

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'Électrotechnique

Thèse présentée par :

Kherbouche Fouad

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat Es-Sciences en Électrotechnique

Option : électrostatique

Intitulé de thèse :

**Étude expérimentale et numérique de la
précipitation électrostatique d'une atmosphère
chargée de pollution**

Présentée devant le jury composé de :

BENDAOU Abdelber	Professeur	UDL-SBA	Président
BENMIMOUN Youcef	Professeur	UMS de Mascara	Directeur de thèse
TILMATINE Amar	Professeur	UDL-SBA	Co-directeur de thèse
OUIDDIR Rabah	Professeur	USTO-MB -Oran	Examineur
FLAZI Samir	Professeur	USTO-MB -Oran	Examineur
MILOUA Farid	MCA	UDL-SBA	Examineur
ZOUZOU Nouredine	MC	Université de Poitiers	Invité

Soutenue le : 16/02/2017

Année universitaire : 2016/2017

Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier sincèrement le professeur **Benmimoun Youcef** pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire. Je souhaite le remercier du soutien qu'il a témoigné durant mes recherches et pour l'aide qu'il a pu m'accorder au cours de ce travail, la pertinence de ses remarques qui m'ont souvent montré la voie, et la confiance qu'il a su me témoigner au cours de ces années. Enfin, merci pour la patience qu'il a eu à corriger mon manuscrit. Je le remercie sincèrement.*

*Je remercie aussi mon co-directeur de thèse monsieur **Tilmatine Amar** Professeur à l'université de sidi bel-abbés pour son aide précieuse et les remarques utiles qu'il m'a procurées durant ces années de thèse.*

*C'est avec reconnaissance que je remercie mon co-directeur de thèse monsieur **Zouzou Noureddine** pour son aide précieuse et les remarques utiles qu'il m'a procurées durant le stage longue durée effectué au sein de l'institut Pprime université de Poitiers.*

*Je remercie le Professeur **Bendaoud Abdelber** d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, je le remercie aussi pour ses conseils, son admirable esprit scientifique, sa disponibilité, sa gentillesse.*

*Je tiens à destiner mes vifs remerciements au Professeur **Ouiddir Rabah** pour sa gentillesse et sa disponibilité pour avoir honoré et accepté d'être examinateur de ma thèse. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers le Professeur **FLAZI Samir** de m'avoir honoré et accepté d'être examinateur de ma thèse.*

*Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance au Docteur **Miloua Farid** qui a bien voulu évaluer mon travail et donner son avis sur cette thèse, et je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude.*

Je remercie toute l'équipe du laboratoire ou j'ai passé de très agréables moments ainsi que les techniciens.

*Merci à **Ayyoub Zaoughi** pour sa patience et ses nombreux conseils.*

*Merci à **Kaddour Miloudi** pour le courage et la ténacité qu'il sait si bien communiquer et surtout son calme qui m'a toujours impressionnée.*

*Merci à **Bekkara Mohamed Fethi** pour ces précieuses remarques ainsi que pour la sympathie qu'il m'a toujours témoigné.*

.Je souhaite associer à ce travail ma famille qui m'a soutenu, mes parents qui m'ont permis de faire ces études. Je souhaite leurs dédier ce travail. Encore un grand MERCI !

SOMMAIRE

Sommaire	<i>i</i>
Liste des figures	<i>iv</i>
Liste des tableaux	<i>vii</i>
Introduction générale	1
<i>Chapitre I : État de l'art sur la pollution particulaire et les différents procédés de dépollution.</i>	
I.1. Introduction	4
I.2. Pollution particulaire de l'air	4
I.2.1. Emissions et formations des particules	4
I.2.2. Particules et aérosols	5
I.2.3. Dimension des particules	6
I.2.4. Forme des particules	6
I.2.4.1. Particules solides	7
I.2.4.2. Particules fluides	7
I.2.4.3. Facteurs de forme	8
I.3. Les sources de pollution	8
I.3.1. Production d'énergie thermique	9
I.3.2. L'industrie	9
I.3.3. Transports et l'automobile	10
I.3.4. Déchets	10
I.3.5. Activités agricoles	10
I.4. Effets des aérosols	11
I.4.1. Effets sur la santé	11
I.4.2. Effets sur l'environnement	13
I.5. Techniques de dépollution des gaz	13
I.5.1. Techniques dites « classiques » pour la dépollution des gaz	13
I.5.2. Techniques de dépollution par plasma	14
I.5.3. Dépollution par décharge couronne (précipitateur électrostatique)	16
I.6. Précipitateurs électrostatiques	16
I.6.1. Définition des électrofiltres	16
I.6.2. Principe de la précipitation électrostatique	17
I.6.3. Différents types d'électrofiltre	18
I.6.3.1. Electrofiltres à un seul étage	18
I.6.3.2. Electrofiltres à double étage	19
I.6.3.3. Electrofiltres humides	20
I.6.3.4. Electrofiltres a électrode mobile	21

I.6.3.5. Dépoussiéreur électrostatique type tube rotatif (fil-cylindre rotatif)	23
I.7. Décharge couronne	23
I.7.1. En Polarité négative	25
I.7.2. En polarité positive	26
I.7.3. Stabilité de la décharge couronne	26
I.7.4. Influence de la nature du gaz	26
I.7.5. Apparence lumineuse	27
I.7.6. Caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne	28
I.8. Conclusion	29

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1. Introduction	30
II.2. Banc expérimental et les instruments de caractérisation	30
II.2.1. Module électrofiltre	31
II.2.2. Alimentation haute tension	31
II.2.3. Système d'injection de particules (Topas SAG, model 410)	31
II.2.3.1. Principe de fonctionnement	32
II.2.3.2. Spécifications	33
II.2.4. Comptage et de granulométrie des particules	33
II.2.4.1. Description du système	34
II.2.5. Tunnel de tranquillisation de l'écoulement	35
II.3. Granulométrie et caractéristiques physico-chimiques des particules de ciment	35
II.3.1. Description du ciment	35
II.3.1.1. Description chimique	35
II.3.1.2. Description granulométrique	36
II.4. Préparation de la poudre de ciment pour l'injection	38
II.5. Calcul de la constante diélectrique du ciment	40
II.6. Protocole de mesure	40
II.7. Comsol multiphysics	43
II.7.1. Présentation	43
II.8. Méthode des éléments finis MEF	45
II.8.1. Principe de la méthode	45
II.8.2. Méthode variationnelle	47
II.8.2.1. Discrétisation de la formule variationnelle	48
II.9. Présentation des différents modules utilisés	49
II.9.1. Module PDE's	50
II.9.2. Module AC/DC	50
II.9.3. Module écoulement de fluide (CFD module)	51
II.9.4. Module suivi des particules (particules tracing)	52
II.10. Conclusion	54

Chapitre III : Modélisation et simulation des trajectoires des particules

III.1. Introduction	55
III.2. Hypothèses et approximations	57
III.2.1. Approximation de Deutsch	57
III.2.2. Approximation de Popkov	57
III.2.3. Approximation de kaptzov	57
III.3. Equations et conditions aux limites	58
III.3.1. Modèle mathématique	58
III.4. Conditions aux limites	63
III.4.1. Partie électrostatique	63
III.4.2. Dynamique des fluides et mouvement des particules	64
III.5. Domaine de simulation	65
III.6. Analyse de sensibilité des résultats au maillage	66
III.7. Résultats et discussions	66
III.7.1. Distribution du potentiel électrique dans la zone de la décharge	66
III.7.2. Distribution de la charge d'espace dans l'espace inter-électrodes	69
III.7.3. Distribution du champ électrique	72
III.7.4. Caractéristiques courant-tension	73
III.7.5. Trajectoire des particules	74
III.7.6. Efficacité de collection	77
III.8. Conclusion	78

Chapitre IV : Résultats expérimentaux et interprétations

IV.1. Introduction	79
IV.2. Objectifs	80
IV.3. Montage expérimental	82
IV.4 .Caractéristique électriques	85
IV.4 .1. Caractéristiques courant-tension	85
IV.4 .2. Coût énergétique	86
IV.4 .3. Morphologie de la décharge couronne dans la configuration fil-cylindre asymétrique	88
IV.5. Concentration et la distribution de taille des particules	89
IV.6. Efficacité de collecte	89
IV.7. Effet du débit du gaz sur l'efficacité de collecte	96
IV.8. Evaluation des performances du précipitateur asymétrique fil-cylindre	97
IV.9. Conclusion	103
Conclusion générale	105
Références bibliographiques	108

Liste des figures

Figure.I.1 : Aérosol présent dans l'air avec leurs diamètres.	6
Figure.I.2 : Vue microscopique des particules de forme sphérique.	7
Figure.I.3 : Voies respiratoires.	11
Figure.I.4 : Evolution des dépôts en fonction de la taille des particules.	12
Figure.I.5 : Photographie d'une décharge à barrière diélectrique.	15
Figure.I.6 : Principe de fonctionnement d'un filtre électrostatique.	17
Figure.I.7 : Précipitateur électrostatique a un seul étage fil-cylindre à gauche, fil-plaque à droite.	19
Figure.I.8 : Schéma d'un filtre électrostatique à double étage.	20
Figure.I.9 : Précipitateur électrostatique humide (Wet type electrostatic precipitator-HITACHI).	20
Figure.I.10 : Précipitateur électrostatique à tapis roulant ou mobile (MEEP).	21
Figure.I.11 : Relation entre la résistivité de la poussière et la vitesse de migration pour les deux procédés ESP classique et MEEP.	22
Figure.I.12 : Précipitateur électrostatique type tube rotatif (Rotary tube type Electrostatic precipitator-HITACHI).	23
Figure.I.13 : Représentation schématique d'une décharge couronne en géométrie fil-cylindre asymétrique.	25
Figure.I.14 : Photographie de la décharge couronne dans la polarité positive est négative.	27
Figure.II.1 : Schéma global du dispositif expérimental.	31
Figure.II.2 : Photographie du disperseur de particules (Topas SAG, model 410).	32
Figure.II.3 : Schématisation du module de dispersion du topas.	33
Figure.II.4 : Description du système de comptage de particules.	34
Figure.II.5 : Anémomètre à fil chaud Testo modèle 405-V1.	35
Figure.II.6 : Distribution granulométrique du ciment.	37
Figure.II.7 : Photographie du ciment utilisé.	37
Figure.II.8 : Distribution granulométrique des particules de ciment utilisées.	38
Figure .II.9 : Photographie du tamis utilisé dans les manipulations.	39
Figure .II.10 : Classification des masses de particules de ciment suivant leurs gammes de diamètres.	39
Figure .II.11 : Courbe d'évolution de la concentration du ciment dispersé par le topas.	41
Figure .II.12 : Schéma illustratif du protocole de mesure de l'efficacité de collecte (t_s est le temps nécessaire pour la stabilisation de la concentration).	42
Figure II.13 : Interface de travail du Comsol multiphysics.	44
Figure II.14 : Représentation du domaine discrétisé Ω et d'un de ses sous-domaines.	46
Figure.II.15 : Fonction test $\beta_i(X)$ et le sous-domaine Ω_i auquel elle correspond forment l'élément e^i . On vérifie que ces fonctions test sont indépendantes par paires.	49
Figure II.16 : Exemple de l'interface du module AC/DC.	51

