

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

BERRACHED Djelloul

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT es Sciences en Electrotechnique

Option : Haute tension

Intitulé de la thèse:

**Contribution à l'étude des précipitateurs
électrostatiques de poussière. Réalisation
d'un prototype de laboratoire**

Présenté devant le jury composé de :

Mr. Bendaoud Abdelber	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Mr. Tilmatine Amar	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Encadreur
Mr. Ouiddir Rabah	Professeur (U.S.T.O ORAN)	Examineur
Mr. Benmimoun Youcef	Professeur (Université de MASCARA)	Examineur
Mr. Zelmat Mohamed Mouloud	MCA (U.S.T.O ORAN)	Examineur
Mr Miloua Farid	MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Invité

Soutenu le : 25 / 04 / 2017



Laboratoire de Recherche APELEC (Applications of Plasma, Electrostatics
& Electromagnetic Compatibility)



Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au Laboratoire de recherche APELEC, sur le site de la faculté des Sciences et de la Technologie à Sidi-Bel-Abbes, sous la direction scientifique du professeur Amar Tilmatine.

Je tiens en premier lieu à remercier très sincèrement Amar TILMATINE qui a assuré l'encadrement de ce travail de thèse. Je lui suis extrêmement reconnaissant de m'avoir permis de travailler avec une grande autonomie sur un sujet passionnant, de m'avoir fait partager son affection pour la recherche, pour la confiance qu'elle m'a attribuée dans la réalisation de ce projet, pour la qualité de son encadrement, ses conseils avisés et d'avoir assuré les bonnes conditions pour le déroulement de ce travail.

Je lui remercie également chaleureusement pour son écoute, sa grande disponibilité, l'efficacité et la qualité de son encadrement m'ont permis de mener à bien l'ensemble des travaux de recherche, de communication et de rédaction liés à cette thèse.

. Je veux aussi remercier Abdelber BENDAOUD d'avoir accepté de présider mon jury de thèse et Messieurs Rabah OUIDDIR, Youcef BELMIMOUN, Mohamed Mouloud ZELMAT et Farid MILOUA d'avoir accepté de faire partie du jury et pour leur remarques constructives sur le manuscrit.

J'adresse ma reconnaissance à l'ensemble des membres du laboratoire, pour la sympathie qu'ils m'ont toujours témoigné, l'aide qu'ils ont pu m'apporter et qui ont rendu ces années de thèse très agréables.

Un grand merci à mon épouse, pour son attention, et sa patience et son soutien, qu'elle trouve ici l'expression de mes sincères reconnaissances.

Enfin, je tiens à remercier mes défunts parents, mes frères et mes sœurs pour leurs encouragements et de m'en avoir donné les moyens pour y arriver. Encore un grand MERCI !

Sommaire

Sommaire

	Pages
INTRODUCTION GENERALE	1
Introduction	3
1. Poussières de bois	3
1.1. Définition d'une poussière	3
1.2. Les agents nocifs du bois	4
2. Présentation du mémoire	8
2.1. Contexte de l'étude	8
2.2. Plan de l'étude	8

Chapitre I

GENERALITES SUR LES FILTRES ELECTROSTATIQUES

1. Introduction	10
2. Historique	10
3. Définition	11
4. Construction et fonctionnement des filtres électrostatiques	12
4.1. Filtrage électrostatique	12
4.2. Types de filtres électrostatiques	14
5. La décharge couronne	22
5.1. Polarité négative.	24
5.2. Polarité positive	24
5.3. Caractéristique courant-tension	25
6. Modèles du fonctionnement des filtres électrostatiques	26
6.1. Efficacité de collecte	26
6.2. Vitesse de migration	27
6.3. Paramètres influençant l'efficacité	28
7. Conclusion	31

Chapitre II

MATERIELS ET METHODES

1 Introduction	32
2. Description du dispositif à un seul étage	32
2.1 Principe de fonctionnement	33
2.2 Matériel utilisés	33
3. Description du dispositif à un deux étages	36
3.1. Introduction	36
3.2. Description du filtre électrostatique de laboratoire	36
3.3 Principe de fonctionnement	39

4. Méthodologie des plans d'expériences	39
4.1. Préparation de l'étude	40
4.2. Choix du plan d'expériences	41
4.3. Expérimentation	42
4.4. Interprétation des résultats	
4.5. Arrêt ou poursuite de l'étude	42
5. Modélisation	42
5.1. Modèles polynomiaux	43
6. Evaluation de qualité des modèles mathématiques	45
6.1. Examen graphique des résultats	45
6.2. Variance globale	47
6.3. Tests statistiques	48
7. Conclusion	48

Chapitre III

MODELISATION DU DISPOSITIF A UN SEUL ETAGE

1. Introduction	50
2. Résultats obtenus	50
2.1. Les expériences préliminaires	50
3. Modélisation des paramètres par la méthode des plans d'expériences	56
3.1. Choix des intervalles d'études	56
3.2. Plan d'expérience composite et modèle de deuxième degré	57
3.3. Résultats des expérimentations	58
4. Conclusion	68

Chapitre VI

MODELISATION DU DISPOSITIF A DEUX ETAGE

1. Introduction	69
2. Méthodologie des modèles expérimentaux	69
3. Procédure expérimentale	71
4. Résultats et discussion	74
5. Modélisation par la méthode des plans d'expériences	78
5.1. Choix des intervalles d'étude	78
5.2. Plan d'expérience composite et modèle du deuxième degré	79
6. Résultats des expérimentations	80
6.1. Les modèles mathématiques	81
6.2. Influence des facteurs choisis sur les réponses	82
6.3. Détermination du point de fonctionnement optimale	84
7. Conclusion	87

CONCLUSION GENERALE	87
Bibliographie	89

INTRODUCTION GENERALE

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

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

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

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

Ce document est composé de quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons essentiellement l'étude des différents précipitateurs qui existent, leurs principe de fonctionnement et leurs efficacité. Nous donnons aussi la définition détaillée et les généralités sur l'effet couronne, ainsi que les paramètres rentrant en jeu et les applications industrielles directes de l'effet couronne.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des matériels utilisés pour la conception et la réalisation des deux précipitateurs et la méthode des plans d'expériences.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse expérimentale du modèle d'électro-filtre (un seul étage), ensuite nous avons effectué une étude expérimentale avec la méthode des plans d'expérience pour modéliser et optimiser le dispositif de laboratoire.

Le dernier chapitre est composé de deux parties : la première est consacrée à l'explication du modèle d'électro-filtre à deux étages réalisé, les différentes composantes de notre filtre (partie d'ionisation et partie de collection), ainsi que les expériences préliminaires. Ensuite, nous avons utilisé la méthode des plans d'expérience pour modéliser et optimiser notre dispositif.

INTRODUCTION

1. Poussières de bois

1.1. Définition d'une poussière

Au sens réglementaire, une poussière est une particule dont le diamètre est inférieur ou égal à 100 μ m (0,1mm) ou dont la vitesse de chute dans l'air est inférieure ou égale à 25cm/s. Cette définition correspond concrètement aux poussières inhalables qui, pour les petites d'entre elles, peuvent arriver aux poumons et se déposer dans les alvéoles pulmonaires. Parmi ces poussières, il faut distinguer ;

Les plus grosses, de 50 à 100 μ m, qui pénètrent pas en totalité dans les voies respiratoires .Elles restent bloquées dans les fosses nasales ou dans la gorge avant d'être rejetés par l'organisme. Cependant, certaines, du fait de leur composition chimique, sont nocives et peuvent générer des maladies graves, telles que le cancer de l'ethmoïde ; L'ethmoïde est un os qui sépare les fosses nasales des orbites oculaires. Il est creusé de petites cavités appelées sinus.

Les plus fines, inférieures à 50 μ m, qui pénètrent dans les poumons et, pour elles inférieures à 5 μ m, vont jusqu'aux alvéoles pulmonaires, lieu des échanges respiratoires (Figure 1).

La taille des poussières dépend de la nature du travail et de celle des matériaux. A titre d'exemple, un bois massif génère, lors des opérations de tronçonnage, délignage, dégauchissage, rabotage, des particules sont inférieures à 100 μ m, donc inhalables .Quant aux poussières de ponçage, elles sont en majorité inférieures à 5 μ m !

Par contre, s'il s'agit d'un panneau de filtres, son calibrage (tronçonnage, délignage) génère 15% de poussières supérieures à 20 μ m et 50% de poussières inférieures à 2 μ m !

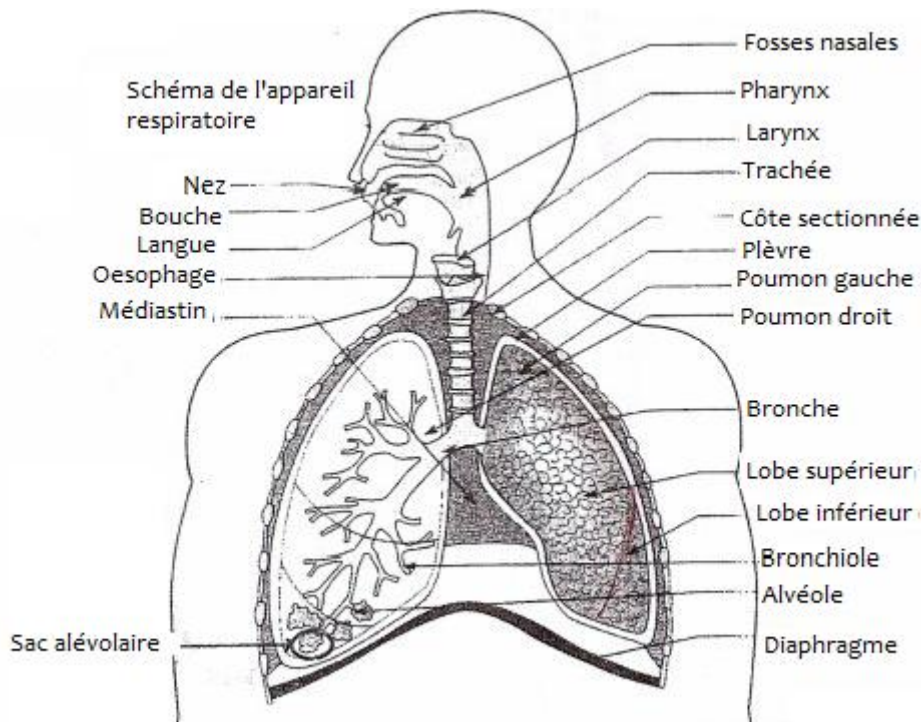


Figure 1 : Schéma de l'appareil respiratoire

1.2. Agents nocifs du bois

Le matériau bois renferme, sur le plan de sa composition chimique, de très nombreux constituants, variables suivant les essences, les facteurs climatiques et la composition des sols. Le récapitulatif des substances chimiques pouvant être contenues dans les poussières de bois est présenté dans le tableau (1.2) ; Substances chimiques des poussières de bois [1].

Par ailleurs, les lichens et moisissures présents sur le bois peuvent être à l'origine de pathologies le souvent allergiques.

Les plus connus sont :

.Le *Frullania* (mousse du chêne) qui possède des propriétés allergisantes dues à la présence de lactones ses qui terpéniques.

.*Aspergillus*

.*Altemaria* (pâte à papier)

.*Cladosporium*

.*Coniosporium*

.*Penicilium*

.*Epicoccum*

Tableau 1 : Substances chimiques des poussières de bois [1]

Substances chimiques	Propriétés
Tanins	Carcinogènes
Quinones	Allergisants, action sur la coagulation, fongicides
Terpènes	Toxiques, irritants, allergisants
Glucosides	Eternuements violents
Saponines	Irritant des muqueuses, action hémolytique
Tropolones	Fongicides, antimitotiques (action voisine de la colchicine)
Alcaloïdes : Glycocolle- bétaines Cystéine Xanthotoxine	Epistaxis Irritation cutanée et respiratoire Céphalées, vomissements

Il faut également prendre en compte les produits de traitement du bois (fongicides, insecticides) , les colles (à base de résines synthétiques, formol) et les vernis. Le tableau ci-dessous résume ces différents produits (tableau 2) :

Tableau 2 : Substances chimiques et leur effet toxique [1]

Substances chimiques	Effets toxiques
Benzols	Troubles hématologiques
Cétones	Irritation voies respiratoires
Isocyanates	Asthme, irritations voies respiratoires
Anhydride phtallique et triméllitique	Signes généraux , asthme
Formol	Asthme retardé, eczéma de contact, irritation
Lindane	Troubles hématologiques
Pentachlorophénol	Troubles hématologiques, eczéma de contact

On remarque que les agents responsables des pathologies sont très nombreux. Une essence de bois peut contenir jusqu'à 30 agents nocifs.

Le travail mécanique du bois lors des opérations de transformation, telles que sciage, fraisage, corroyage ou ponçage, produit des quantités importantes de poussières qui peuvent être dispersées dans l'air et inhalées par les personnes exposées pendant leur travail. Cette exposition aux poussières de bois peut induire des affections respiratoires et cutanées. La durée d'exposition constitue un facteur aggravant.

1.2.1 Le contact cutané

Plusieurs études confirment l'existence de pathologies cutanées diverses chez les travailleurs exposés aux poussières de bois. Ces affections se caractérisent par la survenue d'allergies de contact. Il s'agit le plus souvent d'eczémas, notamment sur la survenue d'allergies de contact. Il s'agit le plus souvent d'eczémas, notamment sur le cou, le visage, les mains, les avant-bras et parfois les yeux (conjonctivite). Elles se manifestent par les vésicules suintantes accompagnées de démangeaisons et souvent de fissures. Les bois exotiques comme l'iroko, le makoré, le teck, le bété, et l'acajou en sont le plus souvent la cause. Des produits associés, comme les colles urée-formol contenues dans les panneaux de fibres, peuvent aussi être responsables de ces allergies [2,3].

1.2.2 L'inhalation

L'inhalation de poussières de bois se traduit par une irritation des voies respiratoires. Elle se manifeste par des éternuements répétés, des rhinites aiguës (rhumes), des saignements de nez, de l'asthme [4]. Cette inhalation, notamment de poussières de chêne ou de hêtre, peut provoquer le cancer de l'ethmoïde [5,6,7], os constituant la partie supérieure des fosses nasales. Les premiers signes surviennent parfois des années après la fin des expositions. Il s'agit d'écoulements purulents et sanglants par le nez accompagnés de douleurs dans la face. C'est une maladie très grave dont le traitement est difficile. Plus de $\frac{3}{4}$ de ces cancers surviennent chez les travailleurs du bois [8, 9,10].

Les maladies dues aux poussières de bois font l'objet des tableaux de reconnaissance de maladies professionnelles n° 47 (annexe B) du régime général et n° 36 du régime agricole. Entre 2000 et 2003, 128 cas de maladies, dont 78 cas de cancer, ont été reconnus en moyenne par an au titre de ces tableaux.

De plus, depuis le 1^{er} juillet 2005, une valeur limite d'exposition professionnelles (VLEP), à ne pas dépasser dans l'atmosphère des lieux de travail, a été fixée à 1mg/m^3 . Il s'agit d'une limite de la moyenne pondérée sur une période de 8 heures. Le respect de cette valeur limite sera toute fois considéré comme un objectif minimal de prévention et l'exposition des travailleurs devant être réduite au niveau le plus bas techniquement possible.

Le recyclage de l'air est autorisé en période froide à condition que la concentration poussières réintroduites dans l'atelier ne dépasse pas 0.2mg/m^3 . Ce recyclage présente une économie d'énergie certaine pour le chauffage des locaux. Par contre, sa mise en œuvre est à faire sous certaine conditions notamment un système de filtration performant.

L'air transportant les poussières doit être filtré avant rejet à l'extérieur ou avant d'être recyclé dans l'atelier. En effet, les poussières de bois comme toute poussière rejetée dans l'environnement, sont soumises à la réglementation concernant les installations classées (classe A) Art. 27 de l'arrêté du 02/02/1998 et JO du 03/03/1998.

Généralement, la filtration est assurée par un groupe filtrant dont le rôle est double : Filtration de l'air pollué et récupération des déchets. Le groupe est souvent composé d'une de compression qui ramène la vitesse de l'air de 20m/s à 0,5 m/s et d'un système de man chants filtrants.

2. Présentation de thèse

1. 2.Contexte de l'étude

Ce travail, s'inscrit dans le cadre de la protection de l'environnement et aux conséquences physiologiques de l'inhalation des poussières fines de bois et sur les méthodes employées. Suite à des constatations faites que l'électro-filtration n'est pas utilisée pour l'épuration des atmosphères chargées en poussières de matériaux bois.

L'objectif du présent travail consiste à étudier la faisabilité de cette méthode pour l'épuration des ambiances chargées en poussières fines de matériaux en bois, ceci via une étude expérimentale et théorique sur une précipitation de géométrie fil-plaque, conçu et mis au point laboratoire. Notre étude se limite aux cas d'ambiances faiblement chargées en particules car les moyens de mesure que nous utilisons ne nous permettent pas d'aller au-delà d'un certain seuil de concentration.

Notre but est de comprendre les mécanismes influençant la collection des particules notamment les paramètres électriques et aérauliques.

2.2. Plan de l'étude

Ce document est composé de six parties distinctes :

L'introduction qui permet de situer les motivations et le contexte de notre travail. Nous donnons un aperçu des problèmes et pathologies liés à l'exposition aux poussières de bois lors des opérations de transformations.

Le premier chapitre est consacré au sujet qui nous intéresse c'est-à-dire l'électro filtration. Nous rappelons les concepts théoriques de la précipitation électrostatique et nous exposons les différents modèles décrivant le fonctionnement de l'électro filtre. Ensuite, nous dressons un état de l'art de la précipitation électrostatique en présentant les différents types de précipitateurs. Enfin nous terminerons ce chapitre par une analyse bibliographique des différents phénomènes qui influencent les efficacités de collectes des électro filtres.

Le second chapitre est consacré à la présentation de l'installation expérimentale réalisée et adaptés aux poussières de matériaux bois. Sont présentées les différentes parties composant le dispositif 1 (à un seul étage), et le dispositif 2 (à deux étages), ainsi le mode opératoire. Ensuite nous citons la méthode des plans d'expériences.

Le troisième chapitre sera consacré sur l'étude expérimentale du dispositif à un seul étage, en prenant en compte des facteurs essentiels qui influent dans l'efficacité du précipitateurs.

Le quatrième chapitre sera consacré sur l'étude expérimentale du dispositif à deux étages.

Dans la dernière partie de ce travail, les conclusions principales des différents chapitres qui résumant les points originaux de notre étude ainsi que les perspectives sont exposés.

GENERALITES SUR LES FILTRES ELECTROSTATIQUES

I.1.Introduction

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

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

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

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

I.2.Historique

Le principe de fonctionnement de l'électrofiltre est connue depuis 1820, mais la première application industrielle connue d'électrofiltre remonte à début 1880 et a été utilisée presque simultanément en Allemagne et en Angleterre. A cette époque, la haute tension est produite par friction de diélectriques et stockée dans des bouteilles de Leyde (condensateur primitif) ou par des bobines de Ruhmkorff. Les isolants naturels utilisés (bakélite, mica, verre) ne permettent pas de travailler à des tensions dépassant 10-15 kV. Les premiers électrofiltres ne sont installés que lorsque la valeur marchande des particules récupérées

(fumées d'acide sulfurique, fumées d'oxydes métalliques) justifie leur construction, au-delà de toute considération environnementale.

Des efficacités de collecte de 90-95% sont donc largement suffisantes, la quantité restante coûtant trop cher à précipiter. Comme aucune législation contre les rejets gazeux n'est en vigueur, la situation n'évoluera que dans les cas de pollutions extrêmes (cimenteries et fours à plomb). On s'aperçoit rapidement de l'intérêt économique d'avoir les plus grands espaces inter-électrodes possibles, malgré les difficultés à produire des très hauts voltages. Les électrofiltres industriels ont donc historiquement des dimensions gigantesques, d'autant plus importantes que le gaz circule à très faible vitesse (1,5 à 1,8 m/s). Les puissances volumiques de travail de l'époque (1919) sont de l'ordre de 0,3 J/L pour les cimenteries et de l'ordre de 1J/L globalement. Un grand pas en avant a été réalisé lorsque *Walter Deutsch* mis au point la relation théorique liant l'efficacité de filtration, le débit traité et la surface collectrice (1922). Cette relation est alors utilisée pendant 50 ans par les ingénieurs, puis modifiée par Mattes et Hochfelden [11]. Il a montré qu'une étincelle électrique pouvait dissiper la fumée contenue dans une bouteille. En 1883, Guitard avait observé qu'une décharge couronne produisait les mêmes effets sur la fumée. En 1883, Lodge propose de purifier l'air dans les salles de fumeurs et dans les tunnels. Ce n'est qu'en 1907 que le premier précipitateur électrostatique est né et depuis, de nombreux travaux ont consacré aux électrofiltres.

Pour être un peu plus réaliste. Enfin à titre anecdotique, des applications de précipitation électrostatique sont à l'étude pour l'abatement des brouillards naturels et dans les zones de transports routiers ou maritimes denses.

I.3.Définition

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

Les électrofiltres sont principalement utilisés dans l'industrie lourde telle que la sidérurgie, les unités d'incinération des déchets (figure I.1.), les cimenteries, les unités de production d'énergie. Ils peuvent également être utilisés pour des applications domestiques telles que l'épuration de l'air des locaux (fumées de tabac, ...) ou celles des ambiances de travail (brouillards d'huile, poussières de bois, ...). Leur efficacité est extrêmement élevée,

notamment pour les particules microniques et submicroniques ou d'autres systèmes sont peu efficaces [12-14].



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

I.4. Construction et fonctionnement des filtres électrostatiques :

I.4.1.Filtrage électrostatique :

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

Ce phénomène de précipitation électrostatique se retrouve largement dans les filtres électrostatiques (appelés également précipitateurs électrostatiques (ESP) ou électrofiltre)[15].

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

Certains de ces ions sont captés par les poussières en raison de la distorsion locale du champ électrique, causée par la différence de la valeur entre la permittivité relative des particules et celle du gaz [16,17]. Ainsi, les particules se chargent en captant les ions, jusqu'à atteindre une charge maximale (souvent appelée charge limite). Pour une particule quelconque de taille suffisante (supérieure à quelques microns), la charge limite correspond

au moment où l'intensité du champ électrique dû aux charges acquises à sa surface devient égale à celle du maximum sur la surface d'une particule identique non chargée, du champ électrique généré par la différence de potentiel entre les deux électrodes et la distribution de charge d'espace. Les particules chargées sont soumises à une force électrique dirigée vers la surface du cylindre extérieur relié à la terre. Elles forment alors une couche qui adhère ainsi à la paroi jusqu'à ce qu'elles soient détachées par le frappage du cylindre ou emportées par lavage. Les étapes successives qui interviennent dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique sont représentées schématiquement dans la figure (I.2).

La formation de la couche de poussières sur la surface collectrice est gérée principalement par les forces électriques ainsi que par les forces d'adhésion surfacique. Les particules isolantes ne perdent pas immédiatement leur charge au contact de l'électrode de collecte, ce qui assure une bonne compaction de la couche. Par contre, les particules conductrices perdent en un temps très court leur charge au contact de la paroi et se chargent en polarité opposée par induction[18].

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 [19] et la résistivité maximum ne doit pas dépasser 10^{12} Ω .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.

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

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

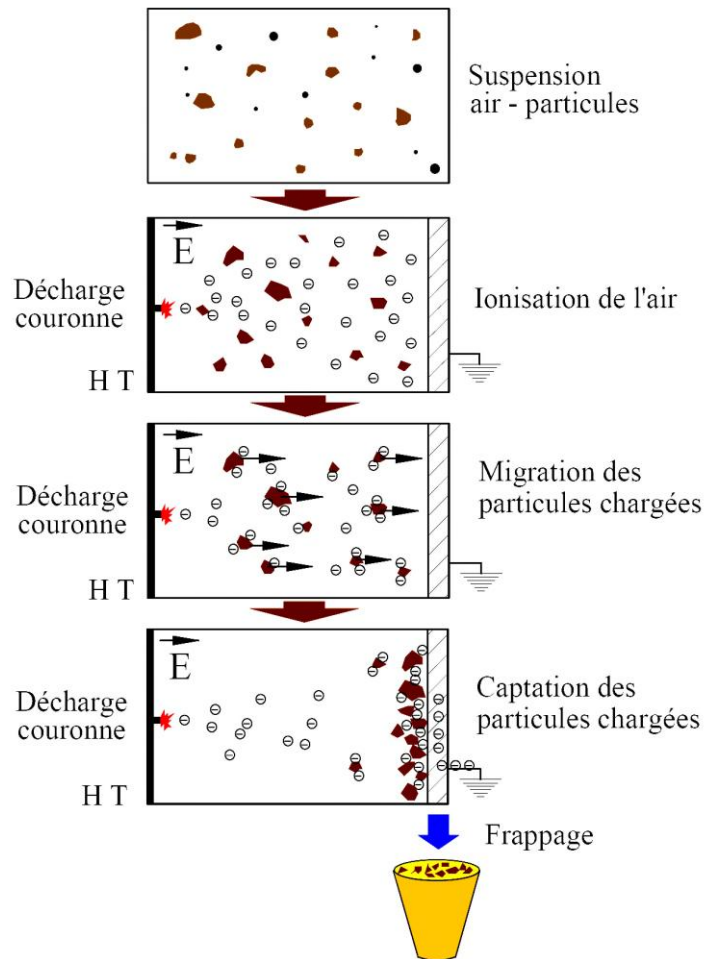


Figure (I.2): Les principales étapes qui interviennent dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique.

