie ci-après nous nous intéresserons aux décharges électriques dans les gaz

II.6.5 Influence de la nature et de la taille des particules

La taille des particules est un facteur important pour ce qui concerne la charge des particules et leur transport. En effet, plus la taille d'une particule augmente, plus sa charge électrique est importante mais moins elle est sensible aux mouvements du fluide qui la transporte.

Cependant, ces arguments ne sont plus valables pour les particules dont la taille est inférieure à $0,2 \mu m$ pour lesquelles l'influence de l'agitation brownienne est très importante. Dans la gamme qui nous occupe (de $0,3$ à $20 \mu m$) ce phénomène n'est pas sensible et l'efficacité de collecte mesurée augmente toujours avec la taille des particules

II.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité les phénomènes physiques quand les particules vivent ou elles pénètrent dans la précipitation électrostatique, tels que : Migration des particules chargées, mécanismes de charge des particules, collecte de particules et en fin les phénomènes détériorant l'efficacité de collecte.

Nous procéderons dans le chapitre suivant présent des simulations pour réaliser les objectifs de cette étude ; un électrofiltre de type fil plaque, un électrofiltre de type fil-cylindre asymétrique et un électrofiltre de type fil-cylindre symétrique avec trois types d'électrode.

Le troisième chapitre, sera dédié à la conception des modèles de simulation sur COMSOL de la décharge couronne et aux résultats de simulation pour les calculs en générale.

Chapitre III

Simulation et optimisation d'un précipitateur électrostatiques

III.1 introduction :

La simulation par ordinateur est devenue un moyen essentiel dans les sciences et l'ingénierie. L'analyse numérique des composants, en particulier, est importante lors du développement de nouveaux produits ou l'optimisation des conceptions. Aujourd'hui, un large éventail d'options de simulation est disponible.

Les chercheurs utilisent tout, des langages de programmation de base à divers packages de haut niveau mettant en œuvre des méthodes avancées. Bien que chacun de ces techniques a ses propres attributs uniques, ils partagent tous une préoccupation commune : pouvez-vous compter sur les résultats ?

Lorsque vous considérez ce qui rend le logiciel fiable, il est utile de se souvenir de l'objectif ; Vous voulez un modèle qui décrit avec précision ce qui se passe dans le monde réel. Un environnement de simulation informatique est simplement une traduction des lois physiques du monde réel dans leur forme virtuelle. Combien de simplification à lieu dans le processus de traduction aide à déterminer la précision du modèle résultant ?

L'idéal serait donc d'avoir un environnement de simulation incluant la possibilité pour ajouter un effet physique à votre modèle.

III .2 Introduction sur le logiciel Comsol Multiphysics et ces modules :

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de modéliser le fonctionnement des systèmes réels par l'utilisation des fonctions mathématiques et lois physique. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie la que Comsol Multiphysics a été développé. C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel. Il sera également un outil de conception grâce à son aptitude à gérer les géométries 3D complexes.

Différentes modules physiques existent sous Comsol Multiphysics, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures...etc. Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est l'un des points forts de ce logiciel ;

- AC/DC Module;
- Acoustics Module;
- Acoustics Module;
- CAD Import Module ;
- Batteries & Fuel Cells Module;
- Chemical Reaction Engineering Module;

- CFD Module ;
- ECAD Import Module;
- Electrochemistry Module;
- Electrodeposition Module;
- Fatigue Module;
- File Import for CATIA V5;
- Geomechanics Module;
- Heat Transfer Module;
- LiveLink for (AutoCAD, Creo Parametric, Excel, Inventor, MATLAB, SolidWorks).
- Matériel Library.
- MEMS Module.
- Microfluidics Module.
- Molecular Flow Module.
- Multibody Dynamics Module.
- Nonlinear Structural Materials Module.
- Optimization Module.
- Particle Tracing Module.
- Pipe Flow Module.
- Plasma Module.
- RF Module.
- Semiconductor Module.
- Structural Mechanics Module.
- Subsurface Flow Module.
- Wave Optics Module.

COMSOL multiphysics (feqlab) est un :

- Logiciel de résolution de modèles différentiels (pde).
- Multiphysique (généricité, couplage mécanique des fluides, électromagnétisme, mécanique des structures, thermique) par éléments finis.
- Nombre illimité d'interactions entre différentes physiques ;

COMSOL Multiphysics est fonctionné sur multiplateforme : Windows, Mac, GNU-Linux...

COMSOL Multiphysics contient la plupart des équations,

Utilise une interface graphique ;

Peu de programmation directe ;

Interface MATLAB possible « intègre ».

III .2 .1 Plan de décisions et de construction :

- Choix de la dimension : 3D, 2D, 2D axisymétrique...
- Choix des modules physique : Transfert de chaleur, Transport d'espèces, Ecoulement laminaire.
- Choix du type d'étude : Stationnaire, Temporelle, Fréquentielle...
- Construction de la géométrie.

- Choix du (ou des) matériau (x).
- Paramétrage du (ou des) module(s) physique(s).
- Paramétrage et calcul du maillage.
- Paramétrage et calcul de l'étude.
- Représentation graphique des résultats.

III.2.2 Méthode des éléments finis :

Dès les années 1960, la méthode des éléments finis est devenue fréquente, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, cette méthode numérique est indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles. Elle est avant tout une méthode d'interpolation. Ainsi, pour approcher une fonction, on découpe son domaine de définition en petits éléments et sur chaque élément, le comportement local de la fonction est représenté par une fonction simple, comme une fonction polynômiale par exemple.

La MEF consiste donc à rechercher une solution approchée de la solution exacte sous la forme d'un champ $\tilde{u}(X, t)$ défini par morceaux sur des sous-domaines de Ω . Les n sous-domaines doivent être tels que :

$$\sum_i^n \Omega_i = \Omega$$

Les Ω_i sont une partition de Ω comme illustré par la Figure (III.1)

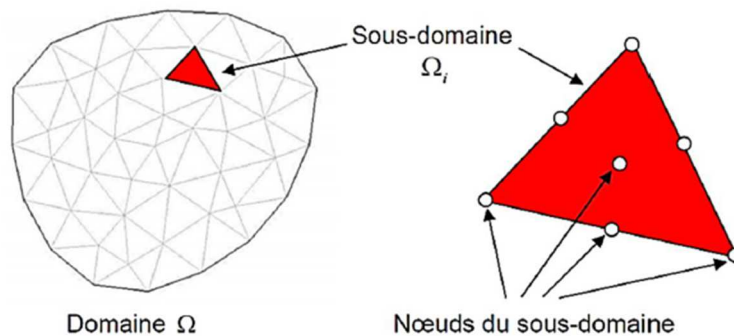


Figure (III.1) : Représentation du domaine discrétisé Ω et d'un de ses sous-domaines

Les champs $\tilde{u}(X, t)$, définis dans chaque sous-domaine, sont des champs choisis parmi une famille arbitraire de champs (généralement polynomiaux). La famille de champs locaux est appelée espace des fonctions d'interpolation de l'élément. La famille de champs globaux $\tilde{u}(X, t)$, obtenus par sommation des champs locaux, est appelée espace des fonctions d'interpolation du domaine Ω .

Le champ dans chaque sous-domaine Ω_i est déterminé par un nombre fini de valeurs de ce champ (ou valeurs de ses dérivées) en des points choisis arbitrairement dans le sous-domaine

appelés nœuds. Le champ local est une interpolation entre les valeurs aux nœuds. Le sous-domaine muni de son interpolation est appelé élément.

La recherche de solution par Eléments Finis consiste donc à déterminer quel champ local on attribue à chaque sous-domaine pour que le champ global $\tilde{u}(X,t)$, obtenu par sommation de ces champs locaux, soit proche de la solution exacte du problème.

La qualité de la solution approchée (proximité de la solution exacte) dépend de la division en sous-domaines (nombre et dimensions des sous domaines), du choix de la famille de champs locaux dans chaque sous-domaine et des conditions de continuité qu'on impose aux frontières des sous-domaines. Une fois ces choix faits, il reste à chercher une combinaison de champs locaux qui satisfait au mieux les équations [48].

Actuellement, le travail de ces différentes étapes est assisté par un grand nombre de logiciels.

III.3 Vue global du logiciel :

III.3.1 Menu principale de COMSOL :

L'interface de COMSOL 5.3 peut être séparée en quatre parties se sont présentées à la Figure (III.2).

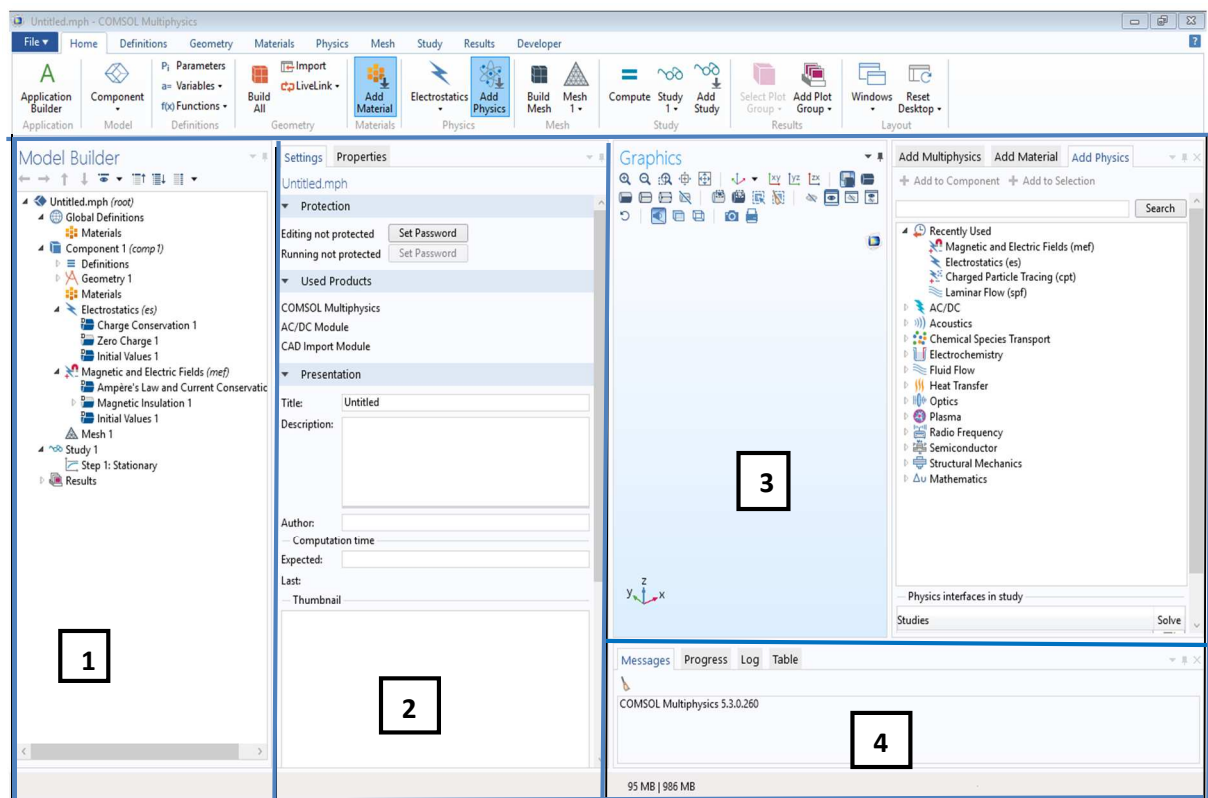


Figure (III.2) : Interface utilisateur de COMSOL 5.3

À gauche, on trouve le **Model Builder** 1 dans lequel est défini le problème à étudier. Dans le détail, le menu (*Global Definitions*) regroupe notamment les variables et paramètres du problème. Dans le menu (*Component 1*) sont définis le système de coordonnées (*Définitions*) par défaut le système cartésien, la géométrie (*Geometry*), les matériaux (*Materials*), la ou les physique (s) appliquées au problème et le maillage (*Mesh*). Le menu suivant (*Study 1*) permet

de définir les paramètres de résolution, stationnaire ou instationnaire, ainsi que les options du solveur. Finalement, le menu (*Results*) regroupe l'ensemble des options de post-traitement des données.

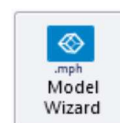
La colonne directement à droite *Settings* 2 permet d'entrer les données relatives aux options sélectionnées dans le *Model Builder*. Par exemple, les dimensions de l'objet créé dans la *Geometry*. C'est aussi dans cette fenêtre que les valeurs initiales et les conditions frontières de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis.

En haut à droite, l'interface d'affichage graphique *Graphics* 3 permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se trouvent les options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, cacher certains éléments, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre.

Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage *graphique*, 4 une fenêtre permet de visualiser les éventuels messages d'erreur, la progression des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée

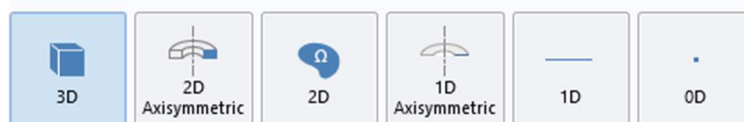
En chois la méthode de création d'une simulation de un dès notre plusieurs géométries qui ne fait

① Ouvrez une nouvelle simulation COMSOL, sélectionnez **Model Wizard**. Cette option permet de définir pas à pas les modalités du problème




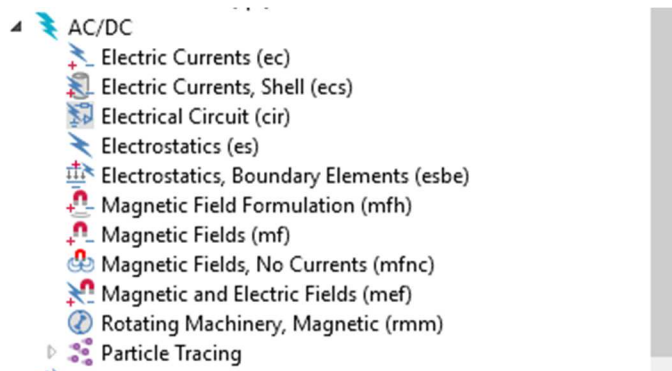
①

② Choisissez ensuite un modèle spatial en **2D**.




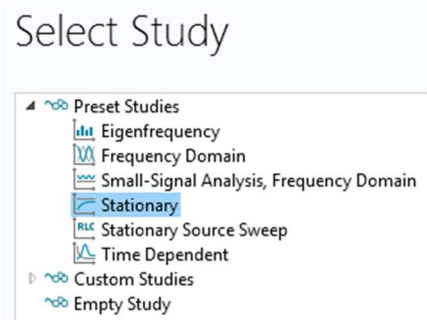
②

③ Vous devez par la suite choisir le modèle physique approprié. Sélectionnez le modèle **Electrostatics (es)** dans la catégorie **AC/DC**. Cliquez sur **Add** puis sur 



③

④ Après avoir sélectionné le modèle, vous devez sélectionner le type d'étude désiré. Sous *Preset Studies*, choisissez le cas d'étude en régime permanent (*Stationary*), puis cliquez sur 



④

Sauvegardez la simulation dans le répertoire personnel

III.3.2 Définition des paramètres globaux et création de la géométrie :

Dans le *Model Builder*, faites apparaître le menu contextuel (*clic droit avec la souris*) sur *Global Definitions* et cliquez sur *Parameters* ; voir Figure (III.3). Lorsque vous définissez une nouvelle variable, il est possible et fortement conseillé de lui associer une unité. Les unités doivent être mises entre crochets. Par exemple, pour spécifier une tension $V_{dc} = 15\text{kV}$ écrire sous *Name* «*Vdc* » et sous *Expression* «*15 [kV]* ». Vous pouvez maintenant entrer les différentes variables relatives au problème, les expressions des unités suggérées sont retranscrites à la Figure (III.4):

- Rayon du fil (électrode) (*re*) : 1cm
- Épaisseur de la plaque (collectrice) (*e*) : 2cm
- Largeur de la plaque (*L*) : 30 cm.
- distance entre fil et plaque (*d*) : 20 cm.
- Longueur du plan (*W*) = $5 \times L$: 1.5 m.
- Hauteur du plan (*H*) = $5 \times d$: 1 m.
- tension appliquée (*Vdc*) : 15000 V.

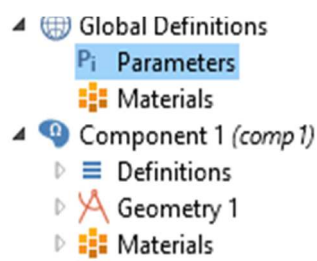


Figure (III.3) Ajout de paramètres au modèle.

Name	Expression	Value	Description
re	1[cm]	0.01 m	rayon du fil (electrode)
e	2 [cm]	0.02 m	epaisseur de la plaque
L	30[cm]	0.3 m	Largeur de la plaque
d	20[cm]	0.2 m	distance entre fil et plaque
W	$5 \times L$	1.5 m	Longueur du plan
H	$5 \times d$	1 m	Hauteur du plan
Vdc	15[kV]	15000 V	tension appliquee

Figure (III.4) Paramètres du modèle.