Figure II.17 : Exemple du module CFD « Comparaison de l'écoulement dans une approximation 2D d'un modèle 3D de réacteur turbulent avec déflecteur».	52
Figure II.18 : Exemple du module suivi de particules d'un ensemble de buses d'injection.	53
Figure.III.1 : Domaine de calcul et conditions aux limites.	63
Figure.III.2 : Représentation 2D de la configuration file/cylindre asymétrique.	65
Figure.III.3 : Maillage triangulaire extrêmement fin utilisée.	66
Figure.III.4 : Distribution 2-D du potentiel électrique pour les différentes tensions appliquées $U = 14 \text{ kV} - 30 \text{ kV}$.	68
Figure.III.5. Profil du potentiel électrique tout au long de la distance inter-électrodes ($X = 0$).	69
Figure.III.6 : Distribution 2-D du champ électrique pour les différentes tensions appliquées $U = 14 \text{ kV} - 30 \text{ kV}$.	71
Figure.III.7: Profil de la charge d'espace dans la zone active ($X = 0$).	71
Figure.III.8 : Distribution 2-D du champ électrique pour une tension $U = 30 \text{ kV}$.	72
Figure. III. 9 : Profil du champ électrique tout au long de la distance inter-électrodes ($X = 0$).	73
Figure.III.10 : Comparaison entre le courant numérique et expérimentale pour les deux polarités positive et négative.	74
Figure.III.11: Résultat de la Simulation des trajectoires la particule dans un ESP avec une configuration asymétrique fil-cylindre ESP.	76
Figure.III.12: Comparaison entre l'efficacité numérique et expérimentale pour une particule de diamètre de $1 \mu\text{m}$ dans le cas d'une décharge couronne négative.	77
Figure .IV.1 : Schéma simplifié d'un précipitateur de type asymétrique fil-cylindre.	81
Figure.IV.2 : Schéma simplifié du montage expérimental	82
Figure.IV.3 : Schéma descriptif des deux configurations étudiées (1 fil et 3 fils), (a): 1 fil ESP, (b): 3 fils ESP	83
Figure .IV.4 : Photographie du précipitateur réalisé -cas de trois fils.	84
Figure .IV.5 : Pièce de serrage de l'électrode active	84
Figure .IV.6 : Caractéristique courant-tension –cas d'un seul fil ($T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 44 \%$).	85
Figure .IV.7 : Caractéristique courant-tension –Cas de trois fils ($T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 44 \%$).	86
Figure .IV.8 : Puissance consommée en fonction de la tension appliquée – en polarité négative ($T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 44 \%$).	87
Figure .IV.9 : Puissance consommée en fonction de la tension appliquée –en polarité positive ($T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 44 \%$).	87
Figure .IV.10 : Morphologie de la décharge couronne en polarité positives et négatives. Conditions expérimentales: tension = 30 kV , résolution = 3072×2048 pixels, le temps d'exposition = 8 s , pas de particules dans l'espace inter-électrodes.	88
Figure .IV.11 : Distribution de la taille des particules du ciment à la sortie du précipitateur avec et sans décharge couronne (polarité négative).	89
Figure. IV.12 : Efficacité de la collecte en fonction de la tension appliquée.	90
Figure .IV.13 : Efficacité de collecte fractionnaire en fonction du diamètre (cas d'un	

seul fil).	91
Figure .IV.14 : Efficacité de la collecte en fonction de la puissance consommée (cas d'un seul fil).	92
Figure .IV.15 : Efficacité de la collecte en fonction de la puissance consommée.	92
Figure. IV.16 : Efficacité de la collecte en fonction de la tension appliquée	93
Figure .IV.17 : Efficacité de fractionnaire en fonction du diamètre (1 Fil-ESP).	94
Figure .IV.18 : Efficacité de fractionnaire en fonction du diamètre (3 Fils-ESP).	94
Figure. IV.19 : Photographie des particules collectées sur l'électrode de collecte. (Photo prise après 9 h de fonctionnement).	95
Figure .IV.20 : Photographie de la zone de collection agrandie (Photo prise après 9 h de fonctionnement).	96
Figure .IV.21 : Effet du débit sur l'efficacité de la collecte.	96
Figure. IV.22 : Evaluation du courant de la décharge en fonction de la tension appliquée pendant une durée de fonctionnement (T = 23 °C, RH = 44 %).	97
Figure .IV.23 : Photographie de la décharge en retour (back corona).	99
Figure. IV.24 : Principe d'apparition d'une décharge en retour.	100
Figure IV.25 : Photographie de l'effet de la décharge couronne en retour sur les particules collectées.	101
Figure .IV.26 : Evolution de l'efficacité fractionnaire en fonction du temps.	102
Figure .IV.27 : Evolution de l'efficacité de collecte en fonction du temps de fonctionnement dans le cas d'un 1 fil-ESP, avec une tension appliquée négative.	103

Liste des tableaux

Tableau.II.1 : Principales caractéristiques techniques du Topas SAG, model 410	33
Tableau.II.2 : Principales caractéristiques techniques du granulomètre Palas, Modèle Welas 1000.	35
Tableau.II.3 : Description des différentes phases du ciment hydraté.	36
Tableau.III.1 : Constantes de la simulation et leurs valeurs.	64
Tableau.III.2 : Conditions aux limites de la dynamique des fluides et la trajectoire.	64
Tableau .IV.1 : Evolution du courant de la décharge en fonction du temps et la tension appliquée.	98

Introduction générale

Introduction générale

Les applications industrielles de l'électrostatique dans le domaine de la manipulation des particules ou des gouttelettes en suspension sont actuellement utilisées dans de nombreux usages tels que : la peinture, le poudrage électrostatiques, la précipitation électrostatique (ESP), la pulvérisation électrique des liquides, le guidage électrostatique des poudres (par rideaux électriques) et la séparation électrostatique des granules. Dans tous ces cas, les particules ou les gouttelettes en suspension doivent être électriquement chargées. Alors, le champ électrique a pour effet de les diriger ou les entraîner vers une zone qui les capture ou les sépare, etc.

La plus ancienne de ces applications est la précipitation électrostatique (ESP), appelée également électrofiltre ou dépoussiéreur électrostatique, qui est une installation de filtration largement utilisée depuis le début du 20^{ème} siècle pour épurer les fumées. Elle prend une part importante dans la filtration des rejets industriels.

Les précipitateurs électrostatiques sont actuellement les séparateurs les plus utilisés dans l'industrie, en particulier pour les grands débits gazeux. On les trouve, par exemple, dans les industries métallurgiques et chimiques ou celle du ciment, ainsi que pour traiter les fumées produites par les centrales électriques brûlant du charbon pulvérisé. Le succès de ce procédé s'explique par la grande efficacité de filtration (en général, supérieure à 99% en masse) et la faible perte de charge dans ces installations de traitement.

Malgré leur excellente efficacité en termes de masse de la matière collectée, les électrofiltres ont des performances insuffisantes pour les particules de diamètre inférieur à 1 μm . La pénétration profonde de ces fines particules dans les poumons les rend plus dangereuses pour la santé humaine. La réglementation internationale sur l'environnement en matière des rejets industriels impose d'améliorer ces précipitateurs soit par association avec des cyclones soit en améliorant les configurations géométriques utilisées pour augmenter l'efficacité de collecte des fines particules.

Donc, il faut tenir compte des phénomènes physiques mis en jeu qui recouvrent de nombreux champs : l'électrostatique, les décharges dans les gaz, la dynamique des fluides et l'électrohydrodynamique (EHD), etc.

Les électrofiltres sont classifiés suivant la géométrie de l'électrode de collecte (de type cylindrique, plaque ou tapis roulant), le sens d'écoulement du gaz (écoulement vertical ou horizontal), ainsi que le système de récupération des particules (ESP secs à l'aide des vibreurs ou électrofiltres humides). Les particules polluantes collectées s'accumulent sur la surface de l'électrode de collecte formant une couche d'une résistivité importante qui adhère avec la surface de l'électrode. Cette couche de pollution favorise l'apparition de la décharge couronne en retour (back corona) qui cause la chute de l'efficacité de collecte. Parmi les nouvelles techniques utilisées pour récupérer les particules collectées, on trouve les précipitateurs électrostatiques à tapis roulant. Ce dispositif répond à la nécessité de quelques industries qui éjectent des particules de poussière avec une résistivité élevées afin de résoudre le problème de réentraînement.

Le dispositif de filtration réalisé dans cette étude a le même principe de fonctionnement que les autres précipitateurs exploités actuellement, la contribution se présente dans la configuration asymétrique, ce qui va nous permettre de séparer mécaniquement la partie de la génération de décharge couronne de la partie de collecte ainsi que le choix d'une électrode de collecte cylindrique mobile (tournante) afin de récupérer les particules collectées sur la surface de cette dernière et même d'avoir une homogénéisation de cette couche qui adhère sur la surface de l'électrode de collecte due à la rotation uniforme de la partie mobile.

Cette thèse comprend quatre chapitres. Le premier chapitre présente les connaissances de base sur la pollution particulaire concernant les caractéristiques physicochimiques et les sources de pollution, les moyens de lutte contre cette pollution, ainsi qu'une brève description de la décharge couronne avec cette nouvelle configuration.

Le second chapitre décrit en détail toutes les parties essentielles qui composent notre banc expérimental, comme la partie des précipitateurs, la partie de la génération de la haute tension, celles de l'injection des particules de ciments et de la visualisation granulométrique, celle du comptage de particules ainsi que le protocole de mesure de l'efficacité. Les dernières sections seront consacrées à la description de l'outil de calcul ou de la simulation numérique qui est le logiciel Comsol multiphysics qui se base sur la méthode des éléments finis, où on

exposera les différents modules utilisés dans notre modélisation tels que : le module électrostatique, PDE, l'écoulement des fluides ainsi que le module de suivi des particules.

La troisième partie est consacrée à la modélisation numérique de notre précipitateur dans une nouvelle configuration asymétrique afin de valider certains résultats expérimentaux tels que le courant de la décharge couronne dans les deux polarités et même l'efficacité de collecte ainsi que la trajectoire des particules. L'utilisation de Comsol multiphysics nous a permis de réaliser un code de calcul en couplant plusieurs physiques (modules). Ce dernier prend en compte les phénomènes physiques pertinents qui affectent le processus de la précipitation électrostatique tels que le champ électrique, la densité de la charge d'espace, et la dynamique d'écoulement des particules et même leurs trajectoires.

Le dernier chapitre a pour objectif de présenter les résultats expérimentaux de notre précipitateur dans la configuration asymétrique fil-cylindre (prototype de laboratoire) conçu au niveau du laboratoire LSTE et achevé au sein de l'institut Pprime –université de Poitiers. La première partie sera consacrée à la description du banc expérimental, où on schématise le précipitateur fil-cylindre réalisé, dans les deux configurations étudiées (un seul fil-cylindre et trois fil-cylindre). Une caractérisation électrique est élaborée afin de valider le fonctionnement de notre nouvelle configuration asymétrique et la comparer avec la configuration classique.

La fiabilité de notre précipitateur électrostatique avec la nouvelle configuration doit être validée en effectuant des séries d'expériences concernant l'efficacité de filtration du précipitateur pour les deux configurations et même pour les différentes polarités et niveaux de tension appliqués.

Chapitre I
État de l'art sur la pollution particulaire et les
différents procédés de dépollution

Chapitre I

État de l'art sur la pollution particulaire et les différents procédés de dépollution

I.1. Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présentons d'abord des généralités sur la pollution particulaire et ses différentes formes suivies par une brève évaluation des caractéristiques (physicochimiques et des sources de pollution) ainsi que les effets des aérosols sur l'environnement dans son ensemble et sur la santé humaine.

Cependant on va exposer les différentes techniques de dépollution de l'air qui diffèrent suivant les phénomènes physiques comme la sédimentation, le dépôt par inertie, l'interception et la précipitation électrostatique.

Après une présentation succincte des différentes techniques de dépollution des gaz d'échappements utilisés, on s'intéresse plus particulièrement à une méthode propre de traitement des polluants : la dépollution par décharges couronne (la précipitation électrostatique), dans laquelle on cite les différents types de précipitateurs électrostatiques où on trouve plusieurs types qui diffèrent suivant les géométries et les configurations des électrodes ainsi que le système de récupération des particules qui donne une spécificité à chaque filtre.

De plus, une brève description sur la décharge couronne dans la configuration fil-cylindre étudié dans notre thèse. Suivi aussi par le mécanisme dans les deux polarités positive et négative.

I.2. Pollution particulaire de l'air

I.2.1. Particules et aérosols

Les particules sont des corps autonomes séparés de l'environnement par une interface bien définie. On distingue trois types de particules :

- les particules solides.
- les particules liquides.
- les particules gazeuses.

Les particules rigides (la plupart des particules solides) sont les particules qui peuvent supporter des contraintes normales et tangentielles de valeurs élevées sans subir de déformations importantes.

On considère comme particules uniquement les corps qui sont inertes du point de vue biologique et qui ne sont pas autopulsés.