A partir de ces principes simples de fonctionnement, plusieurs types de filtres électrostatique sont été réalisés au cours du temps, en essayant de trouver pour chaque application pratique la variante de construction qui assure la meilleure efficacité de séparation [20,21].

I.4.2. Types de filtres électrostatiques

Les filtres électrostatiques (électrofiltres) sont configurés de plusieurs manières ; certaines de ces configurations ont été développées pour l'action spéciale de commande, et d'autre sont évolué pour des raisons économiques.

Les types qui seront décrits ici sont :

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

I.4.2.1 Electrofiltre "Plaque – Fil"

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

Dans un électrofiltre Plaque-Fil, les électrodes de dépôt sont des plaques parallèles et équidistantes et le gaz est ionisé à partir d'électrodes ionisantes situées dans les plans verticaux à mi-distance entre les plaques (figure I.3). En général, les électrodes de collecte sont soumises périodiquement au frappage, ce qui permet de décoller les agrégats afin de les retenir dans des bacs spéciaux placés dans la partie inférieure du filtre. Les précipitateurs industriels, ayant des longueurs de plusieurs dizaines de mètres, sont divisés en plusieurs segments nommés champs. Chaque champ a sa propre alimentation électrique, indépendante des autres parties du filtre ; cela permet l'adaptation des conditions électriques en fonction de la taille et de la concentration des particules dans chaque champ.

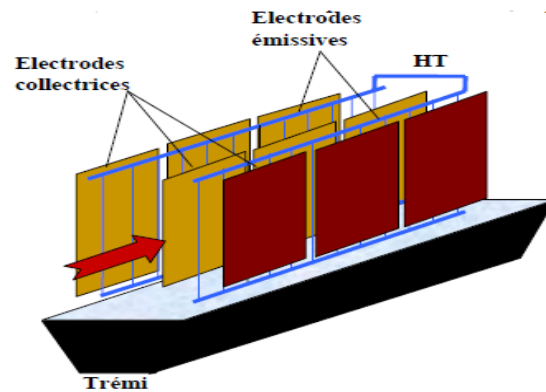


Figure (I.3):Types d'électrofiltre plaque-fil

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

Les alimentations d'énergie pour les électrofiltres sont obtenues par la conversion de la tension en courant alternatif (220V /380V) industriel à la tension en courant continu dans la gamme de 20000 à 100000 V.

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

La tension appliquée aux électrodes cause le claquage électrique de l'air entre les électrodes, une action connue sous le nom de « décharge couronne ». Les électrodes habituellement sont données une polarité négative parce qu'une décharge couronne négative soutient une tension plus élevée qu'une décharge couronne positive avant le claquage et le passage en régime d'arc. Les ions produits dans la décharge couronne suivent des lignes de champ électrique des fils aux plaques de collecte. Par conséquent, chaque fil établit une zone de remplissage par laquelle les particules doivent passer.

Les particules passant par la zone de remplissage interceptent certains ions, qui deviennent attachés. Les petites particules d'aérosol (diamètre de $\mu\text{m} < 1$) peuvent absorber des dizaines d'ions avant que leur charge totale devienne assez grande pour repousser d'autres ions, et les grandes particules (diamètre de $\mu\text{m} > 10$) peuvent absorber des dizaines de milliers. Les forces électriques sont donc beaucoup plus fortes sur les grandes particules.

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

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

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

I.4.2.2. Electrofiltre à plaque plate

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

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

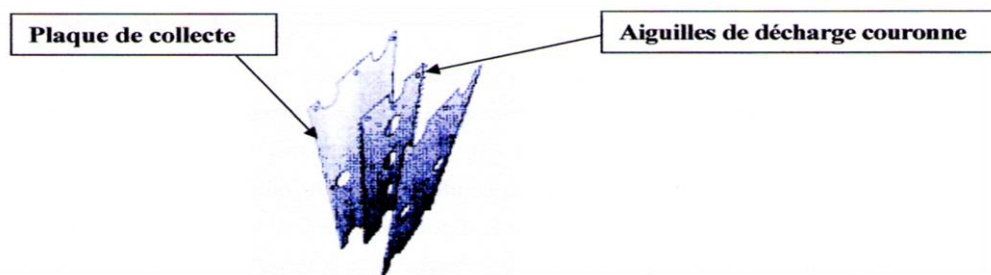


Figure (I.4):Types d'électrofiltre plaque plate

I.4.2.3. Électrofiltre fil-cylindre :

Dans le cas des électrofiltres fil-cylindre, l'électrode ionisante est tendue le long de l'axe du cylindre placé verticalement (figure I.5). Classiquement, le dépôt de particules formé sur la face intérieure du cylindre est nettoyé par intermédiaire d'un film liquide. Ainsi, les agglomérats se détachent et, sous l'influence de la gravité, ils tombent dans les trémies situées dans la partie inférieure du filtre. C'est pour cette raison que ce type de filtre électrostatique est fréquemment utilisé pour enlever des particules liquides (divers acides, huiles), le goudron, etc.

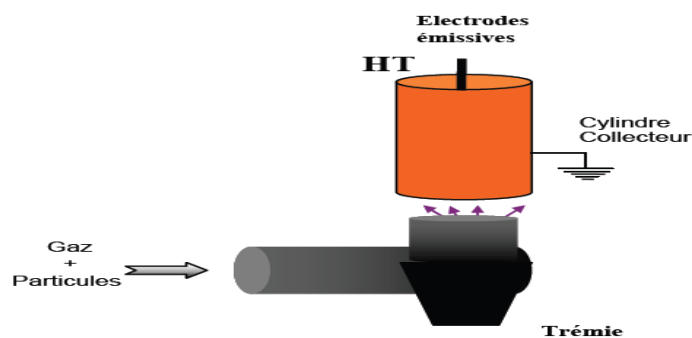


Figure (I.5): Types d'électrofiltre fil-cylindre.

I.4.2.4. Electrofiltres humides

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

- les rendements de filtration sont supérieurs à ceux des électrofiltres secs ;

- le réentraînement des particules collectées est inexistant ;
- les performances de séparation sont indépendantes de la résistivité des poussières.

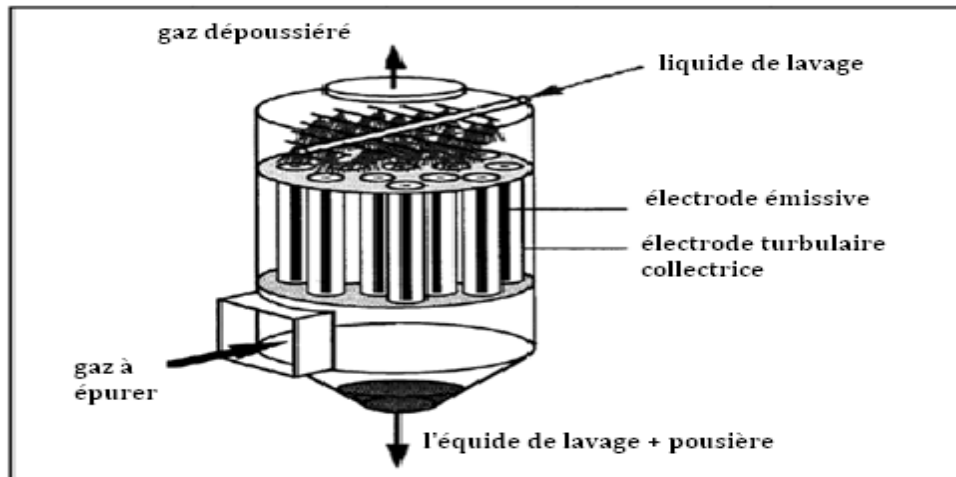


Figure (I.6): Un électrofiltre humide [22].

I.4.2.5. 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.7).

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.

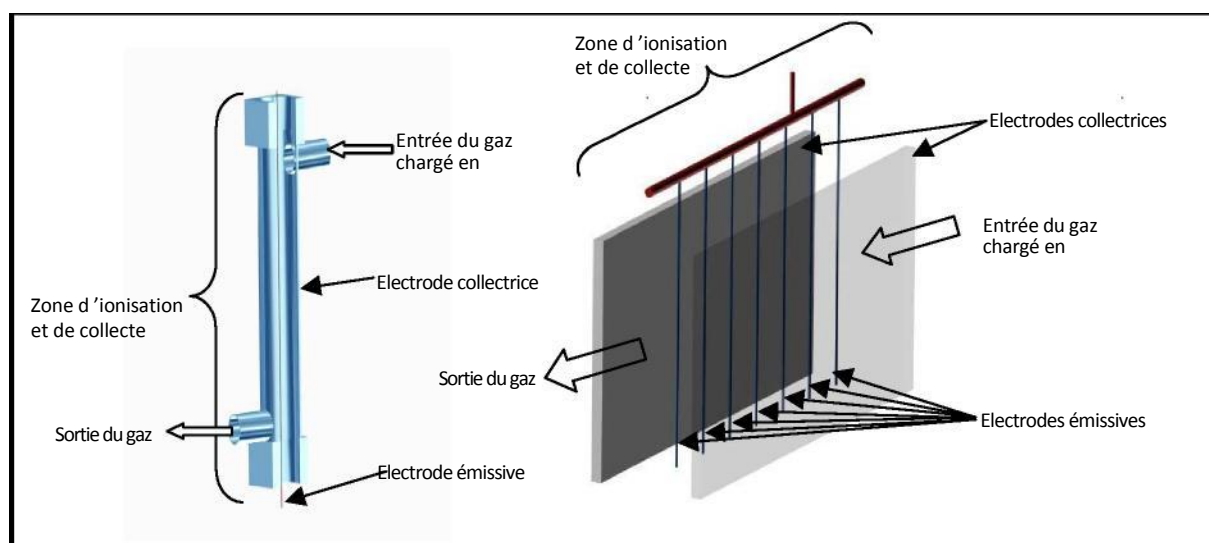
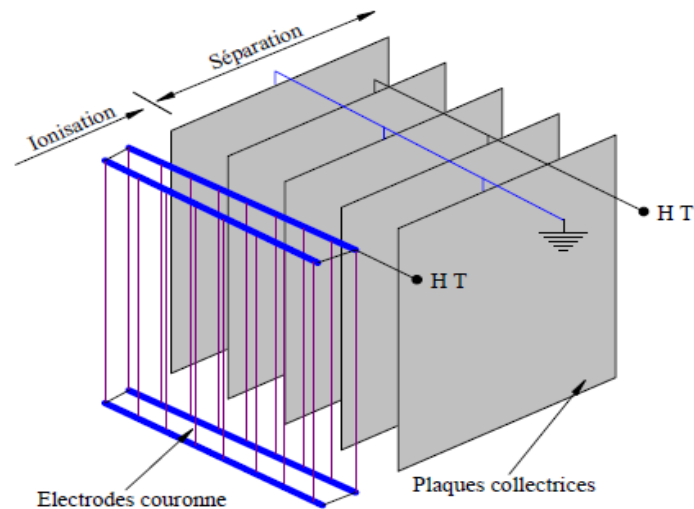


Figure (I.7): Electrofiltre à un seul étage fil-cylindre à gauche, fil-plaque à droite [23]

I.4.2.6. Electrofiltres à deux étages

Les filtres électrostatiques à double étage ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement pour la filtration de l'air ambiant dans certains bâtiments et halles de production. Les deux sections d'un tel filtre sont alimentées séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de tension ainsi que des câblages électriques séparés. Le premier étage, nommé ionisateur, comporte des électrodes de décharge en forme de fil ou de tube. Les électrodes de collecte peuvent être soit des plaques parallèles et équidistantes, soit des cylindres coaxiaux. La figure (I.8) présente une vue schématique d'un précipitateur à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme de plaques. Un problème pour ce type de précipitateurs est l'impossibilité d'utiliser le système de frappe car il provoque le ré-envol des poussières non chargées.

Le lavage des électrodes est donc adopté. Afin d'avoir une production d'ozone la plus faible possible, les électrodes couronne sont portées à un potentiel électrique de polarité positive.



Figure(I.8) : Types d'électrofiltres à double étage avec des électrodes de collecte planes.[23]

I.5. 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 :

- Electriques 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 [24, 25, 26].

Comme l'indique la figure (I.9), ce système consiste en une électrode cylindrique de faible rayon r_f , 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.

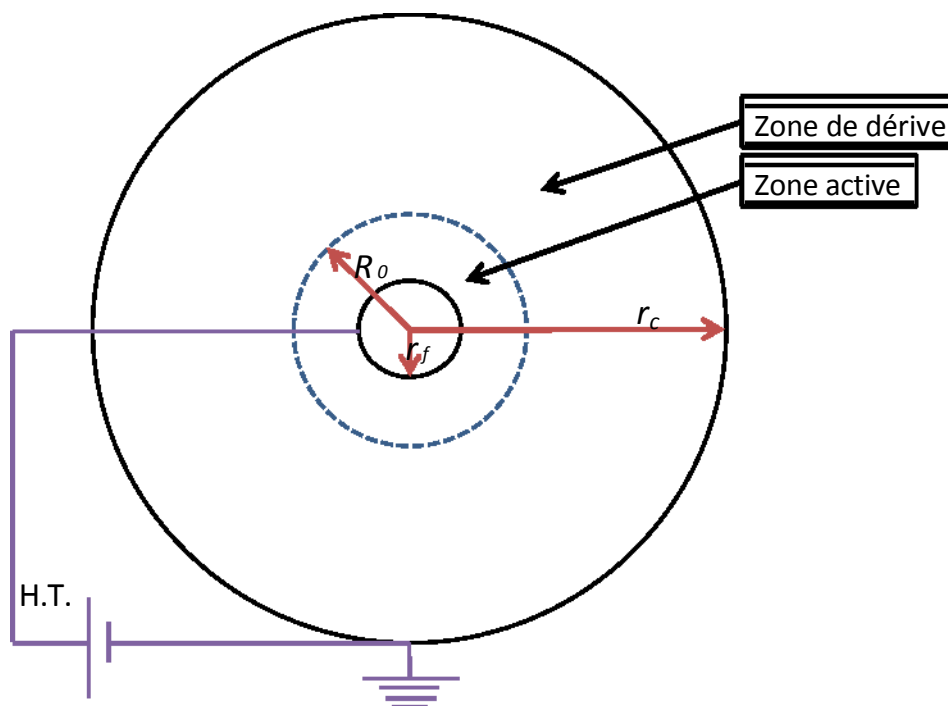


Figure (I.9): Représentation schématique d'une décharge couronne en géométrie fil-cylindre

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.5.1. 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.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.5.2. 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 [27]) 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 [19,28].

I.5.3. Caractéristique courant-tension

La courbe courant-tension d'un électrofiltre est une caractéristique fondamentale. Elle permet d'appréhender l'augmentation du courant liée à l'augmentation de la tension appliquée.

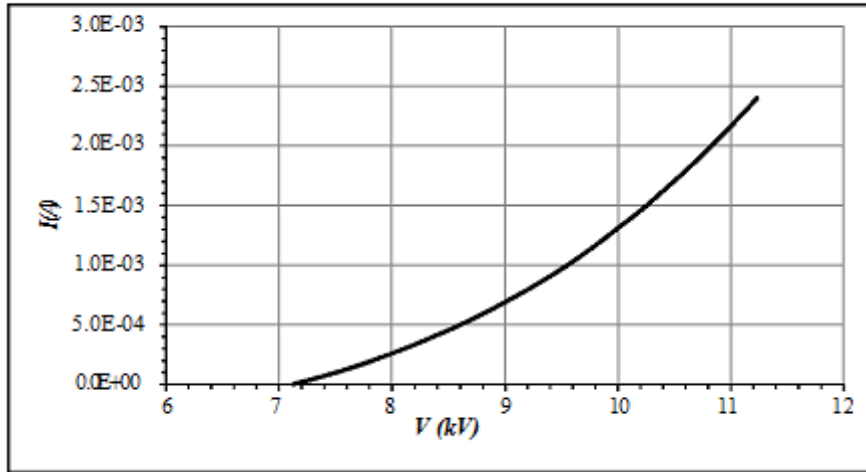


Figure (I.10): Courbe caractéristique courant-tension d'un électrofiltre.

La Figure (I.10), montre l'allure de la caractéristique « courant-tension » pour une décharge couronne positive. Le courant augmente graduellement avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse une certaine valeur I_{fs} et ce jusqu'au claquage du milieu gazeux. Le courant continu qui traverse l'espace inter-électrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée.

Bien que la décharge recouvre des phénomènes complexes, une relation empirique simple entre le courant et la tension est généralement utilisée [29]. Elle s'exprime par:

$$I = C^{st} > V(V - V_s) \quad (\text{I.1})$$

Où C^{st} est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la température, de la pression et de la composition du gaz, V_s représente la tension seuil d'ionisation. D'après Dupuy [30], pour une géométrie fil-cylindre la constante C^{st} est donnée par la relation suivante :

$$C^{st} = \frac{8 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \varepsilon_0}{r_0 \cdot \ln(r_c/r_f)} \quad (\text{I.2})$$

Où C^{st} est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la température, de la pression et de la composition du gaz, V_s représente la tension seuil d'ionisation. D'après Dupuy [30], pour une géométrie fil-cylindre la constante C^{st} est donnée par la relation suivante :

$$C^{st} = \frac{8 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \varepsilon_0}{r_0 \cdot \ln(r_c/r_f)} \quad (\text{I.3})$$

I.6. Modèles du fonctionnement des filtres électrostatiques

Estimer l'efficacité de séparation d'un nouveau précipitateur électrostatique en vue de sa réalisation pratique reste encore un problème difficile. L'importance d'un dimensionnement correct représente finalement un problème économique car, entre le gabarit d'un filtre et son coût total de fabrication il y a une liaison très étroite. Au cours du temps plusieurs travaux ont été menés pour créer des modèles théoriques capables d'offrir des informations sur le rendement du fonctionnement de certaines installations. Au début il y a eu des approches simples, semi-empiriques, qui ont leurs racines dans les observations directes sur le fonctionnement des électrofiltres déjà existants. Ce sont les modèles qu'on appelle analytiques ; ils permettent de décrire l'efficacité de collecte en fonction de paramètres géométriques, électriques et mécaniques. De nos jours, le développement des moyens de calcul ont permis de mettre au point des modèles numériques, basés sur la simulation des phénomènes produits au sein d'un électro filtre [20,31].

I.6.1. Efficacité de collecte

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

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

$$\eta_f = 1 - \frac{C_{cs}}{C_{ca}} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

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

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

Les concentrations sont mesurées à l'aide d'une sonde iso-cinétique placée en aval du filtre, dans une section pour laquelle la concentration est uniforme et où le profil de vitesse est établi. Quand aucun potentiel n'est appliqué au fil, on a vérifié qu'aucune particule n'était piégée, la concentration mesurée en aval est C_{ca} en présence d'un champ électrique cette même sonde mesure C_{cs} [24].

I.6.2 .Vitesse de migration

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

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

$$v_{th} = \frac{q_p E}{3 \pi \mu_g d_p} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

q_p : la charge de la particule,

E : le champ électrique,

μ_g : la viscosité dynamique du gaz,

d_p : le diamètre de la particule.

Cependant, pour des particules de diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$, leur taille devenant comparable au libre parcours moyen des molécules du gaz porteur à pression atmosphérique, on doit tenir compte du mouvement brownien des molécules de gaz. Dans ce cas, la vitesse de migration est corrigée par un facteur C_C appelé facteur de Cunningham (figure 1.11) [19]. La relation (I.17) devient :

$$W_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_p} \cdot C_C \quad (\text{I.6})$$

I.6.3. Paramètres influençant l'efficacité

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

I.6.3.1. Contre-émission

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

Celle-ci réduit le rendement de collecte en abaissant la tension de claquage et en produisant des ions de signe opposé à la décharge principale, qui diminue la charge des poussières. Si la particule est conductrice, il y a peu de perturbation.

Lorsque la conductivité baisse, les ions créés par décharge couronne commencent à être gênés par la résistance de la couche. Ceci entraîne une augmentation de la tension à travers le dépôt et une baisse correspondante au sein du gaz, ce qui entraîne une baisse du courant. Si la conductivité est encore réduite, la tension à travers la couche continue d'augmenter jusqu'à la création d'une décharge diélectrique dans le dépôt ce qui correspond à l'initiation de la contre-émission.

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

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

I.6.3.2. Le réentraînement

Le réentraînement intervient lorsque les particules déposées sur l'électrode collectrice déchargent rapidement et donc ne sont plus le siège de la force électrostatique. Elles se détachent donc de l'électrode et sont emportées par l'écoulement. Il est difficile de retenir les poussières d'une résistivité qui peut être modifiée en jouant sur la température et l'humidité du gaz [32,33]. Ce phénomène de ré envol peut être aussi dû à la contre émission qui détériore la couche de particules déposée. De plus, il peut être provoqué par une mauvaise répartition de l'écoulement et notamment par les effets de la turbulence. En effet, les grandes fluctuations du champ de vitesses du gaz affectent la diffusion turbulente des particules de telle sorte que l'efficacité de l'ESP décroît.

I.6.3.3. Les effets électro hydrodynamiques

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

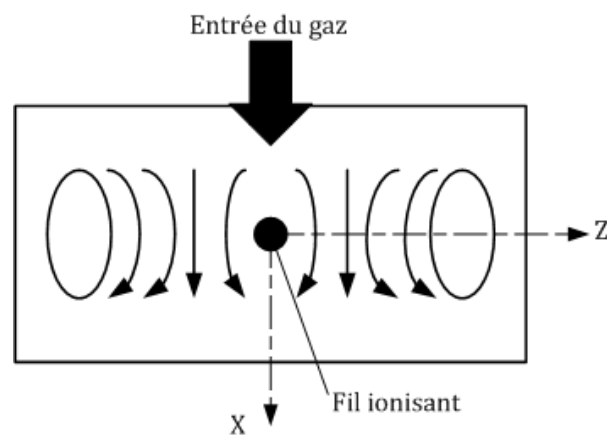
- ✓ Du profil de vitesse et de l'intensité de la turbulence.
- ✓ De l'intensité et de la distribution du champ électrique.
- ✓ De la taille et de la charge de la particule.
- ✓ Du réentraînement des particules.
- ✓ Du vent ionique.

- ✓ Du caractère <non idéal > (rugosité des parois, inhomogénéité de la décharge couronne...).

Il est généralement admis que la présence du vent ionique au sein des ESPs réduit leur efficacité de collection en augmentant le taux de turbulence et donc la diffusion qui lui est associée [34-38].

Dans le cas d'un fil associé à une plaque, en l'absence d'un écoulement forcé, la forme motrice induite par la décharge couronne donne naissance à deux tourbillons réguliers situés symétriquement par rapport au fil et selon la même direction (axe vertical) [39,40]. Ils ont donc conclu que l'écoulement résultant du vent ionique était laminaire.

Yamamoto [31] et al. ont observé que ces tourbillons (figure(I.11)) tendent à disparaître en aval du fil lorsque l'écoulement forcé intervient, en admettant que l'effet de la particule chargée est négligeable. Comme pour Léonard et al. [41,42], la superposition de l'écoulement secondaire, due à la décharge couronne et de l'écoulement principal du gaz, donne un écoulement non turbulent.



Figure(I.11): Ecoulement secondaire observé par Yamamoto

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité les phénomènes physiques de la précipitation électrostatique, tels que la décharge couronne dans les gaz, la charge des particules dans un champ électrique avec ionisation et le transport des particules. De plus, les modèles de fonctionnement des électro-filtres ont été présentés.

Dans le cadre de cette étude, nous allons étudier la faisabilité de l'électro-filtration pour l'épuration d'une atmosphère chargée en poussière de matériaux en bois.