Une fois les variables relatives à la géométrie et au transfert de matière définies, vous devez spécifier la géométrie du problème Figure (III.5). Faites un clic droit sur *Geometry* dans le

Model Builder et choisissez *Rectangle*. Sous l'onglet *Size and Shape*, entrez la variable de largeur précédemment définie dans *Width* et dans *Height*, entrez la variable associée à la hauteur de la plaque. Sous l'onglet *Position*, centrez le rectangle en (0, -e).

Cliquez sur. 

En suit clic droit sur *Geometry* dans le *Model Builder* et choisissez *Cercle*, Sous l'onglet *Size and Shape*, entrez la *variable* rayon de cercle, entrez la variable associée au degré de rotation (360), Sous l'onglet *Position*, centrez la cercle en (L/2, d+re).

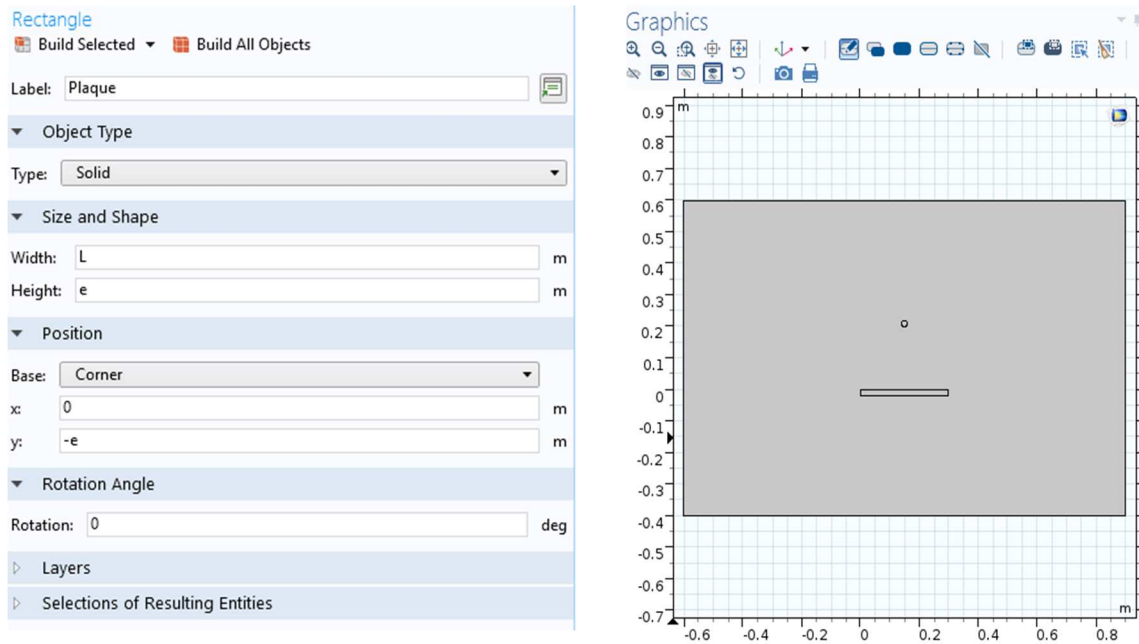


Figure (III.5) : Construction de la géométrie.

III.3.3 Ajouté des propriétés du matériau composant la plaque collectrice et le fil émissive :

Pour ajouter le matériau, cliquez droit sur le sous-menu *Matériel* disponible dans *Component 1*. Sélectionnez *Add Material*, une nouvelle fenêtre apparaît à droite pour choisir parmi une liste de matériaux, gaz et liquides. Choisissez *structural steel* et *Air* disponible sous l'onglet *Built-In* puis ajoutez-le au modèle *Add to Component*. *Structural steel* et *Air* est maintenant disponible sous l'onglet *Materials*, ce matériau est associé à la géométrie par défaut. Les domaines associés à un matériau apparaissent en bleu lorsque ces derniers sont sélectionnés



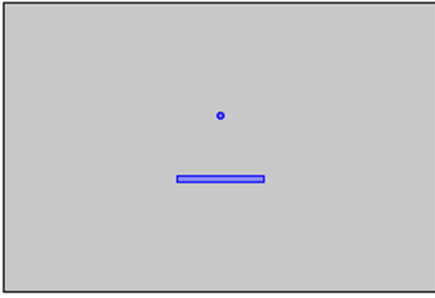


Figure (III.6) : Matériau composant fil et plaque

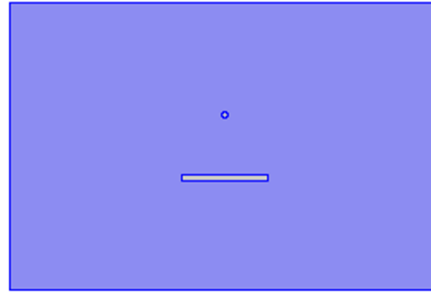


Figure (III.7) : Air occupe le vide.

III .3.4 Ajout des conditions frontières :

Dans le modèle *Electrostatics (es)*, ajoutez les conditions frontières suivantes (clic droit sur *Electrostatics (es)*) ensuite clique sur *Boundaries* et ajoute *Ground* et *Electric Potential*.

Les paramètres des conditions frontières, sont :

- *Electric Potential* V_{dc} varie du (10kV à 45kV)
Quatre frontières de fil (9, 10, 11,12).

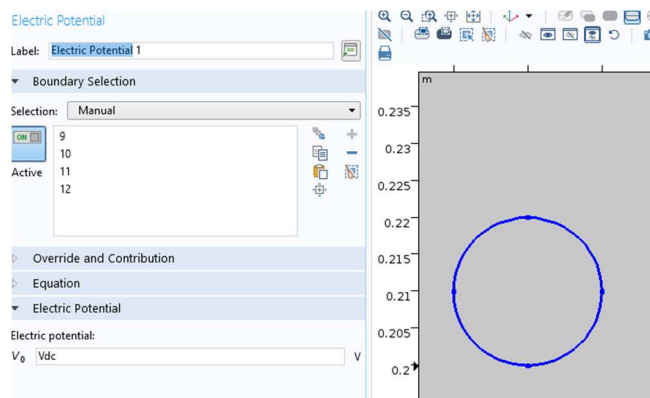


Figure (III .8) : Conditions frontières de fil

- *Ground* $V=0V$.
Quatre frontières de plaque (4, 5, 6,7).

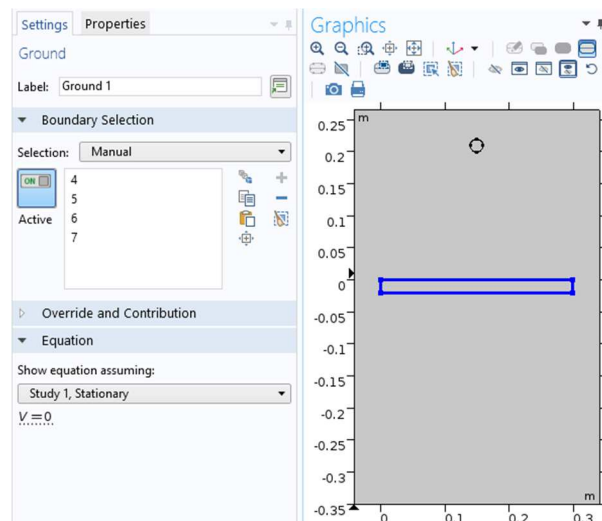



Figure (III.9) : Condition frontière de plaque.

III.3.5 Maillage :

Cliquez sur *Mesh* et choisissez comme taille de maillage *Finer*, laissez le maillage défini en tant que *Physics-controlled mesh*. Cliquez sur  **Build All**, il est maintenant possible de voir le maillage triangulaire (option par défaut). Il est possible de définir manuellement les paramètres de maillage.

À ce stade, Ce modèle devrait ressembler à celui présenté à la Figure (III.10).

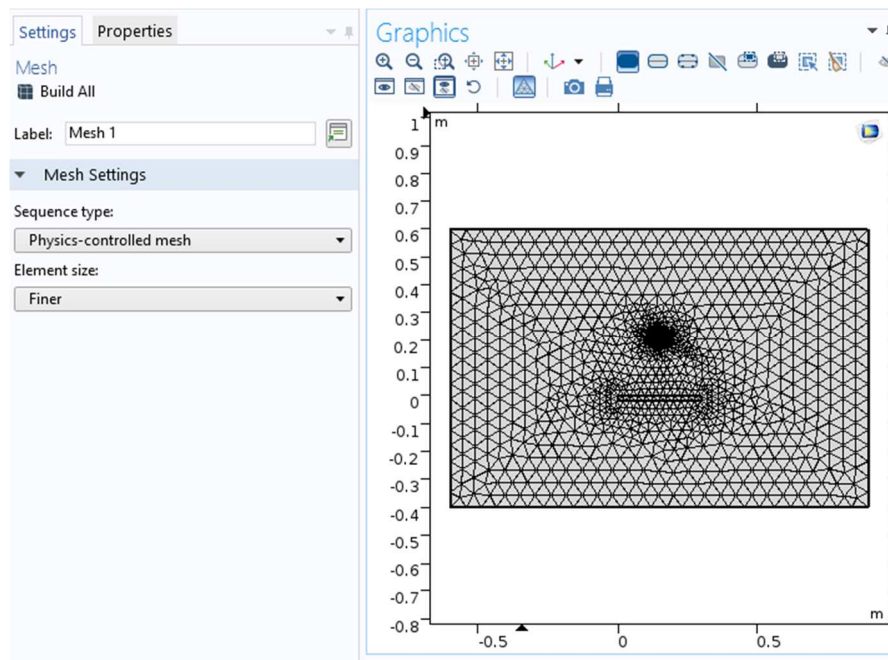

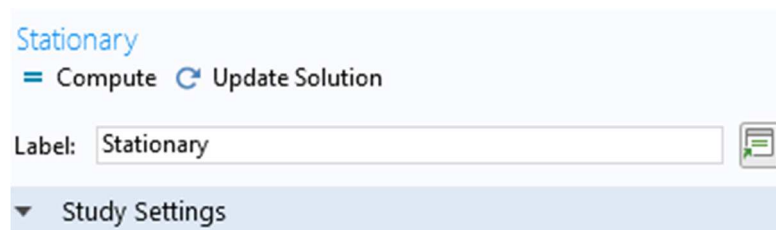


Figure (III.10) : État du modèle après le maillage.

III.3.6 Simulation et traitement des résultats :

Pour effectuer la simulation, cliquez sur *Study* dans le *Model Builder* puis sur  **Compute**. *COMSOL* se chargera de choisir les paramètres du solveur en fonction des modèles physiques choisis. Si vous désirez changer les paramètres du solveur, ces derniers sont accessibles à partir de l'onglet *Study*



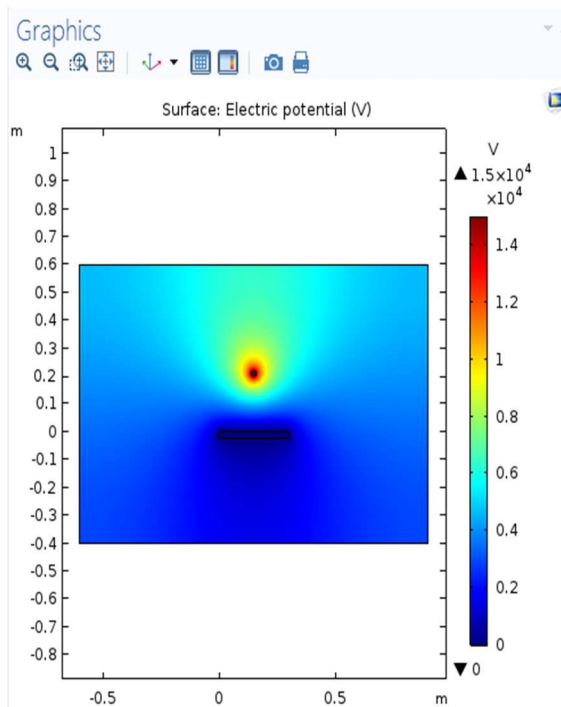
Figure(III.11) : Compilation de modèle

La progression de la simulation apparait en bas à gauche de l'écran il peut être annulé en cliquant sur le signe \otimes ; vous pouvez également voir la quantité de mémoire (RAM) utilisée dans la simulation.



Figure (III.12) : Progression de simulation.

Le résultat que nous devrions obtenir est présenté à la Figure (III.13). La figure comporte la distribution de potentiel électrique entre le fil (électrode émissive) et la plaque (collectrice).



Figure(III.13) : Distribution potentiel électrique.

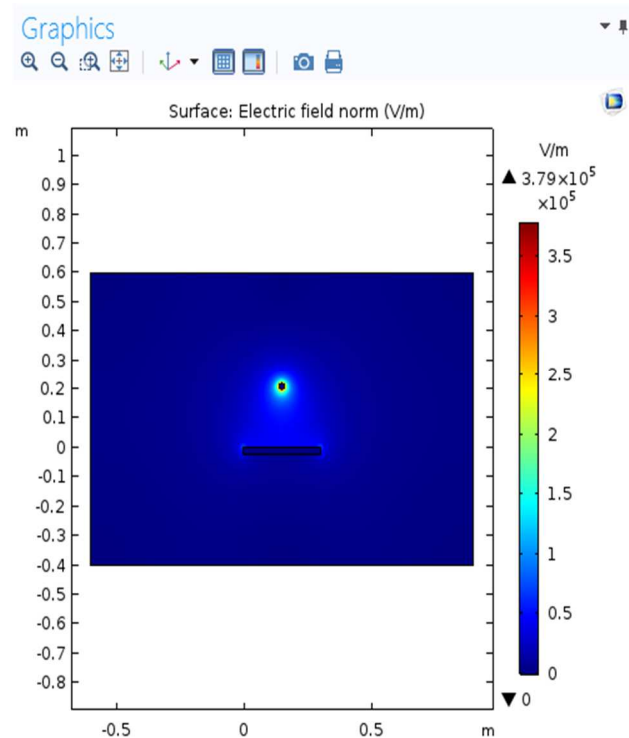
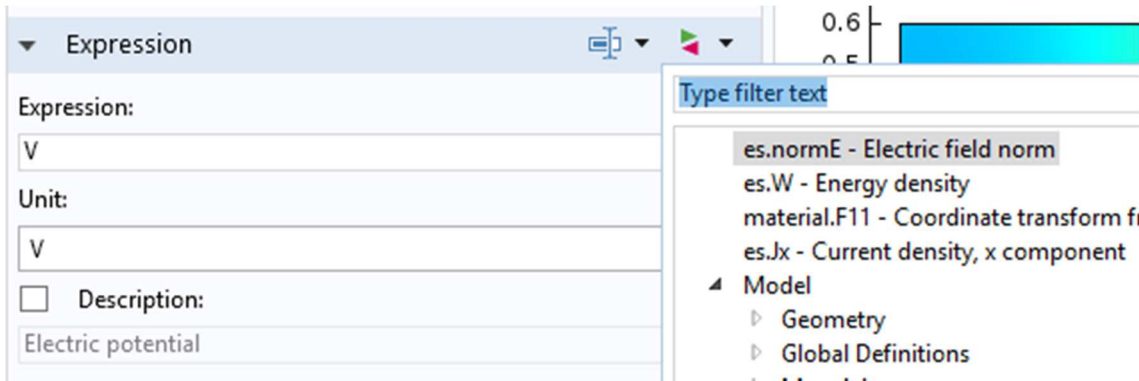


Figure (III.14) : Distribution Champ électrique.

Et clic gauche sur "Surface 1". Une nouvelle fenêtre s'ouvrira dans l'onglet des paramètres. Dans la barre d'expression, cliquez sur l'icône plus à droite pour ouvrir une liste déroulante. Cette liste déroulante contient différents paramètres de sortie. Dans ces paramètres, sélectionnez «*Electric Field Norm*». L'intensité du champ électrique du fil à la plaque s'affichera en sortie.



La Figure (III.14) : est présente la distribution de champ électrique entre le fil (électrode émissive) et la plaque (collectrice) la valeur max atteint 3.7910^5 (V/m).

De droit en cliquant sur le «2 Plot Group» Figure (III.15) et en sélectionnant la «Stream Line», la répartition des Champ électrique sous forme de lignes allant des fils aux plaques. La figure suivante montre la procédure pour modifier la sortie paramètre.

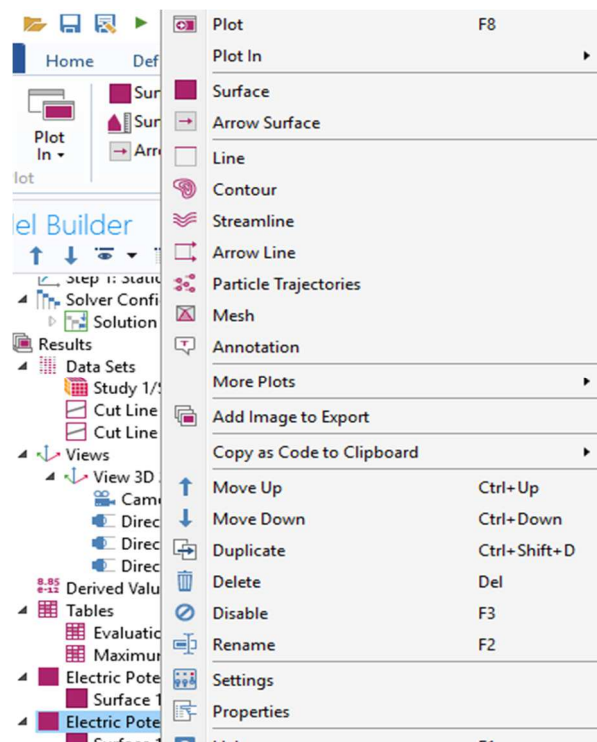


Figure (III.15) : modification du paramètre de sortie.