Les particules constituent avec le gaz qui les entoure un aérosol. Selon leurs types, les aérosols sont stables pour des durées de quelques secondes jusqu'à une année, voir plus [1,2].

I.2.2. Emissions et formations des particules

Les émissions naturelles des particules dérivent de l'abrasion des sols (phénomènes d'érosion), des embruns marins, des éruptions volcaniques, des feux de forêt et de phénomènes biologiques. Au niveau mondial, elles sont de l'ordre de 2105 Mt/an.

Les émissions anthropiques de particules proviennent de la combustion des procédés industriels, des transports, des incinérateurs de déchets... Ces émissions représentent à l'échelle internationale environ 408 Mt/an.

On distingue deux types de particules ayant des modes de formation différents :

- les grosses particules (diamètre $> 10 \mu\text{m}$) d'origine naturelle sont principalement émises par des processus mécaniques et des processus biologiques. Parmi les procédés mécaniques, citons la friction du vent sur des surfaces solides (érosion des sols), et les surfaces liquides (la formation d'embruns marins); parmi les processus biologiques il y a notamment la dispersion des spores et des pollens.
- les fines particules (diamètre $< 10 \mu\text{m}$) peuvent être émises en tant que telles par les procédés de combustion et des procédés industriels. Elles peuvent aussi résulter de la condensation de gaz à faible température de condensation ou encore de réactions chimiques entre le gaz donnant lieu à la formation d'un solide (formation de sulfates, d'ions ammonium).

La formation de fines particules s'opère en deux étapes .D'abord, par la formation de petits agrégats, soit par réaction chimique, soit par condensation de gaz. Ces agrégats, composés de quelques molécules ont des dimensions très faibles. Ils peuvent servir de noyau pour la condensation d'autres molécules de gaz ou coaguler avec d'autres agrégats pour former des particules de taille plus importante, ce qui constitue la seconde étape.

La composition de ces particules est très variable. En effet, les grosses particules contiennent des éléments abondants dans la couche terrestre et les sels marins tels que

Aluminium, Calcium, Fer, potassium, Titane, Manganèse, Strontium, Silicium, alors que les particules fines contiennent des sulfates, des nitrates, de l'ammonium résultant de la transformation dans l'air des oxydes de soufre et d'azote, de l'ammoniac ainsi que du carbone, des composés organiques et des métaux provenant entre autres des combustibles fossiles[1,3].

I.2.3. Dimension des particules

On considère comme dimension caractéristique pour une particule le diamètre d'une particule sphérique ayant une certaine caractéristique (masse, coefficient aérodynamique, libre parcours moyen...) de la même valeur que la particule réelle. Il est important de noter que presque toutes les propriétés d'un aérosol dépendent de la dimension des particules qui le composent. La figure I.1 présente les dimensions des particules pour les aérosols que l'on trouve fréquemment dans l'atmosphère [2 ,4].

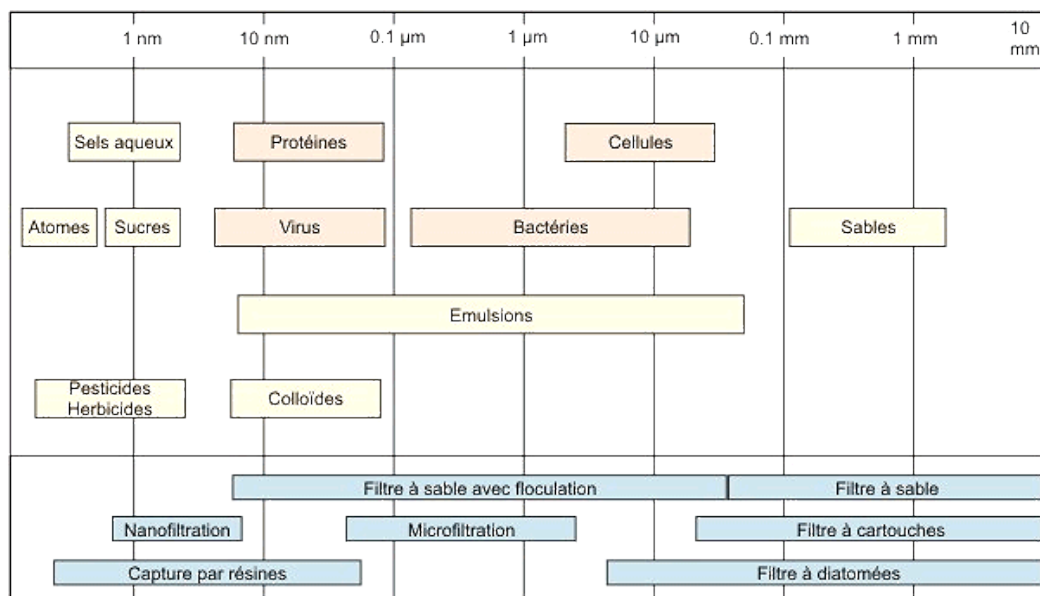


Figure.I.1 : Aérosol présent dans l'air avec leurs diamètres.

I.2.4. Forme des particules

Les particules solides sont d'une grande diversité de formes : de la forme sphérique des particules de pollen à la forme totalement irrégulière des particules minérales. Les particules fluides sont de formes moins variées, elles sont axisymétriques et dans certaines circonstances elles peuvent garder une forme sphérique [4,5].

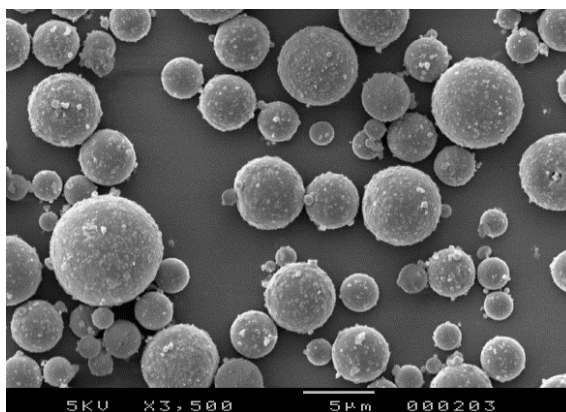


Figure.I.2 : Vue microscopique des particules de forme sphérique [5].

I.2.4.1. Particules solides

Les particules axisymétriques sont les particules dont la forme peut être obtenue par la rotation d'une courbe fermée autour d'un axe. En fonction de l'axe choisi, deux formes peuvent être obtenues. Pour les distinguer, on utilise un coefficient d'aspect défini comme le rapport entre le diamètre maximal dans la direction parallèle à l'axe de rotation et le diamètre maximal dans la direction normale à l'axe de rotation.

Les particules orthotropiques sont les particules qui sont symétriques par rapport à trois plans perpendiculaires. Les particules sphériques et isotropiques sont les particules qui ont la forme d'un polyèdre régulier ou une autre forme obtenue à partir d'un polyèdre régulier par des lissages ou des coupures symétriques [4].

I.2.4.2. Particules fluides

La caractéristique principale des particules fluides dans un milieu fluide est qu'elles se déforment jusqu'à l'équilibre des contraintes tangentiels et normales au niveau de l'interface qui délimite la particule du milieu fluide. Pour ces particules le domaine des formes qu'elles peuvent prendre est beaucoup plus restreint.

Pour les particules fluides au repos, il existe trois formes distinctes : les particules pendantes qui sont attachées à une surface d'où les forces de poussée tendent à les arracher, les particules sessiles qui sont comprimées par la force de poussée contre une plaque plane et les particules qui flottent à la surface d'un milieu fluide.

Pour les particules fluides en mouvement libre dans un milieu fluide, on distingue également trois formes distinctes : les particules sphériques, pour lesquelles si l'écart entre les différents diamètres n'excède pas 10%, les particules ellipsoïdales qui ne font pas parties de la

première catégorie et qui ont une surface convexe, et les particules possédant la forme de coupes sphériques ou ellipsoïdales (les grosses particules fluides en mouvement ont tendance à s'aplatir et à adopter une forme proche des segments découpés d'une sphère) [4].

I.2.4.3. Facteurs de forme

La plupart des particules qui ont un intérêt pratique ont une forme irrégulière et n'appartiennent donc à aucune des catégories énoncées. Pour l'élaboration de lois de comportement, on considère fréquemment que la particule est sphérique. Il est donc nécessaire d'apporter une correction par l'introduction d'un facteur de forme.

Une description empirique de la forme d'une particule est possible par la connaissance de deux des paramètres caractéristiques suivants : le volume de la particule, l'aire de la surface extérieure, l'aire de la projection de la particule et le périmètre de la projection de la particule.

Les facteurs de forme sont définis par rapport à une sphère équivalente dont l'un des paramètres caractéristiques a la même valeur que celui de la sphère réelle.

De nombreux facteurs de formes ont été introduits, les plus utilisés sont : le facteur de forme volumétrique, le facteur de sphéricité, le facteur de circularité, les facteurs opérationnels de sphéricité et de circularité et le facteur du périmètre équivalent [1,6].

I.3. Sources de pollution

L'air naturel, mélange complexe composé principalement d'azote (78 %) et d'oxygène (21 %) est indispensable à la vie.

Chacun de nous en inhale 12 000 à 15 000 litres par jour. Avec l'avènement de nos civilisations modernes, les quantités de substances diverses rejetées dans l'atmosphère, altérant la composition normale de l'air, n'ont cessé d'augmenter.

La quasi-totalité des activités humaines est source de pollution de l'air, elle apparaît essentiellement sous deux formes [4,7] :

- Gazeuse : présence de gaz nouveaux ou augmentation de la proportion d'un gaz existant naturellement,
- Solide : mise en suspension de poussières.

Les activités humaines les plus significatives, dans la contribution à la pollution de l'air, sont les suivantes :

I.3.1. Production d'énergie thermique

Au niveau individuel ou tertiaire (chauffage des logements et des bureaux) comme au niveau industriel (production de vapeur ou d'électricité), la combustion de combustibles fossiles (charbon, fioul lourd) produit d'importantes émissions polluantes.

Le dioxyde de carbone (CO₂), produit inévitable de la combustion des matières organiques dont la concentration croissante dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre, le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO₂), les oxydes d'azote (NO_x), les poussières et les métaux lourds [7,8].

I.3.2. L'industrie

L'industrie est à l'origine des émissions spécifiques dues aux processus de traitement ou de fabrication employés. En quantités variables, selon les secteurs industriels, elle est émettrice de monoxyde et de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre, d'oxydes d'azote, de poussières et de composés organiques volatils (COV) [4,9].

Parmi ces secteurs polluant l'environnement on prend le cas des cimenteries où le ciment est le matériau de base répondant à une utilisation homogène entrant dans les activités de réalisation et de construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil.

Un matériau fondamental dans la construction mais dont la fabrication génère des émissions polluantes et nuisibles, si celles-ci se développent à proximité d'agglomérations habitables. De cette manière, elle constitue un risque urbain par la pollution qu'elle cause aussi bien pour la population que pour l'environnement.

Les principales émissions polluantes des cimenteries qui doivent être traitées sont celles de poussières, d'oxydes d'azote (NO_x) et de dioxyde de soufre (SO₂), ainsi que celles de composés organiques volatils (COV), des polychlorodibenzo-para-dioxines (PCDD), de chlorure d'hydrogène (HCl) et des polychlorodibenzofuranes (PCDF). En outre, les émissions d'oxydes de carbone (CO, CO₂), de fluorure d'hydrogène (HF), d'ammoniac (NH₃), de benzène, toluène, éthylbenzène et xylène (BTEX), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH), de métaux et leurs composés, de bruit et d'odeurs peuvent être prises en considération dans des circonstances spéciales [4,10].

I.3.3. Transports et l'automobile

La pollution due aux transports a longtemps été considérée comme un problème de proximité, essentiellement perçu dans les villes en raison de la densité du trafic.

Aujourd'hui, on sait que les transports, essentiellement routiers et en particulier l'automobile, sont une source de pollution importante.

Les moteurs à explosion sont ainsi de très loin la première cause d'émission d'oxydes d'azote et de divers hydrocarbures. Les moteurs diesels, moins polluants pour ce qui concerne ce dernier type d'émissions, sont en revanche à l'origine de particules et de dioxyde de soufre. La contribution des transports à la pollution ne cesse de s'accroître du fait de l'augmentation du trafic directement liée à l'évolution économique [11].