MATERIELS ET METHODES

II.1 Introduction

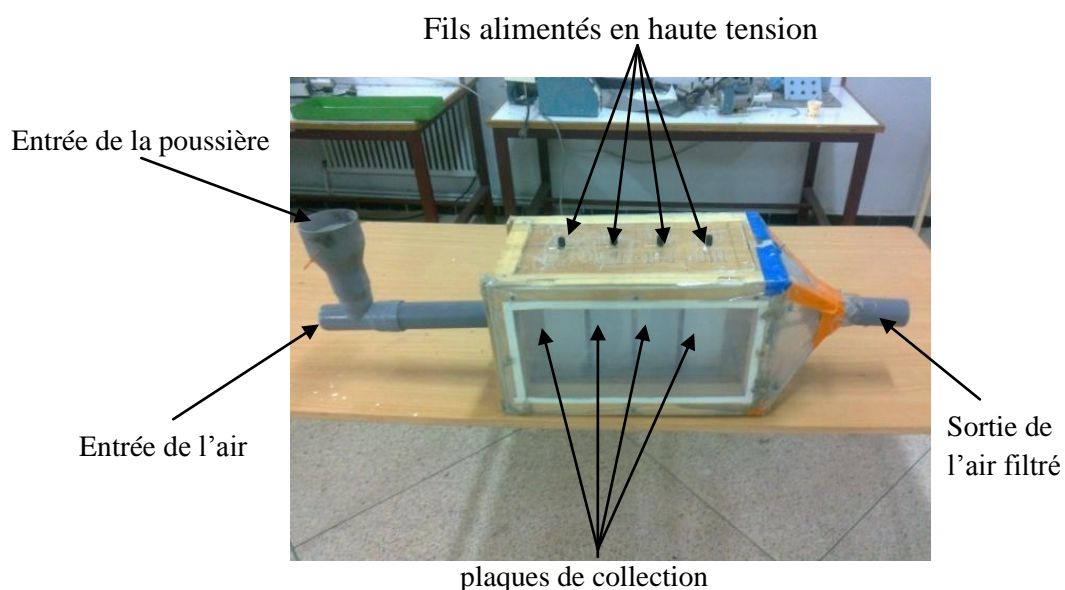
Les filtres électrostatiques sont des filtres industriels robustes, utilisés pour une élimination efficace des cendres transportées par les fumées et des poussières présente dans l'air. Grace à leur durée de vie importante, ces filtres sont extrêmement économiques.

Dans ce chapitre, nous présentons le banc expérimental de filtration d'un filtre électrostatique à un seul étage et à deux étages (fil-plaque). Le but de ce chapitre est de présenter tous les équipements et les dispositifs expérimentaux utilisés dans ce travail.

II.2 Description du dispositif à un seul étage

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

- Entrée de l'air.
- Entrée de la poussière
- Partie d'ionisation et de collection qui consiste en des fils d'ionisations et des plaques de collections.
- Sortie de la poussière.



Figure(II.1): photographie du dispositif expérimental

II.2.1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du filtre électrostatique est simple : un potentiel électrique très élevé est appliqué au fil, appelé électrode émettrice .Il se trouve entre les plaques d'électrode appelé électrodes collectrices qui sont reliés à la terre.

La poussière utilisé est constitué de poussière de bois de différents diamètres, mise dans un réservoir placé en amont d'un ventilateur, celui-ci servant à refouler l'air qui pénètre à travers le filtre et traverse l'espace inter électrodes. Par effet couronne, il ya une ionisation de la poussière autour du fil métallique et création d'ions et d'électrons. Ces derniers bombardent la poussière qui se chargent d'électricité et sont ensuite attirées vers la surface des plaques sous l'effet du champ électrique. La poussière se dépose sur les électrodes plaques d'où elle régulièrement enlevées par soufflage.

II.2.2 Matériel utilisé

Alimentation haute tension (HT) : on a utilisé une source de haute tension continue de polarité positive et polarité négative délivrée par un générateur HT de tension variable entre 0 et 60 kV et de courant variable de 0 a 6 mA figure(II.2).



Figure(II.2): Photographie de l'alimentation haute tension de laboratoire utilisé

- ✓ **Thermo hygromètre :** La mesure de la valeur de l'humidité relative est prise avant chaque série d'expériences en utilisant un thermo hygromètre numérique, de marque WaveTeck figure(II.3).



Figure(II.3): Photographie du thermo hygromètre utilisé

La température ambiante pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de $17 \pm 2 \text{ C}^\circ$ et le taux d'humidité était l'ordre de $50 \pm 2 \%$.

- ✓ **Balance:** Une balance digitale nous permet de mesurer la quantité de poussière qui sera injectée dans le filtre par l'intermédiaire d'un souffleur, ainsi que la poussière récupérée à la sortie figure(II.4).



Figure(II.4): Photographie de la balance

Autotransformateur : L'autotransformateur nous permet de réguler la vitesse du souffleur en variant la valeur de sa tension figure(II.5).



Figure (II.5): Photographie d'un autotransformateur

Souffleur : A l'aide de ce souffleur nous pouvons injecter de la poussière a travers le filtre qui sera être charge figure(II.6).



Figure (II.6): Photographie de souffleur

Tamiseur : A l'aide de ce tamiseur nous pouvons connaitre le diamètre des particules de poussière utilisée. Il a été utilisé pour déterminer une seule classe de particules de taille granulométrique de taille moyenne environ $10 \mu\text{m}$ Figure(II.7).

Tamis de différents diamètres

Moteur de vibration



Figure (II.7): Photographie du tamiseur

II.3. Description du dispositif à deux étages

II.3.1. Introduction

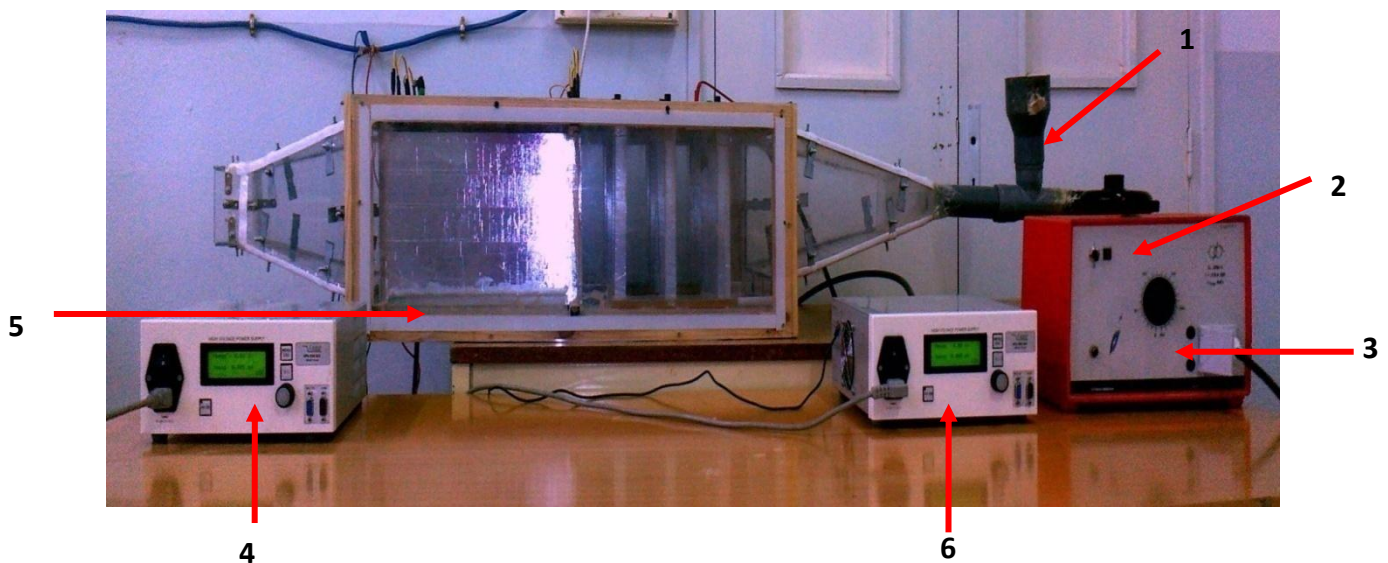
Dans le but de concevoir et réaliser notre filtre électrostatique à deux étages, nous avons mené nos expériences dans le laboratoire d'APELEC. Les filtres électrostatiques à deux étages comme nous avons vu au chapitre I, ont des performances qui dépendent des conditions de fonctionnement liées à la présence de deux générateurs haute tension.

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

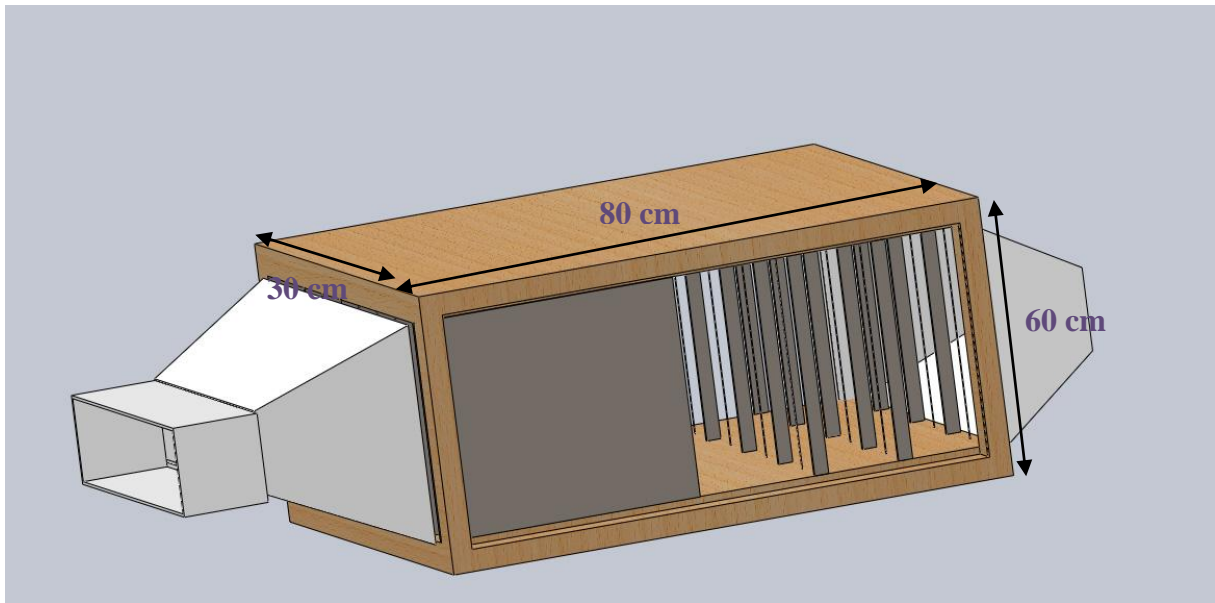
II.3.2. Description du filtre électrostatique de laboratoire

Le schéma descriptif de notre dispositif expérimental, représenté dans la photographie de la figure(II.8) permet de faire ressortir les différentes parties du dispositif qui seront décrites par la suite: (figure II.8-II.9)

- 1-Entrée de la poussière.
- 2-Souffleur.
- 3-Autotransformateur.
- 4-Générateur de haute tension de polarité positive.
- 5-Filtre électrostatique.
- 6-Générateur de haute tension de polarité négative.

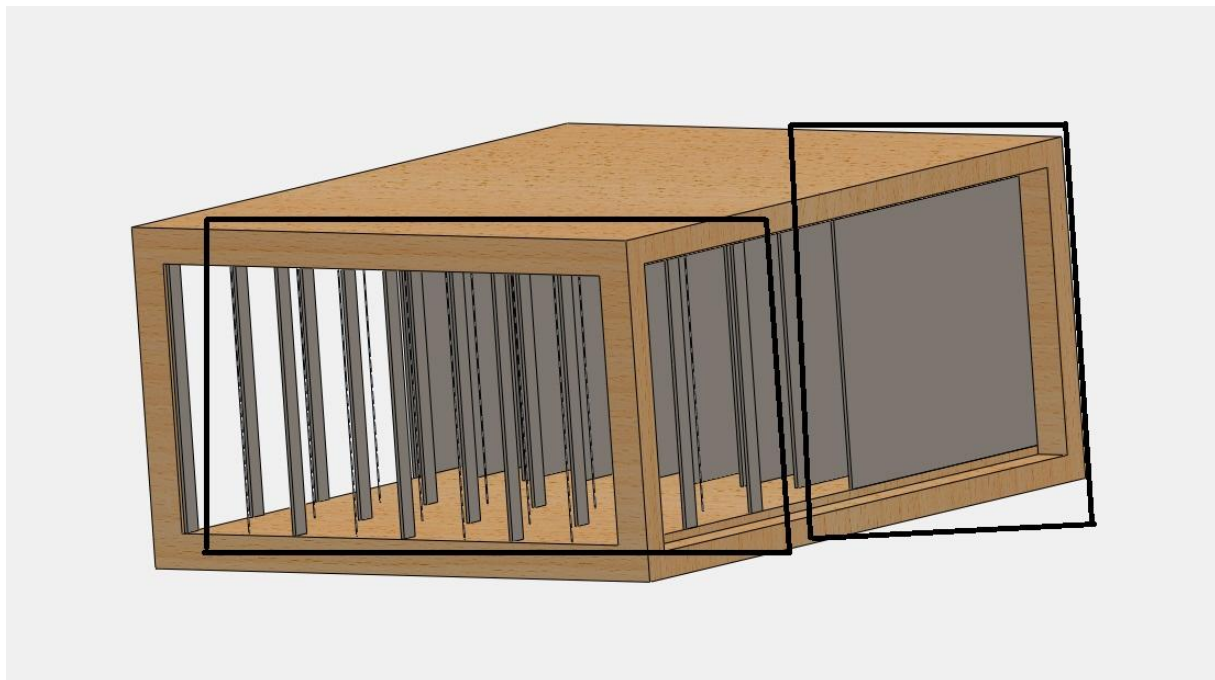


Figure(II.8) photographie du dispositif de laboratoire à deux étages.



Figure(II.9) : le filtre électrostatique

-Le filtre électrostatique de notre laboratoire comprend deux parties essentielles: (figure II.10), une partie de collection et une partie d'ionisation.

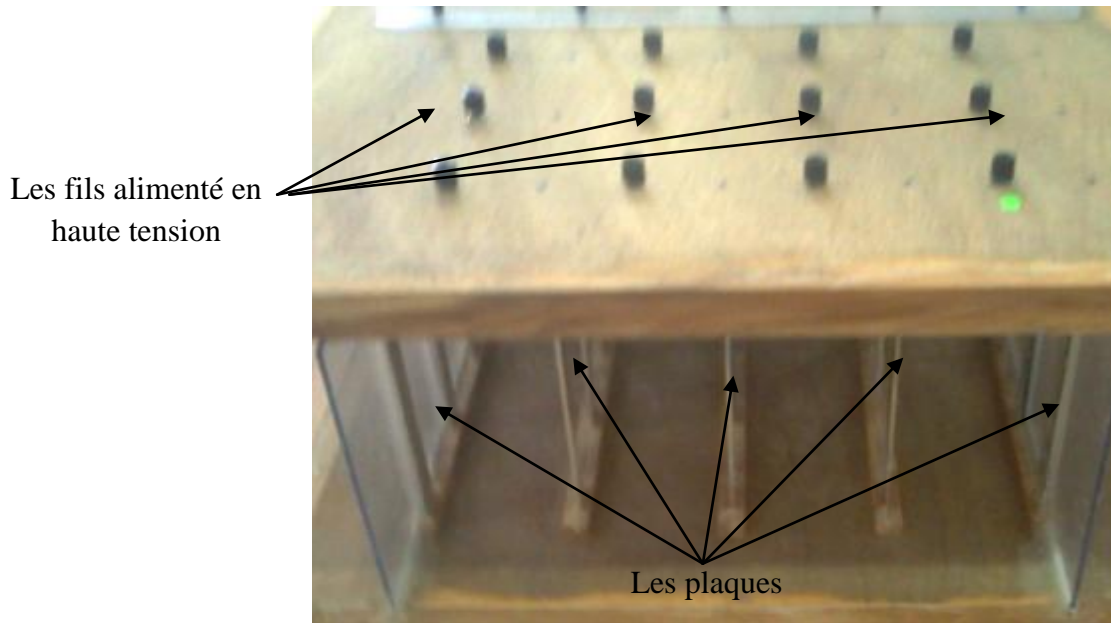


Partie d'ionisation

Partie de collection

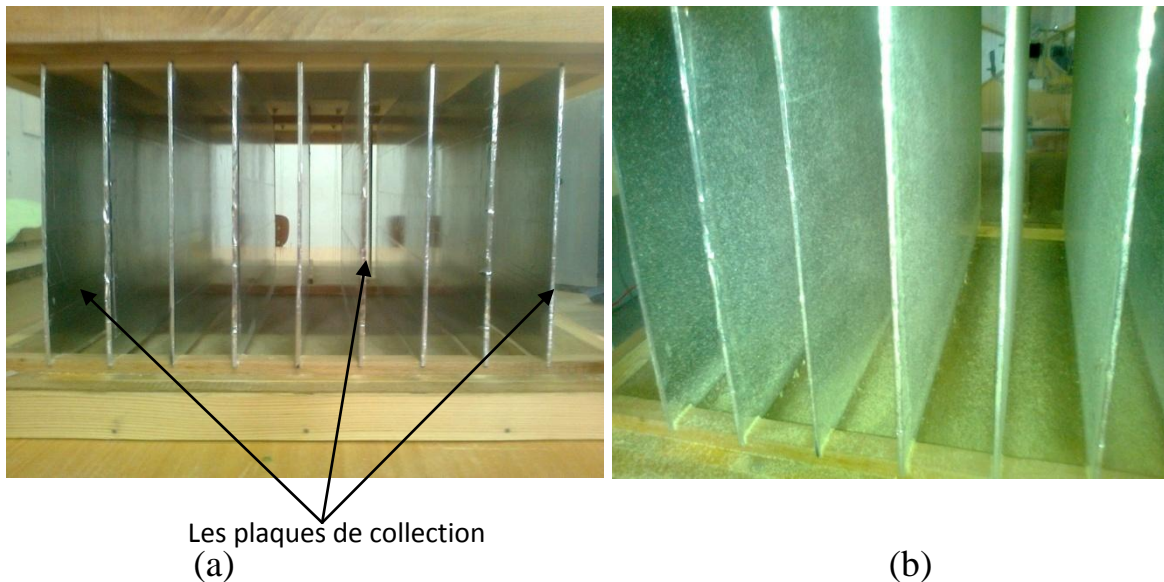
Figure(II.10) : les deux parties de filtre électrostatique

La première partie : la partie d'ionisation composée des fils et des plaques figure(II.11).



Figure(II.11): photographie de la partie d'ionisation

La deuxième partie : la partie de collection est composée seulement des plaques figure(II.12).



Figure(II.12): photographie de la partie de collection

a- les plaques à vide

b- les plaques après collection

II.3.3 Principe de fonctionnement

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

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

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

L'augmentation du potentiel électrique appliqué conduit à un champ intense près de l'électrode haute tension ou se développe une avalanche électronique. les ions et les électrons créés par la décharge couronne qui chargent les particules polluantes. les fines particules qui se trouvent en suspension dans l'air peuvent recueillir des charges électrique grâce à plusieurs mécanisme qui sont : la charge naturelle par attachement des ions existants dans l'atmosphère, la triboélectrisation (regroupant la charge par contact et la charge par frottement) et la charge par charge d'espace ionique (regroupant la charge par champ et la charge par diffusion).

Le deuxième étage noté collecteur est consiste des plaques collectrices, alimentées par une alimentation de haute tension négative et les autres plaques sont reliés à la terre. La distance entre ces plaques est $D=5\text{cm}$. Les particules chargées dans le premier étage sont accumulées sur les plaques de collection.

II.4. Méthodologie des plans d'expériences

Les plans d'expériences devraient faire partie du bagage scientifique de tout expérimentateur car ils servent à optimiser l'organisation des essais. Cette organisation permet d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats. Cette science de l'organisation des essais et de la modélisation des résultats expérimentaux nécessite une terminologie adaptée, précise et une mise en œuvre rigoureuse.

II.4.1. Préparation de l'étude

a) Définition de l'objectif de l'étude

Définir l'objectif de l'étude est primordial. Tous les choix et toutes les actions vont découler de cet objectif. Il peut y avoir plusieurs objectifs, le problème devient alors plus compliqué et la construction du plan devra prendre en compte cette donnée.

b) Description détaillée des éléments sur lesquels va porter l'étude

Il s'agit de décrire avec le plus de précision possible, les principaux éléments qui entrent en jeu. Il peut s'agir d'un appareil de mesure (voltmètre, ampèremètre, tachymètre), ou bien des conditions climatiques (température, humidité, ...etc.). Il y a des facteurs contrôlables et non contrôlables.

b) Choix de la réponse permettant d'obtenir l'objectif

L'objectif étant précisé, il importe de choisir la réponse (ou les réponses) qui permettra de savoir si cet objectif est atteint ou non. Dans ce dernier cas, la réponse doit permettre de savoir si l'on est près ou loin du but. Il ne s'agit pas de choisir une réponse facile à mesurer, il s'agit de trouver la réponse pertinente.

c) Recherche des facteurs qui pourraient être influents sur la réponse

On se demande quels sont les facteurs qui pourraient avoir une influence sur la réponse choisie. Il ne faut pas se limiter et il convient d'écrire tous les facteurs possibles. Quand la liste est bien remplie et que l'on a par exemple six facteurs, on peut faire des choix. On pourra introduire certains facteurs dans le plan d'expériences et on fixe d'autres à un niveau constant pendant toute l'expérimentation [43].

Il est également possible d'utiliser des plans séquentiels. Le premier plan permet d'étudier n facteurs, si l'on veut ensuite reprendre l'étude d'un ou de plusieurs nouveaux facteurs, il suffit d'ajouter quelques essais supplémentaires à ce premier plan pour obtenir un nouveau plan portant sur tous les facteurs.

d) Définition des niveaux des facteurs

Il s'agit de choisir les niveaux haut et bas de chaque facteur. Ce travail est indispensable car il définit le domaine d'étude à l'intérieur duquel les conclusions de l'expérimentation seront valables.

f) Contraintes

Aux limites inférieures et supérieures de chaque facteur, viennent souvent s'ajouter les contraintes, c'est à dire les conditions pratiques particulières pour lesquelles il est exclu de réaliser des expériences, on citera par exemple des contraintes d'existence physiques ou électriques. Elles se traduisent alors par la définition implicite des niveaux des facteurs [43].

Existence ou non d'interactions entre les facteurs

On doit répondre à cette question avant l'expérimentation, car suivant la réponse, le plan d'expérience ne sera pas construit de la même manière.

Dans le cas des plans de second degrés, le modèle à priori ne sera pas le même suivant qu'on suppose la présence ou non d'interactions.

II.4.2. Choix du plan d'expériences

Lorsque la préparation a été menée avec soin, le choix du plan ne pose en général aucune difficulté. Un peu de théorie et beaucoup d'imagination permettent de traiter tous les problèmes.

II.4.3. Expérimentation

C'est une phase d'on on parle peu dans la théorie des plans d'expériences, on suppose toujours que l'expérimentateur, spécialiste de la partie scientifique et technique, travaille parfaitement.

En réalité il y a des pièges qu'il faut savoir éviter, s'il y a beaucoup de facteurs, l'un des problèmes majeurs, est de bien mettre chaque facteur au bon niveau pour chaque essai. La moindre erreur se répercute sur tous les coefficients du modèle mathématique et sur les conclusions de l'étude qui risquent alors d'être fausses.

II.4.4. Interprétation des résultats

Toutes les étapes précédentes ont été réalisées pour faciliter l'interprétation des résultats, maintenant que l'on y arrive, on possède des données très riches en information et il faut prévoir beaucoup de temps pour l'interprétation, qui fait appel au savoir et à la créativité de l'expérimentateur.

II.4.5. Arrêt ou poursuite de l'étude

Si l'objectif a bien été défini, l'arrêt de l'étude coïncide avec l'atteinte de l'objectif. Dans le cas contraire, il faudrait revoir l'ensemble du problème, en général ce qu'il faut faire pour arriver au résultat souhaité, changement du domaine d'étude, modèle plus élaboré, précision plus grande, ...etc. La poursuite de l'étude dépendra du coût et des enjeux.

II.5. Modélisation

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création de modèle de la fonction objectif (réponse). Il est donc naturel d'analyser dans les détails cette composante primordiale.

II.5.1. Modèles polynomiaux

Le but est la recherche de l'expression d'un modèle polynomial décrivant les variations de la fonction réponse (y) relativement aux valeurs de (k) facteurs ($x_1^*, x_2^*, \dots, x_k^*$).