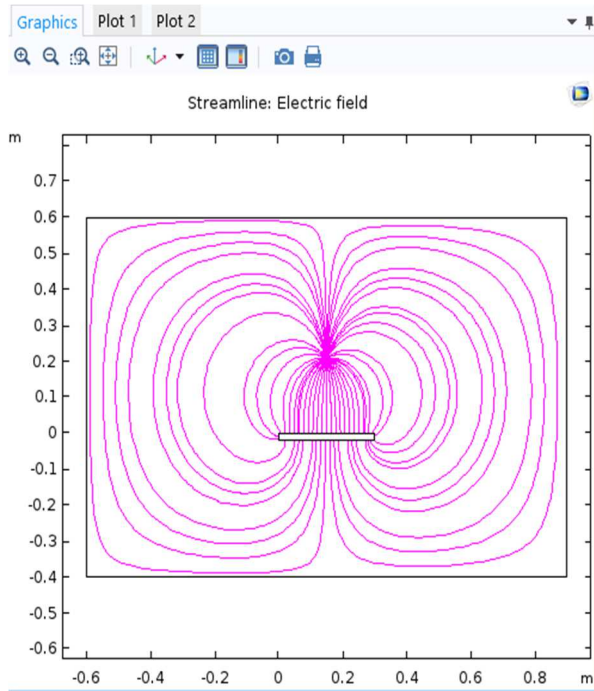


Figure (III.16) : Ligne de champ électrique.

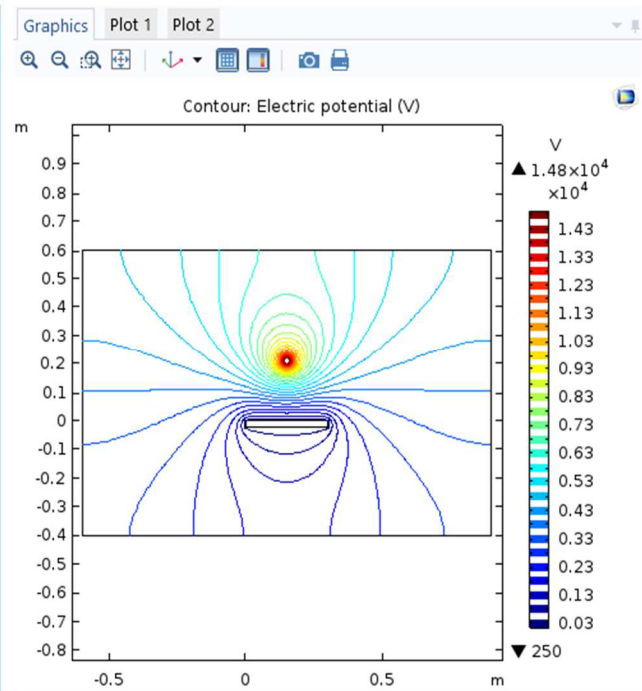
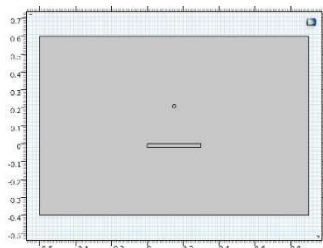


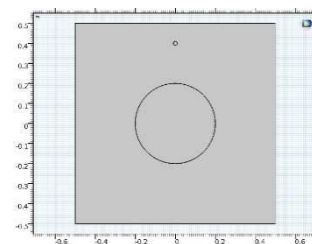
Figure (III.17) : le contour.

La simulation du précipitateur électrostatique est la partie principale de ce travail de la thèse. Le logiciel utilisé pour la simulation est la version 5.3 de Comsol Multiphysics. Dans ce chapitre (**Vue global du logiciel**) contient un guide sur Comsol Multiphysics et comment modéliser le champ électrique stationnaire dans un ESP.

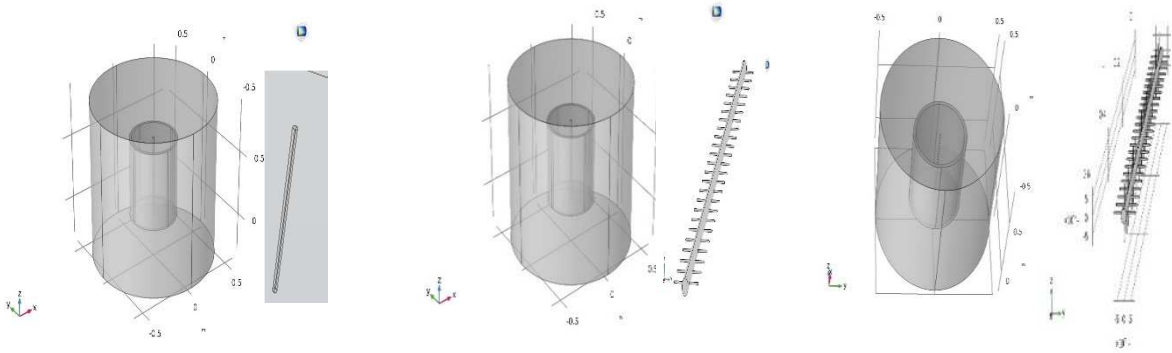
Notre simulation implique la modélisation du potentiel électrique et du champ électrique entre le fil et la plaque d'un ESP, lorsque seul de l'air pur non diffusé est présent entre le fil et la plaque. Nous ne simulons pas l'ensemble du processus, c'est-à-dire la création de région corona, chargement des particules de poussière et migration des particules de poussière. Parce que pour simuler l'ensemble du processus, en particulier la décharge corona, nous devons connaître le comportement et nature du gaz. Nous simulons uniquement le champ électrique et le potentiel électrique lorsqu'aucun gaz contenant des particules de poussière ne s'écoule à travers l'ESP. La simulation démarre avec le dessin de la structure d'un ESP. ci-dessus de ce paragraphe des figures montrent les différentes structures d'un ESP. (**fil-plaque 2D, fil-cylindre 2D Asymétrique, fil cylindre axisymétrique 3D, fil 2 pointes-cylindre axisymétrique 3D, file 4 pointes-cylindre axisymétrique 3D**). Hauteur de l'ESP est sélectionnée à 1 mètre. La distance entre le fil et la plaque est de 0,2 mètre. et le rayon des fils est de 10 mm, Niveau élevé de tension continue positive est appliquée à chaque fil. Les plaques et le cylindre sont connectés à la terre (la masse).



Fil plaque 2D



fil cylindre 2D



Fil-cylindre 3D

Fil 2 pointes cylindre

Fil 4 pointes cylindre

La figure (III.18) déférent géométrie pour simulation.

Nous simulons le potentiel électrique et l'intensité du champ électrique à différents niveaux de tension, soit 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV, 35 kV, 40 kV, et 45 kV

III.4 Simulation fil-plaque 2D :

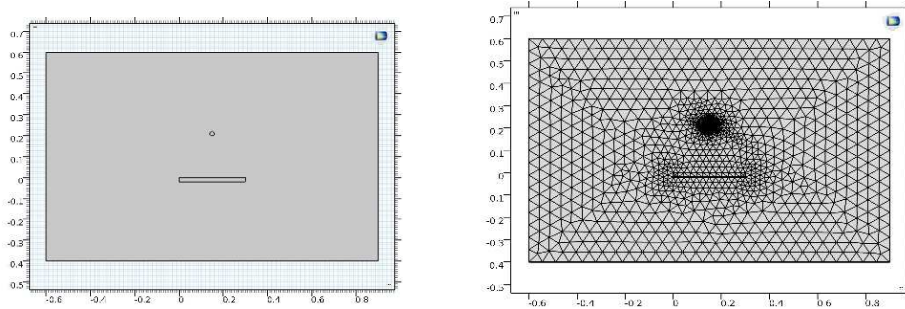
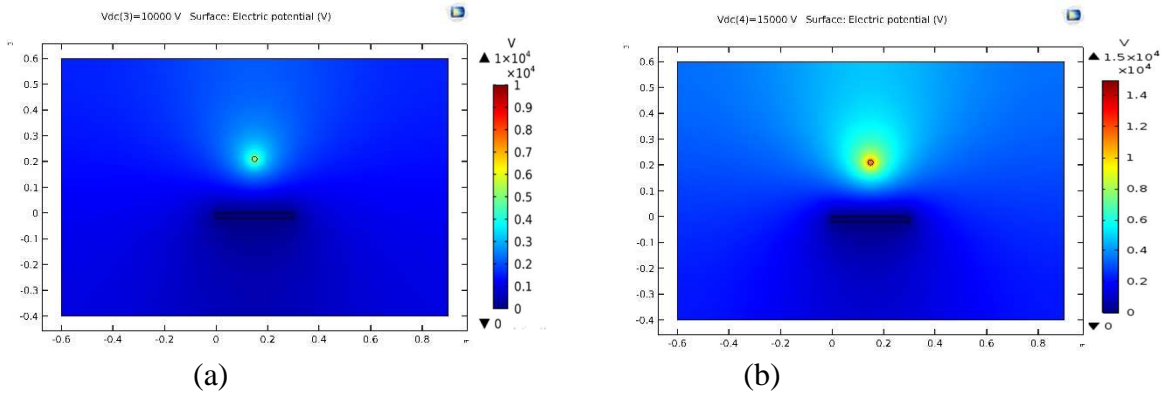


Figure (III.19) : Géométrie et maillage simulation fil plaque

III.4.1 Distribution de potentiel électrique



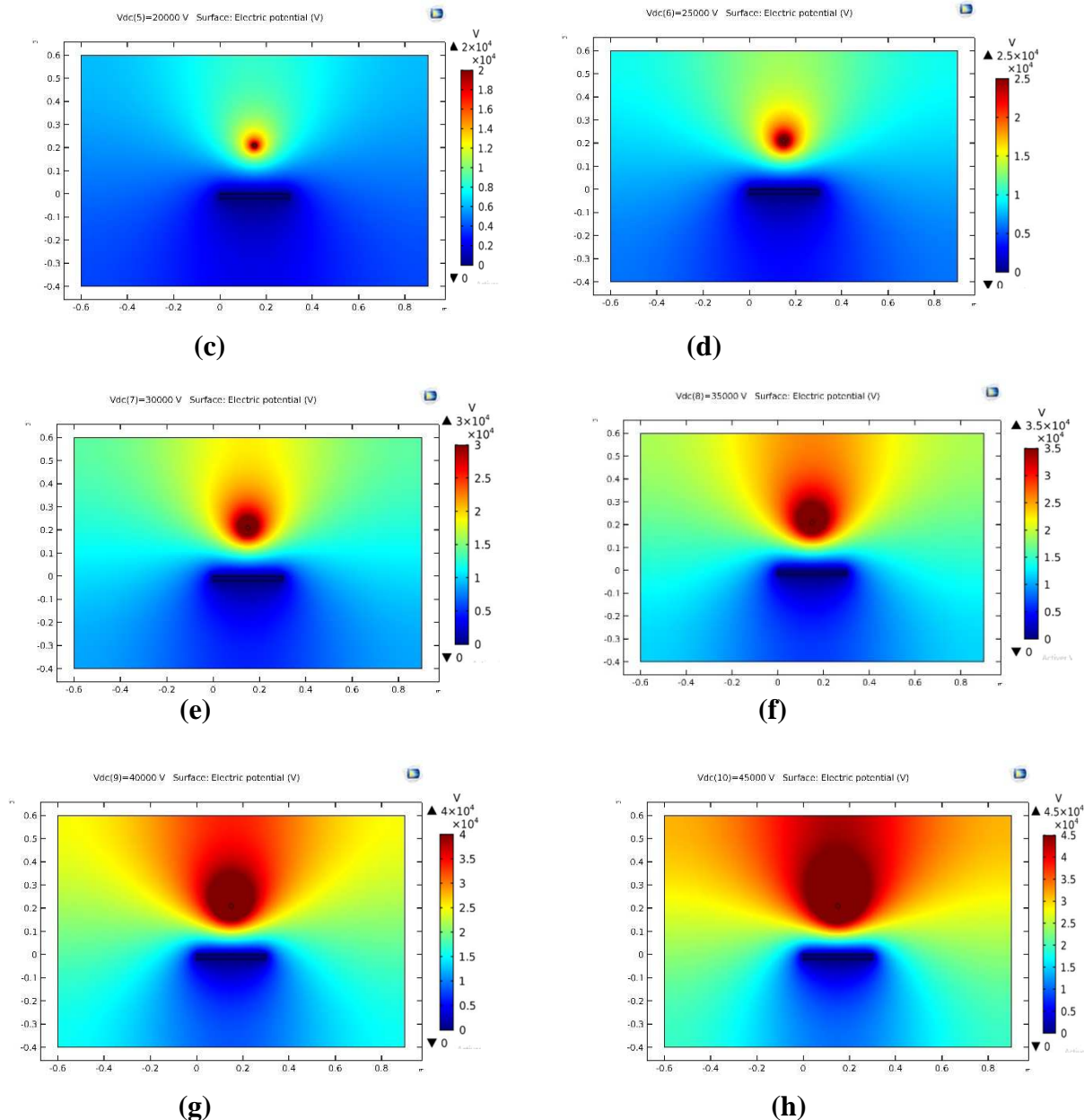


Figure (III.20) Distribution 2-D du potentiel électrique pour les différentes tensions appliquées
 $U = 10 \text{ kV}$ à 45 kV

Lorsqu'une haute tension est appliquée, l'air autour du fil devient ionisé et le courant commence à circuler dans l'air vers la plaque mise à la terre en raison d'une avalanche d'électrons. Nous avons montré la distribution du potentiel de fil à la plaque à différentes tensions appliquées, Les figures (a,b,c,d ,e,f,g,et h) montrent la répartition du potentiel électrique entre le fil et la plaque La figure (c) montre la distribution potentielle du fil à la plaque à 20 kV. Tel quel clairement d'après la figure que le potentiel se répartit de telle manière qu'il a une valeur élevée au fil et valeur zéro à la plaque de masse.

La barre d'échelle verticale sur la figure montre la valeur de couleur différente. La couleur jaune foncé a une valeur de 12 kV. Selon l'échelle de couleurs, il y a un potentiel élevé autour du fil. Ce potentiel diminue progressivement et devenir zéro, comme indiqué par la couleur bleu.

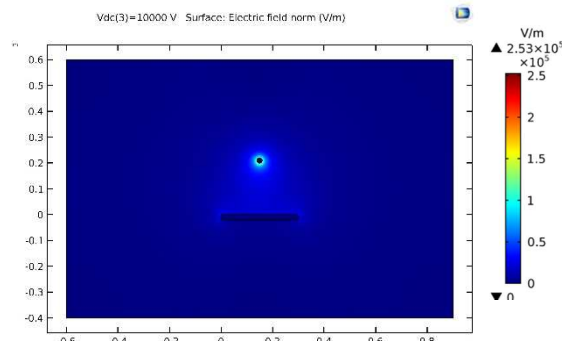
La figure (f) montre la distribution potentielle à 35kV. La distribution des couleurs est étirée figure (f) par rapport à la figure (c). La couleur jaune foncé s'est éloignée du fil, presque au centre de l'espace fil-plaque. La zone de couleur rouge autour du fil est augmentée, elle pousse la couleur jaune loin du fil.

A une tension appliquée de 45 kV, la figure (h) montre que la distribution potentielle en fil-plaque a augmenté suffisamment. La couleur verte clair apparaît au prêt de la plaque métallique. Selon la barre d'échelle verticale, la couleur vert clair a une valeur de 20 kV. Quand nous comparons la distribution potentielle à huit niveaux de tension différents, nous avons constaté que par l'augmentations de la valeur de la tension appliquée au fil ; la distribution de potentiel dans les différentes régions d'espace entre les fil-plaque augmente.

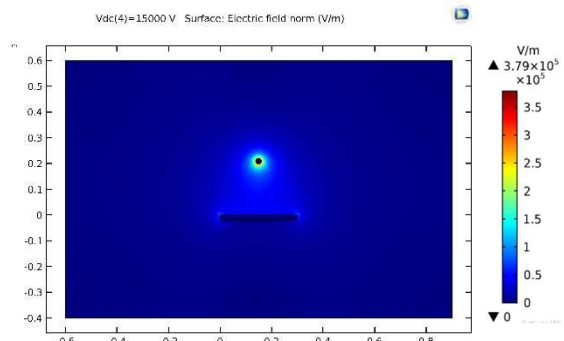
III.4.2 Distribution champ électrique :

Lorsqu'une tension est appliquée au fil, un champ se développe dans l'espace fil-plaque. Lorsque la valeur de la tension appliquée atteint V_c , tension de démarrage corona, le courant commence à circuler du fil vers la plaque en raison de l'ionisation de l'air entre le fil et la plaque. La force de ce champ est directement liée à la tension appliquée, car le champ électrique est le gradient négatif du potentiel électrique. En augmentant la tension appliquée, la force déposée augmente. Nous examinons l'intensité du champ électrique pour différentes valeurs de tension appliquée. L'intensité du champ électrique est plus intense près du fil et s'affaiblit progressivement à l'écart du fil vers la plaque de masse.