I.3.4. Déchets

Ils sont à l'origine de plusieurs types de polluants, parmi lesquels :

- **Le méthane** : abondamment dégagé par la décomposition des matières organiques, il contribue fortement à l'effet de serre. En décharge par exemple il y a la formation d'un biogaz contenant de 40 à 60 % de méthane (le reste étant du gaz carbonique, de l'azote, du gaz sulfhydrique, et divers acides plus ou moins volatils et soufrés) sur une période pouvant atteindre une dizaine d'années. Le captage du méthane est une obligation réglementaire.
- **l'acide chlorhydrique** : il est produit par l'incinération (la combustion d'une tonne de déchets ménagers entraîne l'émission de plus de 7 kg d'acide chlorhydrique).
- **les métaux lourds** : ils résultent de l'incinération des déchets industriels et des déchets ménagers.
- **les dioxines et les furanes** : ils sont principalement générés par les installations d'incinération d'ordures ménagères et ont notamment pour origine la combustion des déchets chlorés [4].

I.3.5. Activités agricoles

L'agriculture contribue également à la pollution atmosphérique. Ses émissions (essentiellement l'ammoniac, le méthane, le protoxyde d'azote, le monoxyde de carbone et les pesticides) sont liées à la décomposition des matières organiques et à l'utilisation d'engrais et de pesticides [4,10].

I.4. Effets des aérosols

I.4.1. Effets Sur la santé

Les mécanismes qui influencent sur le comportement des aérosols dans les voies respiratoires (figure I. 3) sont les mêmes que pour le processus de filtration. Cependant, la géométrie spatiale complexe et le taux d'humidité des voies respiratoires sont des facteurs importants.

Le système respiratoire d'un adulte humain traite environ 10 à 25 m³ d'air par jour. La surface d'échange gazeux dans la région alvéolaire est d'environ 30 m² et elle est couverte d'environ 2000 km de capillaires. Le volume d'air lors de l'inhalation et de l'exhalation est de 700 ml au repos et peut être de 2 à 3 fois plus lors d'un effort.

Le rythme respiratoire se situe aux environs de 12 fois par minute au repos et ce rythme triple lors des efforts. Environ 1,1 litres d'air résiduel n'est pas exhalé durant une respiration normale (mais il peut l'être lors de respiration forcée). Le parcours, à partir de la trachée, suit un dédale de 23 branchements dont 16 sont dans la région alvéolaire. Les effets combinés des divers mécanismes de dépôt ont mené à la définition de la courbe de dépôt des aérosols dans les voies respiratoires selon les régions et le diamètre des particules [2, 4].

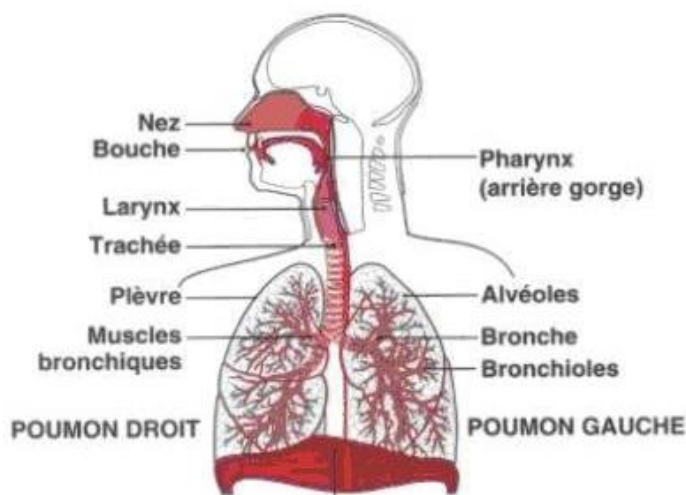


Figure.I.3 : Voies respiratoires.

Les mesures usuelles et la réglementation définissent les grandes classes d'aérosols en fonction de la courbe de dépôt Figure I.4:

- **Les poussières totales:** aérosols collectés avec un filtre attaché à un système d'aspiration d'air (ensemble des particules qui pénètrent par le nez et la bouche).
- **Les poussières respirables:** la fraction des aérosols qui atteignent la région alvéolaire des voies respiratoires.

- **La fraction inespérable (ou inhalable):** la fraction des aérosols qui pénètrent et se déposent dans les voies respiratoires, soit par la bouche ou par le nez, lors du Processus normal d'inspiration,
- **La fraction thoracique:** la fraction des aérosols qui pénètrent et se déposent au-delà du larynx,
- **La fraction alvéolaire (respirable):** la fraction des aérosols qui pénètrent et se déposent dans la région alvéolaire des voies respiratoires.

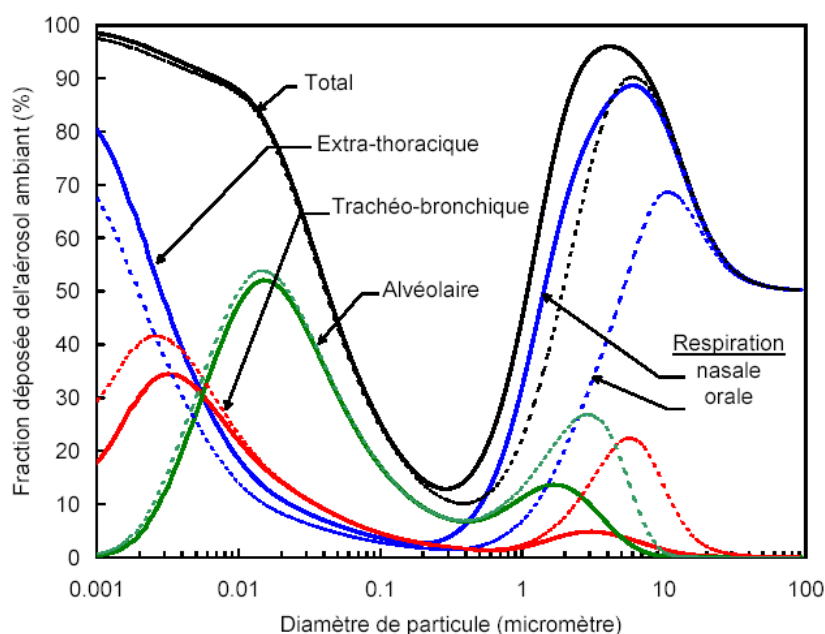


Figure.I.4 : Evolution des dépôts en fonction de la taille des particules

Les particules organiques et inorganiques peuvent être solubles ou insolubles dans les fluides des voies respiratoires. L'action chimique de l'aérosol sera principalement fonction de cette propriété. Les particules solubles passent en solution dans ces fluides à l'endroit où elles se déposent et sont diffusées dans tout l'organisme. Les substances toxiques dans ces particules sont donc distribuées de cette manière, de même que les substances simplement nuisibles [4, 8, 12].

Les particules insolubles dans les fluides des voies respiratoires vont demeurer plus ou moins longtemps selon la capacité des mécanismes de « nettoyage » pour s'en débarrasser.

I.4.2. Effets sur l'environnement

En ce qui concerne l'environnement, les retombées acides générées par les émissions de SO₂ (industries, centrales thermiques, chauffages domestiques) de NO_x (industries, moteurs à combustion) sont les principales responsables des effets sur :

- les matériaux (édifices, monuments, façade d'immeubles...) ; Elles mettent en danger notre patrimoine culturel et occasionne d'onéreux travaux de ravalement de façades ou une restauration de monuments
- Les écosystèmes forestiers. Le dépérissement forestier est lié à l'action de plusieurs facteurs souvent hiérarchisés :
 - ✓ Facteurs prédisposant qui agissent depuis longtemps (pauvreté du sol, pollution chronique, changement climatique),
 - ✓ Facteurs déclenchant qui interviennent brusquement sur des périodes courtes (sécheresse, attaque d'insectes..),
 - ✓ Facteurs aggravants qui accentuent les effets précédents.
- Les écosystèmes aquatiques. L'acidification des lacs et des cours d'eau entraîne parfois une destruction irréversible de la vie aquatique. Cependant on observe depuis une dizaine d'années une lente amélioration de la situation grâce notamment à la diminution des émissions soufrées [4].

I.5. Techniques de dépollution des gaz

I.5.1. Techniques dites « classiques » pour la dépollution des gaz

Les principales techniques dites « classiques » de dépollution des rejets gazeux sont [13] :

- **La filtration** : Dans ce cas, l'interposition d'une membrane semi-perméable permet la séparation des particules solides ou liquides contenues dans le gaz. Elle est la base de toute séparation dans le prétraitement des effluents gazeux.
- **L'adsorption** : Cette propriété physique permet aux produits gazeux à éliminer d'être transférés à la surface d'un adsorbant. Elle peut être réversible, ce qui permet la régénération de l'adsorbant.
- **L'absorption** : Cette méthode utilise un substrat qui retient les substances à éliminer. On parle de « lavage du gaz » les polluants gazeux pénètrent dans une phase liquide et y restent piégés.
- **Le piégeage cryogénique** : Dans ce cas, la condensation partielle à basse température (inférieure à 200°K) permet de séparer certains constituants.

- **La combustion** : Elle est principalement utilisée pour la dépollution de fumées contenant des hydrocarbures. Ces derniers sont transformés en éléments inertes non polluants par oxydation à chaud entre 700 et 900° C.

I.5.2. Techniques de dépollution par plasma

Les techniques de dépollution par plasma sont décomposées en deux groupes. Le premier groupe utilise des plasmas thermiques (torche à plasma ou arc électrique) pour faire monter la température du gaz (500 à 1200°K) et favoriser ainsi certaines réactions de réduction. Le second groupe utilise des plasmas non thermiques (ou hors équilibre) pour ensemencher le gaz en espèces excitées et radicalaires et ainsi initier une cinétique chimique de transformation des polluants [13].

Les techniques nécessitant des températures de gaz élevées sont [13,14] :

- **La Réduction Catalytique Sélective (SCR)** qui se base sur l'injection d'ammoniac (NH_3) et sur la réduction de NO en azote N_2 en présence d'un catalyseur.
- **La Réduction Non Catalytique Sélective (SNCR ou « Thermal DeNO_x »)** qui n'utilise pas de catalyseur mais requiert une température de gaz plus élevée et fonctionne grâce à l'ammoniac ou à des agents à base d'urée.
- **La Réduction Catalytique Non Sélective (NSCR)** disponible depuis 1945 et qui demande l'utilisation d'additifs d'hydrocarbures afin d'accomplir la réduction de NO , ceci en présence d'un catalyseur.
- **Le procédé RAPRENO_x** qui fonctionne de la même manière que le procédé « Thermal DeNO_x » mais qui implique l'injection de l'acide isocyanique comme additif.

Ces méthodes ne sont pas adaptées à l'élimination des effluents toxiques présents en quantité minoritaire dans des milieux gazeux occupant de grands volumes (ce qui est le cas des gaz d'échappement). En effet, ces techniques demandent le chauffage des molécules de manière non sélective : cela est coûteux énergétiquement et par conséquent financièrement.

Plus récemment des projets basés sur la formation de plasmas froids non thermiques ont fait l'objet de recherche dans plusieurs pays. Ces techniques sont basées sur [13, 15,16 ,17] :

- Le bombardement (ou irradiation) du gaz d'échappement par faisceau électronique. Cette technique a été initiée dans les années 1970 par la société japonaise EBARA puis elle s'est développée dans les années 1980 en Allemagne et aux Etats-Unis. Le procédé permet d'oxyder les NO_x et SO_2 en HNO_3 et HSO_4 ces derniers étant ensuite neutralisés par l'adjonction d'une base. Ils forment ainsi des résidus solides récupérés

par des filtres mécaniques ou des précipitateurs électrostatiques et sont ensuite valorisés en tant que sels fertilisants.