□ Notations de Yate

La notation de Yate permet une représentation simple des niveaux de facteurs. Les niveaux sont représentés par les valeurs (+1) et (-1) symbolisant la valeur haute et basse d'un facteur. Le passage des variables d'origine x aux variables centrées réduites x_i^* et inversement, est donné par la formule suivante [44]:

$$x^* = \frac{x - x_c}{pas} \quad (\text{II.1})$$

où

x^* : est la variable centrée réduite

x : est la variable exprimée en unités courantes ;

x_c : est la valeur exprimée en unités courantes

pas : est la variation entre la valeur centrale et une extrémité du domaine.

II.5.1.1. Modèle constant

On suppose que la réponse peut être représentée par un modèle tel que :

$$y = a_0 \quad (\text{II.2})$$

Toutes les réponses sont égales et constantes.

II.5.1.2. Modèle du premier degré sans interaction

On suppose que la réponse est une fonction du premier degré des coordonnées (x_i^*) points expérimentaux. Pour un point ne faisant intervenir que deux facteurs, on a [44]:

$$y = a_0 + a_1 x_1^* + a_2 x_2^* \quad (\text{II.3})$$

Où :

y : est la réponse

x_1^*, x_2^* ; sont les niveaux de facteurs en unités centrées réduites ;

a_0, a_1, a_2 : sont des coefficients constants.

II.5.1.3. Modèle du premier degré avec interactions

Ce modèle mathématique est généralement utilisé pour interpréter les résultats des plans factoriels, pour deux facteurs on a :

$$y = a_0 + a_1 x_1^* + a_2 x_2^* + a_{12} x_1^* x_2^* \quad (\text{II.4})$$

Où : a_{12} : est l'interaction entre le facteur 1 et 2.

II.5.1.4. Modèle du second degré avec interactions

C'est un modèle qui fait intervenir les coordonnées des points expérimentaux au second degré, pour deux facteurs on a :

$$y = a_0 + a_1 x_1^* + a_2 x_2^* + a_{11} x_1^{*2} + a_{22} x_2^{*2} + a_{12} x_1^* x_2^* \quad (\text{II.5})$$

II.6. Evaluation de la qualité des modèles mathématiques

Il faut maintenant évaluer la qualité du modèle, c'est à dire qu'il faut se poser la question: " Le modèle postulé explique-t-il les résultats obtenus au cours des essais ?" ou, ce qui revient au même, "Existe-t-il une erreur d'ajustement ?".

Pour pouvoir répondre à cette question, il faut utiliser des outils qui sont capable d'évaluer la qualité d'un modèle mathématique. Parmi ces outils, il y a les méthodes graphiques, l'analyse de la variance, la recherche globale de l'ajustement du modèle et l'analyse des résidus.

II.6.1. Examen graphique des résultats

Soit le modèle mathématique postulé pour un seul facteur suivant

$$\hat{y}_{\text{predit}} = a_0 + a_1 x^* \quad (\text{II.6})$$

L'examen visuel permet de s'apercevoir que les réponses mesurées sont proches pour une même valeur du niveau de facteur considéré. L'erreur expérimentale est donc faible [45]. Par contre l'allure de la courbe qui pourrait joindre ces points ressemble à une fonction du second degré (courbure) qu'à une droite. Le modèle à priori qui a été choisi ne paraît pas être le bon (figure II.15) .

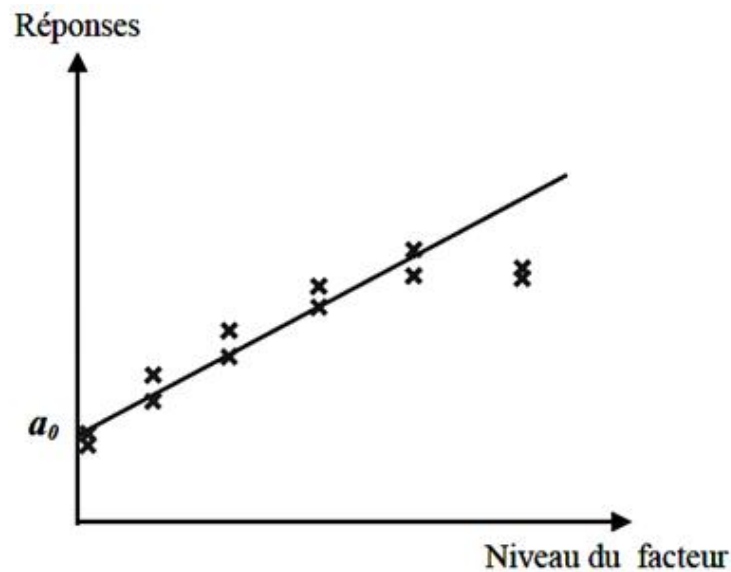


Figure II.13 : Réponses expérimentales et prédites d'un processus à un seul facteur.

Comment pourrait-on s'apercevoir de cette divergence sans graphique ? Il faudrait pouvoir estimer l'écart d'ajustement entre la courbe représentative du modèle postulé et la courbe représentant les résultats expérimentaux. Le moyen couramment utilisé est la comparaison entre la somme des carrés des écarts d'ajustement et la somme des carrés des écarts expérimentaux. Pour cela, il faut d'abord définir les différents écarts qui vont intervenir dans les calculs. La figure (II.14) permet de distinguer trois types d'écarts différents :

II.6.1.1. Erreur expérimentale

Pour une valeur donnée du niveau du facteur, l'erreur expérimentale est l'écart entre une réponse mesurée et la moyenne des réponses mesurées au même point expérimental.

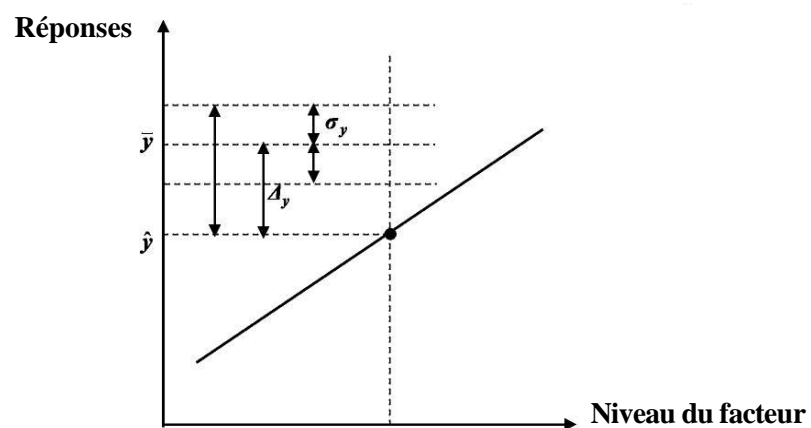


Figure II.14 : Les différents écarts existant entre les points expérimentaux et les points prédits.

Prenons par exemple la valeur du niveau du facteur (x^*) qui correspond à deux réponses mesurées (expérimentalement) y_1 et y_2 dont la moyenne est \bar{y} . Il y a donc deux écarts :

$$\begin{cases} \sigma_1 = y_1 - \bar{y} \\ \sigma_2 = y_2 - \bar{y} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Avec

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2}{2} \quad (\text{II.8})$$

Ces écarts sont les écarts enregistrés lors de la détermination des réponses. Il s'agit donc de l'erreur expérimentale (σ_y).

II.6.1.2. Erreur d'ajustement

Le second écart est celui que l'on constate entre la moyenne des réponses (\bar{y}) et la réponse prédite (\hat{y}). Cette différence est caractéristique du manque d'ajustement ou du "lack of fit" (Δy) [44].

$$\Delta y = \bar{y} - \hat{y} \quad (\text{II.9})$$

II.6.1.3. Résidus

Enfin, le troisième écart est celui qui existe entre chacune des réponses mesurées et la réponse prédite. Cet écart est le résidu (e_i) :

$$e_1 = y_1 - \hat{y} \quad (\text{II.10})$$

II.6.2. Variance globale

C'est la variance globale des résidus, on calcul la somme des carrés des résidus, pour cela il est nécessaire de calculer les réponses prédites à l'aide de la relation (II.6).

La modélisation est d'autant mieux ajustée aux données expérimentales que la valeur des carrés moyens des résidus (CMR) est faible.

$$CMR = \frac{SCR}{(N - p)} \quad (\text{II.11})$$

Avec:

SCR : somme des carrés des résidus;

N : nombre des essais;

p : nombre des coefficients du modèle mathématique.

II.6.3. Tests statistiques

II.6.3.1. Rapport R^2

Pour évaluer le degré d'explication du modèle par rapport aux réponses mesuré

$$R^2 = \frac{SCP}{SCE} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

SCP : la somme des carrés des réponses prédites ;

SCE : la somme des carrés des réponses expérimentales.

D'après cette formule, on voit que le rapport R^2 varie entre 0 et 1, s'il vaut zéro, c'est que le modèle n'explique rien, s'il vaut 1 c'est que le modèle explique toutes les réponses mesurées.

II.6.3.2. Rapport Q^2

Le coefficient Q^2 est très similaire au coefficient R^2 ; il est parfois appelé R^2 prédictif.

Son expression est :

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{SCE} \quad (\text{II.13})$$

$PRESS$: signifie "Predictive Residual Sum of Square". Ce coefficient est défini comme sur [47] [48]:

$$PRESS = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y})^2}{(1 - h_i)^2} \quad (\text{II.14})$$

h_i : est le $i^{\text{ème}}$ élément diagonal de la matrice de "Hat": $X(X^t X)^{-1} X^t$

Le coefficient Q^2 varie généralement entre 0 et 1. Il peut être négatif pour les très mauvais modèles. Des valeurs proches de l'unité désignent de la même façon des modèles bien ajustés aux données expérimentales. R^2 et Q^2 sont ainsi deux mesures de la qualité d'ajustement; le premier est descriptif, il mesure la relation entre le modèle et les réponses aux points initiaux, alors que le Q^2 est d'avantage prédictif, il mesure la capacité du modèle à prévoir la réponse aux points inconnus du domaine d'étude [46].

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les matériels pour la conception des filtres à un étage et à deux étages et pour la réalisation des expériences, ainsi que la méthode des plans d'expérience qui va être très utile pour la modélisation et la prédiction du rendement du processus de filtration. Les modèles mathématiques les plus employés pour la modélisation des résultats d'un plan d'expérience sont les modèles polynomiaux. Ils sont, la plupart du temps, du premier ou du deuxième degré. Il faut noter, qu'ils ne sont valables que dans le domaine d'étude.

MODELISATION DU DISPOSITIF A UN SEUL ETAGE

III.1. Introduction

Les filtres électrostatiques sont des filtres industriels robustes, utilisés pour une élimination efficace des cendres transportées par les fumées et des poussières présente dans l'air. Grace à leur durée de vie importante, ces filtres sont extrêmement économiques.

Le but de ce travail est de formuler un ensemble de recommandations concernant le choix de quelques facteurs qui peuvent influencer sur le processus de la filtration. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus, d'après les expériences faites sur un modèle d'électrofiltre "fil plaque" à un seul étage.

Notre dispositif est réalisé pour trois configurations de la distance inter-électrodes variable $d=4, 8, 12$ [cm]. Dans le cadre de cette étude, nous allons étudier la faisabilité de l'électro filtration pour l'épuration d'une atmosphère chargée en poussières de matériaux bois. Nous procéderons de la façon suivante :

- Tests avec des poussières de matériaux bois issues essentielles par ponçage dans les locaux,
- un électrofiltre de type fil-plaque, conçu et réalisé dans notre laboratoire, va être testé. Un ensemble de données expérimentales concernant le fonctionnement électrique et les performances de filtration sera alors à notre disposition.

III.2 Résultats obtenus

III.2.2. Expériences préliminaires:

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

- ✓ Distance inter-électrodes [cm].
- ✓ Tension appliquée [kV].
- ✓ Vitesse de l'air (souffleur) [m/s]
- ✓ Courant [mA]

Dans cette expérience nous avons pris un produit de mélange de poussière de bois, dans le diamètre moyen de la particule est de l'ordre de $10 \mu m$. Pour chaque valeur de la distance inter-électrodes ($d=4cm$, $d=8cm$, $d=12cm$), les résultats obtenus en polarité positive du rendement en fonction de la tension, du courant et de la vitesse sont illustrés par les courbes aux figures (III.1, 2 et 3) respectivement.

Polarité positive :

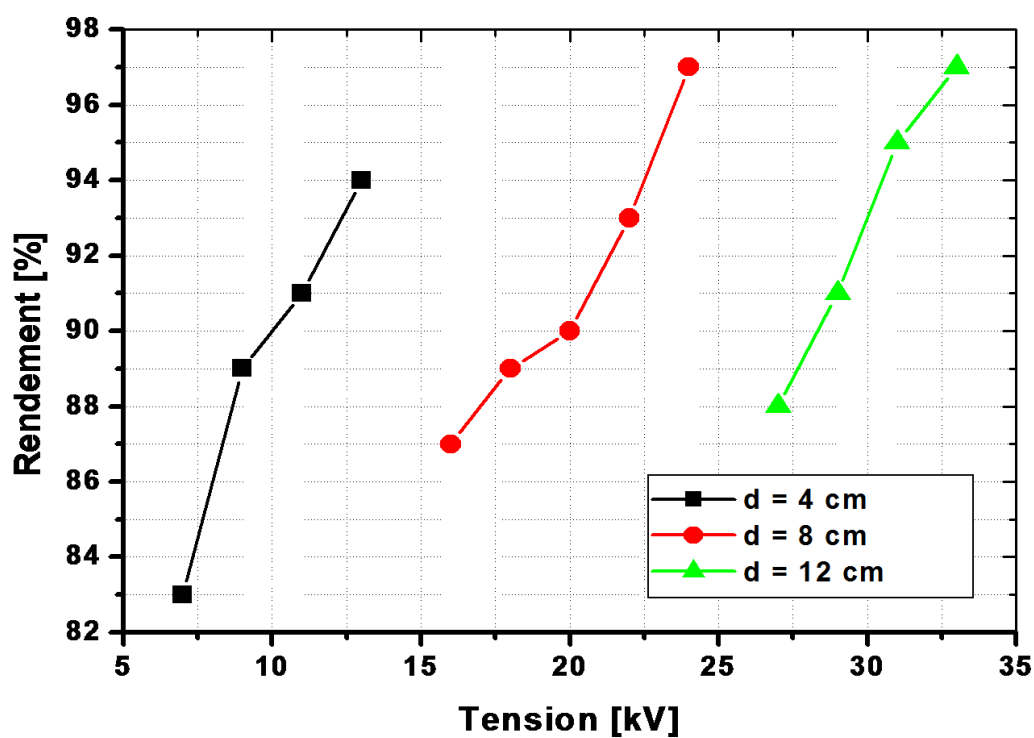


Figure (III.1): Variation du rendement en fonction de la tension pour trois valeurs de la distance inter-électrodes d ($v=1.66m/s$).

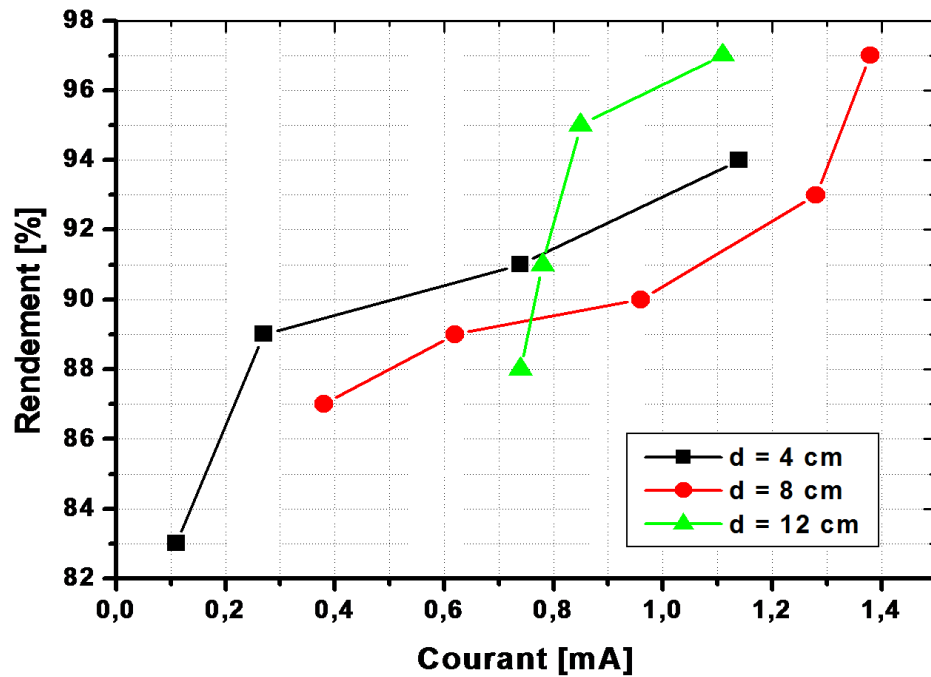
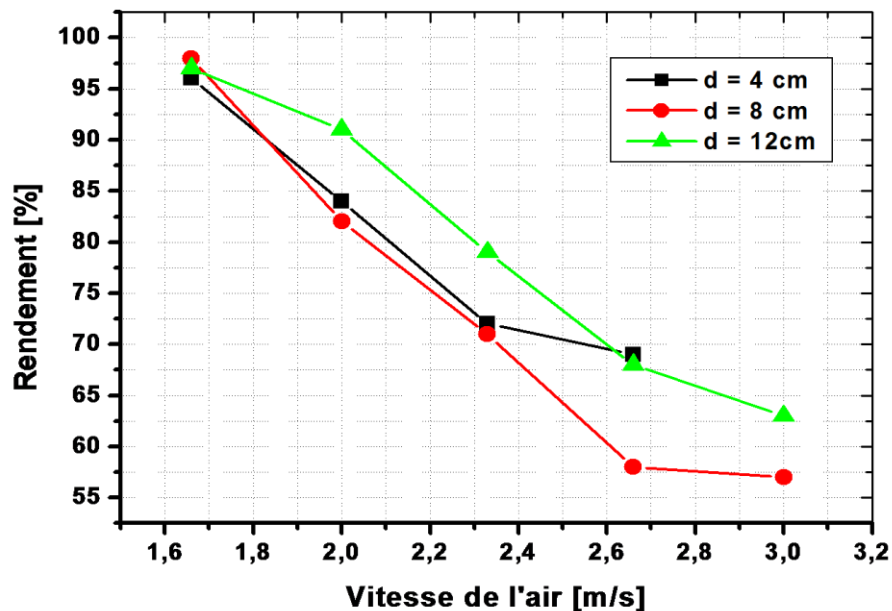


Figure (III.2): Variation du rendement en fonction du courant pour trois valeurs de la distance inter-électrodes d ($v=1.66$ m/s)



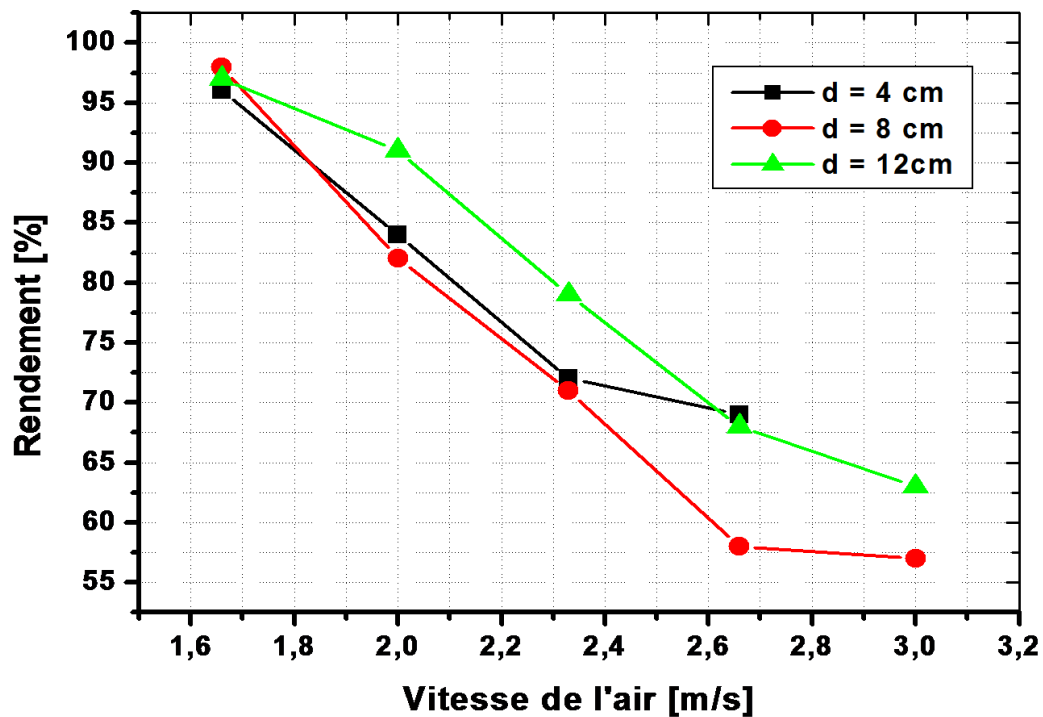


Figure (III.3): Variation du rendement en fonction de la vitesse de l'air pour trois valeurs de la distance inter-électrodes d ($U=11\text{kV}$, $I=0.744\text{ mA}$).

Polarité négative :

Tout en gardant le même produit et avec la même procédure qu'on a fait en polarité positive, pour chaque valeur de la distance inter-électrodes ($d=4\text{cm}$, $d=8\text{cm}$, $d=12\text{cm}$), les résultats obtenus en polarité négative du rendement en fonction de la tension, du courant et de la vitesse sont illustrés par les courbes aux figures (III.4,5 et 6).

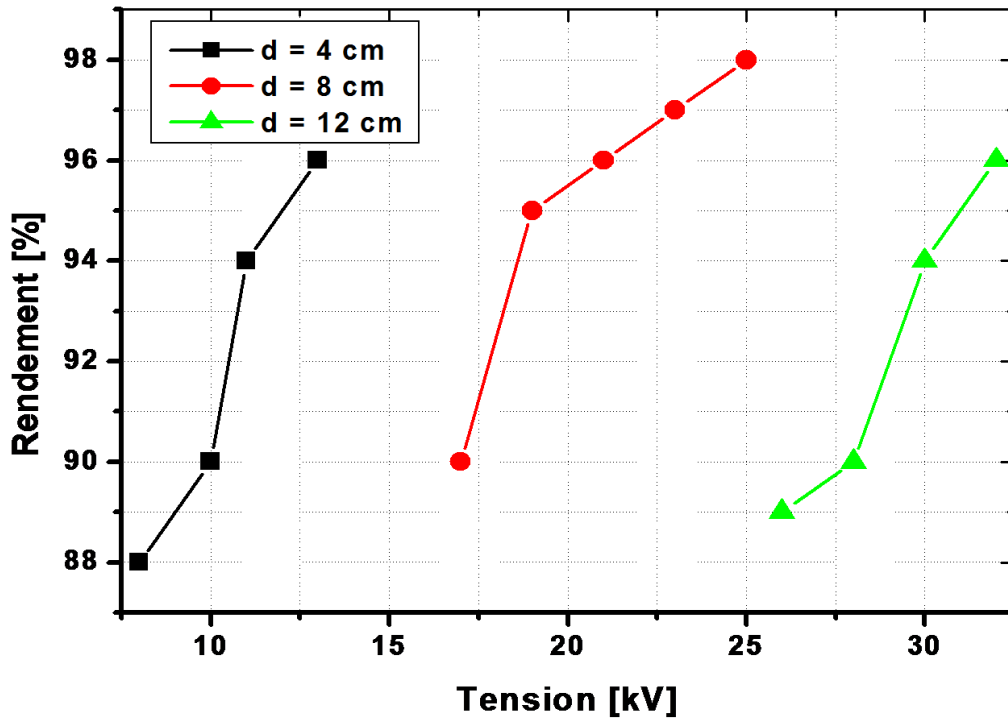


Figure (III.4): Variation du rendement en fonction de la tension e pour trois valeurs de la distance inter-électrodes d ($v=1.66\text{m/s}$).