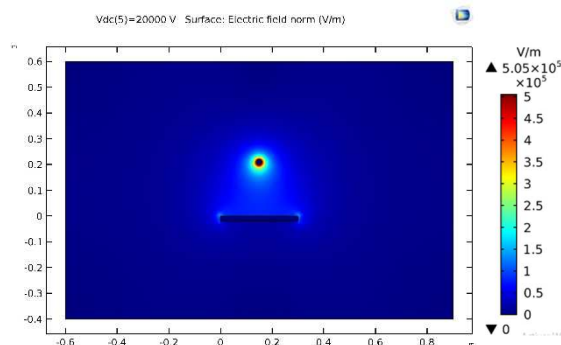
Les différents motifs de couleur montrent la force du champ entre le fil et la plaque d'un ESP. Les Figures (a, b, c, d, e, f, g, et h) montrent l'intensité du champ électrique entre le fil et la plaque d'un ESP.



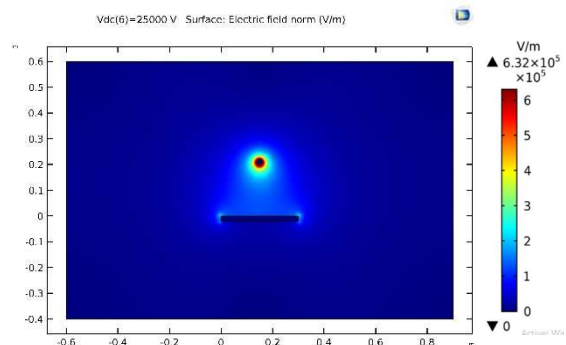
(a)



(b)



(c)



(d)

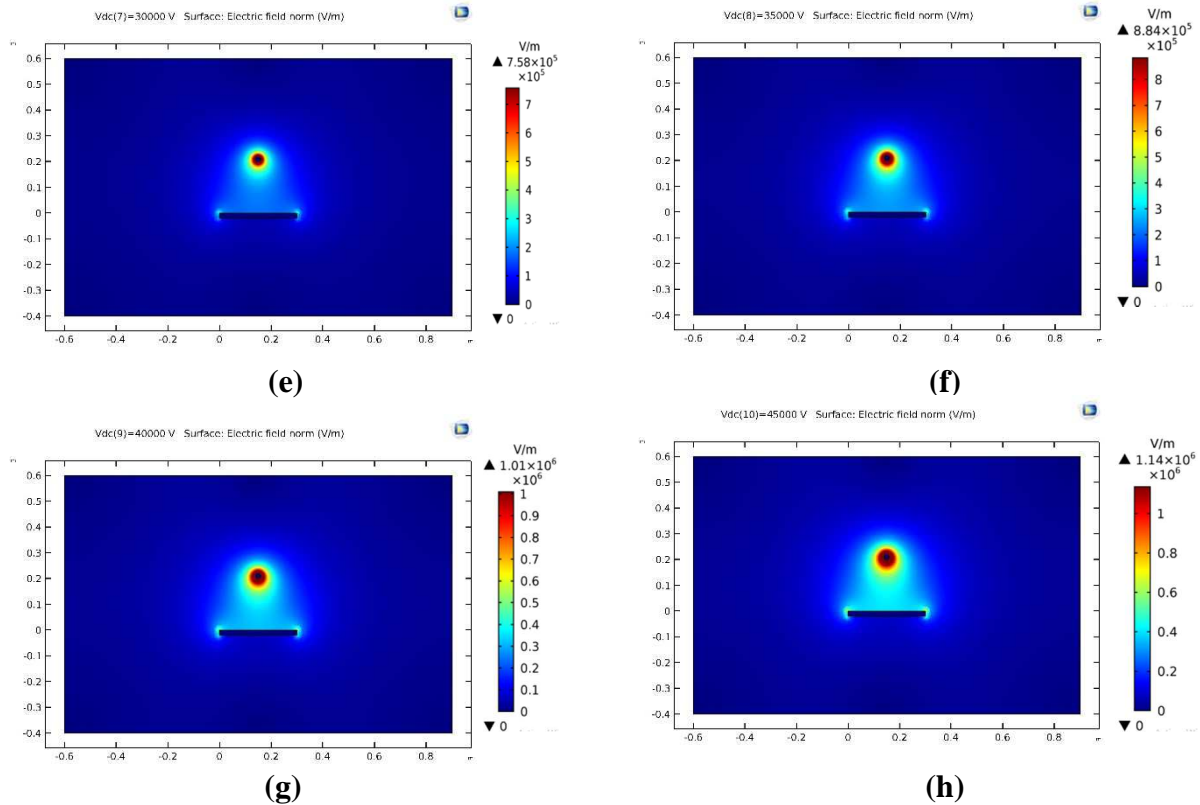
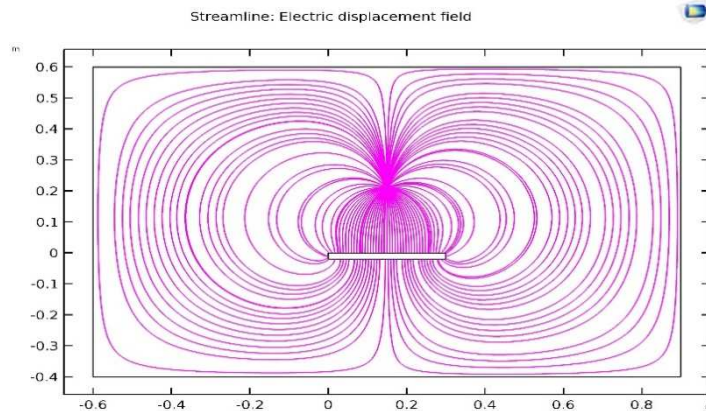


Figure (III.21) : Distribution 2D du champ électrique pour les différentes tensions appliquées
 $U = 10 \text{ kV} - 45 \text{ kV}$

La figure (c) montre l'intensité du champ électrique entre le fil et la plaque à 20 kV. L'intensité du champ électrique a une valeur élevée près du fil car la couleur rouge entoure le fil. La couleur rouge a une valeur maximale, comme indiqué dans la barre d'échelle verticale. Cette couleur rouge se transforme progressivement en couleur jaune montrant que l'intensité du champ électrique a diminué loin du fil. La valeur du champ électrique devient $3.4 \times 10^5 \text{ V/m}$ dans la région jaune de la figure (c). De même, la couleur jaune passe à la couleur verte clair qui a une valeur de $2.5 \times 10^5 \text{ V/m}$. Enfin, cette couleur vert clair devient bleu clair puis devient bleu foncé. Ensuite, le champ devient beaucoup plus faible à la plaque, la valeur de champ plus la faible dans la géométrie devient seulement $1,38 \text{ V/m}$.

III.4.3 Distribution des lignes champ électrique :

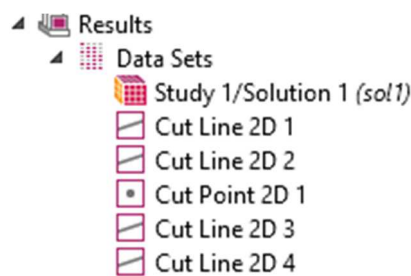
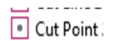
La figure (III.22) montre la répartition des lignes de champ électrique entre le fil et la plaque d'un ESP. Ces lignes émergent du fil et se terminent à la plaque. Dans notre simulation, le modèle de distribution des lignes de champ électrique reste le même à huit niveaux de tension appliquée différents.



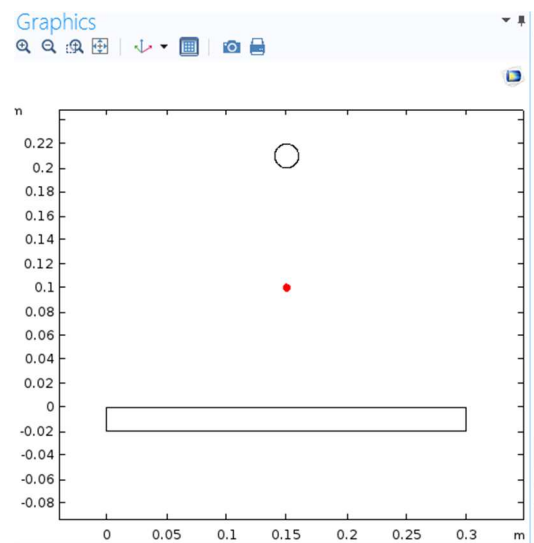
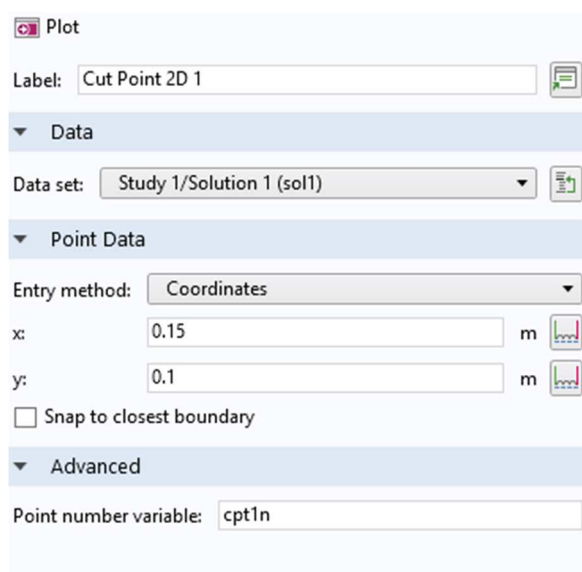
La figure (III.22) distributions des lignes de champ électrique

La tension appliquée elle influence qu'à l'intensité du champ électrique. Mais ; elle n'est pas influent sur le schéma de distribution des lignes de champ électrique entre le fil et la plaque. Nous avons mesuré la valeur du potentiel et le champ électrique au milieu entre le fil et la plaque collectrice. La procédure pour prendre cette valeur et comme suit.

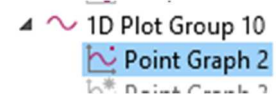
Faites un clic droit sur "Data Sets" sous l'onglet "Results". Cliquez sur "Cut point 2D"



Définissez les coordonnées du point de coupe. ($x=0.15\text{m}$ milieu de plaque, $y=0.1\text{m}$ milieu entre fil et plaque).



Clique sur *plot* une point rouge (•) apparaît au milieu (fil-plaque)



Faites un clic droit sur "Résultats" et ajoutez un groupe de *plot 1D*.

Cliquez droit sur le groupe de " *plot 1D* » et ajoutez un *point graph*. dans l'interface du *point graph*, sélectionnez "Cut point 2D" comme source de données et cliquez sur l'icône du "plot" pour générer le graphe

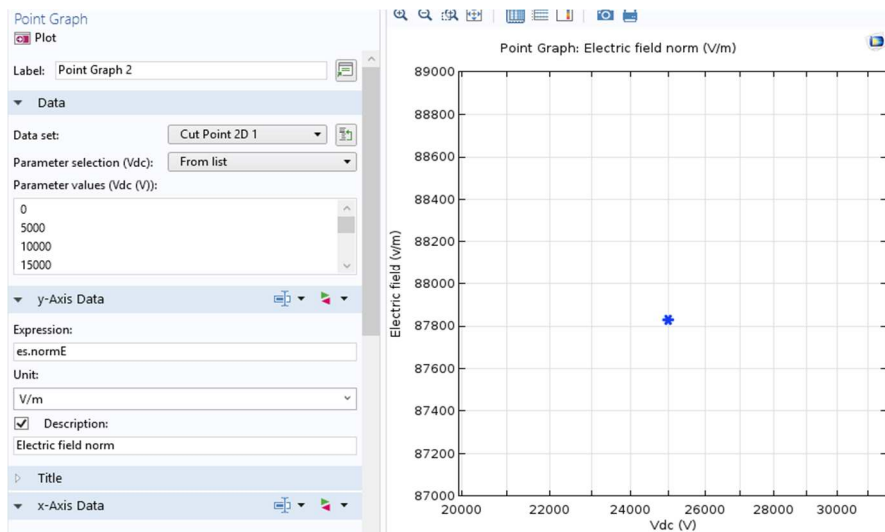


Figure (III.22) : valeur de champ électrique au point milieu à 25kV

Nous présentons les résultats de notre simulation dans le tableau III.1. Ce tableau montre les différentes valeurs du potentiel et de l'intensité du champ électrique dans l'espace fil-plaque à différents niveaux de tension.

Tension appliquée	Potentiel (V)			Champ électrique (V/m)	
	Au fil	Au centre d'espacement fil-plaque	À la plaque	Au fil	Au centre de l'espacement fil-plaque
10 kV	1×10^4 V	3.15 kV	0V	2.53×10^5 V/m	3.50×10^4 V/m
15 kV	1.5×10^4 V	4.735 kV	0V	3.79×10^5 V/m	5.27×10^4 V/m
20 kV	2×10^4 V	6.312 kV	0V	5.05×10^5 V/m	7.01×10^4 V/m
25 kV	2.5×10^4 V	7.885 kV	0V	6.32×10^5 V/m	8.79×10^4 V/m
30kV	3×10^4 V	9.500 kV	0V	7.58×10^5 V/m	10.5×10^4 V/m
35 kV	3.5×10^4 V	11.05 kV	0V	8.84×10^5 V/m	1.23×10^5 V/m
40 kV	4×10^4 V	12.62 kV	0V	1.01×10^6 V/m	1.41×10^5 V/m
45 kV	4.5×10^4 V	14.25 kV	0V	1.14×10^6 V/m	1.58×10^5 V/m

Tableau III.1 Valeur de potentiel et champ électrique.

La figure (III.24) montre le profil du potentiel électrique pour différents niveaux de tension applique (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 et 45) kV .Le potentiel tracé sur la figure. (III.23) représente une coupe droite dans l'espace inter-électrodes en une dimension suivant l'axe des Y, et à partir

du point ($x= 0.15$, $y= 0.2$) jusqu'à la surface du plaque (l'électrode collectrice) avec les coordonnées suivante ($x= 0.15$, $y= 0$).

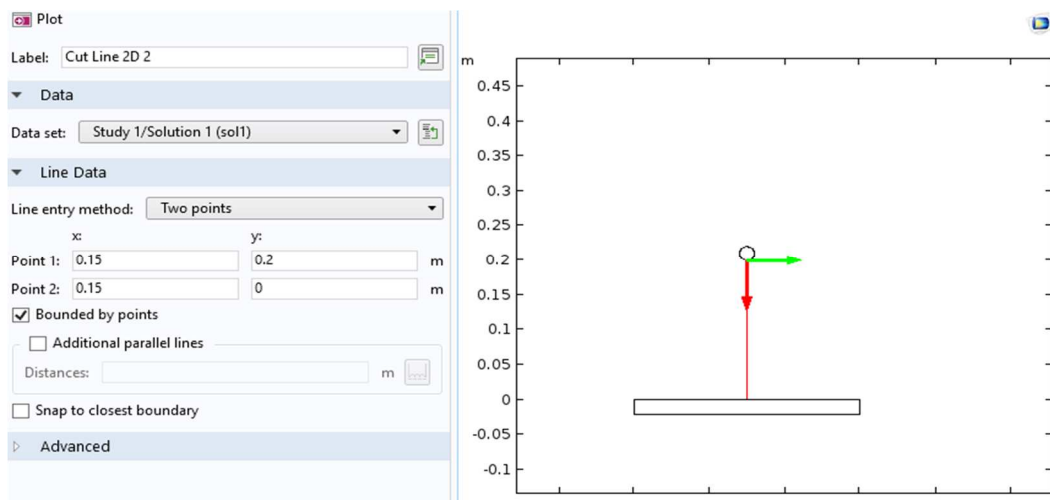


Figure (III.23) : coupe droite dans l'espace inter-électrodes.