- **Les décharges électriques hors équilibre** : Différents types de décharges électriques à la pression atmosphérique peuvent être utilisées comme les décharges couronne, les décharges à barrières diélectriques, les décharges de surface et les décharges glidarc. Les décharges couronnes s'établissent dans un intervalle gazeux séparé par deux électrodes dissymétriques entre lesquelles s'établit un champ géométrique non uniforme.
- **Les décharges à barrières diélectriques** sont effectuées dans un espace inter – électrodes de faible distance, isolé par la présence d'au moins un diélectrique sur l'une des électrodes métalliques (limitant ainsi le risque de passage à l'arc) une photographie de la décharge DBD est présentée sur la figure.I.5. Elles sont utilisées depuis 1857 par Siemens pour la formation d'ozone. Elles restent le principe de base pour la production industrielle de cette molécule utilisée pour le traitement des eaux de consommation. Les recherches en laboratoire montrent que ce type de réacteur est adapté à l'élimination de polluants oxydables.

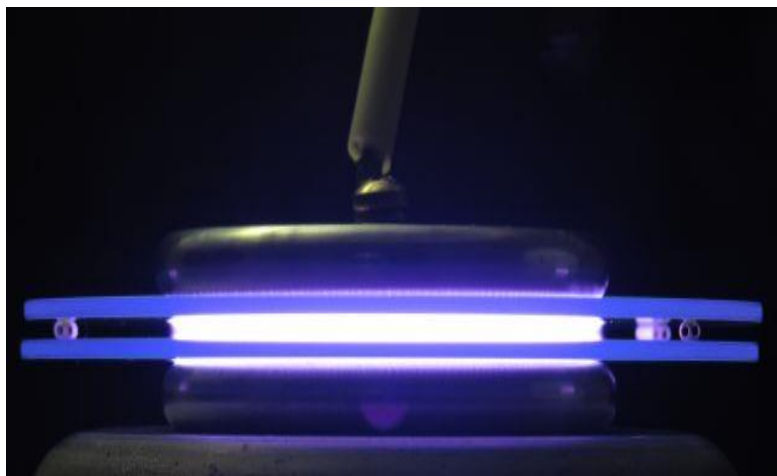


Figure.I.5 : Photographie d'une décharge à barrière diélectrique.

- **Les décharges de surface** sont de configuration plane ou cylindrique. Un diélectrique (céramique) sur lequel une décharge rampante se propage est incorporé entre les électrodes. L'électrode active est une grille placée en surface de la céramique et l'électrode de masse est un film métallique incorporée dans cette dernière. Ce type de réacteur a des propriétés similaires à celles rencontrées dans les décharges couronne [4].
- Les décharges glidarc apparaissent dans des réacteurs constitués de deux électrodes divergentes. La décharge s'amorce au niveau du col des électrodes puis se propage le

long de celle-ci du fait du flux de gaz à traiter. Les décharges obtenues sont intermédiaires entre les Plasmas hors équilibre et les arcs électriques, la température du gaz étant de l'ordre de 4000°C [4,13].

I.5.3. Dépollution par décharge couronne (précipitateur électrostatique)

La dépollution des effluents gazeux par plasmas froids ou non thermiques s'effectue par l'intermédiaire de décharges électriques. L'une des décharges la plus adaptée est la décharge couronne. Elle permet de traiter les gaz à pression atmosphérique, au sein même de leur conduit d'évacuation. Le traitement s'effectue soit en détruisant les espèces toxiques soit en les transformant en espèces moins nocives et/ou plus facilement traitables par d'autres techniques de dépollution [16, 18].

I.6. Précipitateurs électrostatiques

Les phénomènes électrostatiques ont été observés par les philosophes grecs vers 600 avant Jésus-Christ. Ils ont remarqué l'attraction de petites particules par l'ambre jaune (résine fossile) frottées sur la peau de l'animal.

Au début du 17^{ème} siècle, WILLIAM GILBERT a noté qu'un diélectrique frotté attire les particules de fumée produite par un feu éteint. Les relations quantitatives décrivant les forces électrostatiques ont été introduites par F. COULOMB au 18^{ème} siècle.

De nombreux rapports sur les effets électrostatiques voient le jour au début du 19^{ème} siècle. Le premier appareil expérimental utilisant ces phénomènes est issu des travaux de HOHLFELD. Il a montré qu'une étincelle électrique pouvait dissiper la fumée contenue dans une bouteille. En 1850, GUITARD avait observé qu'une décharge couronne produisait les mêmes effets sur la fumée.

En 1883, LODGE propose de purifier l'air dans les salles de fumeurs et dans les tunnels. Ce n'est qu'en 1907 que le premier électrofiltre conçu par Cottrell fonctionna de manière efficace. Le premier précipitateur électrostatique est né et depuis, de nombreux travaux sont consacrés aux électrofiltres

I.6.1. Définition des électrofiltres

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, les cimenteries et 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 [19,20].

I.6.2. Principe de la précipitation électrostatique

La précipitation électrostatique est basée sur trois principes (Figure.I.6) :

- Charger électriquement les particules en suspension.
- Collecter les particules chargées par l'intermédiaire d'un champ électrique.
- Enlever les poussières précipitées sur les plaques de collecte.

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

Le principe repose sur le passage du gaz porteur de particules entre deux électrodes (fil-cylindre ou fil-plan), où est appliquée une forte différence de potentiel due à la dissymétrie des électrodes, une décharge électrique est générée, utilisée comme source d'ions gazeux qui va permettre de charger les particules en suspension dans le gaz.

Les particules chargées sont ensuite déviées par le champ électrique, et migrent vers la contre-électrode où elles sont collectées [17, 19, 20].

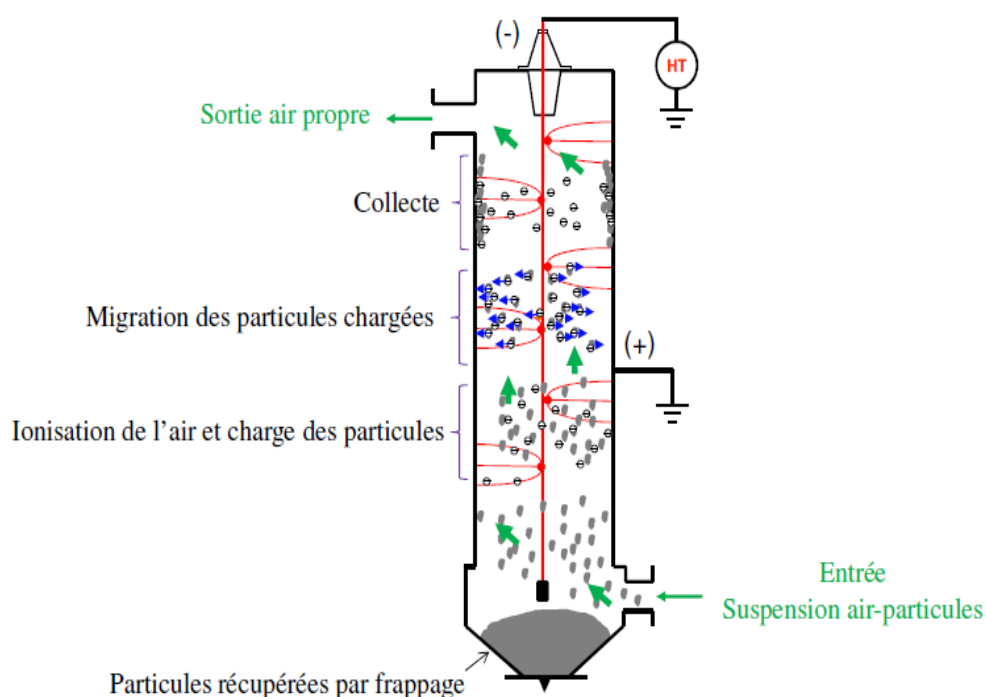


Figure.I.6 : Principe de fonctionnement d'un filtre électrostatique [22].

L'accumulation de particules sur l'électrode de collecte nuisant à l'efficacité du procédé, le nettoyage des plaques est effectué régulièrement. Si les particules sont liquides, le

liquide tombe de l'électrode par gravitation. Si les particules sont solides, la couche de poussière collectée sur l'électrode est périodiquement enlevée en frappant les électrodes.

Dans les installations industrielles, la décharge électrique est souvent négative, et donc les particules sont chargées négativement. Ce choix est dû à la tension de passage à l'arc, plus grande, pour une géométrie donnée, en polarité négative qu'en polarité positive.

I.6.3. Différents types d'électrofiltre

Hormis la forme géométrique de l'électrode collectrice du filtre électrostatique qui peut être cylindrique ou sous la configuration de plaque, on distingue plusieurs types de précipitateurs [20, 22] :

- les électrofiltres à un seul étage,
- Les électrofiltres à double étage,
- Les électrofiltres humides.

I.6.3.1. Electrofiltres 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 cout d'investissement est très élevé.

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 marteau), 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 du 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 [4, 22].

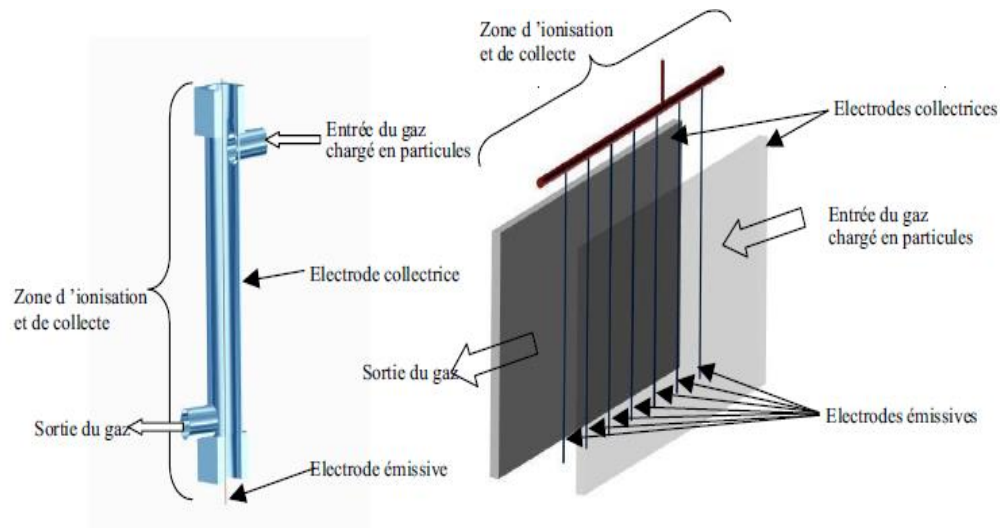


Figure.I.7 : Précipitateur électrostatique à un seul étage fil-cylindre à gauche, fil-plaque à droite.

I.6.3.2. Electrofiltres à double étage

Les filtres électrostatiques à double étage (figure I.8) sont équipés d'un premier étage ionisant dans lequel les particules sont chargées suivi d'un filtre électrostatique proprement dit. Ils ont une construction plus compliquée, ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés.

C'est de la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement dans des installations de conditionnement d'air. Les deux étages dans ce type filtre sont alimentés séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de haute tension [21,22].

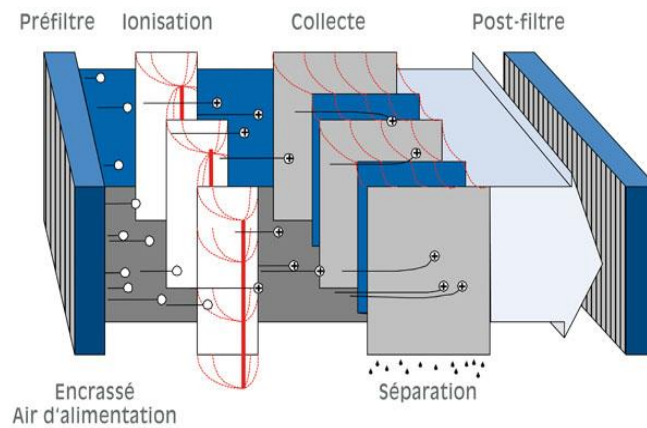


Figure.I.8 : Schéma d'un filtre électrostatique à double étage.

I.6.3.3. Electrofiltres humides

Le principe de base (figure I.9) est identique à celui des électrofiltres secs. La différence provient de la présence d'un film humide ruisselant sur l'électrode collectrice.