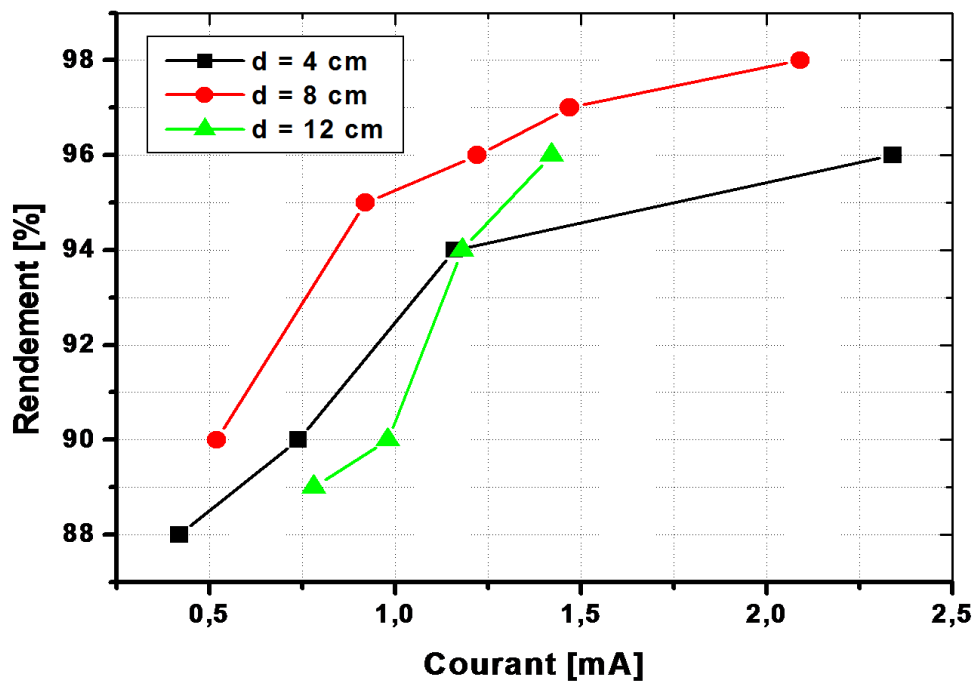


Figure (III.5): Variation du rendement en fonction du courant pour trois valeurs de la distance inter-électrodes d ($v=1.66\text{m/s}$).

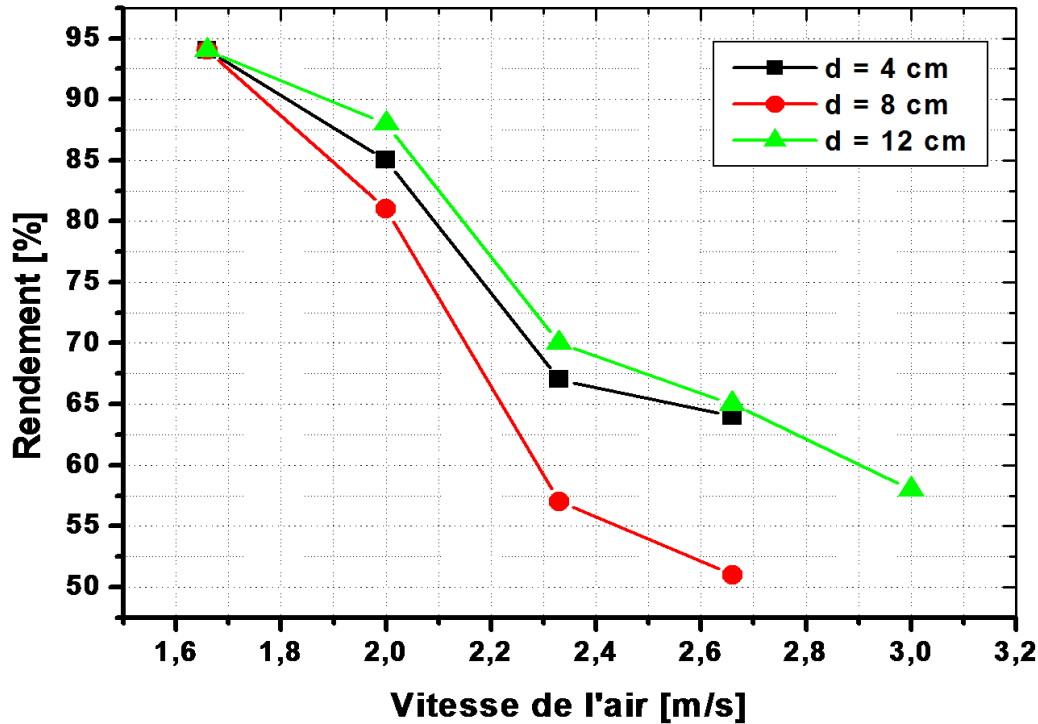


Figure (III.6): Variation du rendement en fonction de la vitesse l'air pour trois valeurs de la distance inter-électrodes d ($U=11\text{kV}$, $I=0.744\text{ mA}$).

Le rendement augmente en fonction de la tension, cela est due à l'augmentation du champ E ($E = \frac{U}{d}$), ainsi que la quantité de charge q augmente ce qui entraîne que les particules vont être fortement chargées, ce qui favorise et facilite la collection de ces dernières.

Le rendement diminue en fonction de la vitesse de l'air car la force aérodynamique sera plus grande que la force électrique ce qui ne facilite pas la collection des particules. En effet, l'augmentation du champ entraîne l'augmentation du courant généré par décharge couronne, d'où un meilleur chargement des particules par champ. Ces résultats sont confirmés par les courbes du rendement en fonction de la tension et en fonction du courant. Par ailleurs, nous avons constaté que l'augmentation de la vitesse d'écoulement du produit polluant entraîne une diminution considérable du rendement de la filtration. Ceci s'explique par le fait de l'augmentation de la force aérodynamique de la particule qui l'emporte sur la force électrique. Ces commentaires sont valables dans les deux polarités.

III.3. Modélisation par la méthode des plans d'expériences

Le but de ce travail est de trouver les valeurs optimales des dimensions géométriques et électriques du filtre électrostatique qui donnent un taux de filtration maximal. Il n'est pas simple de réaliser de telle relation entre la réponse et les facteurs considérés et surtout, si on sait qu'il existe bel et bien des interactions entre ces derniers. A partir de ces considérations, la méthodologie des plans d'expériences s'est avérée être très adaptée pour les études expérimentales car elle sert à optimiser l'organisation des essais[49]. Cette organisation nous a permis non seulement d'obtenir le maximum de renseignements mais aussi d'arriver à une meilleure précision possible sur la modélisation des résultats et par la suite l'optimisation de l'efficacité du filtre.

III.3.1. Choix des intervalles d'étude

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

a) Intervalle d'étude de la tension :

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

- **Polarité positive**

$$8(\text{kV}) \leq U \leq 13(\text{kV}) \quad (\text{III.1})$$

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

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

D'où : $U_c = 10.5 \text{ kV}$

- **Polarité négative**

$$-12(\text{kV}) \leq U \leq -8(\text{kV}) \quad (\text{III.3})$$

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

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

D'où : $U_c = -10 \text{ kV}$

b) Intervalle d'étude de la vitesse de l'air:

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

$$1.67(\text{m/s}) \leq v \leq 2,33(\text{m/s}) \quad \text{(III.5)}$$

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

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

D'où : $v_c = 2\text{m/s}$

c)- Intervalle d'étude de la distance :

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

$$4(\text{cm}) \leq d \leq 12(\text{cm}) \quad \text{(III.7)}$$

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

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

D'où : $d_c = 8\text{cm}$

Tableau(III.1) : Intervalles d'étude choisis à partir des expériences préliminaires

	Tension [kV]	Vitesse [m/s]	Distance [cm]
Niveau -1	8	1.66	4
Niveau 0	10.5	2	8
Niveau 1	13	2.33	12

III.3.2. Plan d'expériences composite et modèle de deuxième degré :

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences qui correspondent aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble des expériences [46-49]. Dans ce plan, on doit faire 17 expériences composites données sur la figure(III.12).

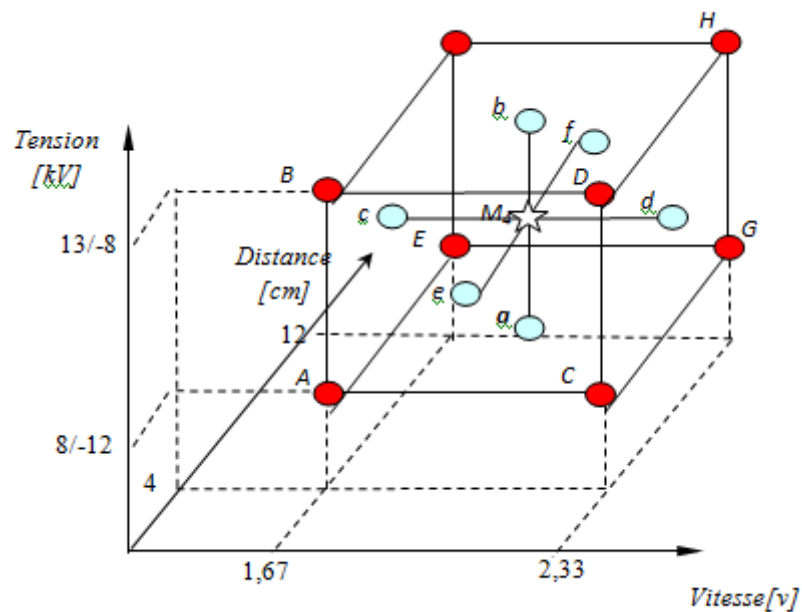


Figure (III .7): Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite.

III.3.3. Résultats des expérimentations :

III.3.3.1 : Polarité positive

On a utilisé trois types de produits de différents diamètres de particules suivants :

Tableau (III.2) : Diamètres de trois types de matière

	Type de matière	Diamètre [μm]
a	Bois	0,315-0,5
b	Bois	0,2-0,315
c	PVC	0,2-0,315

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportés au tableau (III.3) pour la polarité positive.

Trois réponses sont considérés correspondant aux trois tailles, comme suit :

- Rendement η_1 : taille 1 (0.315 - 0.5)
- Rendement η_2 : taille 2 (0.2 - 0.315)
- Rendement η_3 : taille 3 (0.2 - 0.315)

Tableau(III.3): Matrice d'expériences et les résultats expérimentaux du plan composite centré

N° Essais		Tension [kV]	Vitesse [V]	Distance [cm]	Taille 1		Taille 2		Taille 3	
					Courant [mA]	Rendement η_2 [%]	Courant [mA]	Rendement η_2 [%]	Courant [mA]	Rendement η_3 [%]
Plan factoriel « 2 ³ »	1	-1	-1	-1	0,248	83	0,253	87	0,265	88
	2	1	-1	-1	2,038	95	2,062	97	2,181	96
	3	-1	1	-1	0,268	68	0,024	54	0,263	72
	4	1	1	-1	2,339	77	2,463	81	2,481	83
	5	-1	-1	1	0,016	88	0,011	89	0,021	92
	6	1	-1	1	0,082	89	0,014	91	0,096	95
	7	-1	1	1	0,014	59	0,011	53	0,02	73
	8	1	1	1	0,085	59	0,072	68	0,097	80
Points en étoiles « 2×3 »	9	-1	0	0	0,029	53	0,023	65	0,031	72
	10	1	0	0	0,234	65	0,238	75	0,255	79
	11	0	-1	0	0,106	83	0,09	94	0,112	88
	12	0	1	0	0,101	56	0,093	62	0,114	71
	13	0	0	-1	0,855	79	1,016	86	0,934	79
	14	0	0	1	0,04	73	0,032	78	0,048	81
Points au Centre	15	0	0	0	0,108	60	0,089	79	0,11	76
	16	0	0	0	0,108	67	0,089	80	0,109	74
	17	0	0	0	0,107	61	0,92	75	0,11	75

A- Modèles mathématiques obtenus:

Le programme calcul deux critères statistique significatifs qui rendent possible de valider ou non le modèle mathématique symbolisé par R^2 et Q^2 . On obtient les modèles mathématiques suivants :

$$\eta_a = 63,09 + 3,4*U - 11,9*v - 3,4*d - 4,42*ten^2 + 6,07*v^2 + 12,57*d^2 - 2,5*U*d - 3,25*v*d \quad (\text{III.9})$$

Avec $Q^2=0,90$ $R^2=0,98$

$$\eta_b = 77,21 + 6,39*U - 14*v - 2,6*6,61*t^2 + 5,38*d^2 + 3,75*U*v - 2,5*U*d \quad (\text{III.10})$$

Avec $Q^2=0,91$ $R^2=0,98$

$$\eta_c = 75,02 + 3,59*U - 8*v + 4,45*v^2 + 4,95*d^2 + 0,87*U*v - 1,12*U*d \quad (\text{III.11})$$

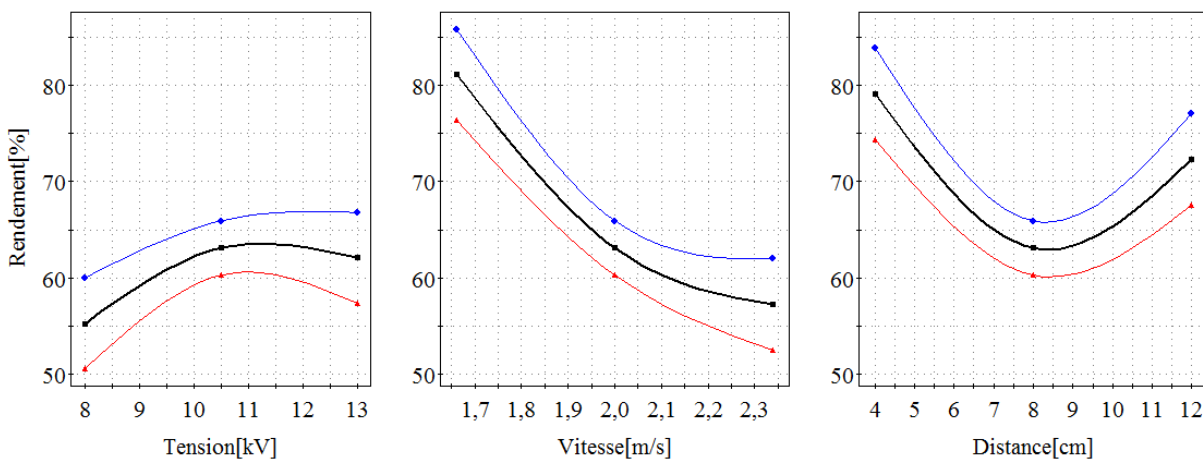
Avec $Q^2=0,98$ $R^2=0,99$

A- Influence des facteurs choisis sur les réponses :

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

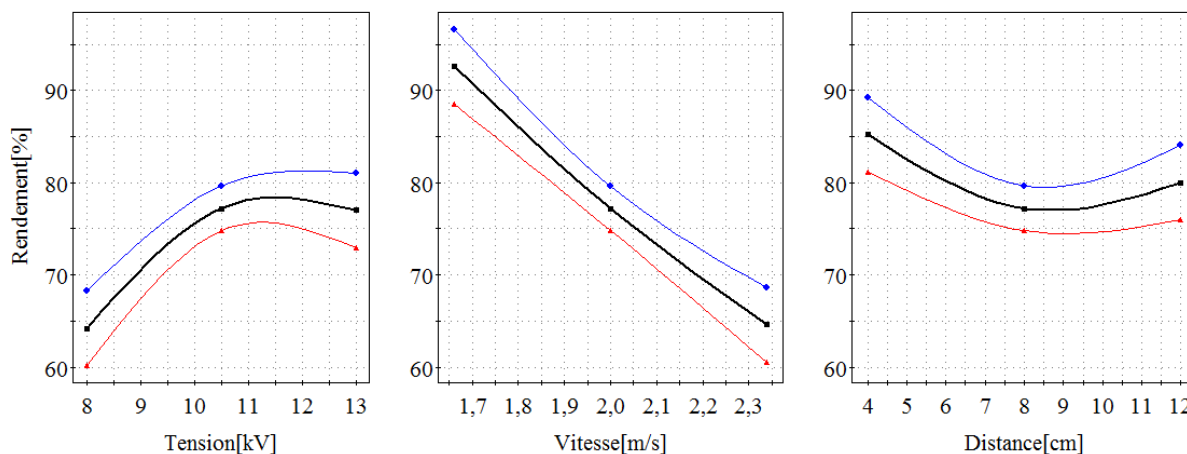
En procédant de la même manière, on peut démontrer le degré d'influence des facteurs sur le rendement (la tension, le débit de l'air et la distance entre les plaques de collection) qui sont présentés dans les figures suivantes.(Figure III.8-III.10).

a-



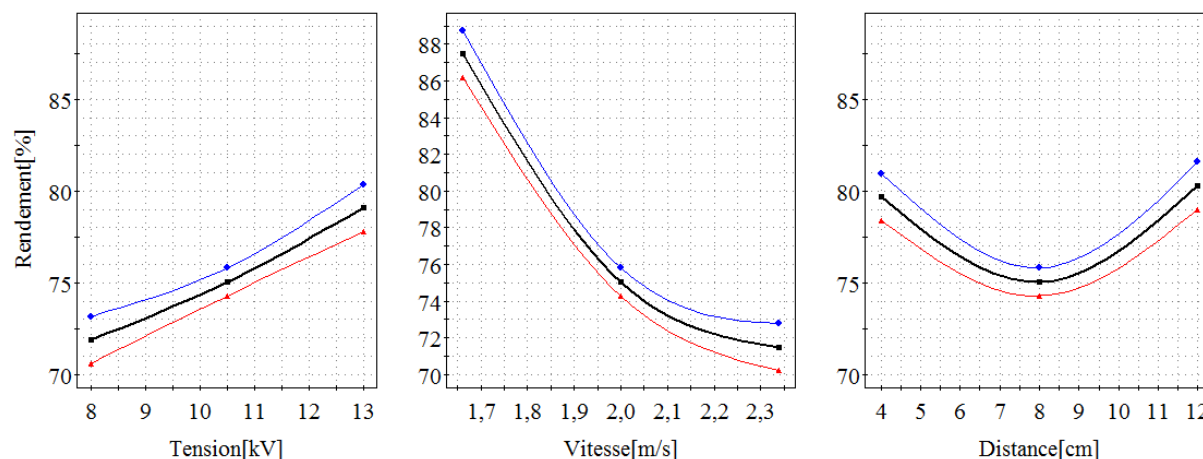
Figure(III.8): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière(a).

b-



Figure(III.9): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière(b).

c-



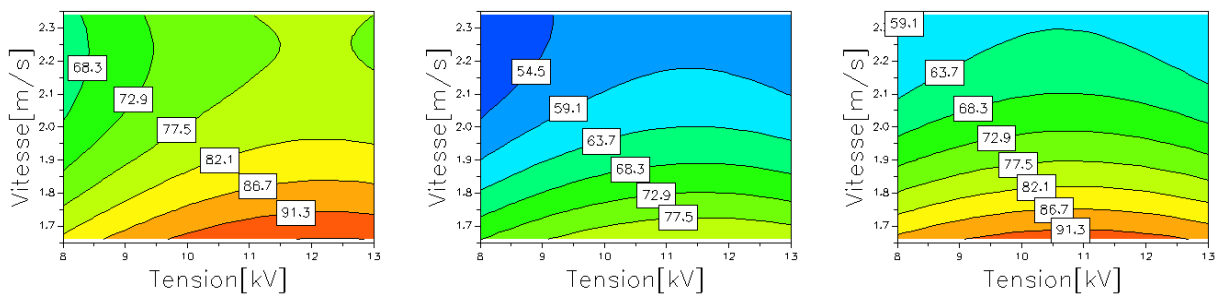
Figure(III.10): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière(c).

Selon les figures III.8 et III.9 et III.10, avec la tension le rendement augmente considérablement jusqu'à 10,5kV puis devient constant. Tandis qu'il décroît considérablement avec l'augmentation de la vitesse de l'air. Mais avec la distance il y a une diminution jusqu'à une certaine distance puis elle augmente. D'un autre côté, le rendement est proportionnel avec la tension, mais il décroît considérablement avec l'augmentation de la vitesse de l'air. Tandis il y a une diminution jusqu'à une valeur de distance de 8cm puis elle augmente.

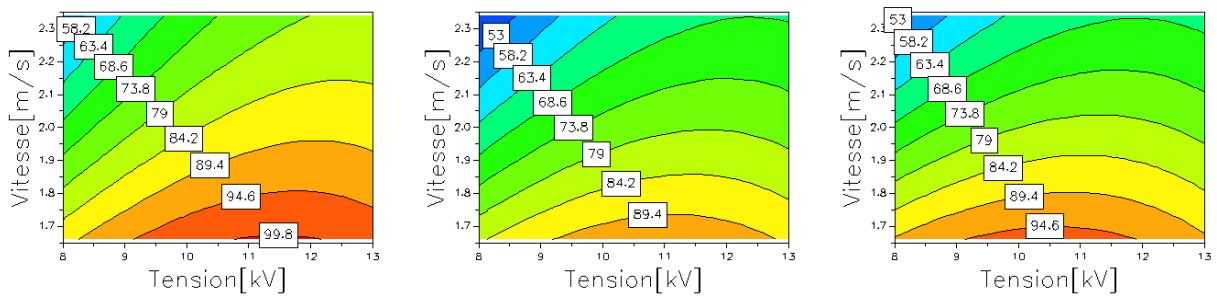
B- Détermination du point de fonctionnement optimal

Nous avons utilisé le logiciel MODDE 5.0 (MODELing and DESIGN) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par Umetrics AB, Umea, Suède) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences. Il donne les réponses prédites en fonction des paramètres : la tension, le vitesse de l'air et la distance entre les deux plaques de collection. Ce programme délivre les courbes iso-réponses, montrées ci-dessous figure(III.11).

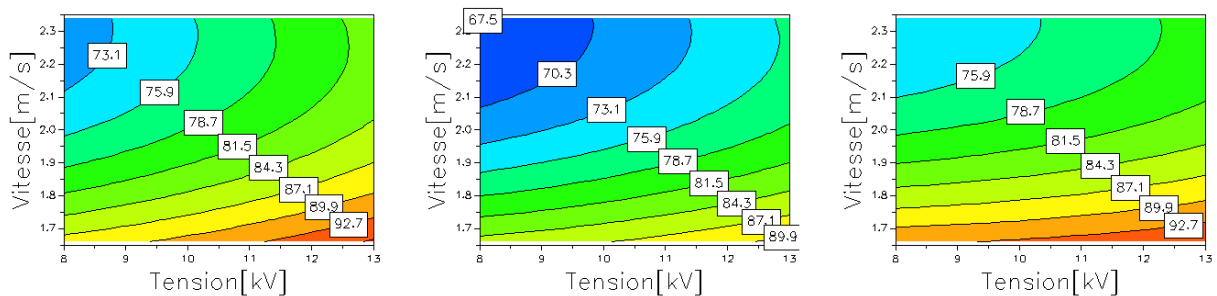
a-



b-



c-



Distance=4cm

Distance=8cm

Distance=12cm

Figure(III.11): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, en fonction des Trois facteurs U, v, d pour différentes distances.

En analysant les courbes iso- réponses de la figure (III.11), on remarque qu'elles confirment les conclusions déduites par celles des courbes prédites. Ainsi, on peut remarquer que l'effet du facteur distance d est non significatif devant les autres facteurs.

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur rendement correspond aux valeurs optimales suivantes : une tension de 13kV, une vitesse de l'air de 1.66 m/s et distance de 4cm comme le montre la figure (III.12) du logiciel MODDE 5.

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max	
1	tension	Free		8	13	1	Rendement (a)	Maximize	1	93,7558	97,8062
2	vitesse	Free		1,66	2,34	2	Rendement (b)	Maximize	1	95,5521	100,152
3	distance	Free		4	12	3	Rendement (c)	Maximize	1	94,589	97,0216

	1	2	3	4	5	6	7	8
	tension	vitesse	distance	Rendement (a)	Rendement (b)	Rendement (c)	iter	log(D)
1	13	1,66	4	95,781	97,8521	95,8053	246	-0,6021
2	9	1,66	12	91,0714	94,1487	92,5569	5000	0,417
3	12,9823	1,6604	4,0255	95,5962	97,8021	95,6895	517	-0,5433
4	11,3898	1,66	12	93,4416	95,8366	93,9812	1256	0,0796
5	11	1,66	11,9999	93,606	96,3868	93,6924	1275	0,0814
6	13	1,66	4	95,781	97,8521	95,8053	246	-0,6021
7	9	1,66	12	91,0714	94,1487	92,5569	5000	0,417
8	12	1,66	12	92,7515	94,3288	94,4769	5001	0,1517

Figure(III.12): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

III.3.3.2 : Polarité négative

Les expériences ont été faites sur les mêmes produits de même diamètre comme pour la polarité positive.

Les intervalles d'étude choisis à partir des expériences préliminaires précédentes sont reportées au tableau suivant.