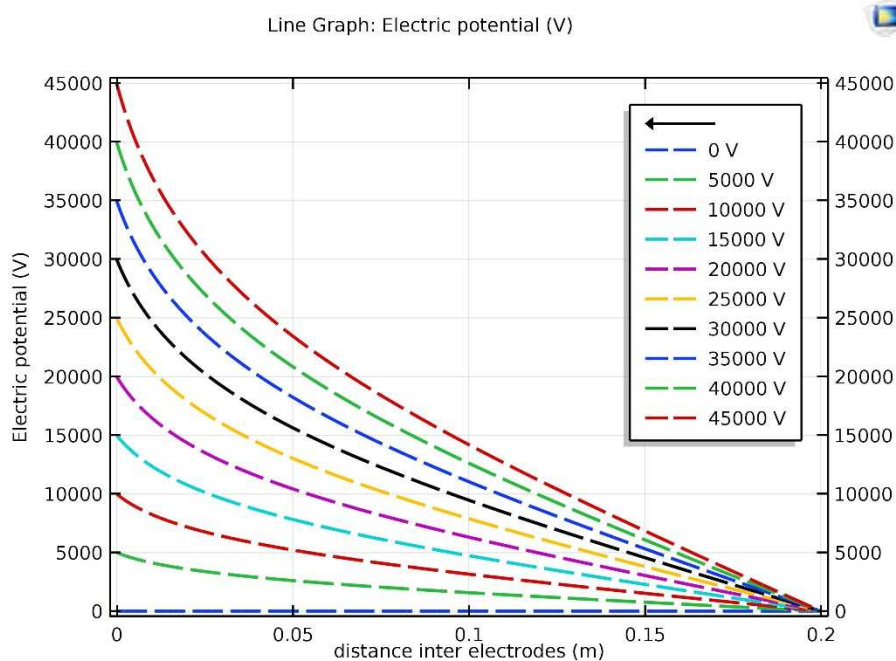


Figure (III.24) : Profil du potentiel électrique tout au long de la distance inter-électrodes

Les résultats numériques (figure III.24) montrent que le potentiel électrique diminue de façon monotone avec la position $X(x= 0.15\text{m}, y= 0.2\text{m})$. Sa valeur est très importante à proximité de la zone d'ionisation et atteint zéro à la surface de la plaque mis à la terre. Le profil du potentiel électrique est à peu près la même pour toutes les tensions appliquées

A partir la figure (III.25) qui montre que l'intensité du champ électrique est plus supérieure sur les côtes (coin supérieure) de la plaque que sur le reste .ces pourquoi nous voulons mesure

et comparer les valeurs du champ électrique au milieu de la surface de la plaque et les cotes supérieur de la plaque

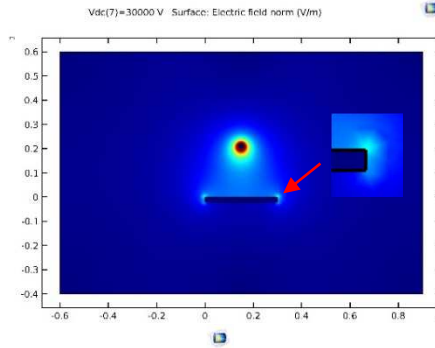
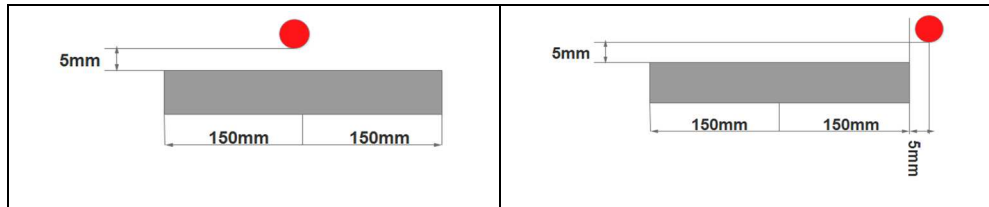
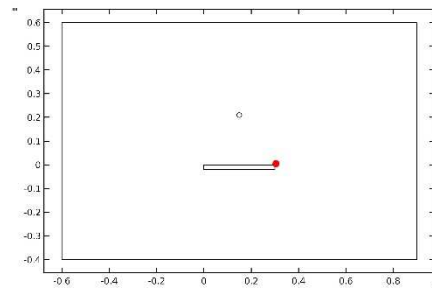
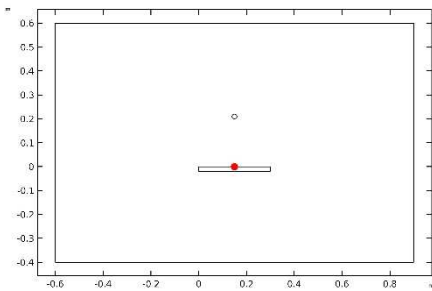


Figure (III.25) : effet de point Sur les coin.



Tension applique (kV)	Tension au point de mesure 1	Champ électrique au point de mesure 1	Tension au point de mesure 2	Champ électrique au point de mesure 2
10	151 V	3.02×10^4 v/m	262 V	4.6×10^4 v/m
15	226 V	4.52×10^4 v/m	393 V	7.04×10^4 v/m
20	302 V	6.06×10^4 v/m	524 V	9.3×10^4 v/m
25	377 V	7.54×10^4 v/m	655 V	1.16×10^5 v/m
30	453 V	9.06×10^4 v/m	786 V	1.4×10^5 v/m
35	528 V	1.06×10^5 v/m	918 V	1.66×10^5 v/m
40	604 V	1.21×10^5 v/m	1050 V	1.88×10^5 v/m
45	679 V	1.36×10^5 v/m	1180 V	2.11×10^5 v/m

Tableau III.2 : valeur de potentiel et champ électrique

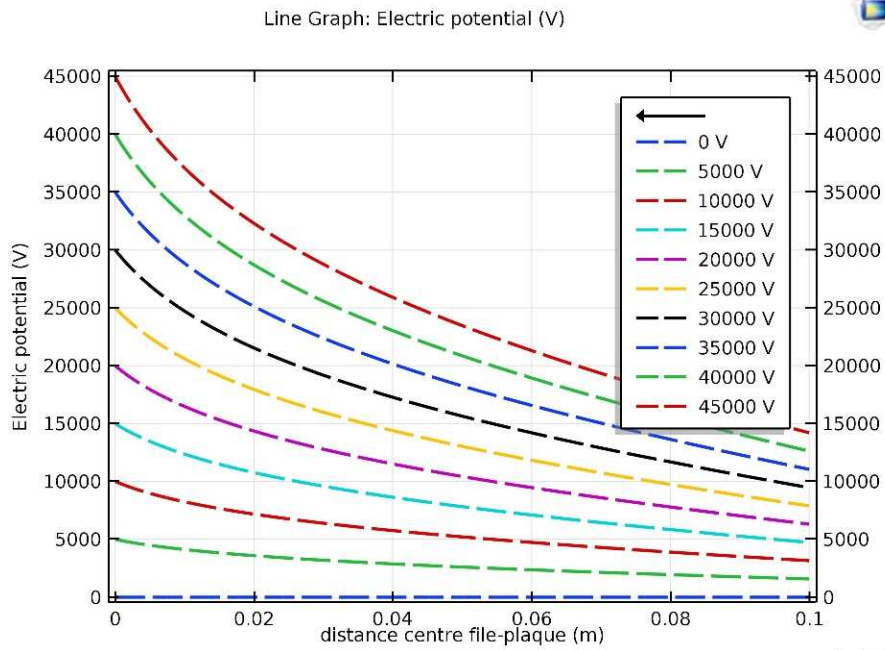


Figure (III.26) profil de potentiel jusqu'à point milieu.

La figure représente le potentiel suivant la coupe droite dans l'espace inter-électrodes en une dimension suivant l'axe des Y et à partir du Point (x= 0.15, y= 0.2) m jusqu'à le centre entre fil-plaque avec les Coordonnées suivante (x= 0.15, y= 0.1) m.

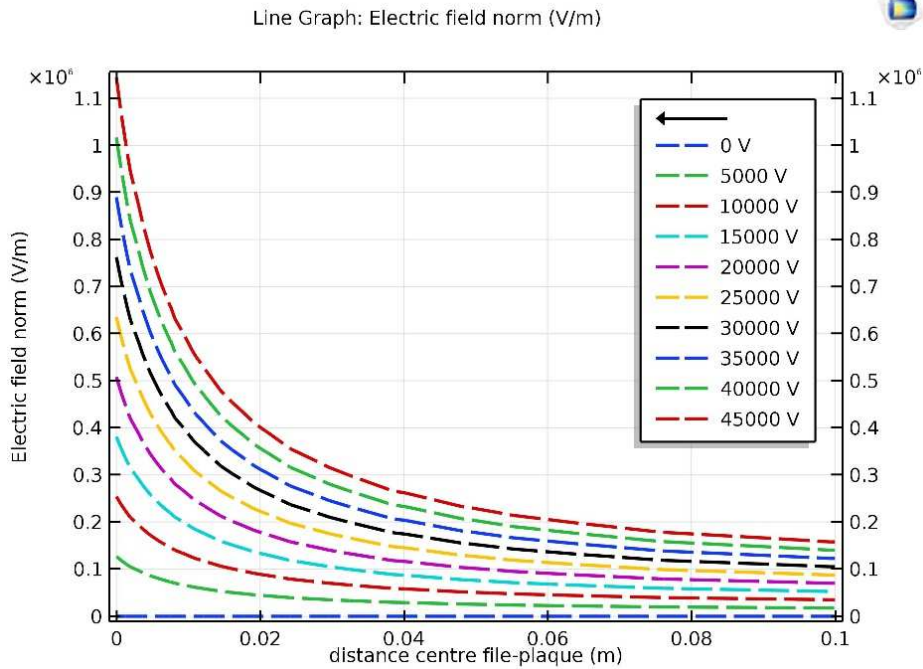
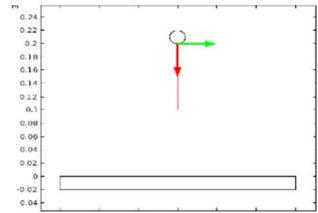


Figure (III.27) : représente le champ électrique sur la même coupe que la figure (III.26).

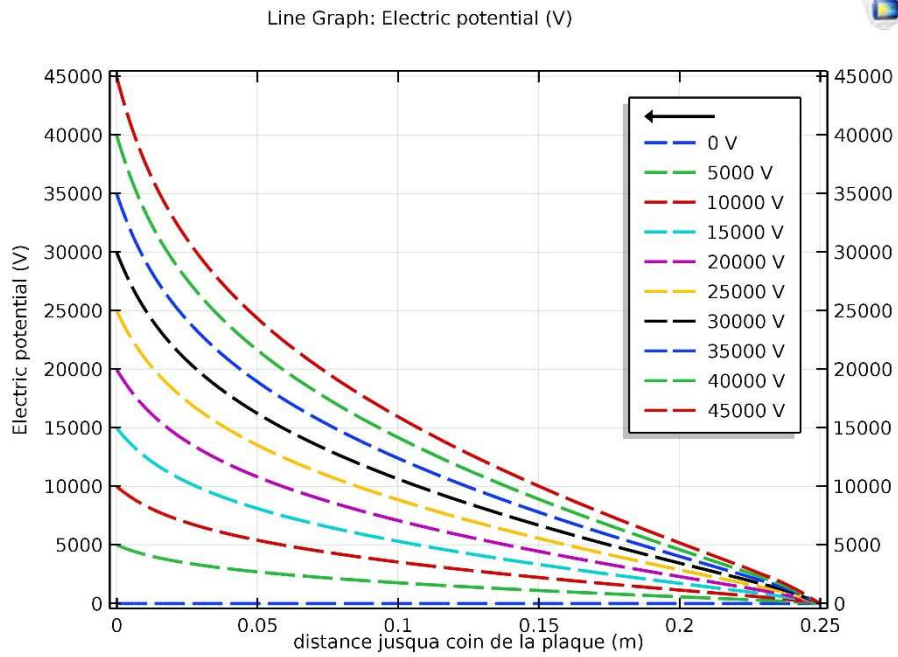


Figure (III.28) profil de potentiel jusqu'à point milieu

La figure représente le potentiel sur une ligne de coupe dans l'espace inter-électrodes en une dimension suivant.
 À partir du point (x= 0.15, y= 0.2) m jusqu'à le cote de la plaque avec les coordonnées suivante (x= 0.30, y= 0) m.

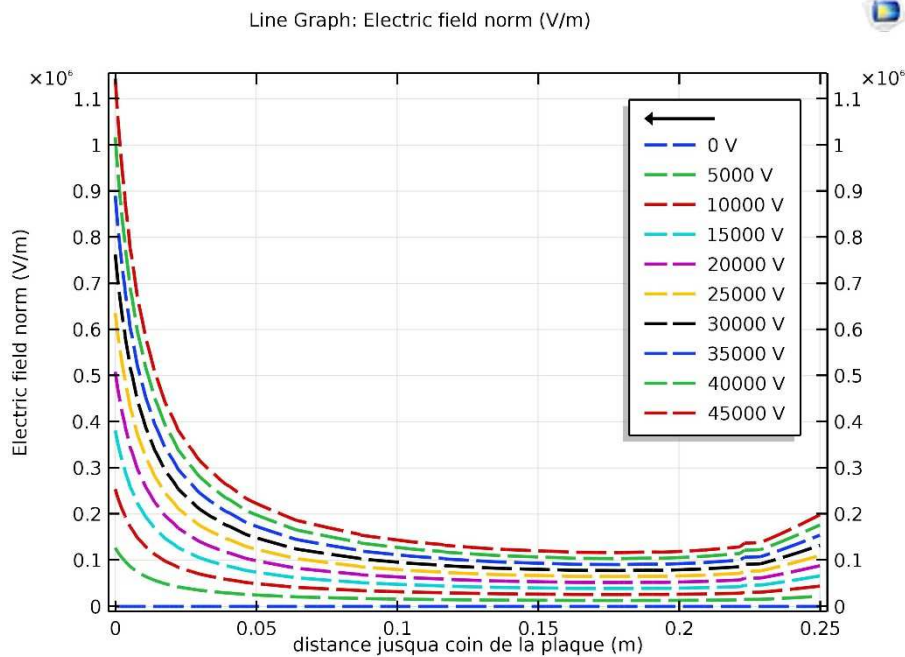
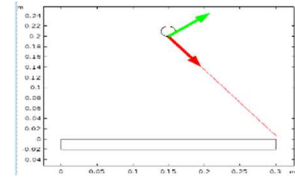
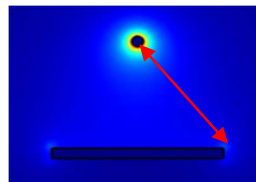
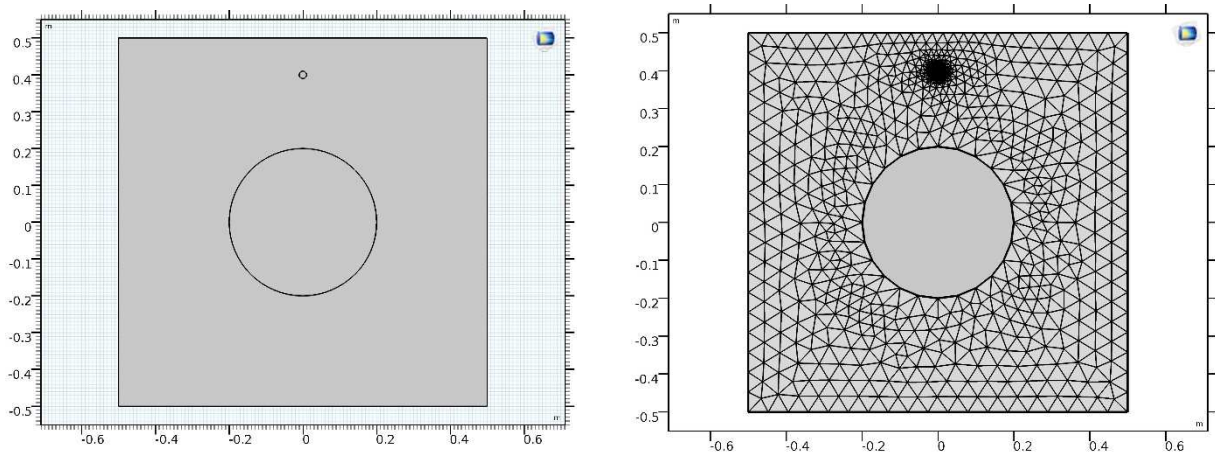


Figure (III.29) : Profil de champ électrique jusqu'à point milieu

En observe que la valeur du champ électrique diminue progressivement avec l'augmentation entre les deux point de coupe démineur sauf quand on approche au l'ongle de la plaque la valeur du champ et augment de nouveau. Cela est dû à un effet de pointe très important qui provoque une Activité ionisante tout proche de ce coin.

III-5 Simulation file/cylindre 2D :

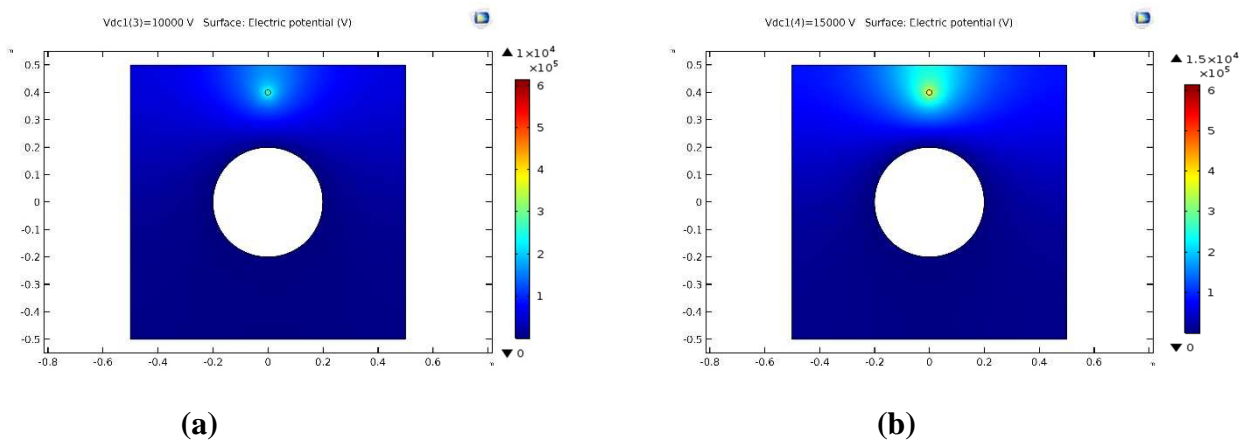
La figure III.30 représente l'ensemble des domaines de calcul de la simulation. Le domaine se compose d'une électrode de masse (cylindre) avec un diamètre de 0.4 m et une électrode active de diamètre 0.02 m avec un espace inter électrodes de 0.2 m où se produit la décharge couronne. Le domaine correspond à l'espace environnant avec les dimensions suivantes (1 m x 1 m).