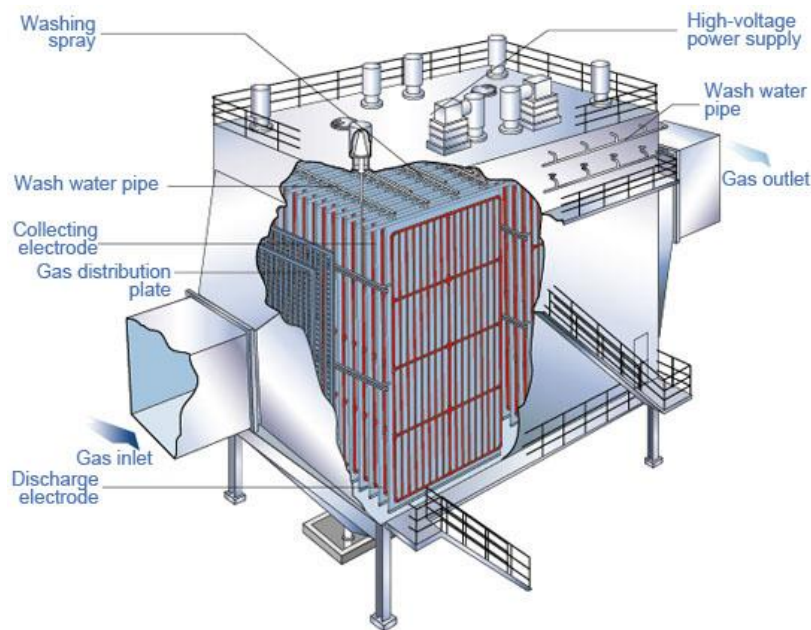


Figure.I.9 : Précipitateur électrostatique humide (Wet type electrostatic precipitator- HITACHI) [26].

L'effluent à traiter est saturé en vapeur d'eau qui permet, par l'intermédiaire de la condensation, d'augmenter la taille des particules.

Ce procédé autorise une efficacité de collection moins sensible aux caractéristiques électriques de la particule et permet l'épuration d'effluents chargés en particules, difficilement réalisable avec un électrofiltre sec [6,21].

En effet, cette procédure limite l'effet de contre émission pour les particules dont la résistivité est trop forte ainsi que le phénomène de réentraînement pour celle dont la résistivité est trop faible.

Un gain de performance élevé est remarquable mais les inconvénients majeurs sont : le coût d'investissement énergétique pour le procédé de lavage, la température de fonctionnement qui est limité 0 à 9 °C et enfin la nécessité de traiter l'effluent liquide [6,21, 26].

I.6.3.4. Electrofiltres à électrode mobile

La technologie du précipitateur à électrode mobile (figure.I.10) a été créée pour répondre au besoin industriel. Le déplacement de l'électrode de collecte recueille la poussière en permanence et la rotation de la brosse située dans la partie inférieure élimine la poussière déposée sur la surface d'électrode (tapis roulant).

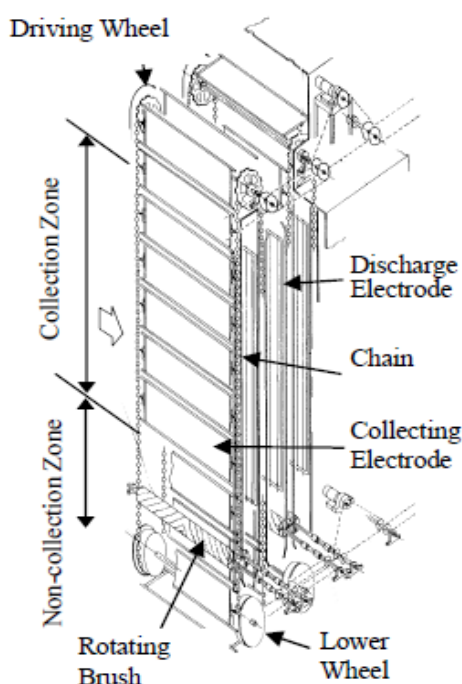


Figure.I.10 : Précipitateur électrostatique à tapis roulant ou mobile (MEEP).

Cette zone est une zone de non-recouvrement qui est exempt de flux de gaz ou d'électricité (haute tension). La poussière collectée est complètement enlevée par ces brosses rotatives, ainsi que les plaques collectrices sont maintenues propres en tout temps. En outre, le réentraînement ne peut pas se produire par le brossage de particules.

Par conséquent, l'utilisation du précipitateur MEEP peut effectivement collecter les poussières à haute résistivité, qui ne peut être retirée par méthode frappe (procédé classique) dont les électrodes sont généralement fixées, ces poussières fines qui sont récupérées par frappe se mélange de nouveau avec l'écoulement du gaz.

D'autre part, des pièces telles que la chaîne et les pignons qui se déplacent l'électrode sont exposés à un environnement fortement poussiéreux ce qui va poser beaucoup de problèmes mécanique donc un dysfonctionnement dans le processus de récupération des particules.

La figure I.11 montre la relation entre la résistivité de la poussière ρ et la vitesse de migration ω . Les particules ayant une forte résistivité électrique adhèrent fortement sur l'électrode de collecte, cette forte adhésion est due au temps de la décharge de ces particules. Au fil du fonctionnement du précipitateur classique cette couche va causer une décharge appelée corona ce qui va chuter la collecte donc diminuer la vitesse de migration de ces particules.

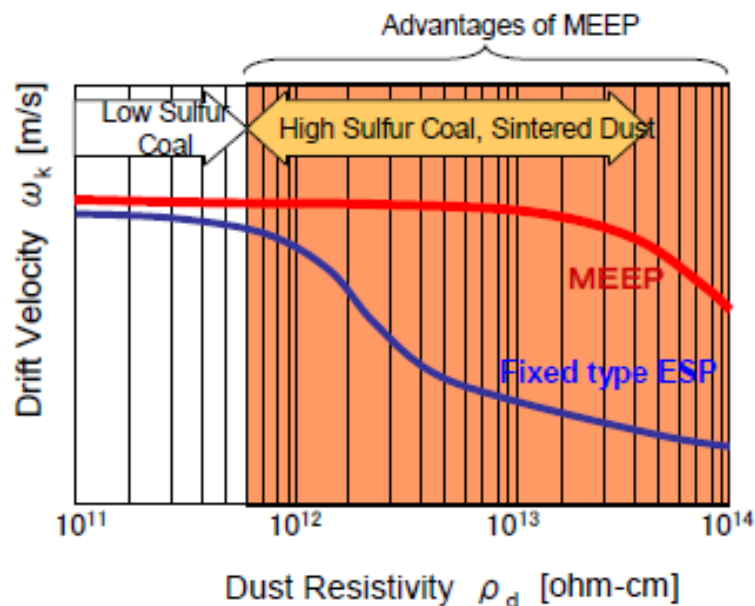


Figure.I.11 : La relation entre la résistivité de la poussière et la vitesse de migration pour les deux procédés ESP classique et MEEP [26].

Les précipitateurs munis de la technologie des tapis ou électrodes mobiles garde le même niveau de la vitesse de migration même pour des particules fortement résistives et ce processus est assuré même dans le cas des poussières extrêmement résistives [24, 25].

I.6.3.5. Dépoussiéreur électrostatique type tube rotatif (fil-cylindre rotatif)

Le dépoussiéreur électrostatique de type tube rotatif est utilisé pour la collecte de particules de haute résistivité générée à partir de l'électrode de carbone fours de cuisson, ou des procédés de fabrication de coke, de l'asphalte, ou de matériaux réfractaires, ou des brouillards d'huile générés dans les procédés de fabrication de caoutchouc, pneus, etc....

L'électrode de collecte de poussière d'électrofiltre du type tube rotatif est combiné avec le boîtier extérieur, ce système est mis en rotation avec une vitesse lente comme un four rotatif.

Un Racloir monté sur la surface interne du tube sert à enlever les particules qui se déposent sur l'électrode collectrice, ce processus est réalisé à travers la surface du tube entier. Par conséquent, cela est approprié pour la collecte des aérosols qui présentent des difficultés dans la récupération. La figure I.12 représente un précipitateur électrostatique type tube rotatif conçu par HITACHI [26].



Figure.I.12 : Précipitateur électrostatique type tube rotatif (Rotary tube type Electrostatic precipitator-HITACHI).

I.7. Décharge couronne

Les précipitateurs électrostatiques utilisent un champ électrique pour épurer les gaz chargés de particules en suspension. Le principe est de charger électriquement les particules puis de les diriger sous l'effet du champ électrique vers les zones de collecte. La charge des particules est assurée par la présence d'une charge d'espace générée par une décharge couronne [4, 24].

Dans le cas d'une décharge sur une cathode, du fait de la grande différence de rayon de courbure entre les électrodes des précipitateurs (classiquement des fils et des plaques), le champ électrique est fortement inhomogène, l'avalanche électronique se développe dans ce cas jusqu'à une distance telle que l'intensité du champ électrique n'est plus suffisante pour assurer la multiplication électronique.

Ces mécanismes sont à l'origine de la formation d'une charge d'espace ionique dans l'espace inter-électrodes [22].

En dehors de cette région d'ionisation, les électrons libres s'attachent rapidement aux molécules neutres pour former des ions négatifs ; à partir d'une certaine distance de l'électrode ionisante, tout se passe comme si l'électrode à faible rayon de courbure émettait des ions de la même polarité qu'elle.

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

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

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

- Électriques tels que la nature et la polarité de la tension appliquée à l'électrode active.
- Géométriques tels que la forme, et les dimensions des électrodes ainsi que la distance inter-électrodes.
- Physiques, liés à la nature du gaz inter-électrodes, à sa densité, à sa pression, à sa température et à sa teneur en vapeur d'eau et en impuretés. Le (ou les) matériau(x) constituant les électrodes jouent également un rôle non négligeable.

L'une des géométries les plus simples d'électrodes pour l'étude de la décharge couronne en laboratoire est le système d'électrodes cylindriques (fil-cylindre concentriques) car on connaît les solutions analytiques de toutes les équations régissant les phénomènes électriques, de transport des particules et d'écoulement.

En outre, ce système offre une symétrie de révolution permettant de simplifier l'expression du champ électrostatique existant entre les électrodes et de mener une étude simple en vue de l'élaboration d'une simulation numérique de la décharge couronne.

Comme l'indique la Figure I.13, ce système consiste en une électrode cylindrique de faible rayon r_f , dite active, mise sous haute tension continue. Positionnée asymétriquement par rapport à l'axe du cylindre conducteur mis à la terre.

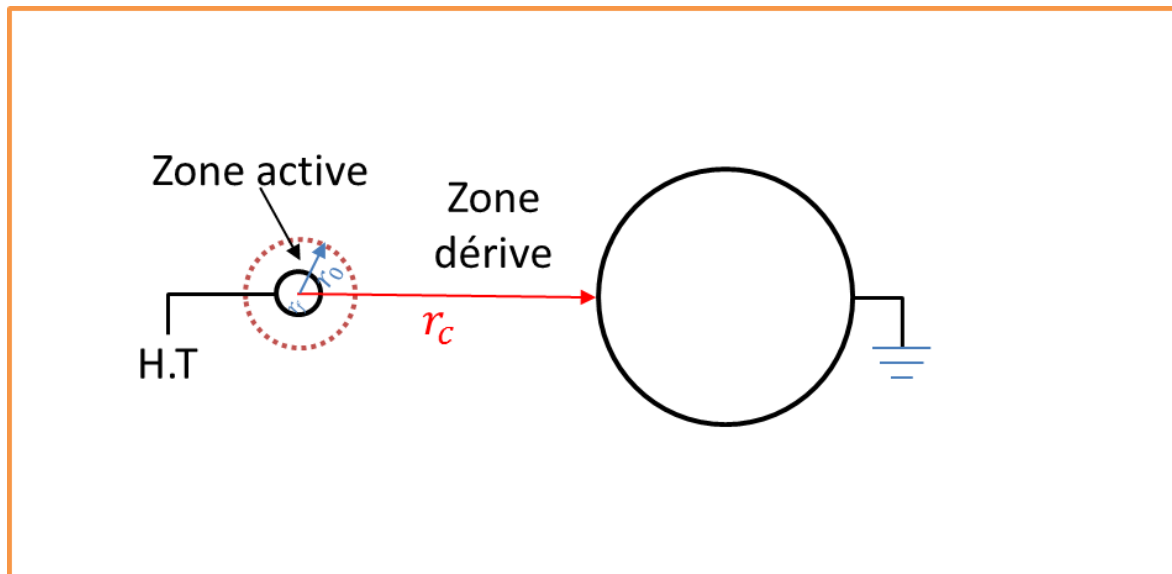


Figure.I.13 : Représentation schématique d'une décharge couronne en géométrie fil-cylindre asymétrique.