Tableau (III. 3) : Intervalles d'étude choisis à partir des expériences préliminaires

	Tension [kV]	Vitesse [m/s]	Distance [cm]
Niveau -1	-12	1.66	4
Niveau 0	-10	2	8
Niveau 1	-8	2.33	12

Les résultats des 17 expériences effectués selon le plan d'expériences composite sont reportés au tableau N°(III.2) pour la polarité négative

Tableau(III.2): Matrice d'expériences et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré

N° Essais	Tension [kV]	Vitesse [m/s]	Distance [cm]	Taille 1		Taille 2		Taille 3		
				Courant [mA]	Rendement η_1 [%]	Courant [mA]	Rendement η_2 [%]	Courant [mA]	Rendement η_3 [%]	
Plan factoriel «2 ³ »	1	-1	-1	-1	1,642	96	2,001	94	2,143	95
	2	1	-1	-1	0,01	84	0,008	82	0,014	80
	3	-1	1	-1	1,475	72	2,234	78	1,523	75
	4	1	1	-1	0,009	53	0,008	71	0,025	62
	5	-1	-1	1	0,024	97	0,024	92	0,046	96
	6	1	-1	1	0,006	93	0,006	89	0,012	91
	7	-1	1	1	0,025	64	0,023	70	0,042	69
	8	1	1	1	0,06	59	0,05	66	0,009	65
Points en étoiles « 2×3 »	9	-1	0	0	0,054	75	0,041	73	0,105	75
	10	1	0	0	0,005	61	0,003	62	0,008	69
	11	0	-1	0	0,015	82	0,012	65	0,03	89
	12	0	1	0	0,014	45	0,014	50	0,026	63
	13	0	0	-1	0,079	78	0,084	80	0,305	82
	14	0	0	1	0,012	76	0,011	77	0,022	84
Points au Centre	15	0	0	0	0,013	68	0,012	65	0,028	74
	16	0	0	0	0,014	66	0,012	60	0,027	77
	17	0	0	0	0,013	67	0,013	62	0,027	78

A- Modèles mathématiques obtenus:

$$\eta_a = 66,38 - 5,4*U - 15,9*v + 11,08*d^2 + 2,75*U*d \quad (\text{III.12})$$

Avec $Q^2=0,89$ et $R^2=0,98$

$$\eta_b = 62,01 - 3,7*U - 8,70*v + 5,72*U^2 - 4,27*v^2 + 16,72*d^2 - 2,25*v*d \quad (\text{III.13})$$

Avec $Q^2=0,90$ et $R^2=0,98$

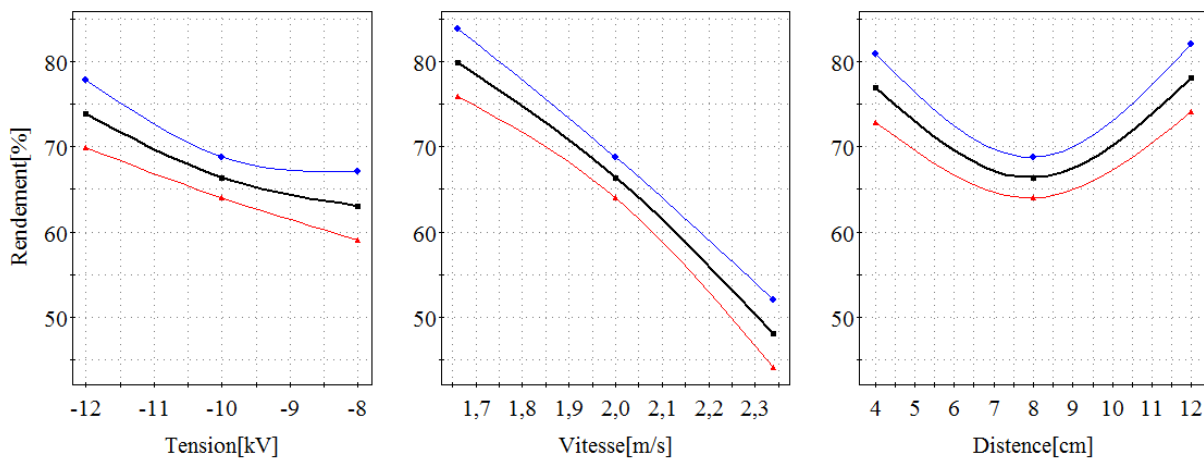
$$\eta_c = 76,15 - 4,3*U - 11,7*v - 4,02*U^2 + 6,97*d^2 + 2,37*U*d - 1,87*v*d \quad (\text{III.14})$$

Avec $Q^2=0,9$ et $R^2=0,99$

B- Influence des facteurs choisis sur les réponses :

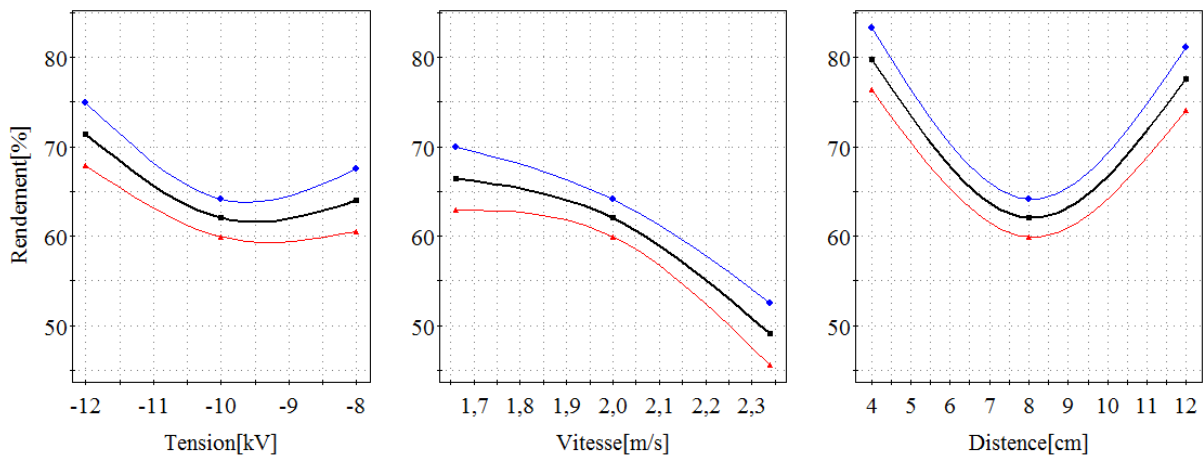
En procédant de la même manière, on peut démontrer facilement que les facteurs les plus influents sur le rendement sont respectivement (la tension, le débit de l'air et la distance). (Figure III.13-III.15)

a-



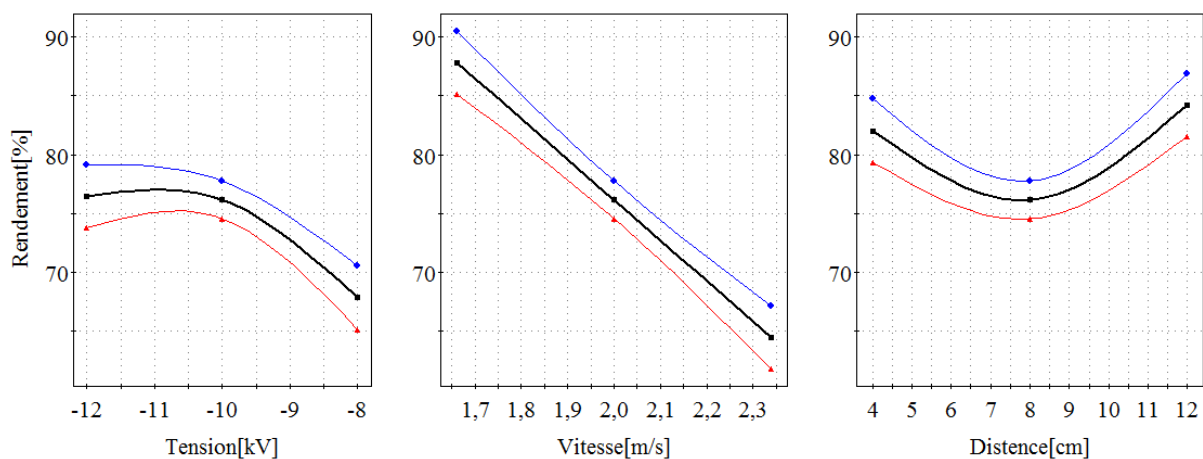
Figure(III.13): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière(a).

b-



Figure(III.14): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière(b).

c-



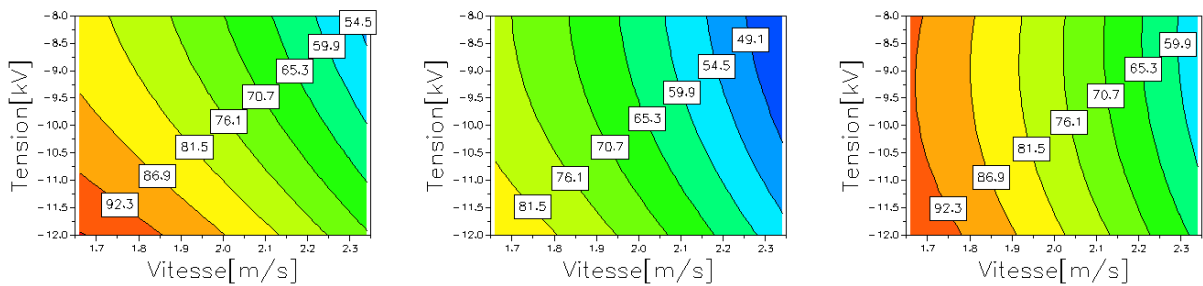
Figure(III.15): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière(c).

Nous remarquons le même comportement que la polarité positive. Le rendement diminue avec l'augmentation de la tension, mais il décroît considérablement avec l'augmentation de la vitesse de l'air. Par ailleurs, l'augmentation de la vitesse de l'air fait décroître considérablement le rendement jusqu'à une certaine valeur de distance puis il augmente.

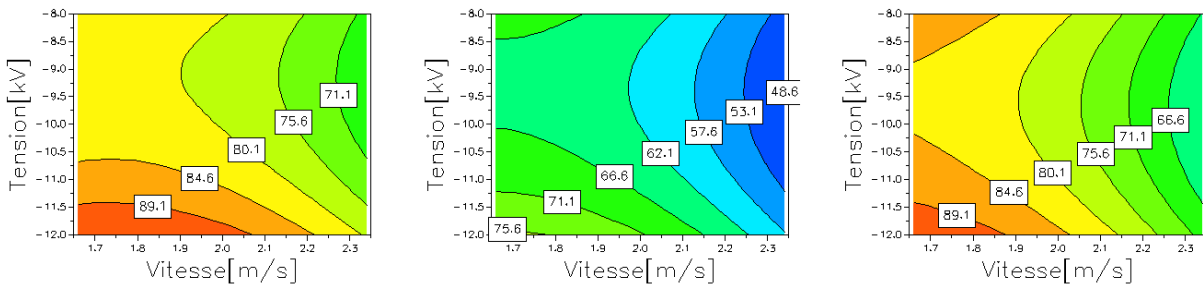
C- Détermination du point de fonctionnement optimal :

En utilisant la fonction de réponse, le logiciel MODDE 5.0 (**MODELing and Design**) qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par Umetrics AB, Umea, Suède) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences. Il donne les réponses prédites en fonction des paramètres : la tension, le débit de l'air et la distance entre les deux plaques de collection. Les courbes iso-réponses obtenues avec ce logiciel sont tracées à la figure (III.16).

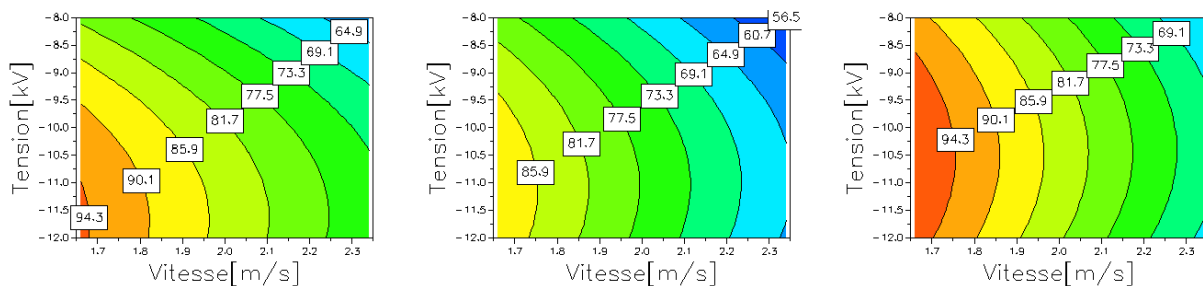
a-



b-



c-



Distance=4cm

Distance=8cm

Distance=12cm

Figure(III.16): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, en fonction des paramètres de tension et débit de l'air pour différentes distances.

De la même manière, si on analyse les courbes iso- réponses de la figure (III.16), on remarque qu'elles confirment les conclusions déduites pour la polarité positive. Ainsi, on peut remarquer que le facteur distance est non significatif devant les autres facteurs.

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur rendement correspond aux valeurs optimales suivantes : une tension de -11,98kV, une vitesse du vent de 1.66m/s et distance de 4cm comme le montre la figure (III.17) du logiciel MODDE

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1	tension	Free	-12	-8
2	vitesse	Free	1,66	2,34
3	distance	Free	4	12

Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1	Rendement(a)	Maximize	1	95,5829	100,585
2	Rendement(b)	Maximize	1	91,2201	95,6602
3	Rendement(c)	Maximize	1	94,3565	97,7765

Iteration: 2329 Iteration slider: _____

	1	2	3	4	5	6	7	8
	tension	vitesse	distance	Rendement(a)	Rendement(b)	Rendement(c)	iter	log(D)
1	-11,9895	1,66	4	98,0242	93,3503	94,8714	2024	-0,3787
2	-11,9023	1,66	4,0159	97,4461	92,4829	94,8528	1651	-0,2632
3	-12	1,66	12	96,7838	92,7402	96,0665	1171	-0,3768
4	-11,9998	1,66	11,9991	96,7772	92,7309	96,0624	1639	-0,3747
5	-9,6	1,66	12	92,8027	84,0039	97,1669	1623	0,4934
6	-11,9237	1,66	4	97,655	92,7944	94,8983	1430	-0,3104
7	-12	1,66	12	96,7838	92,7402	96,0665	1171	-0,3768
8	-8,0198	1,66	12	93,4592	87,2542	91,5685	2329	0,4727

Figure(III.17): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

III.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons effectué une analyse expérimentale du filtre à un étage, nous nous sommes basés sur les trois paramètres essentiels qui sont : la tension, la vitesse de l'air et la distance entre les plaques. Nous avons délimité les valeurs de ces paramètres, en prenant les valeurs maximales et minimales.

L'étude expérimentale avec la méthode des plans d'expérience, permet de délimiter les intervalles de variation des facteurs variables et ensuite de modéliser le rendement du dispositif en proposant un model mathématique qui est validé on vérifiant des critères bien définis. Les modèles obtenus ont été ensuite utilisés pour déterminer les valeurs optimales des différents facteurs et pour prédire le rendement du dispositif qui serait obtenu pour n'importe quelles valeurs des facteurs.

IV.1. Introduction

La précipitation électrostatique est un moyen efficace pour éliminer les polluants particuliers solides (comme la poussière et la fumée) ou liquide (brouillard, de l'huile, buée) contenu dans le gaz injecté dans l'environnement [50-53] .

En dépit de plusieurs études publiées sur ces questions au cours des dernières années [54-58], aucune procédure n'est disponible pour guider la recherche du point de consigne et pour identifier les facteurs qui devraient être mieux contrôlés pour que le processus soit robuste.

La difficulté du problème réside dans le fait que la précipitation électrostatique est un processus multifactoriel. Dans un ESP« plan-fil " qui comprend deux étages (ionisation et collection), par exemple, la liste des facteurs qui influent sur l'efficacité (le rendement) du procédé comprend le niveau de la tension des deux étages, le taux de pollution, la taille des granulés, la configuration d'électrode, la vitesse de l'air.

L'objectif de la présente étude est l'identification du point de consigne de processus en utilisant une procédure expérimentale sur la base de la modélisation de la surface de réponse, qui est utilisé dans d'autres études, le cas des séparateurs de particules électrostatiques [59-62].

Le travail a été réalisé pour le choix du niveau de la haute tension des deux étages d'ionisation et de collection, et la vitesse de l'air. Trois plans d'expériences de type « un-facteur-à-la-fois » ont été réalisés, correspondant à chaque facteur, suivis par un plan factoriel composite, sur la base des deux étapes stratégiques suivantes :

- 1) identifier le domaine de variation des variables;
- 2) l'identification du point optimal de fonctionnement et l'optimisation du processus.

IV.2. Méthodologie des plans d'expériences

Avant de commencer les expériences, il est nécessaire de définir le grand plan approprié et qui peut modéliser le processus avec la précision la plus possible [63-65]. le plan composite à faces centrées (CCF), qui donne des modèles quadratiques, a été adopté. C'est possible de déterminer une dépendance quadratique entre la fonction de sortie à optimiser (réponse) et les variables d'entrée u_i ($i = 1, \dots, k$) (facteurs):

$$y = f(u_i) = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ii} u_i^2 \quad (\text{IV. 1})$$

Sachant que Δu et u_0 sont respectivement l'étape de variation et la valeur centrale de facteur i , les valeurs centrées réduites de facteurs d'entrée peuvent être définies par la relation suivante

$$x_i = \frac{(u_i - u_{i0})}{\Delta u_i} \quad (\text{IV.2})$$

Avec ces nouvelles variables, la fonction de sortie devient :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (\text{IV. 3})$$

Ou

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

Les coefficients peuvent être calculées ou estimées par un programme de traitement de données, un moyen d'avoir un écart minimum entre le modèle mathématique de prédiction et les résultats expérimentaux.

Le logiciel MODDE 5.0 (Umetrics AB , Umea , Sweden) qui a été utilisé, est un programme windows pour la création et l'évaluation des modèles expérimentaux [66] . Le programme aide l'utilisateur pour l'interprétation des résultats et la prédiction des réponses. Il calcule les coefficients du modèle mathématique et identifie les meilleurs ajustements des facteurs pour optimiser le processus. En outre, le programme calcule deux critères statistiques significatifs qui rendent possible de valider ou non le modèle mathématique, symbolisés par R^2 et Q^2 .

La modélisation d'un processus à deux étages et à l'aide du facteur R^2 , appelé la qualité de l'ajustement, est une mesure de la façon dont le modèle peut être adapté à des données brutes. Il varie entre 0 et 1 , où 1 indique un modèle parfait et 0 aucun modèle. Q^2 est appelé la qualité de prédiction, et estime la puissance prédictive du modèle. Comme R^2 , Q^2 a une limite supérieure 1 , mais sa limite inférieure est moins l'infini ($-\infty$). Pour qu'un modèle puisse passer le test de diagnostic, les deux paramètres doivent être élevés, et de préférence non séparés par plus de 0.2 à 0.3 .

IV.3. Procédure expérimentale

Les tests ont été effectués sur un précipitateur électrostatique de laboratoire [67], décrit au chapitre 2 (figure II.8). Le banc expérimental est composé de deux étages (Figure IV.1).: D'abord les particules polluantes passent à travers l'étage d'ionisation où ils sont chargés électriquement par une décharge couronne et ensuite sont collectés dans l'étage de la collection par un champ électrostatique intense généré entre les électrodes à plaques (en aluminium, 300×200 mm). L'étage d'ionisation comprend 4 unités, dont chacune comprend trois fils verticaux (tungstène, diamètre $0,1$ mm), alimenté à partir d'une haute tension d'alimentation négative (ISEG, 60 kV, 9 mA), et à égale à la distance des électrodes de plaque verticale (aluminium, 300×20 mm) reliée à la masse. L'espace inter-électrodes de l'étage d'ionisation est $d = 3$ cm et pour l'étage de la collecte $D = 2$ cm.

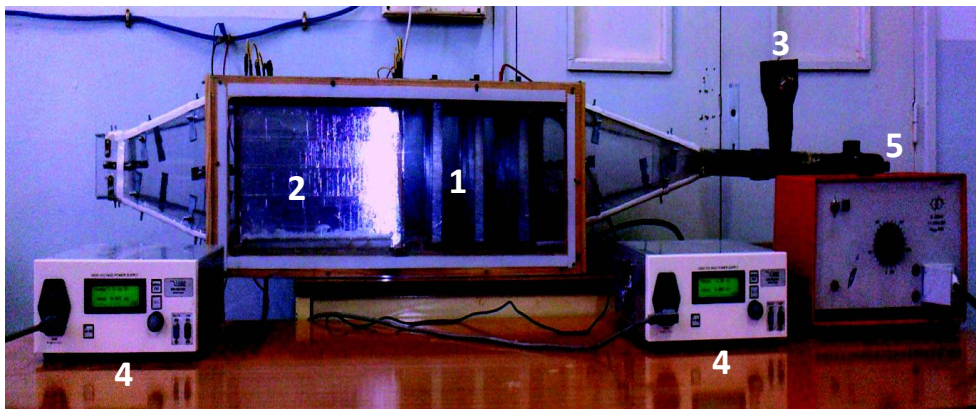


Figure IV.1. Dispositif expérimental: 1) Etage d'ionisation; 2) Etage de collection; 3) Entrée des particules de bois; 4) Générateurs de haute tension; 5) Alimentation variable de la soufflerie

Les particules de bois de granulométrie moyenne 10 μm ont été utilisées comme matériau polluant. La poussière a été préparée en utilisant des tamis vibrants et les particules d'un diamètre moyen de 10 μm étaient utilisées comme matière polluante. Par conséquent, le diamètre moyen global était uniforme, tandis que la densité étant égale à 1,4 g / dm^3 .

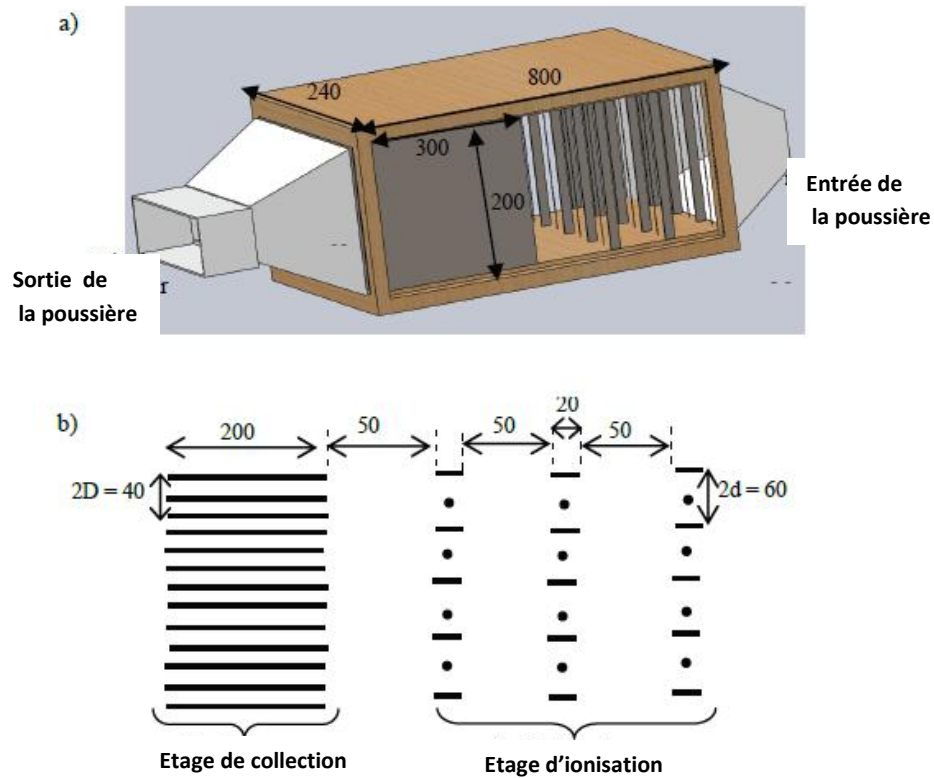
La circulation de l'air pollué est effectuée au moyen d'un souffleur d'air de 1,45 kW avec une vitesse de rotation maximale de 1280 tr/min, le débit étant ajusté à l'aide d'une source de tension variable.

Le rendement est calculé en utilisant la relation suivante.

$$\eta = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{IV.4})$$

Où: m_i – la masse totale de la poussière introduite dans le précipitateur.

m_s – masse de la poussière récupérée non filtrée à la sortie du gaz propre.