Figure(III.30) Représentation 2D de la configuration file/cylindre

III-5.1. Distribution du potentiel électrique dans la zone de la décharge :

Dans cette partie, on s'intéresse à étudier la distribution du potentiel électrique dans la zone de la décharge, l'intervalle qui sépare l'électrode couronne (fil) et l'électrode de masse (cylindre l'électrode collectrice), dans le plan X-Y. Les barres de couleur indiquent les amplitudes du potentiel électrique étudié, pour les tensions appliquées Vdc allant de 10 kV jusqu'à 45 kV.



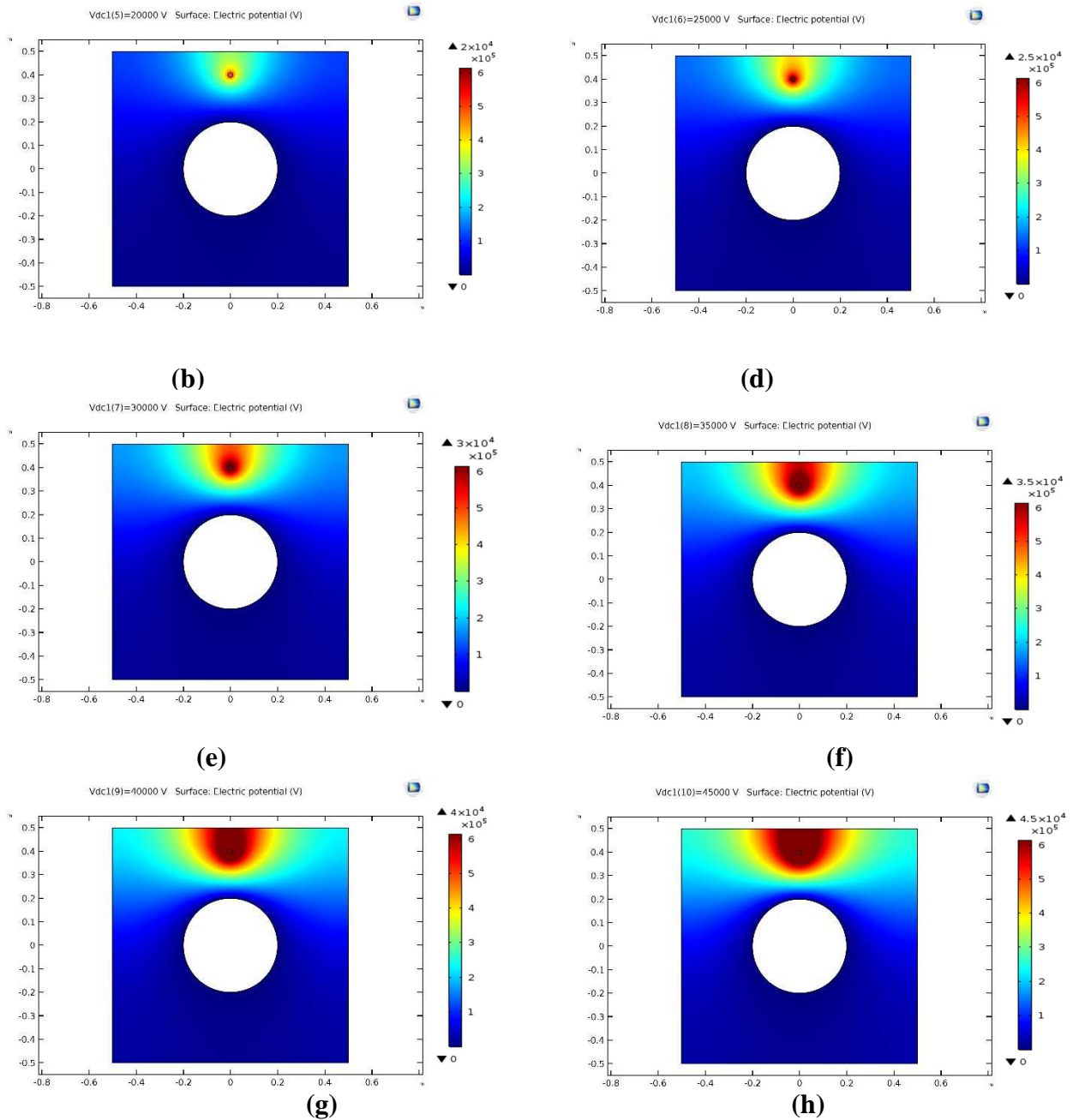


Figure.III.31 : Distribution 2-D du potentiel électrique pour les différentes tensions appliquées $U = 10\text{kV}-45\text{Kv}$

La figure III.31 (a, b, c, d, e, f, g, h,) montre respectivement les résultats numériques de la distribution du potentiel électrique, les valeurs du potentiel électrique sont plus élevées à la surface de l'électrode couronne et diminue en allant vers le cylindre de masse

La figure III.32 montre le profil du potentiel électrique pour différents niveaux de tension applique (de 10kV à 45kV avec un pas de 5kV).Le potentiel tracé (figure.III.30) représente une coupe droite dans l'espace inter-électrodes en une dimension suivant l'axe des Y, et à partir du point $(x = 0, y = 0.4\text{m})$ jusqu'à la surface du cylindre (l'électrode masse) avec les coordonnées suivante $(x = 0, y = 0.2 \text{ mm})$.

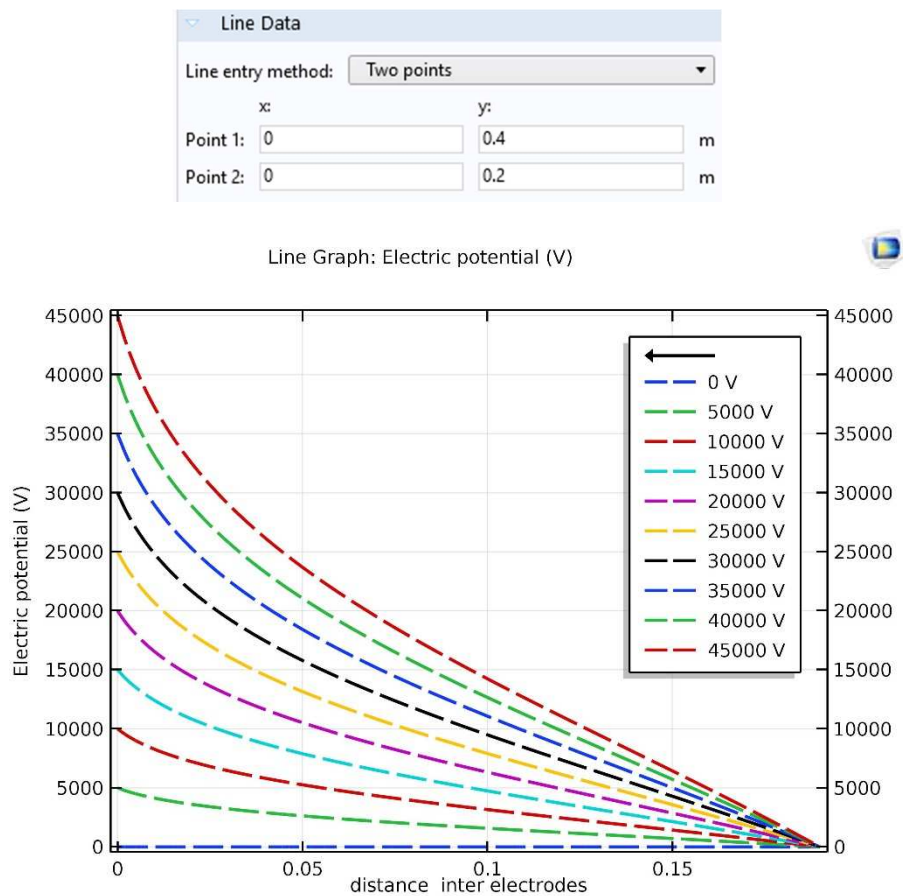


Figure (III. 32) : Profil du potentiel électrique tout au long de la distance inter-électrodes

La figure III-32montrent que le potentiel électrique diminue de progressivement et atteint zéro à la surface du cylindre. Pour toutes les tensions appliquées

Nous veulents mesurer la valeur de potentiel électrique jusqu'à le pion milieu inter électrodes avec coupe droite dans l'espace inter-électrodes en une dimension suivant l'axe des Y, et à partir du point ($x=0$, $y=0.4\text{m}$) jusqu'à la le centre (inter électrodes) avec les coordonnées suivante ($x=0$, $y=0.3\text{ mm}$).

Line entry method: Two points

	x:	y:	
Point 1:	0	0.4	m
Point 2:	0	0.3	m

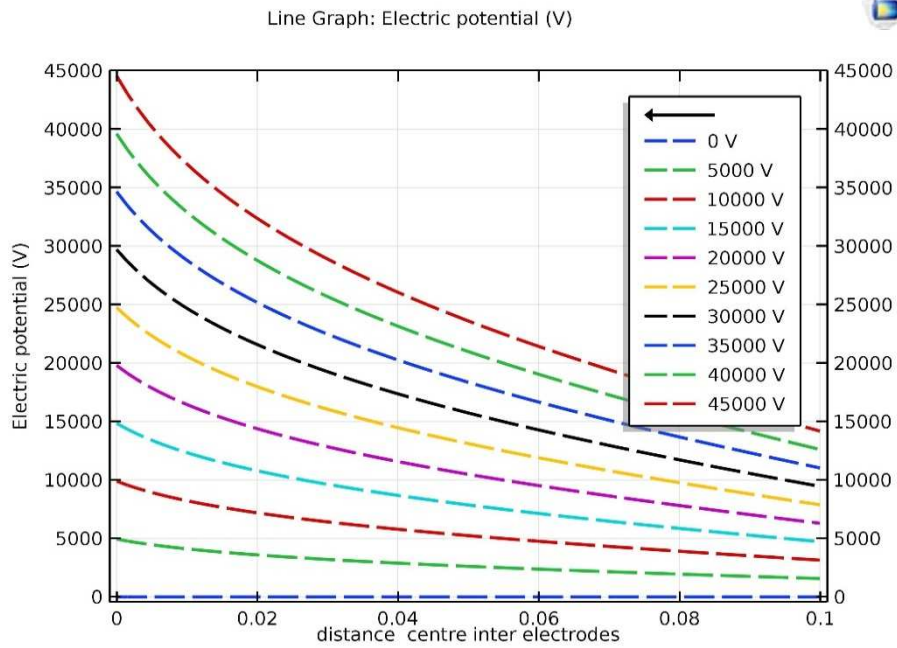


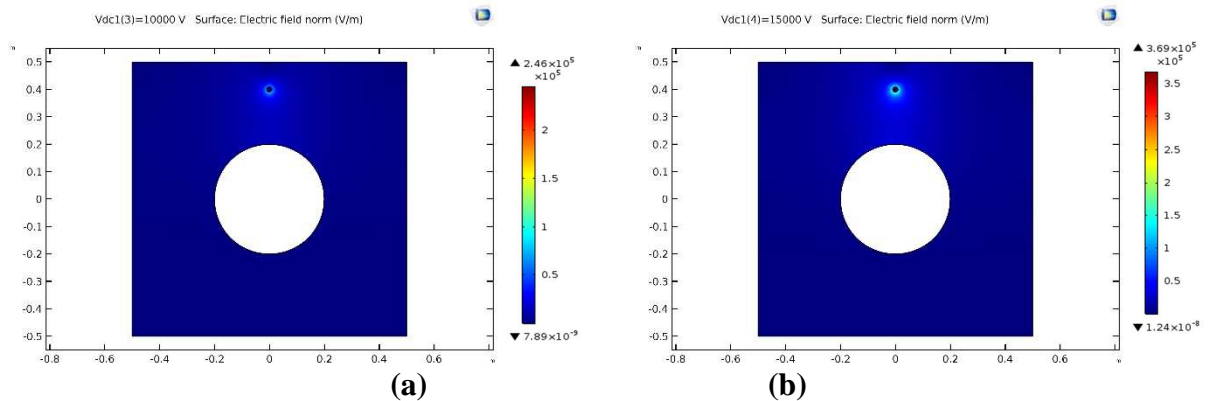
Figure (III.33) profil de potentiel jusqu'à point milieu

Tension applique	Potentiel au point De mesure 1
10 kV	3.212 Kv
15KV	4.845 kV
20 KV	6.295 kV
25 KV	8.055 kV
30 KV	9.630 kV
35 KV	9.630 kV
40 KV	12.753 kV
45 KV	14.120 kV

Tableau III. 3 valeurs de potentiel au point milieu

En remarque que le potentiel a une valeur important au milieu entre les deux électrodes presque le 1/3 de la tension applique

III.5.2.La distribution du champ électrique



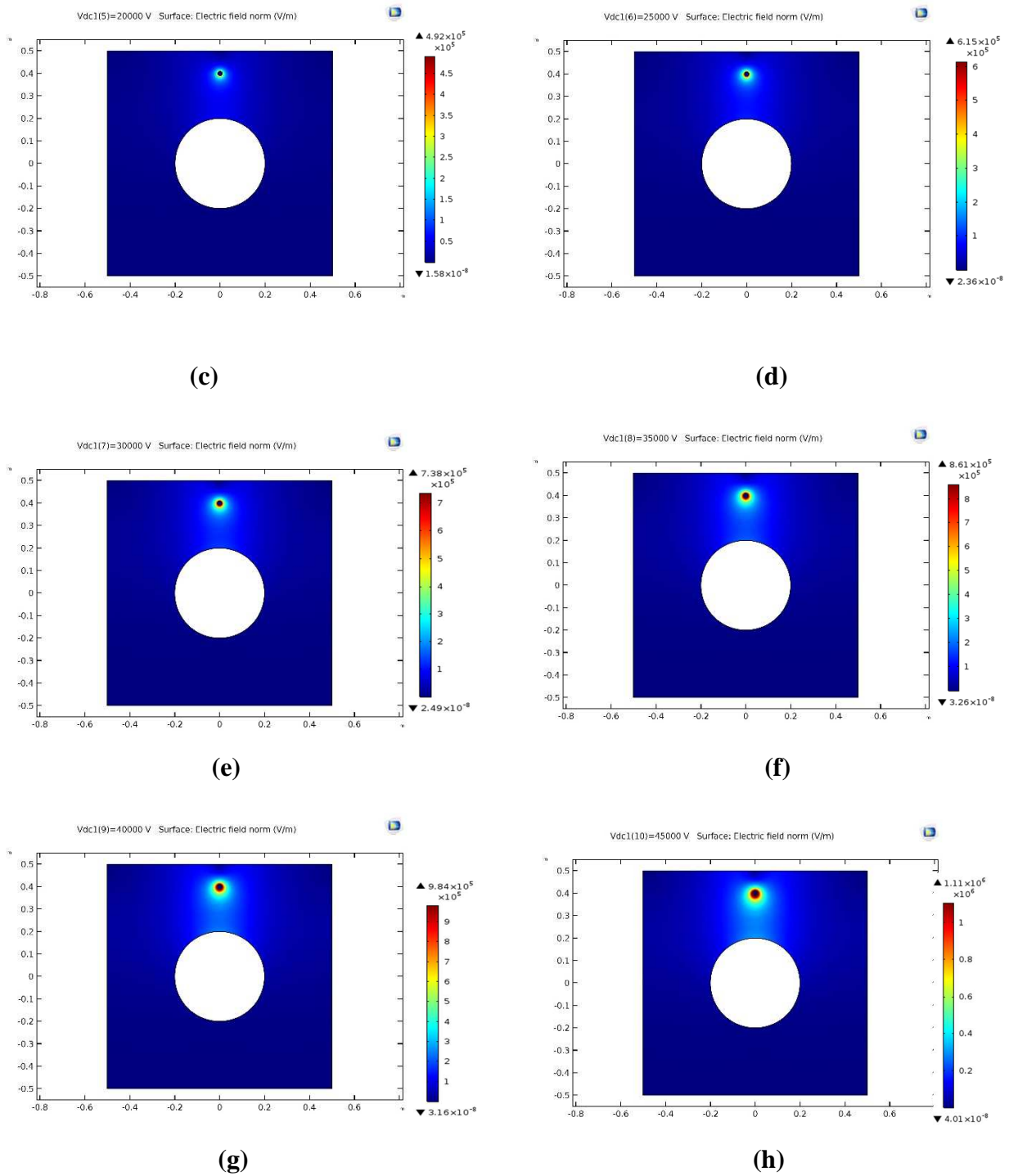


Figure.III.34 : Distribution 2-D du champ électrique pour les différentes tensions appliquées U= 10kV-45 kV

La figure III. 34 (a, b, c, d, e, f, g, h) présent respectivement les résultats numériques de la distribution du champ, les valeurs champ sont plus intenses à la surface de l'électrode couronne et diminue en allant vers le cylindre.