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 où l'ionisation du gaz peut avoir lieu, appelée la zone active.

La deuxième zone où le champ électrique n'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 monopolaire.

Les deux zones actives et de dérive, sont bornées par une frontière circulaire de rayon r_0 dit rayon critique d'ionisation.

I.7.1. En Polarité négative

Dans le cas d'une décharge négative, l'avalanche électronique se développe de la cathode vers l'extérieur. Elle s'arrête au rayon critique r_0 (Figure I.13). 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 [22].

I.7.2. 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 [28]) ne peuvent pas 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 [21, 29].

I.7.3. Stabilité de la décharge couronne

Ce phénomène d'effluve négatif ne s'étend qu'à une faible distance de l'électrode active, donc pas question de formation d'un canal entre électrodes (cathode, anode) ; on peut réduire leur distance sans qu'il se produise d'étincelle, parce que l'étincelle se produit rapidement quand on est dans le cas d'une décharge couronne positive à cause de la sécession des avalanches électroniques, l'effluve négatif ne tourne pas de lui-même à l'étincelle. De ce fait on peut conclure que la décharge couronne dans la polarité négative est un phénomène stable qui se confine au voisinage de l'électrode active [4].

I.7.4. Influence de la nature du gaz

Dans l'oxygène, les électrons une fois éloignés de l'électrode active s'attachent aux molécules neutres ; si les électrodes sont éloignées, on doit augmenter la tension appliquée car la mobilité des ions est limitée.

Dans un gaz comme l'azote, la tension appliquée est beaucoup plus faible parce que les électrons restent libres par suite de leur grande mobilité.

Pour une distance de 10 cm entre les deux électrodes, et un courant de 50 μA , il faut :

- Dans l'air à la pression atmosphérique : 50 kV.
- Dans l'azote très pur et à la même pression : 5 kV.

Cette propriété est utilisée pour apprécier la pureté de l'azote (ou du moins la proportion d'oxygène restant). Toutefois quelle que soit la nature du gaz et la distance des électrodes, une tension de 1 kV à 2 kV au moins est toujours nécessaire pour entretenir le phénomène [4].

I.7.5. Apparence lumineuse

La figure.I.14 représente des photographies sur les apparences lumineuses de la décharge couronne dans les deux polarités pour le même niveau de tension 30 kV et les mêmes conditions expérimentales.

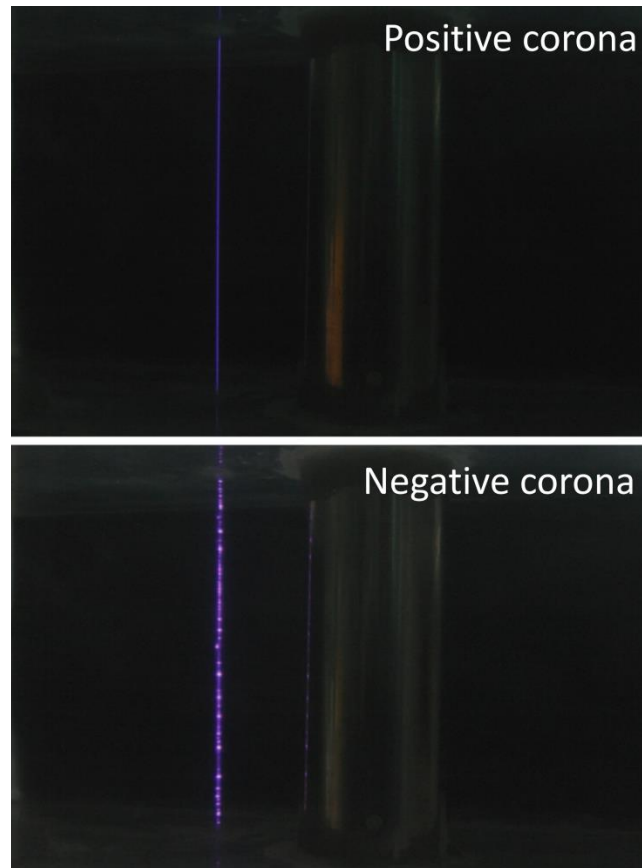


Figure.I.14 : Photographie de la décharge couronne dans la polarité positive est négative [27].

Même avec la géométrie asymétrique fil – cylindre (notre cas), la décharge couronne en polarité négative produit des taches actives discrètes appelées «tufts» le long du fil couronne, tandis que la décharge couronne en polarité positive produit une gaine lumineuse uniforme autour du fil [27].

I.7.6. Caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne

Une relation empirique simple entre le courant et la tension développée théoriquement est généralement utilisée dans la majorité des décharge couronne pour les différentes configurations [30, 31]. Elle s'exprime par:

$$I = CV(V - V_0) \quad (\text{I.1})$$

Où :

- C : est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la température, de la pression et de la composition du gaz ;
- V_0 : représente la tension seuil d'ionisation ;

D'après Dupuy [32], pour une géométrie fil-cylindre la constante C est donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{8 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \epsilon_0}{r_c \cdot \ln\left(\frac{r_c}{r_f}\right)} \quad (\text{I.2})$$

Où :

- μ : Mobilité ionique ;
- ϵ_0 : La permittivité du vide ;
- r_c : Le rayon de la zone dérive ;
- r_f : Le rayon du fil couronne ;

En 1929, Peek a proposé une loi empirique du champ seuil E_0 en tension alternative. Cette loi elle représenté sous la forme [33] :

$$E_0 = 31 \cdot \epsilon \cdot \delta_a \cdot \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta_a \cdot r_f}}\right) \quad (\text{I.3})$$

Où :

- ϵ : est le facteur de rugosité de la surface de l'électrode active. Il est égal à 1 pour une surface lisse ;
- δ_a : Densité relative de l'air ;

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué quelques notions importantes qui se rapportent à la pollution particulaire à savoir les différentes sources de pollution et leurs effets sur la santé de l'être humain et l'environnement. Dans certains pays émergent, aucune précaution n'est prise et des populations sont exposées aux risques de contaminations massives. Ces situations appellent une prise de conscience de la communauté internationale.

Les poussières en suspension, qui se différencient par leur taille, leur forme et leurs composants, sont toujours dans l'air en plus ou moins grande quantité. Si, dans l'air extérieur, les concentrations en particules sont habituellement suffisamment diluées (sauf dans certains cas où une quasi absence de vent alliée à d'autres facteurs comme la présence d'importantes sources rendent impossible une dilution convenable), il n'en est pas de même à l'intérieur des bâtiments où, par l'intermédiaire de la ventilation et des infiltrations, les particules tendent à s'accumuler.

Ceci a pour effet de procurer des sensations de gêne et d'inconfort aux personnes présentes dans cet air pollué pouvant représenter un danger certain à plus ou moins long terme.

Parmi les différentes techniques qui se présentent pour lutter contre la pollution, on distingue des techniques dites classiques comme la pollution et piégeage des particules polluantes et les techniques de dépollution par plasma (DBD volumique, surfacique, décharge couronne).

La précipitation électrostatique reste la méthode la plus efficace et la plus économique qu'on doit utiliser pour lutter contre la pollution particulaire, sur laquelle est porté notre présent travail.

Chapitre II
Matériels et Méthodes

Chapitre II

Matériels et Méthodes

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente en détail toutes les parties du banc expérimental et de notre prototype dans la configuration fil-cylindre asymétrique ainsi que des brèves définitions des outils et des instruments de mesure et de visualisation utilisés dans cette investigation.

Une description des différentes parties essentielles qui composent notre banc expérimental comme la partie précipitateurs, la partie génération de la haute tension, la partie d'injection des particules de ciments et la partie de visualisation granulométrique et comptage de particules, cette description comporte aussi les principes de fonctionnement des instruments de mesure afin de comprendre les phénomènes physiques de base de ces derniers .

Cette description sera suivie par une caractérisation granulométrique et physico-chimique du ciment utilisé comme polluant qui est injecté dans notre système afin de valider notre configuration dans le cas des particules de grande résistivité.

Enfin, ce chapitre sera clôturé par une courte description du logiciel utilisé dans la modélisation des phénomènes importants qui régissent dans la trajectoire des particules dans le précipitateur électrostatique avec cette nouvelle configuration.

II.2. Banc expérimental et les instruments de caractérisation

Dans cette section nous détaillons le banc expérimental dans sa globalité, ce qui nous amène à décrire les diverses parties qui la constituent.

Le schéma global du dispositif expérimental que nous avons utilisé est illustré sur la figure II.1. Il comporte trois parties principales, à savoir : l'électrofiltre, L'alimentation en air comprimé et l'alimentation électrique, la soufflerie (tunnel de tranquillisation d'écoulement) ainsi que la partie de comptages des particules. Chacun de ces parties fait l'objet d'une description détaillée.

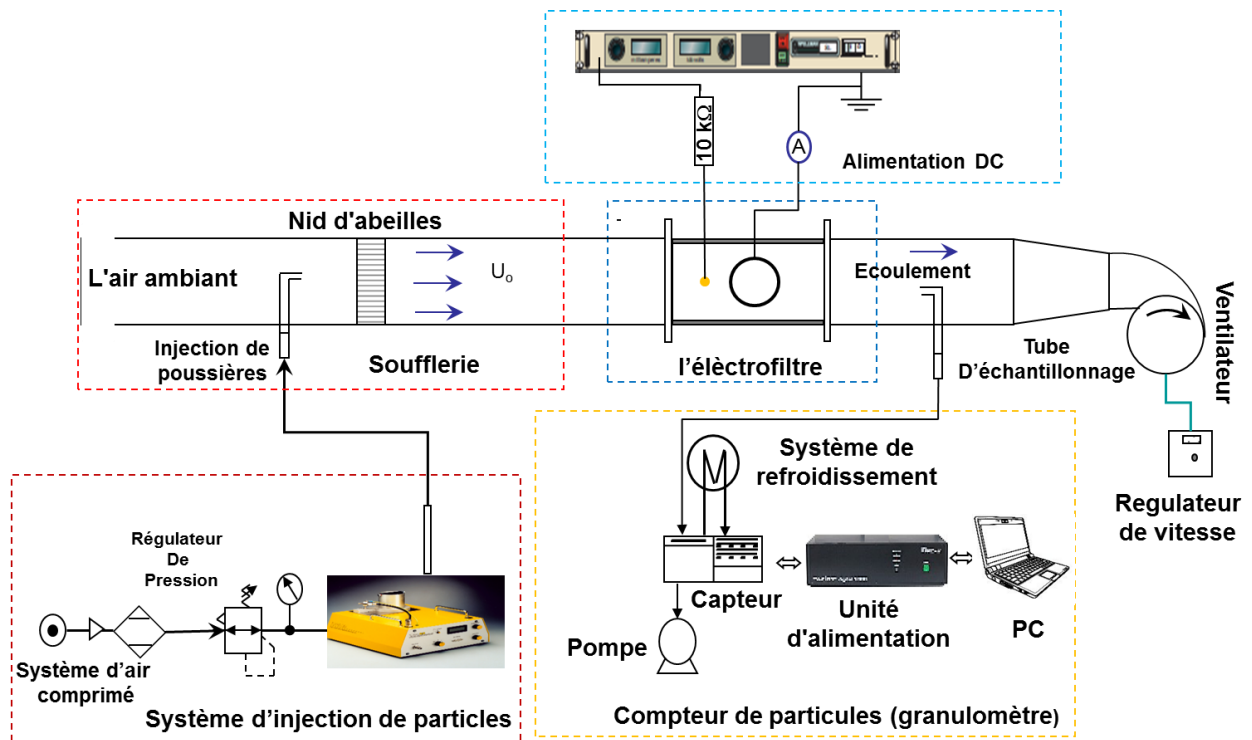


Figure.II.1 : Schéma global du dispositif expérimental.