Figure(IV.2) Représentation descriptive des deux étages d'un ESP (vue d'ensemble en 3D),
b) Description schématique (toutes les dimensions sont en mm)

La masse a été mesurée en utilisant la balance numérique de résolution 0,1 g. Tous les essais ont été réalisés dans des conditions environnementales stables: 18-20 ° C de température, 40-50 d'humidité relative.

Trois facteurs ont été pris en compte dans la présente étude:

- ❖ la tension d'ionisation V_i [kV];
- ❖ la tension de collection V_c [kV];
- ❖ la vitesse de l'air v [m/s].

Pour mesurer la masse de poussière à la sortie de l'ESP, un filtre à air a été fixé à la sortie des particules afin de récupérer les particules non filtrées. Une procédure expérimentale de deux étapes a été adoptée:

Etape 1. Définir le domaine de la variation des facteurs ($V_{i\min}$ et $V_{i\max}$, $V_{c\min}$ et $V_{c\max}$, v_{\min} et v_{\max}) Avec trois expériences un seul facteur à la fois:

Expérience 1.1. Tension V_i variable (8 à 16) kV, avec des valeurs constantes de $V_c = -15$ kV et de la vitesse de l'air $v = 6$ m / s.

Expérience 1.2 : La tension de collection V_c variable (11 à 23) kV, avec une tension d'ionisation constante $V_i = 12$ kV et vitesse de l'air $v = 6$ m / s.

Expérience 1.3 : v : Vitesse de l'air variable (5 à 7)m / s, avec une tension d'ionisation constante $V_i = 12$ kV et tension de collection $V_c = -15$ kV.

Etape 2. Définir le point de fonctionnement optimal en effectuant un plan composite à faces centrées CCF .

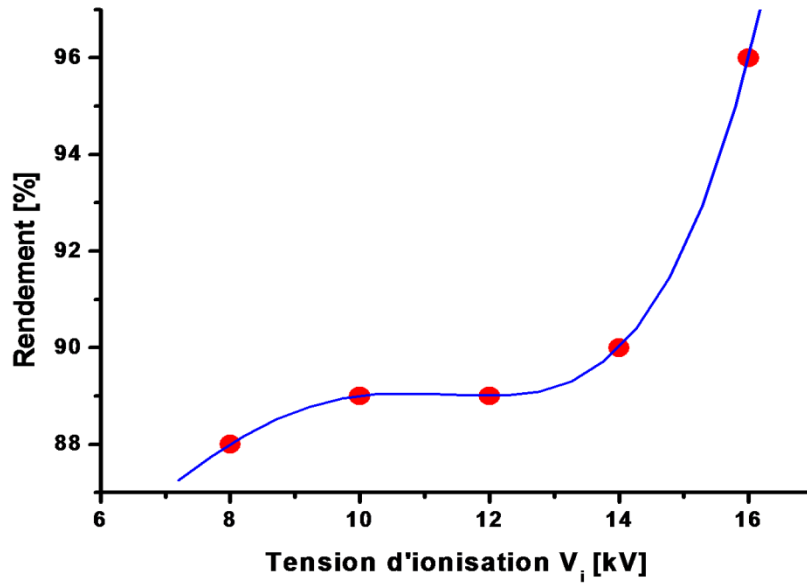
IV.4. Résultats et discussion

Etape 1. Variation du domaine des facteurs.

Pour plus de précision, toutes les expériences dans ce travail ont été effectuées deux fois et la valeur moyenne a été utilisée pour le traçage. Ces données ont été utilisées pour la définition du domaine de variation de V_i , V_c et v pour l'étape 2 de la procédure expérimentale.

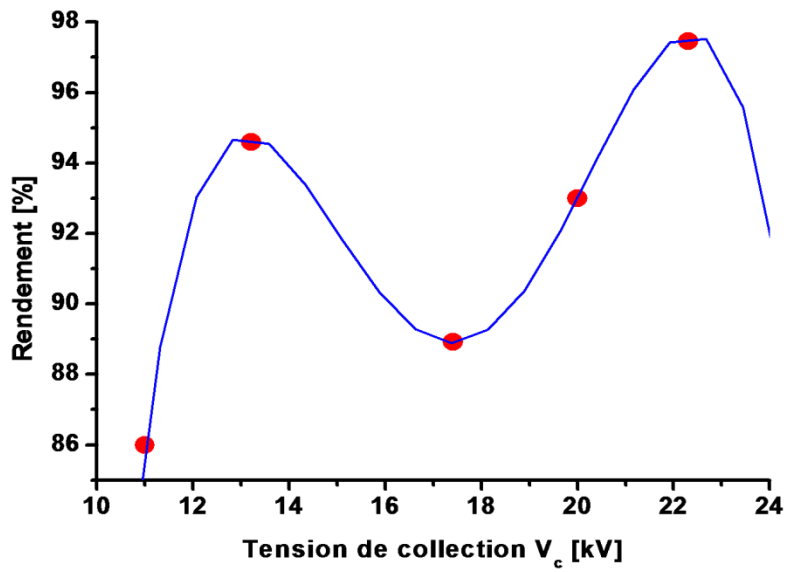
Les résultats des expériences sont illustrées sur la (Figure IV.3) .

Ainsi, le graphique de la figure IV.3 montre que, dans les conditions de l'expérience 1.1, décrivant la variation du rendement de la précipitation en fonction de la tension d'ionisation V_i , le rendement augmente avec la tension V_i jusqu'à 16 kV. Au-delà de cette valeur, la décharge couronne générée par les électrodes ionisantes arrête en raison du claquage de l'air se produisant lorsque V_i est supérieur 16kV. Ainsi, $V_{i\min}=13$ kV et $V_{i\max} = 16$ kV ont été choisis comme les valeurs limites de la variation du domaine pour V_i

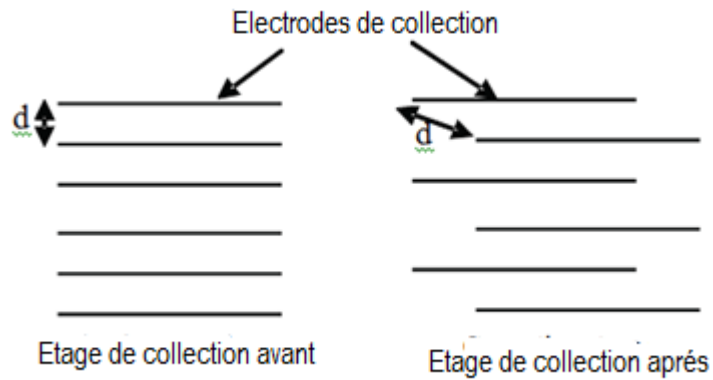


Figure(IV.3): Variation du rendement de la précipitation en fonction de la tension d'ionisation.

La variation du procédé du rendement en fonction de la tension de collection V_c représentée sur la figure 4 souligne que le rendement augmente jusqu'à (14 kV) et puis décroît jusqu'à (7 kV) et enfin augmente jusqu'à (24 kV). La diminution a été causée par une seconde décharge couronne " indésirable " survenant sur les bords des électrodes collectrices. Pour éviter ce problème, les électrodes ont été réarrangées d'une manière telle que on a augmenté la distance d'intervalle entre les électrodes adjacentes (Figure IV.5). Une deuxième courbe de variation a été obtenue avec la nouvelle configuration des électrodes (Figure IV.6). D'où les valeurs minimales et maximales de V_c ont été déterminées comme suit $V_{cmin}=13$ kV et $V_{cmax}= 16$ kV.



Figure(IV.4):Variation de l'efficacité de précipitation en fonction de la tension de collection V_c



Figure(IV.5).Position des électrodes de collection pour éviter la décharge couronne " indésirable "

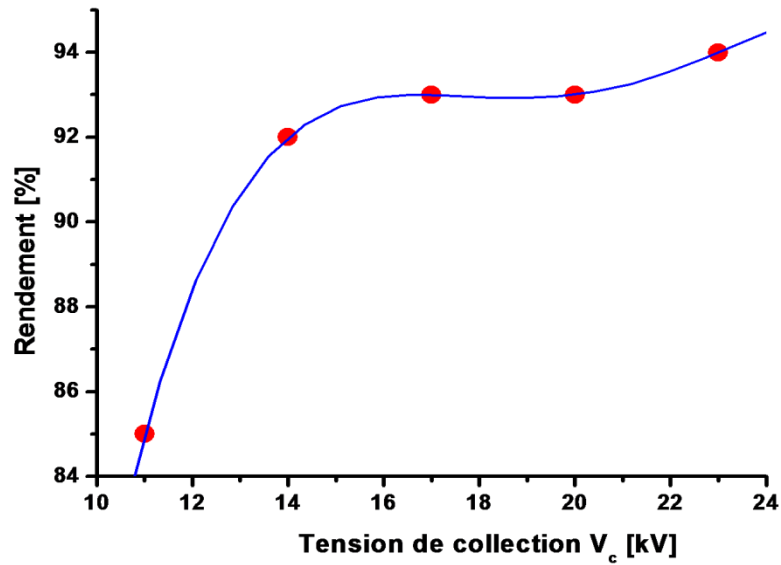
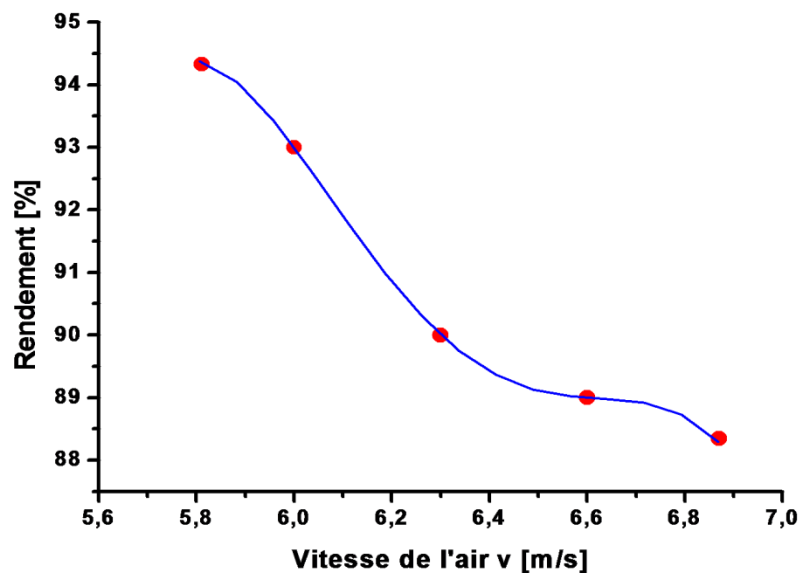


Figure.(IV.6) : Variation du rendement de la précipitation en fonction de la tension de collection (pour la nouvelle configuration des électrodes collectrices)

Les résultats obtenus dans la figure IV.7 montrent que le rendement de la précipitation du processus diminue avec la vitesse en raison de l'augmentation de la force aérodynamique F_a d'air qui agit presque perpendiculaire à la force électrique F_e . Ainsi, le domaine de variation de vitesse de l'air v est délimité par $v_{\min}=5.6\text{m/s}$ et $v_{\max}=6.4\text{m/s}$.



Figure(IV.7): Variation du rendement de précipitation en fonction de la vitesse de l'air

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

IV.5.1 Choix des intervalles d'étude

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

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

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

$$5.67 \text{ (m/s)} \leq v \leq 6.33 \text{ (m/s)} \quad (\text{IV.5})$$

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

$$v_c = (v_{\text{ax}} + v_{\text{min}})/2 \quad (\text{IV.6})$$

D'où : $v_c = 6 \text{ m/s}$

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

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

$$13 \text{ (kV)} \leq U_i \leq 16 \text{ (kV)}$$

(IV.3)

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

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

D'où : $U_{ic} = 14.5 \text{ Kv}$

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

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

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

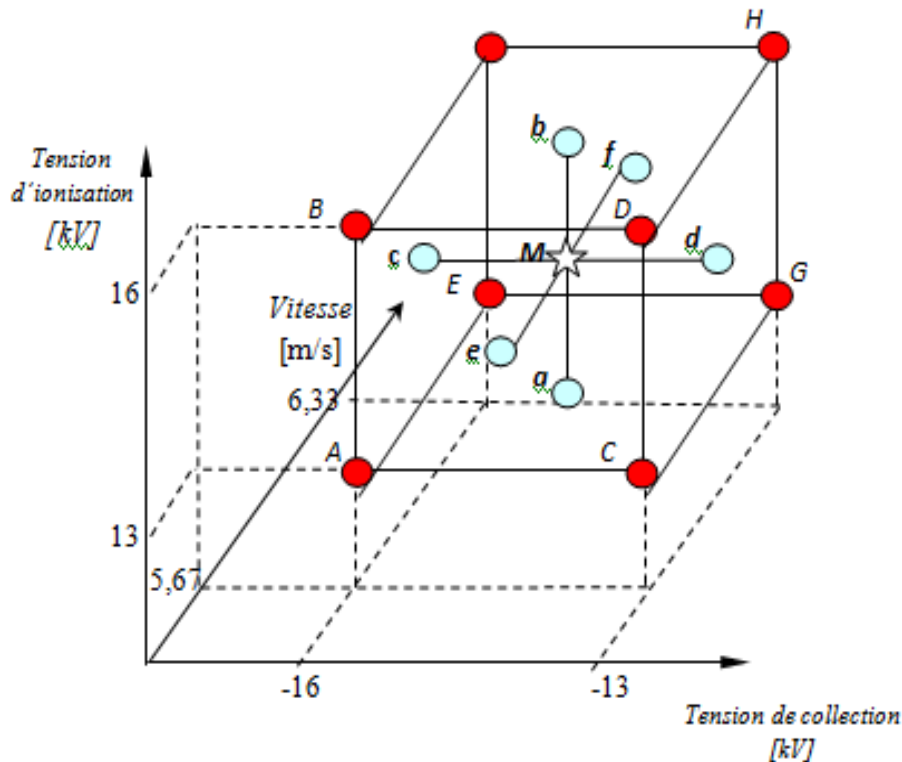
La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

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

D'où : $U_{cc} = 14.5 \text{ kV}$

IV.5.2. Plan d'expériences composite et modèle de deuxième degré :

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences qui correspondent aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble des expériences [46-49]. Dans ce plan on doit faire 17 expériences composites données sur la figure.(IV-8)



Figure(IV.8): Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite.

IV.6. Résultats des expérimentations :

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expériences composite sont reportés au tableau (IV.1).

Tableau(IV.1): Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré

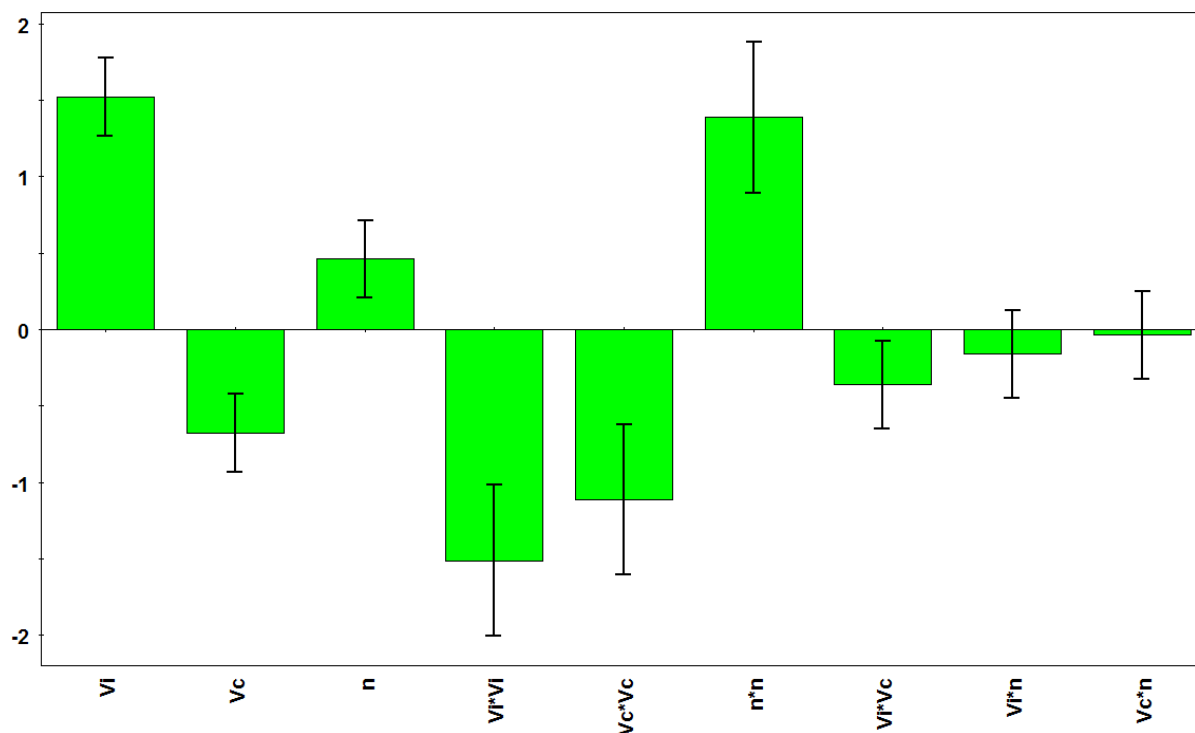
N ^o Essais	U _{ionisation} [kV]	U _{collection} [kV]	Vitesse [m/s]	I _{ionisation} [mA]	I _{collection} [mA]	Rendement η[%]	
Plan factoriel «2 ³ »	1	-1	-1	0,616	0,470	93	
	2	1	-1	1,341	0,791	97	
	3	-1	1	0,498	0,323	93	
	4	1	1	1,752	0,473	95	
	5	-1	-1	1	0,708	0,568	94
	6	1	-1	1	1,501	0,858	98
	7	-1	1	1	0,487	0,303	94
	8	1	1	1	1,341	0,527	96
Points en étoiles « 2×3 »	9	-1	0	0	0,582	0,417	93
	10	1	0	0	1,371	0,670	96
	11	0	-1	0	0,977	0,67	96
	12	0	1	0	0,765	0,877	95
	13	0	0	-1	0,809	0,510	97
	14	0	0	1	0,887	0,52	98
Points au Centre	15	0	0	0	0,792	0,440	96
	16	0	0	0	0,796	0,441	95
	17	0	0	0	0,863	0,440	96

Tableau(IV.2) : Intervalles d'étude choisis à partir des expériences préliminaires

	U _{ionisation} [kV]	U _{collection} [kV]	Vitesse [m/s]
Niveau -1	13	-16	5.67
Niveau 0	14.5	-14.5	6
Niveau 1	16	-13	6.33

IV.6.1. Les modèles mathématiques :

Le diagramme de la figure IV.9 représente, les valeurs des coefficients du modèle obtenus avec « MODDE.05 »



Figure(IV.9). Valeurs des coefficients d'effets et des interactions des facteurs du modèle

La tension d'ionisation influe considérablement sur la collection, celle-ci est d'autant plus efficace la tension est faible. En effet, dans un filtre à deux étages on cherche à ce que la poussière soit piégée dans l'étage de collection, pour que d'une part l'acquisition de charge dans l'étage d'ionisation se produise en continu et qu'elle ne soit pas perturbée par l'accumulation de particules et que d'autre part le nettoyage du filtre ne concernera que l'étage de collection. Par contre, le rendement est plus grand lorsque la tension appliquée aux électrodes de collection est élevée et la distance inter-électrode faible, car le champ électrique devient plus intense.

Le modèle mathématique de la réponse considérée pour l'optimisation, qui est le rendement de la précipitation, a été obtenu avec MODDE 5.0 par le diagramme de la figure IV.9 et l'équation IV.8.

$$\eta = 96.49 + 1.52 * V_i - 0.68 * V_c + 0.46 * v - 1.51V_i^2 - 1.11V_c^2 + 1.39v^2 - 0.36V_i * V_c \quad \text{(IV.8)}$$

Avec une qualité représentée par la figure suivante figure(IV.10).

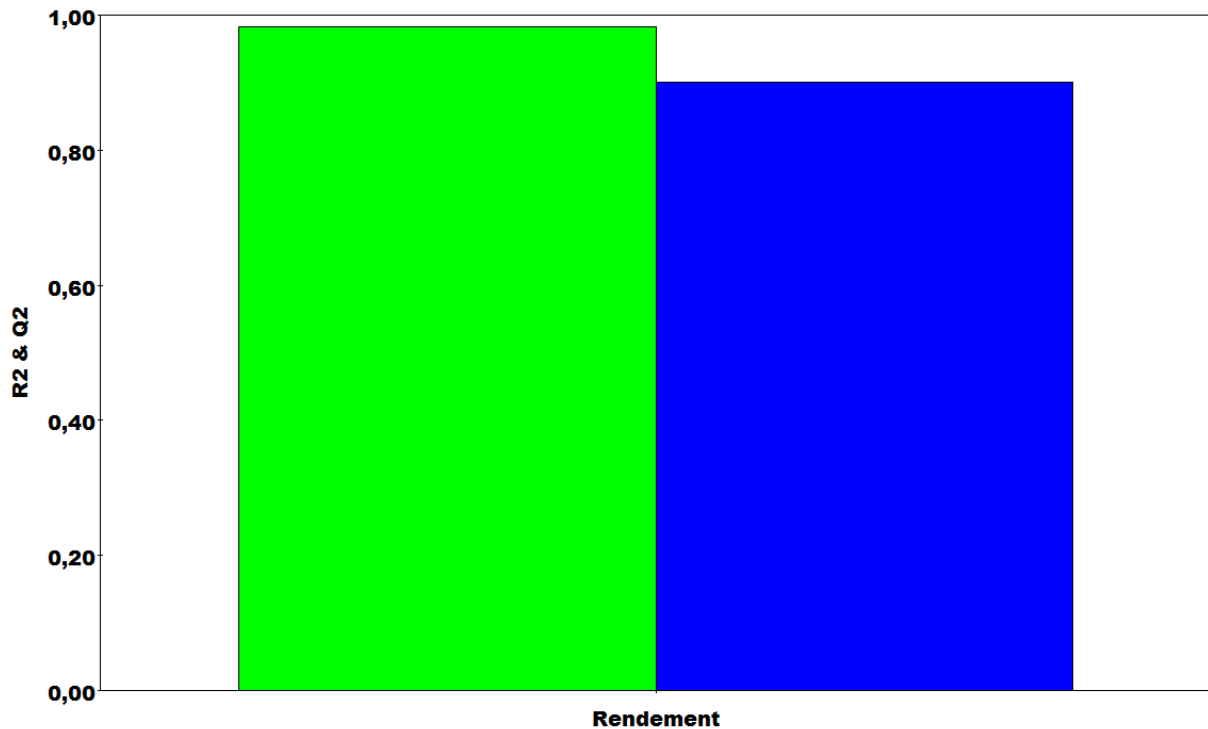


Figure (IV.10) : Qualités des réponses

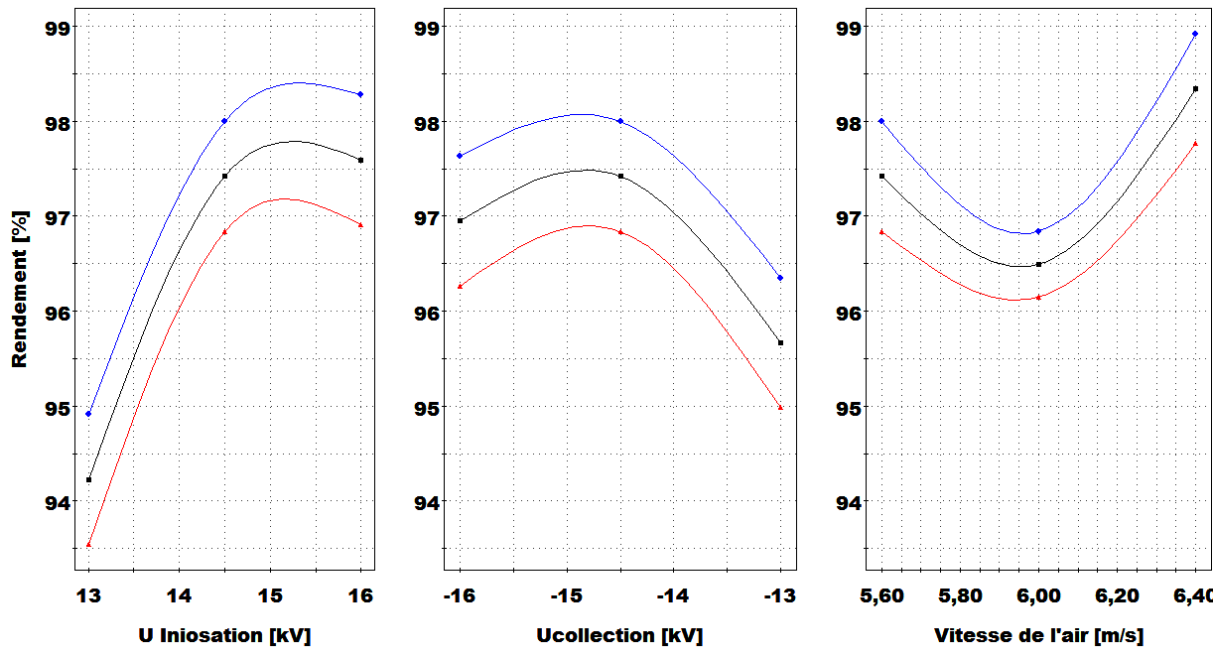
Les valeurs des critères $R^2 = 98.2\%$ et $Q^2 = 90.1\%$, montrent que le modèle mathématique est validé et peut être utilisé pour l'interprétation des résultats.