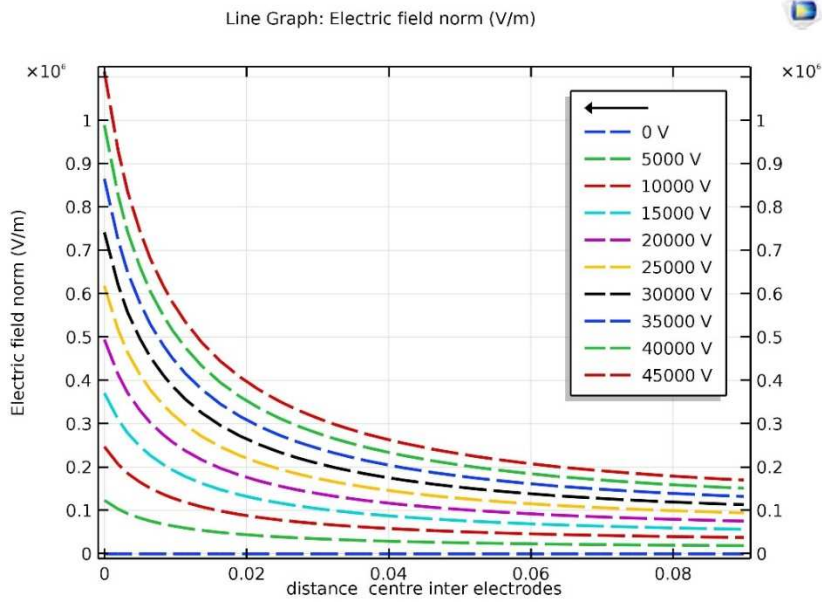


Figure (III.35) profil de champ électrique jusqu'à point milieu pour différentes tensions

Tension appliquée	champ à l'électrode	Champ au point milieu
10 kV	$2.46 \cdot 10^5 \text{ v/m}$	$0.360 \cdot 10^5 \text{ v/m}$
15KV	$3.69 \cdot 10^5 \text{ v/m}$	$0.544 \cdot 10^5 \text{ v/m}$
20 KV	$4.93 \cdot 10^5 \text{ v/m}$	$0.726 \cdot 10^5 \text{ v/m}$
25 KV	$6.16 \cdot 10^5 \text{ v/m}$	$0.912 \cdot 10^5 \text{ v/m}$
30 KV	$7.39 \cdot 10^5 \text{ v/m}$	$1.089 \cdot 10^5 \text{ v/m}$
35 KV	$8.62 \cdot 10^5 \text{ v/m}$	$1.268 \cdot 10^5 \text{ v/m}$
40KV	$9.85 \cdot 10^5 \text{ v/m}$	$1.467 \cdot 10^5 \text{ v/m}$
45 KV	$1.11 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	1.63310^5 v/m

Tableau III. 4 valeurs de champ électrique la électrode et au point milieu pour les différentes tensions appliquées

III.5.3 distributions des lignes de champ électrique :

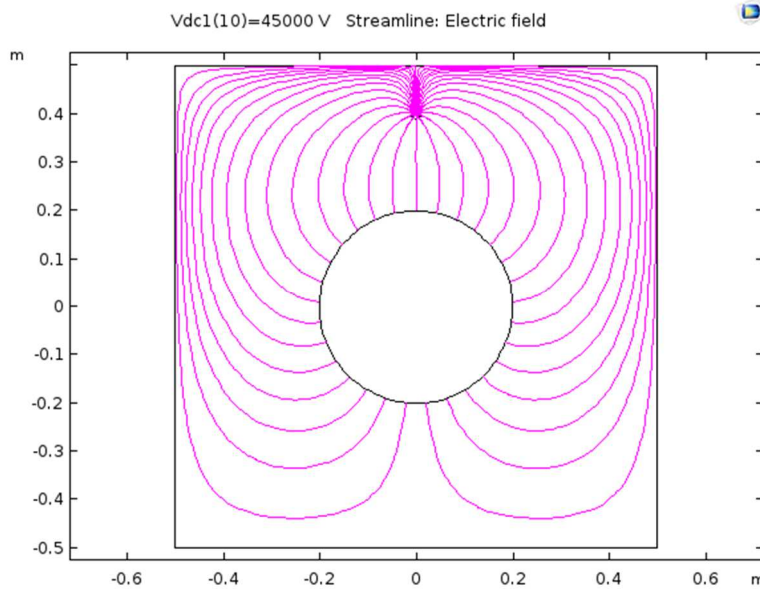


Figure III.36 distributions des lignes de champ électrique.

III.6 Simulation file cylindre axisymétrique 3D :

Nous présentent dans cette simulation des domaines de calcul de la simulation. Le domaine se compose d'une électrode de masse cylindre avec (de 0.4 m diamètre ,0.6m longueur) et une électrode active (0.015m de diamètre, 0.6m de longueur) avec un espace inter électrodes de 0.2 m où se produit la décharge couronne. Le domaine correspond à l'espace environnant avec les dimensions suivantes (1 m x 1 m). Nous utilise 3 modèles d'électrodes.

III.6.1 Electrode tube sans pointe

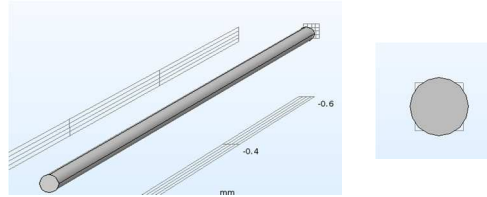


Figure III.37. forme de l'électrode tube sans pointe

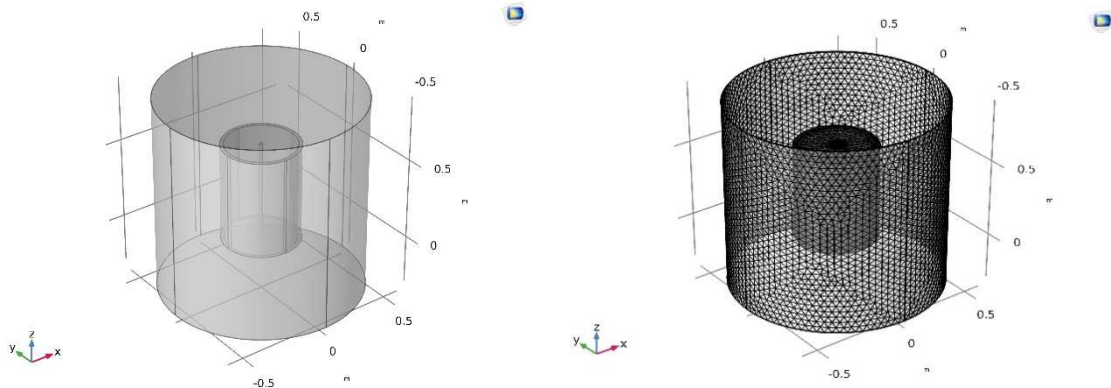


Figure III 38 (a) géométrie 3D

Figures III. 38 (b) maillage

Multislice: Electric field norm (V/m) Streamline: Electric field

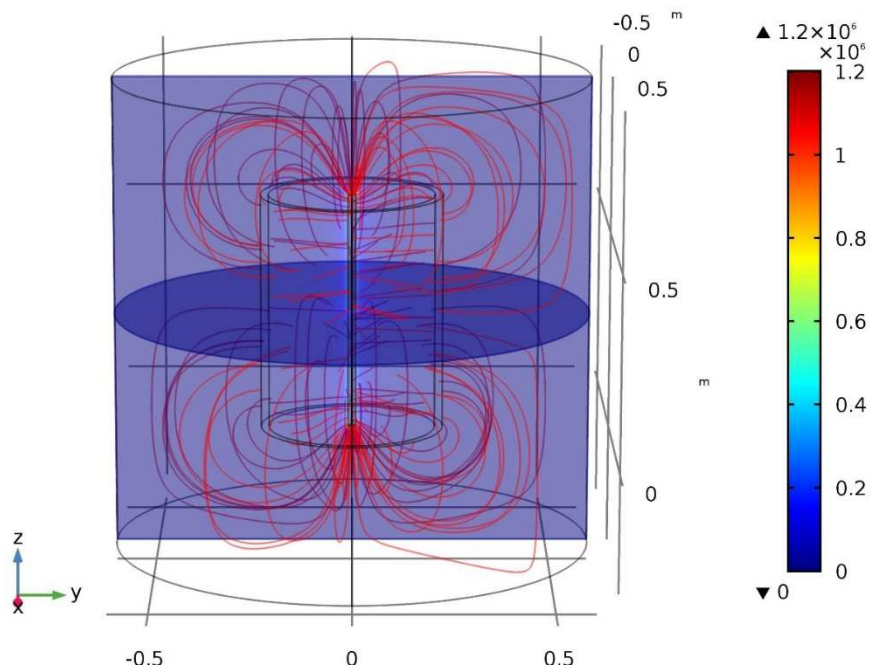


Figure III 38 (c) distribution de ligne de champ électrique électrode sans pointe

III.6.2 Electrode tube 2point

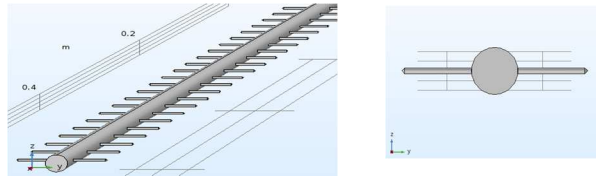


Figure III.39. forme de l'électrode tube 2 pointes

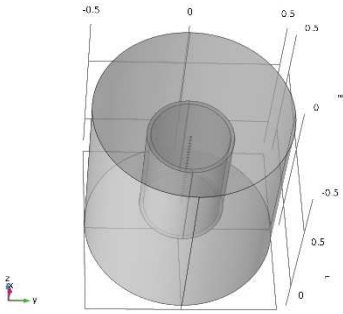


Figure II.40 (a) géométrie 3d

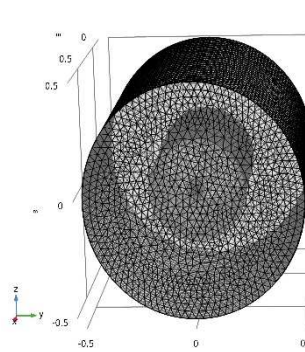


Figure III.40 (b) maillage

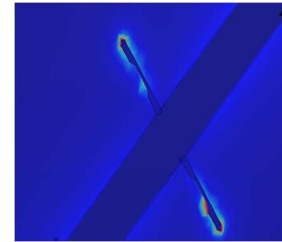


Figure III.40(d) effet de point sue les Pointes de l'électrode

Multislice: Electric field norm (V/m) Streamline: Electric field

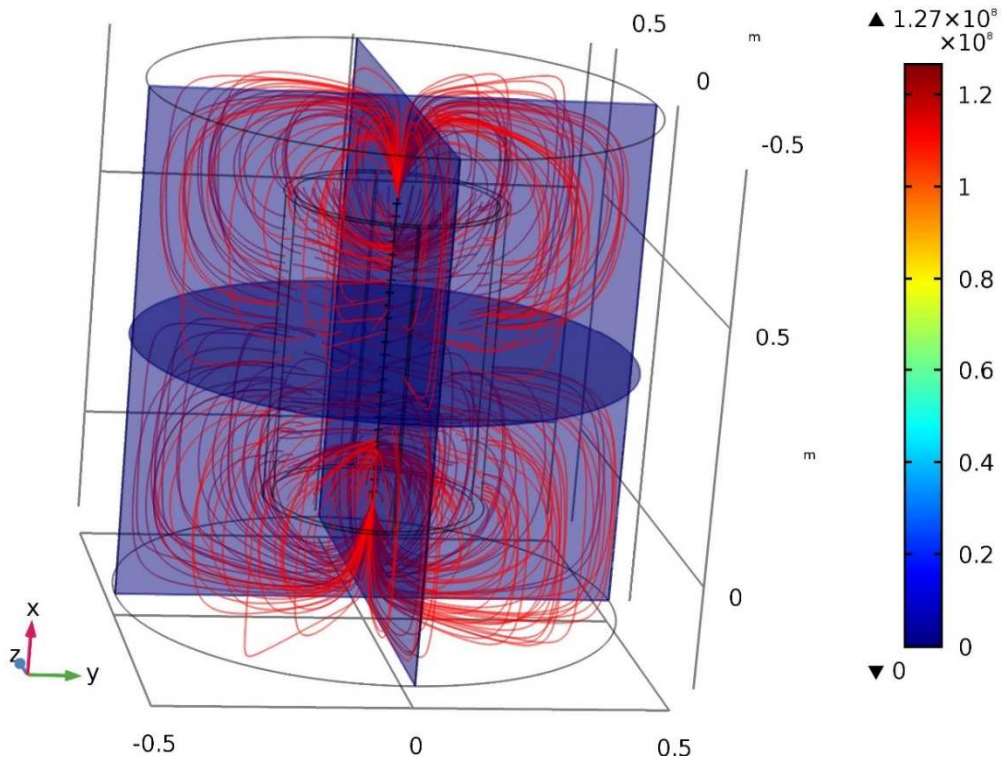


Figure III.40.(d) distribution de ligne de champ électrique électrode 2 pointes

III.6.3 Electrode tube 4pointe

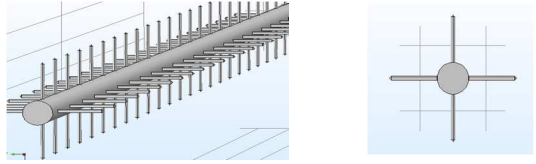


Figure III.41 .forme d'électrodes tube 4 pointes

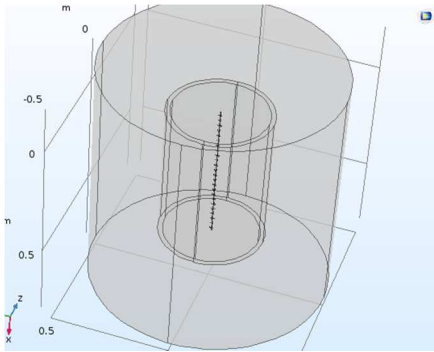


Figure III.41 (a) La géométrie 3D

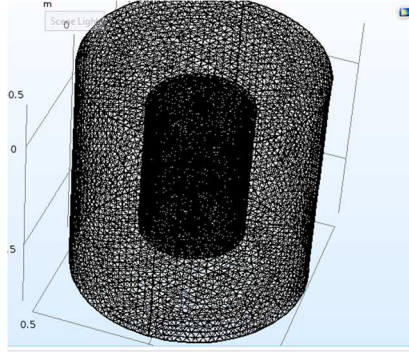


Figure III.41 (b) Le maillage

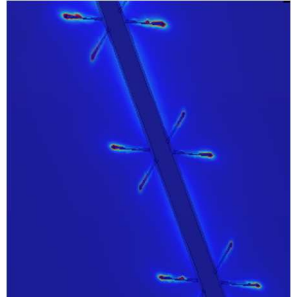


Figure III.41(d) effet de point sur les points de l'électrode

Multislice: Electric field norm (V/m) Streamline: Electric field

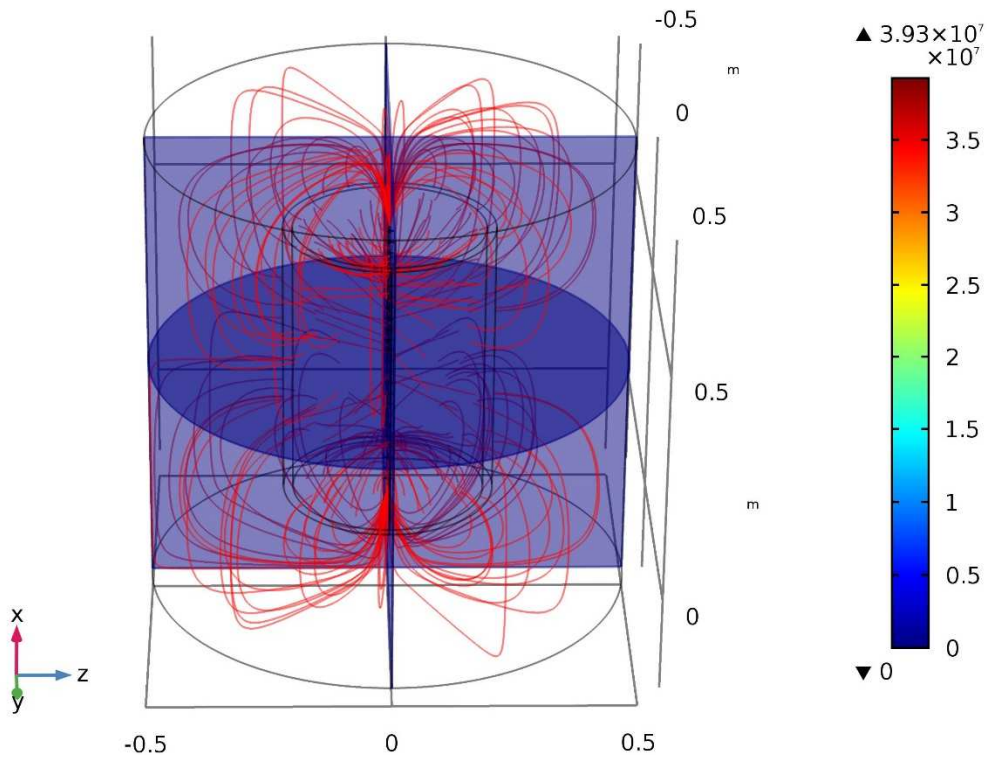


Figure III.41(d) distribution de ligne de champ électrique électrode 4 pointe

III.6.4 Comparaison de champ entre les trois géométries

Voici Au-dessous de les valeurs max obtenu dans les trois géométries avec les déferrent électrodes (fil simple « sans pointe », fil deux pointes et fil quatre pointes).