IV.6.2. Influence des facteurs choisis sur les réponses :

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

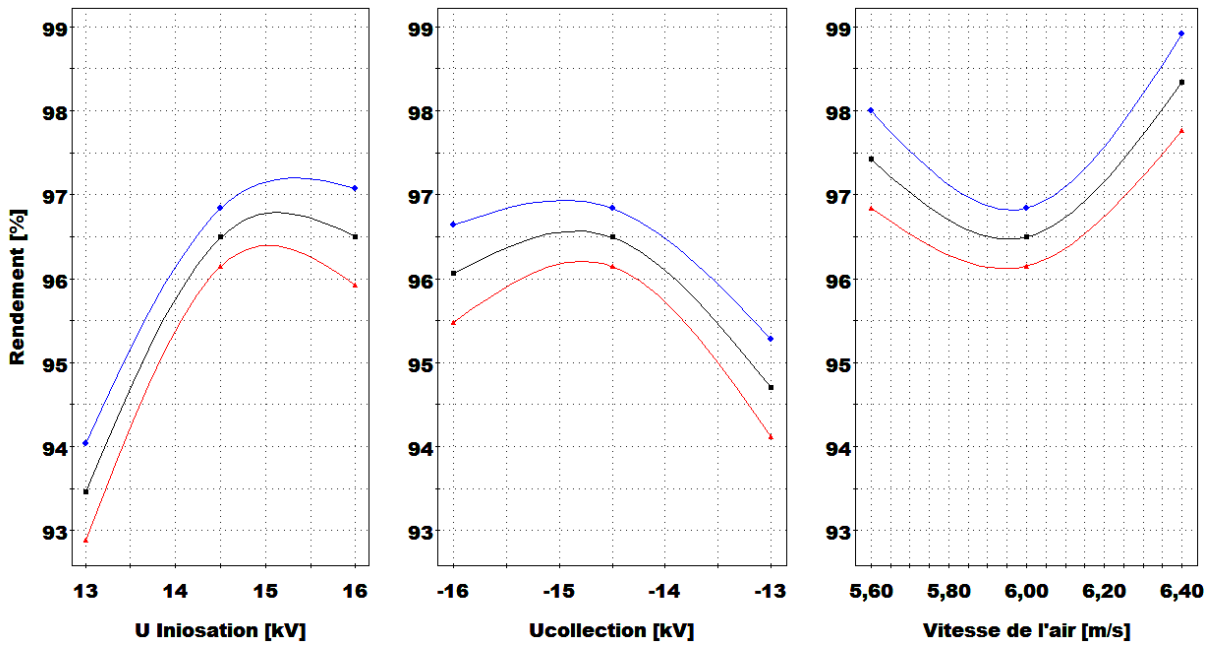
En procédant de la même manière, on peut facilement que les facteurs les plus influents sur le rendement sont respectivement la tension d'ionisation, la vitesse de l'air et la tension de collection. (Figure IV.14), (Figure IV.15).

a-



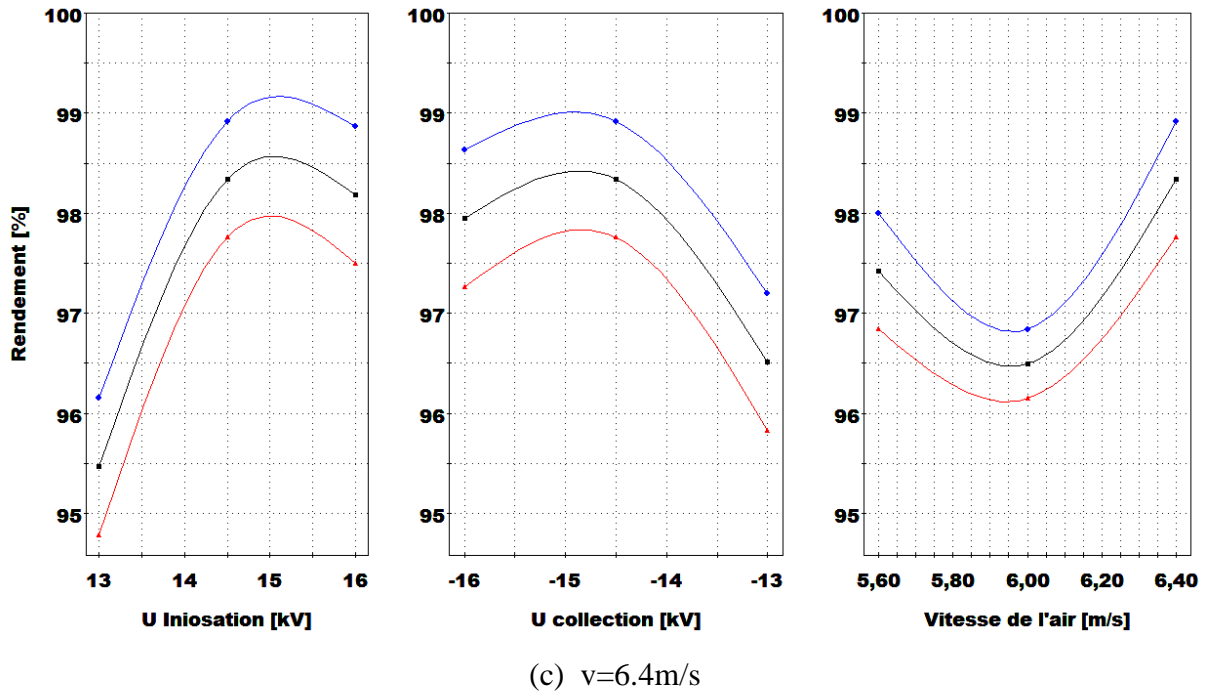
(a) $v = 5.6 \text{ m/s}$

Figure(IV.11): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière pour $v = 5.6 \text{ m/s}$



(b) $v = 6 \text{ m/s}$

Figure(IV.12): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière pour $v = 6 \text{ m/s}$



Figure(IV.13): Effets de chaque facteur sur la réponse pour la matière pour $v=6.4\text{m/s}$

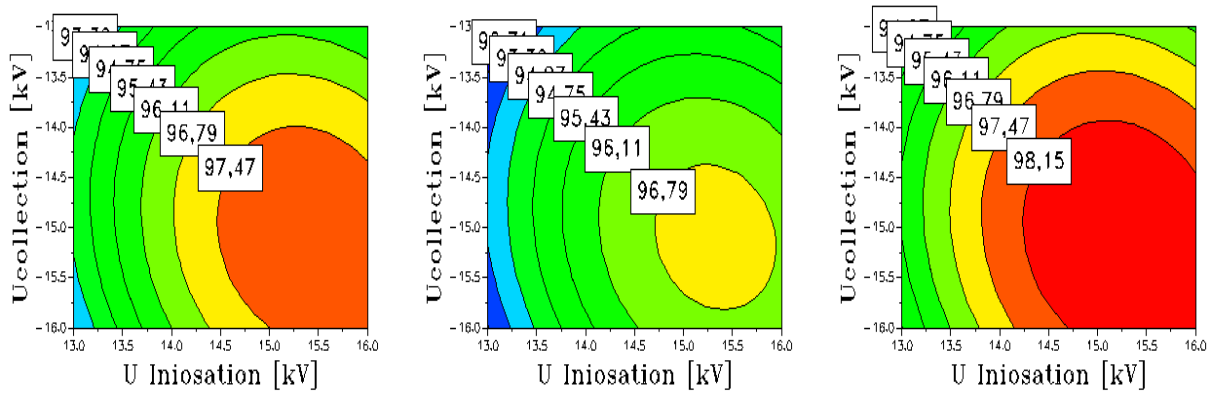
D'après ces courbes, on peut déduire que :

Augmentation du rendement avec l'augmentation de la tension d'ionisation jusqu'à 15kV puis on aura une diminution. Tandis que l'augmentation du rendement avec l'augmentation de la tension de collection jusqu'à une valeur de tension de -14,5kV puis elle diminue. Mais le rendement décroît considérablement avec l'augmentation de la vitesse de l'air jusqu'à une vitesse de 5.9m/s puis croit considérablement avec l'augmentation de la vitesse de l'air .

IV.6.3. Détermination du point de fonctionnement optimal :

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

La figure IV.14) représente les courbes iso-réponse de U_i et U_C pour les valeurs minimales, maximales et centrée de la vitesse v .



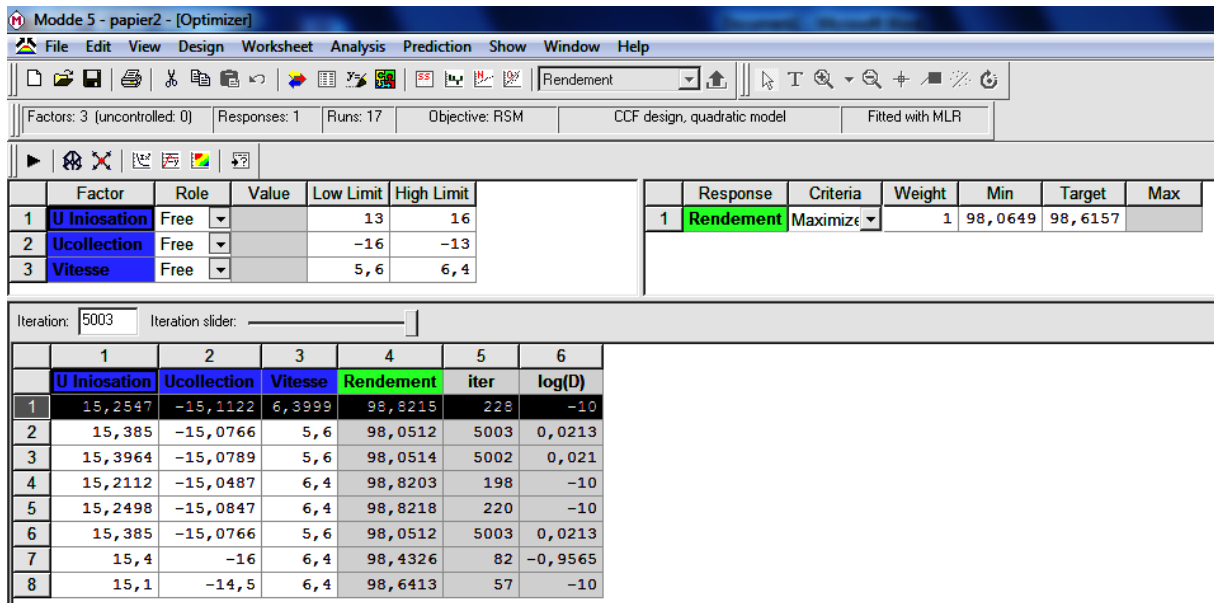
Vitesse $v=5.67$ [m/s]

$v= 6$ [m/s]

$v= 6.33$ [m/s]

Figure(IV.14): Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0, en fonction des paramètres de tension et débit de l’air pour différentes distances.

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur rendement correspond aux valeurs optimales suivantes : une tension d’ionisation de 15,25, une vitesse du l’air de 6,4m/s et une tension de collection de -15,11kV comme le montre la figure (IV.17) du logiciel MODDE 5.



Figure(IV.15): Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

IV.7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude expérimentale sur le filtre électrostatique à deux étages, commençant par voir la relation courant-tension pour les deux étages et aussi voir l'influence de quelques paramètres sur l'efficacité de notre dispositif.

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

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

CONCLUSION GENERALE

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

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

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

Dans la première partie de ce travail, nous avons situé les motivations et le contexte de notre étude. Aussi nous avons cité les problèmes et les pathologies liés à l'exposition aux poussières de bois lors des opérations de transformations. Nous avons aussi traité la précipitation électrostatique, les différents modèles de charge de particules et présenté les différentes études effectuées auparavant.

Après au deuxième chapitre, nous avons cité le matériel utilisé pour notre dispositif à un seul étage et à deux étages réalisés ainsi que les différentes composantes de nos deux filtres, et ensuite la méthode des plans d'expériences utilisée pour différentes cas possible.

Dans le troisième chapitre, nous sommes basés sur les trois paramètres essentiels qui sont la tension, la vitesse de l'air et la distance entre les plaques, après une étude expérimentale avec la méthode du plan d'expérience pour la modélisation et l'optimisation de l'efficacité de ce dispositif.

Pour le quatrième chapitre, une étude expérimentale avec la méthode des plans d'expérience en considérant les trois paramètres les plus influents que sont la tension appliquée dans la partie d'ionisation d'une polarité positive, la tension appliquée dans la partie de collection d'une polarité négative et la vitesse de l'air. Ensuite, nous avons effectué la modélisation et l'optimisation l'efficacité de ce dispositif.

Bibliographie

1. ARNE-RODERMAN H. – Effets sur la santé de l'exposition professionnelle aux poussières de bois et de liège : a propos d'un cas – thèse de médecine, Nancy, pp 169, 2004
2. KRIEF P. COUTROT, D. CONSO F. – Risque toxicologique professionnel lié à l'exposition aux poussières de bois MDF – Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, pp 1-12, 2008.
3. FOUSSERAU JP. – Guide de dermato-allergologie professionnelle. Masson, Paris, pp 464, 1991.
4. Monier, S. Hemery, M.-L. Demoly, P. Dhivert-Donnadieu H. – L'asthme professionnel aux poussières de bois – Revue Française d'Allergologie et d'Immunologie Clinique, Volume 48, Issue 1, , Pages 31-34, 2008.
5. FONTANA, L. LIETIN, B. CATILINA, P. DEVIF, C. FENEON, B. MARTIN, F. MOM, T. Gilain L. – Exposition professionnelle aux poussières de bois et cancers naso-sinusiens – Annales d'Otolaryngologie et de Chirurgie Cervico-Faciale, Volume 125, Issue 2 Pages 65 71, 2008.
6. LIETIN B., MOM T., AVAN P., LLOMPART X., KEMENY J.-L., J. CHAZAL (3), M. RUSSIER M., GILAIN L. – Adénocarcinomes de l'éthmoïde : analyse rétrospective des facteurs pronostics – Ann Otolaryngol. Chir. Cervicofac., 123, 5, pp. 211-220, 2006.
7. FERNANDEZ-RIVAS M, PEREZ-CARRAL C., SENENT CJ. – Occupational asthma and rhinitis caused by ash (*Fraxinus excelsior*) wood dust. – Allergy, 52 (2), pp. 196-199, 1997.
8. GUINCHARD R. – cancers de l'éthmoïde et catégories socio-professionnelles. A propos de 32 observations de tumeurs malignes de l'éthmoïde survenues chez les travailleurs du bois. These médecine. Lyon. Pp 109, 1972.
9. HINNEN U., WILLA-CRAPPS C., ELSNER P. – Allergic contact dermatitis from iroko and pine wood dust. Contact Dermatitis, 33 (6), pp. 428.
10. CHAN-YEUNG, M. et MALO, J.-L. – Tables of major inducers of occupational asthma. – Chap. 35. In : Bernstein, D. et al., Asthma in the workplace. 2nd ed. New York : Marcel Dekker, pp. 683-720. 1999.
11. ZHONGYI G., ROBERT A. & SCHILL J., Novel quasi-electrostatic air filter: a singleparticle study. Journal of Electrostatics Vol. 39,pages 203-230, 1997.
12. GOLDMAN M., GOLDMAN A. – Corona discharges – Gaseous electronic, Merles, Hirsh, N. & Oskam, H.J., Academic Press, chapter 4, 1978.
13. MEEK J.M., CRAGGS J.D. – Electrical breakdown of gases – A Wiley-Interscience Publication, John Wiley et sons, New-York, 1978.
14. FJELD, R.A. & MCFARLAND, A.R. – Evaluation of select approximations for

- calculating particle charging rates in the continuum regime. *Aerosol Science and technology* 10, 535-549, 1989.
15. HINZE J.O. – Turbulence – McGraw-Hill, 1975.
 16. BLANCHARD D. – Collection des fines particules et caractérisation des couches de poussière dans un précipitateur électrostatique – Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble 2001.
 17. RAMADAN O.E., SOO S.L. – Electrohydrodynamic secondary flow - *Phys. fluids*, 12, pp1943-1945, 1969.
 18. WHITE H.J. – Industrial electrostatic precipitation – Addison Wesley Publishing company, New York, 1963.
 19. DUMITRAN L. M., – Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique – Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 2001.
 20. NF X 44-052 – Prélèvement de poussières dans une veine gazeuse – Paris La Défense,
 21. CONTAL P. – Les techniques du dépoussiérage – Document de synthèse de la journée sur le dépoussiérage 1993 à ESIGEC, Chambéry, 1993.
 22. KHALIJ M., – Caractérisation et modélisation de l'efficacité de filtration d'un électrofiltre de type Cottrell – Thèse de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2001.
 23. NF 44-061 – Méthodes d'essai de filtres à air utilisés en ventilation générale – AFNOR, 1992
 24. CEN/EN779 – Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules – Exigences, essais et marquages, norme européenne, Juillet 1993.
 25. NFX44-101 – Définition et classification de la propreté particulaire de l'air et d'autres gaz – AFNOR 1981.
 26. 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.
 27. POINTU, A.M. – Décharge électrique – *Techniques de l'ingénieur D322*.
 28. M. GOLDMAN, A. GOLDMAN, R.S. SIGMOND, – The corona discharge, its properties and specific uses – *Pure and applied chemistry*. 57-9, pp.1353–1362, 1985.
 29. DUPUY J. Effet de couronne et champs ionisés, revue générale d'Electricité, 67, 2, PP 85-104, 1958.
 30. ROBINSON M. – Turbulent gas flow and electrostatic precipitation – *J. Air. Pollut. Control Ass.*, 18, pp. 235-239, 1968.
 31. DAVIDSON J.H. – Ph.D. Dissertation, Duke Univ, 1984.
 32. ROBINSON M. – Turbulent gas flow and electrostatic precipitation – *J. Air. Pollut. Control Ass.*, 18, pp. 235-239, 1968.
 33. LAMI, F. MATTACHINI F., SALA, R. & VIGL, H. – A mathematical model of electrostatic field in wires-plate electrostatic precipitators – *Journal of Electrostatics*

- Vol 39, pp. 1-21, 1997.
34. CEN/TC 195/N22 – Filtre à air à très haute efficacité et filtre à air à très faible pénétration (HEPA et ULPA). Partie 1 : prescriptions, essais et marquages – Norme européenne, 1994.
 35. NELSON D.A., OHADI M.M., ZIA S. AND WHIPPLE R.L. – Electrostatic effect on pressure drop in tube flow – Int. J. heat and flow, Vol. 11 N° 4, December 1990.
 36. BENEMAR B., DONNOT A. & RIGO M.O. – – Wood Dust Congress Strasbourg, 2006.
 37. PARKER K.R., Electrostatic precipitation, Chapman & hall, 1997, pp. 1-24.
 38. BROCK J.R., – Non continuum unipolar charging of aerosol: the role of external electric field. – Journal applied Physics, Vol. 41, 5, pp. 1940-1944, 1970.
 39. PAUTHENIER M.M., MOREAU M., HANOT – La charge des particules sphériques dans un champ ionisé – Journal de physique et radium, 3, 590-613, 1932.
 40. SMITH W.B., MCDONALD J.R. – Development of theory for the charging of particle by unipolar ions – Journal of aerosol science 7, pp. 473-477, 1976.
 41. COOPERMAN P. – Boundary layer effects in electrostatic precipitation – 59th annual meeting Air Pollut. Control Ass., Pittsburgh, 1966.
 42. COCHET R. – Lois de charges des fines particules (submicroniques) – La physique des forces électrostatiques et leurs applications, Edition CNRS, pp. 331–338, 1961.
 43. T. Takahashi. A. Zukeran Y. Ehara. Ito. T. Takamatu “Influence of Re-entrainment Phenomena on Particle Deposit in Electrostatic Precipitator”, T.IEE Japan. Vol. 119-A. N°3.pp. 254-260. 1999.
 44. B.Scherrer. “comparaison des moyennes de plusieurs échantillons indépendants”, tiré de “Biostatistiques”. Gaetan Morin Editeur. Pp. 422-463.1984.
 45. S. Vivier, “Stratégies d’opération par la méthode des plans d’expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis”, Thèse de doctorat soutenue à l’université de Lille (France), Juillet 2002.
 46. N.L. Frigon, D.Mathews, “Practical Guide to Experimental Design”, “New York: Wiley,1996.
 47. F.Miloua, R. Gouri. N. Kadous, A.Tilmatine, “Etude paramétrique du fonctionnement d’un filtre électrostatique”, Publié dans la revue science technologies et développement-ANDRU, N°01, pp. 119-127, 2007.
 48. K.R. Parker, “Applied Electrostatic Precipitation”, publié par Blackie Academic and Professional, 1997.
 49. J.Goupy, “Plans d’expériences pour surfaces de réponse,” Dunod, Paris, 1999.
 50. Jedrusik M., Swierczok A., Teisseyre R., Experimental study of fly ash precipitation in a model electrostatic precipitator with discharge electrodes of different design. Powder Technology: 295- 301 (2003).
 51. Hoenig, S.A., New application of electrostatic technology to control of dust, fumes, smokes and aerosols. IEEE Transactions on Industry Applications IAS-

- 17(4): 386-391 (1981).
52. White HJ., *Industrial Electrostatic Precipitation*, Reading, MA. Wesley G.O. (1963).
53. Onda K., Kasuga Y., Kato K. et al., Electric discharge removal of SO and NO from combustionflue gas by pulsed corona discharge. *Energy Conversion and Management* 38: 1377-1387 (1997).
54. Balcerak M., Hołub M., Pałka R., High voltage pulse generation using magnetic pulse compression. *Archives of Electrical Engineering* 62(3): 463-472 (2013).
55. Hołub M., Study on the influence of output inductance on DBD plasma uniformity. *Archives of Electrical Engineering* 63(2): 263-272 (2014).
56. Balcerak M., Hołub M., Pałka R., High voltage pulse generation using magnetic pulse compression. *Archives of Electrical Engineering* 62(3): 463-472 (2013).
57. Masłowski G., Corona current concept in lightning return-stroke models of engineering type. *Archives of Electrical Engineering* 59(3-4): 177-188 (2010).
58. Artino A., Cârdu M., Electrostatic precipitators used in the ecological conversion of power in coal-fired thermoelectric power plants. *Energy Convers Manage* 35: 477-81 (1994).
59. Macarie R., Martin D., New technologies for the electrostatic precipitators pulsed energization in energetic. *Energy Convers Manage* 38: 511-6 (1997).
60. Miloua, F., Gouri, R., Tilmatine, A. et al., Optimization of the rapping process of an intermittent electrostatic precipitator. *European Physical Journal of Applied Physics*, EDP Sciences 41(1): 81-85 (2008).
61. Remaoun SM., Tilmatine A., Miloua F. et al., Optimization of a Cost-Effective“Wire-Plate”Type ESP for Installation in a Medical Wastes Incinerator. *IEEE/IAS Joint. Conference on Electrostatics*, Waterloo, Canada, pp. 12-15 (2012).
62. Adamiak K., Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: a review. *J. Electrostatics* 71: 673-80 (2013)
- 63 Khalid U., Eldein A., Experimental study of V-I characteristics of wire-plate electrostatic precipitators under clean air conditions. *J. Electrostatics* 71: 228-34 (2013).
- 64 Gajewski J.B., Accuracy of cross correlation velocity measurements in two-phase gasesolidflows. *Flow Meas. Instrum* 30: 133-137 (2013).
- 65 Juliusz B., Gajewski., Monitoring of electrostaticfire and explosion hazards at the inlet to electrostatic precipitators. *Journal of Electrostatics* 72: 192-197 (2014).
- 66 Djelloul BERRACHED, Amar TILMATINE, Farid MILOUA, Malika BENGRIT, Modeling of a two stages electrostatic air precipitation process using response surface modeling. *Archives of electrical engineering*. Vol.63(4),pp 609-619 (2014).