Tension applique en kV	Champ électrique d'électrode		
	Fil simple	Fil deux pointes	Fil quatre points
10	$1.2 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$1.27 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$3.93 \cdot 10^7 \text{ v/m}$
15	$1.8 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$1.9 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$5.89 \cdot 10^7 \text{ v/m}$
20	$2.4 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$2.53 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$7.86 \cdot 10^7 \text{ v/m}$
25	$3.01 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$3.17 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$9.82 \cdot 10^7 \text{ v/m}$
30	$3.61 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$3.8 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$1.18 \cdot 10^8 \text{ v/m}$
35	$4.21 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$4.43 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$1.37 \cdot 10^8 \text{ v/m}$
40	$4.81 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$5.07 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$1.57 \cdot 10^8 \text{ v/m}$
45	$5.41 \cdot 10^6 \text{ v/m}$	$5.7 \cdot 10^8 \text{ v/m}$	$1.77 \cdot 10^8 \text{ v/m}$

Tableau III.5 valeurs de champ électrique pour différentes type d'électrodes

Enfin, nous présentons les résultats de notre simulation file cylindre axisymétrique 3D dans le tableau III.5. Ce tableau montre les différentes valeurs d'intensité du champ électrique max ; on utilise trois modèles d'électrodes avec différents niveaux de tension appliquée.

Selon les résultats présentés dans le tableau III.4 les valeurs de champ max et plus élevée avec l'utilisation de l'électrode avec deux pointes que les deux autres modèles électrodes (sans pointe et quatre pointes)

III.7 Conclusion :

La simulation du précipitateur électrostatique est la partie principale de ce chapitre ; le logiciel utilisé dans cette étude est le Comsol Multiphysics version 5.3. Dans la partie III. 3 ; contient un guide pour écrire notre programme de la simulation de la thèse et comment faire la modélisation du potentiel et d'intensité du champ électrique stationnaire dans un précipitateur électrostatique

Nous avons simule la distribution du potentiel électrique et l'intensité du champ électrique qui dépend de la valeur de la tension appliquée. Plus que la tension appliquée est élevée, alors l'intensité du champ électrique est plus élevée et vice versa.

Les barres de couleur indiquent les amplitudes du potentiel et du champ électrique étudié aux déférentes tensions appliquées (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40,45) kV. La simulation, montre l'intensité du champ électrique et le potentiel électrique dans la région entre le fil et la surface de collection.

Nous avons montres la répartition des lignes de champ électrique ces ligne qui oblige les particules polluantes à suivre leur chemin.

Nous avons présenté ces résultats sous forme des graphes et des tableaux pour les trajectoires des particules polluantes on peut dire que les particules suivent le chemin des lignes des champs émergent du fil vers les surfaces de collection.

Conclusion générale

La précipitation électrostatique est la technique la plus efficace dans la captation des particules les plus fines parmi les autres procédés de la filtration et du traitement des gaz d'échappement des usines existants dans le monde. Cette genre de traitement de l'air propre doivent obier a de ombreuse contrainte ; économiques ; techniques et juridiques en générale ; les électrofiltres utilisant une décharge volumique a pression atmosphérique ; la plus répondues est la décharge de couronne avec des avantages plus démontrée.

Néanmoins ; les rares inconvénients de ces filtres s'intéresse à la décharge des particules de poussières.

Nous avons parlée au chapitre un sur les phénomènes physiques qui agir sur la précipitation électrostatique tels que la décharge couronne dans le gaz, les différents procédés et techniques de traitement de l'épuration des gaz.

Nous avons également abordé aussi sur le principe de fonctionnement de ce filtre de récupération, leurs types et leur application à l'industrie. Comprenant aussi les conditions de choix d'un ESP, les avantages et inconvénients de ce dernier. Et finalement nous avons parlé sur un nouveau modèle d'ESP.

Au chapitre deux ; on à présenter la manipulation de particules en suspension dans un gaz au sein d'un séparateur des particules.

Dans le dernier chapitre on a basé sur les simulations suivantes :

- 1- Fil plaque en 2D ; vu la distribution du champ et de potentiel électrique avec plusieurs tension appliquée, on a mesurée les valeurs en milieu d'inter l'électrode. Nous avons mesurée aussi les valeurs des champs et du potentiel aux coins de la plaque ; c'est dernier valeurs était plus supérieurs aux autres côté de la plaque. Nous avons aussi faire les simulations de la distribution des lignes des champs électrique.
- 2- Simulation fil-cylindre asymétrique ; l'avantage de ce type de precipitateur électrostatique en peut faire tourner le cylindre « électrode de collecte » pour récupérer les particules collecté à l'aide d'une raclette au côté du surface de collecte, ce système est plus efficace que la méthode de récupération des poussières collectée par frappage. Ce dernier qui était très agressif mécaniquement. Elle nécessite une gamme de maintenance, supervision et l'arrêt du système de fabrication.
- 3- Simulation fil-cylindre axisymétrique 3D avec trois types d'électrode émissives : fil simple, fil deux pointe et fil quatre pointes. Nous avons faire des comparaisons avec ces trois électrodes ; les valeurs max des champs et du potentiels électriques. On a constaté que les valeurs sont plus élevées avec l'utilisation de l'électrode deux pointes que les autres électrodes.

- [1] Principaux procédés de filtration des gaz ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/documents/61353-principaux-procedes-de-filtration-des-gaz.pdf>
- [2] ZHONGYI G., ROBERT A. & SCHILL J., Novel quasi-electrostatic air filter: a single particle study. *Journal of Electrostatics* Vol. 39, pages 203-230, 1997
- [3] R. Gouri, N. Zouzou, A. Tilmatine, et L. Dascalescu, « Enhancement of submicron particle electrostatic precipitation using dielectric barrier discharge in wire-to-square tube configuration », *J. Electrostat.*, vol. 71, no 3, p. 240-245, juin 2013.
- [4] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau, et G. Touchard, « Electrostatic precipitation in wire-to-cylinder configuration: Effect of the high-voltage power supply waveform », *J. Electrostat.*, vol. 67, no 2–3, p. 117-122, mai 2009
- [5] N. Zouzou, A. C. A. Ndong, P. Braud, et E. Moreau, « Time-resolved measurements of electrohydrodynamic phenomena in an AC dielectric barrier discharge electrostatic precipitator », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no 2, p. 651-657, avr. 2016.
- [6] N. Zouzou, B. Dramane, E. Moreau, et G. Touchard, « EHD Flow and Collection Efficiency of a DBD ESP in Wire-to-Plane and Plane-to-Plane Configurations », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no 1, p. 336-343, janv. 2011.
- [7] T. Han, M. Wren, K. DuBois, J. Therkorn, et G. Mainelis, « Application of ATP-based bioluminescence for bioaerosol quantification: Effect of sampling method », *J. Aerosol Sci.*, vol. 90, p. 114-123, déc. 2015
- [8] K.-S. Kim, S. Kim, et T. H. Jun, « Activated Carbon-Coated Electrode and Insulating Partition for Improved Dust Removal Performance in Electrostatic Precipitators », *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 226, no 11, p. 1-13, oct. 2015.
- [9] H. Chen et al., « Effects of simultaneous acoustic and electric fields on removal of fine particles emitted from coal combustion », *Powder Technol.*, vol. 281, p. 12-19, sept. 2015.
- [10] D. Zhou, Z. Luo, J. Jiang, H. Chen, M. Lu, et M. Fang, « Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment », *Powder Technol.*, vol. 289, p. 52-59, févr. 2016.
- [11] J. Zhang, D. Xu, J. Ren, H. Wu, et W. Pan, « Modeling and simulation of PM2.5 collection efficiency in a S A ESP subjected to magnetic field and diffusion charging », *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 34, no 3, p. 697-702, 2015.
- [12] E. J. Eschbach et D. E. Stock, « Optimization of collection efficiency by varying plate spacing within an electrostatic precipitator », *Environ. Int.*, vol. 6, no 1–6, p. 177-180, 198SW1
- [13] A. Silvestre de Ferron, T. Reess, L. Pécastaing, P. Pignolet, et F. Lemont, « Optimizing the operation of an electrostatic precipitator by developing a multipoint electrode supplied by a hybrid generator », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 42, no 10, mai 2009.
- [14] ». AQCS (Air Quality Control System) for Thermal Power Plants Capable of Responding to Wide Range of Coal Properties and Regulations ». [En ligne]. Disponible sur

- [15] Special Electrostatic precipitator ». [En ligne]. Disponible sur:
http://www.es.mhps.com/en/products/dustcollection/other/special_e-precipitator/index.html
- [16] BRICARD J., CABANE M. and MADELAINE G. – Formation of atmospheric ultrafine particles and ions from trace gases. – J. of Colloid and Interface Science, 58-1, 113-124, 1977.
- [17] WHITE H.J. – Industrial electrostatic precipitation – Addison Wesley Publishing company, New York, 1963
- [18] POINTU, A.M. – Décharge électrique – Techniques de l'ingénieur D322
- [19] CONTAL P. – Les techniques du dépeussierage – Document de synthèse de la journée sur le dépeussierage 1993 à ESIGEC, Chambéry, 1993.
- [20] Electrostatic Precipitator Market». [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.gminsights.com/industry-analysis/electrostatic-precipitator-market>
- [21] F. M. Moesner and T. Higuchi, “Devices for Particle Handling by an AC Electric Field”, Proceedings of IEEE Workshop on Micro Electro mechanical Systems, pp. 66- 71, 1995.
- [22] T. B. Jones, “Electromechanics of Particles”, Cambridge University Press, New York, 1995
- [23] W.C. Hinds, Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles, 2nd Edition, New York, 1999 (Wiley-Interscience).
- [24] S. Masuda and Y. Matsumoto, “Contact-type Electric Curtain for Electrodynamical Control of Charged Dust Particles”, Proc. 2nd Int. Conf. on Static Electricity, Frankfurt, 1973, Dechema-Monogr. No. 72, Nr. 1370-1409, Verlag Chemie, 1974, pp. 293-301.
- [25] Dupuy J., “Effet de couronne et champs ionisés”, Revue Générale d'Electricité, 67, 2, pp. 85-104, 1958.
- [26] Oglesby S. & Nichols G. B., “Electrostatic precipitation”, Marcel Dekker Inc., 1978.
- [27] Pauthenier M. & Moreau-Hanot M., “La charge des particules sphériques dans un champ ionisé”, Journal de Physique et le Radium, 3, pp. 590-613, 1932.
- [28] Pauthenier M. & Guillien R., “Etude électromécanique de la charge limite d'une sphère conductrice dans un champ électrique ionisé”, C. R. A. S. Paris, 195, pp. 115-116, 1932
- [29] Liu B. H. Y. & Pui D. H. Y., “On unipolar diffusion charging of aerosol in the continuum regime”, Journal of colloid and interface science, Vol. 58, (1), pp. 142-149, 1977.
- [30] Brock J. R., Wu M., “Field charging of aerosol particles”, Journal of colloid and interface science, Vol. 45, pp. 106-114, 1973
- [31] McDonald J. R., Smith W. B. & Spencer H. W., “A mathematical model for calculating electric conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices”, Journal

of Applied Physics, Vol. 48, N° 6, pp. 2231-2243, 1978

[31] PARKER K.R., Electrostatic precipitation, Chapman & hall, 1997, pp. 1-24.

[32] BLANCHARD D. – Collection des fines particules et caractérisation des couches de poussière dans un précipitateur électrostatique– Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble 2001.

[33] ANDERSEN E., HORNE G.H. – Report on electrical precipitation experiment at the experimental installation at Santa Cruz – Unpublished report from Western Precipitation Company, 1919.

[34] DEUTSCH W. – Bewegung und ladung der elektricitätsträger im zylinder kondensator – Ann. Phys., Leibzig 68, 335, 1922

[35] DUMITRAN L. M., – Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique – Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 2001.

[36] MATTS S., ÖHNFELDT P. – Efficient gas cleaning with SF electrostatic precipitator – Fläk, pp. 93-110, 1963

[37] COOPERMAN P. – Turbulent gas flow and electrical precipitation – Winter general meeting, American Institute of Electrical Engineers, New York, 1960.

[38] COOPERMAN P. – Boundary layer effects in electrostatic precipitation – 59th annual meeting Air Pollut. Control Ass., Pittsburgh, 1966.

[39] FRIEDLANDER S.K. – Principles of gas-solid separation in dry systems – Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 55, pp. 135-149, 1959.

[40] WILLIAMS J.C., JACKSON R. – The motion of solid particles in an electrostatic precipitator – Third congress of the European federation of chemical engineering, symposium on the interaction between fluid and particles, pp. 282-288, 1961

[41] K. R. Parker. Electrostatic precipitation. Chapman & Hall, 1997.

[42] N. Tachibana and H. Fujishima. Application of electrostatic precipitation with intermittent energization. In Pro. International Conférence on Modern Electrostatics, page 14, 1988.

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

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

[45] S. Masuda and J. D. Moon. High intensity charging device for carbon soot particles. In

Proc. 2nd International Conference on Electrostatic Precipitation, page 871, 1984.

[46] I.E.Japan. Handbook of Electrostatics. Ohm-Publishing Co., 1998.

[47] G. W. Penny. Electrostatic precipitation of high resistivity dust. AIEE Trans. Journal, 70 :1192, 1951

[48] A. M. Benselama, “Modélisation numérique du comportement d’une particule sous champ électrique dans les microsystèmes : de la déformation au déplacement”, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 25 Novembre 2005

[49] P. A. Lawless and R. F. Altman. Espm : an advanced electrostatic precipitator model. In *IEEE Ind. Appl. 29th IAS Annual Meeting Denver, 2-5 Octobre*, pages 1519–1526, 1994.

ABSTRACT

The Electrostatic Precipitator (ESP) is a collecting device that removes different particles dust from the gas flow using the force of the electric field. It is usually designed as a set of metal plates with metal electrodes stretched between them. A potential difference of several kilovolts is created between the electrodes. The potential difference results in a strong electric field between the electrodes and plates. On the surface of the electrode a corona discharge occurs and in combination with the electric field it provides an ion current from the electrode to the plate. Polluted air is fed into the space between the plates. Dust particles from the polluted air passing through the filter become charged (ionized) under the influence of the ion current, and then get attracted to the plates and settle on them.

The design of an Electrostatic Precipitator requires the knowledge of its working principle and the problems that often arise during its working. This thesis is the study of the working and the problems of the Electrostatic Precipitators. The main reason for problems in working of an Electrostatic Precipitator is the dust resistivity. This dust resistivity affects the collection performance of an Electrostatic Precipitator. This thesis also contains the simulation of an Electrostatic Precipitator. In the simulation part, the Electric Potential and the Electric Field of an ESP is modeled in an ideal condition, when no gas is flowing through the ESP. The industrial software Comsol Multiphysics is used for the simulation. A Comsol Multiphysics guide is given in chapter III of this thesis report that provides information about using this software.

يحتوي العادم الغازي للصناعات المختلفة على جزيئات غبار من رواسب كيميائية مختلفة ضارة بالبيئة. غالبًا ما تستخدم المرسبات الكهروستاتيكية في الصناعات لتصفية عوادمها الغازية ومنع تلوث الغلاف الجوي. المرسبات الكهروستاتيكية فعالة للغاية في عملها. تستخدم المرسبات الكهروستاتيكية قوة المجال الكهربائي لفصل جزيئات الغبار عن العادم الغازي. تقوم المرسبات الكهروستاتيكية بشحن جزيئات الغبار وإزالة هذه الجسيمات عن طريق جذب جزيئات الغبار المشحونة نحو لوحات التجميع. يتطلب شحن جزيئات الغبار منطقة شحن. عندما يمر الغاز عبر منطقة الشحن تلك، تصبح جزيئات الغبار في تيار الغاز مشحونة ومن ثم تنجذب هذه الجسيمات المشحونة نحو لوحات التجميع. يتطلب تصميم المرسبات الكهروستاتيكية معرفة مبدأ عملها والمشاكل التي تنشأ غالبًا أثناء عملها. هذه الأطروحة هي دراسة عمل ومشكلات المرسبات الكهروستاتيكية. السبب الرئيسي لمشاكل عمل المرسب الكهروستاتيكي هو مقاومة الغبار. تؤثر مقاومة الغبار هذه على أداء التجميع لمرسب إلكتروستاتيكي. تحتوي هذه الأطروحة أيضًا على محاكاة المرسب الكهروستاتيكي. في جزء المحاكاة، تم تصميم الجهد الكهربائي والحقل الكهربائي لـ ESP في حالة مثالية، عندما لا يتدفق أي غاز عبر ESP. يستخدم البرنامج الصناعي Comsol Multiphysics للمحاكاة. ويرد دليل Comsol Multiphysics في جزء الثالث تقرير الأطروحة هذا الذي يوفر معلومات حول استخدام هذا البرنامج.

Mots-clés : Précipitation électrostatique, ESP, affecte da résistivité de poussière, Comsol Multiphysics, champ électrique, ionisation, effet de couronne, récupérateur de poussière.