II.2.1. Module electrofiltre

Ce module comporte l'électrofiltre asymétrique de type fil – cylindre . Il est relié aux autres modules par des connections électriques et pneumatiques. Nous y reviendront en détail dans le chapitre IV.

II.2.2. Alimentation haute tension

Dans cette étude, on a utilisé deux générateurs de marque spellman, la haute tension continue est générée par un générateur de marque Spellman SL 1200, +100 kV, + 12 mA pour la tension positive et Spellman SL 150, -40 kV, - 3.75 mA pour la négative, avec une précision de 0.1 kV, protégé par une résistance haute tension de 10 kΩ. Le courant moyen de la décharge couronne couronne est mesuré par un multimètre digitale.

II.2.3. Système d'injection de particules (Topas SAG, model 410)

Ce générateur disperse une poussière fine grâce à une double buse d'injection. La poussière est amenée par une courroie d'alimentation, ce qui permet de régler le débit. Le disperseur de poudre SAG est un générateur de poussières très précis et très stable sur une longue durée.

D'une façon similaire aux technologies de l'information, la dispersion des particules est assurée en divisant la poussière en tout petits paquets. La masse apportée à la buse de

dispersion peut être réglée en modifiant la vitesse de la courroie dentée, segmentée de façon uniforme. De plus la solution technique retenue pour la réserve de poussière garantit un dosage continu et stable.

La conception modulaire du SAG et les trois unités de dispersions à monter sur une base commune permet une gamme de débit de quelques mg/min à plusieurs kg/h. Il est conçu de telle façon qu'on peut mesurer le débit massique à l'aide d'une balance. Il peut être piloté à distance. L'entretien ainsi que le changement de poudre sont très faciles. La figure.II.2 montre une photographie du topas SAG.



Figure.II.2. Photographie du disperseur de particules (Topas SAG, model 410).

II.2.3.1. Principe de fonctionnement

L'utilisation de bande doseuse est une technique éprouvée. La courroie est segmentée en volume défini ce qui permet une alimentation stable même pour de très petites quantités. La concentration en nombre de particules peut donc facilement être réglée en modifiant la vitesse de la courroie.

Une double buse d'injection (selon la norme ISO 5011) à la fin de la courroie prend la poudre et la met sous forme d'aérosol. Un excavateur (scraper) spécialement conçu assure le remplissage constant de la courroie dentée et réduit l'influence du niveau de remplissage de la trémie.

Le débit massique peut être réglé simplement en jouant sur la vitesse de la courroie. Le débit massique dépend de la densité brute du matériau. On le détermine facilement en

mesurant les masses fournies à différentes vitesses de courroie. On voit ici un exemple d'une telle calibration [34, 35]. La figure.II.3 schématise le module de dispersion Topas.

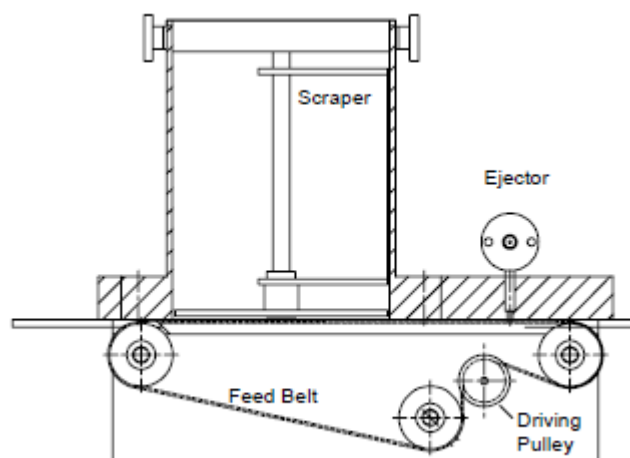


Figure.II.3 : Schématisation du module de dispersion du topas.

II.2.3.2. Spécifications

Le tableauII.1 présente les principales caractéristiques techniques du Topas SAG.

Tableau.II.1 – Principales caractéristiques techniques du Topas SAG, model 410

Type de particules	
Réservoir	320 cm ³ (220 g*)
Débit Maximal	558 cm ³ /h
Fonctionnement continu	50 h
Alimentation	9,5 .. 529 g/h
Débit Standard	1,0 .. 2,5 m ³ /h
concentrations	3,8 .. 529 g/m ³

II.2.4. Comptage et granulométrie des particules

- **Principe de fonctionnement**

Le dispositif de comptage des particules est un granulomètre de marque Palas, Modèle Welas 1000. La technique de comptage est basée sur l'utilisation d'une source de lumière blanche. Un petit volume de mesure défini optiquement est éclairé avec une lumière blanche afin d'analyser la lumière diffusée et de déterminer le nombre et la taille des particules. Les particules passent séparément à travers ce volume.

Pour chaque particule, une impulsion de lumière diffusée d'une intensité spécifique est produite. L'intensité de l'impulsion de lumière diffusée collectée à 90° est le moyen de

déterminer la taille des particules. Le nombre de ces impulsions de lumière diffusée, mesuré par unité de temps permet de calculer la concentration particulaire.

L'avantage de ce procédé est la totale indépendance entre le nombre de particules et la taille de celles-ci. Cette indépendance est la condition la plus importante pour une bonne résolution analytique.

L'utilisation de la lumière blanche permet une illumination homogène du volume de mesure contrairement à l'illumination par lumière monochromatique. De même, la mesure de l'intensité de la lumière blanche diffusée à 90° évite toute ambiguïté entre l'amplitude des impulsions de lumières diffusées et le diamètre des particules. Enfin, la courbe d'étalonnage est par conséquent clairement définie, la lumière blanche réduisant les erreurs causées par les particules de forme non sphérique [36].

II.2.4.1. Description du système

Le système de comptage des particules illustré sur la figure.II.4 se compose du granulomètre qui comporte quatre organes : le module optique, le module électronique, le module de pompage et de refroidissement et le module de post traitement des données.

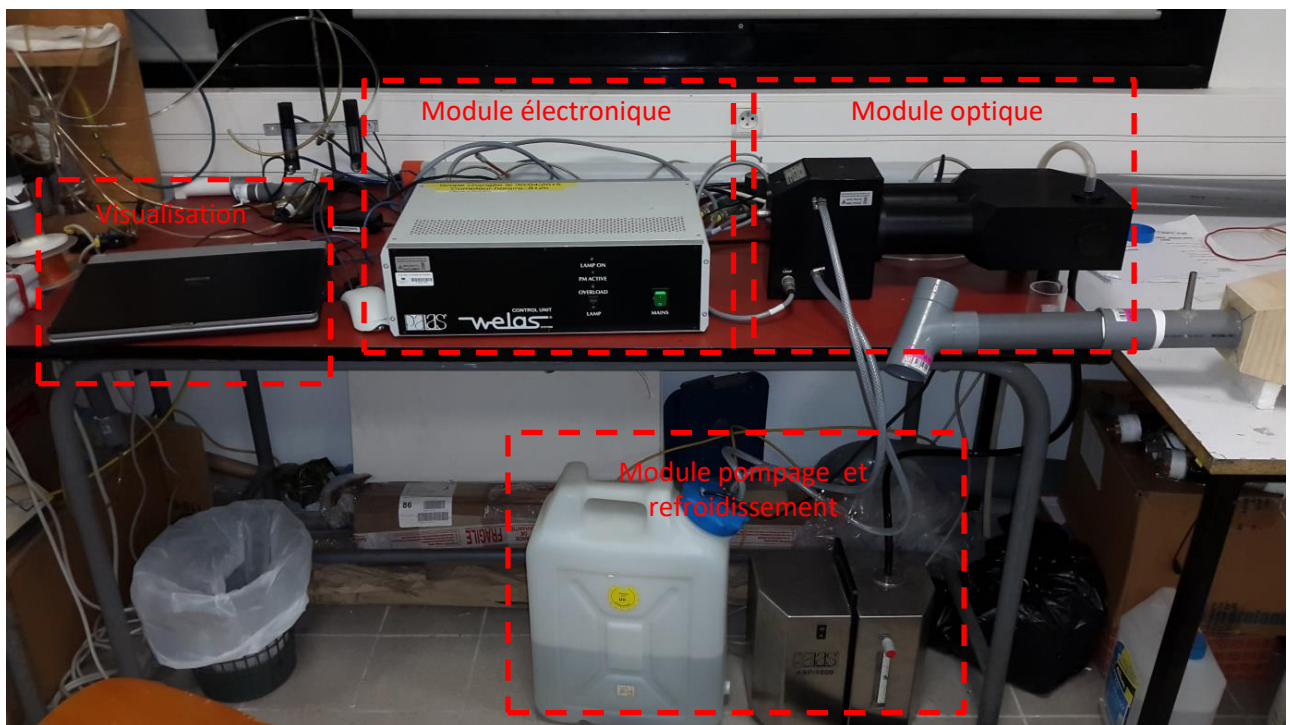


Figure.II.4 : Description du système de comptage de particules.

Les principales caractéristiques du granulomètre sont regroupées dans le tableau.II.2:

Tableau.II.2 : Principales caractéristiques techniques du granulomètre Palas, Modèle Welas 1000 [36].

Débit volumique	Constant
Gamme	0,18 à 40 μm
Nombre de canaux	32 par décade
Concentration maximale	$5 \cdot 10^5$ part/ cm^3
Débit	5 L.mn ⁻¹
Source de lumière	Lampe Xénon
Système de refroidissement	Eau

II.2.5. Tunnel de tranquillisation de l'écoulement

Le tunnel de tranquillisation est construit de poly méthacrylate de méthyle (PMMA), avec une section carrée de 132 mm de largeur et 132 mm de hauteur. la longueur globale du tunnel est de 2 mètres. Un ventilateur contrôlé par un régulateur de vitesse va générer un écoulement dans le tunnel de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Les mesures de débit sont effectuées pour obtenir cette vitesse en utilisant un anémomètre à fil chaud Testo, modèle 405-V1, $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pleine échelle, et une résolution de $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, figure II.4.



Figure.II.5 : Anémomètre à fil chaud Testo modèle 405-V1

II.3. Granulométrie et caractéristiques physico-chimiques des particules de ciment

II.3.1. Description du ciment

II.3.1.1. Description chimique

Le ciment Portland utilisé habituellement est un mélange de clinker, fruit de la cuisson à 1450°C de calcaire, d'argile et de gypse (CaSO_4). Le clinker de ciment Portland anhydre est un système multiphasique composé de quatre phases principales :

- Le silicate tricalcique (noté C_3S) : 50 à 70 %
- Le silicate dicalcique (noté C_2S) : 10 à 30 %
- L'aluminate tricalcique (noté C_3A) : 2 à 15 %
- L'alumino-ferrite tétracalcique (noté C_4AF) : 5 à 15 %

Lors de l'hydratation du ciment, le gypse permet de réguler la prise du ciment par la formation de cristaux d'étrangéité à la surface des grains de C_3A . Le gypse permet donc de ralentir la prise du C_3A qui devrait être quasi-instantanée. Les phases anhydres se dissolvent et forment de nouvelles phases Tableau.II.3 [37].

Tableau.II.3 : Description des différentes phases du ciment hydraté.

Nom	Notation cimentière	Formule
Silicate de calcium hydraté	CSH	$xCaO.SiO_2.yH_2O$
Portlandite	CH	$Ca(OH)_2$
Ettringite	$C_3A.3CSH_{32}$	$3CaO.A_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$
Monosulfoaluminate	C_4ASH_1	$CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O [Ca_2Al(OH)_6] (SO_4)_{1/2}12H_2O$
Aluminate de calcium hydraté	C_4AH_x	$4CaO.Al_2O_3.xH_2O [Ca_2Al(OH)_6]OH.xH_2O$
Aluminate de calcium hydraté	C_2AH_8	$2CaO.Al_2O_3.8H_2O [Ca_2Al(OH)_6]Al(OH)_4 .8H_2O$
Katoïte	C_3AH_6	$3CaO.Al_2O_3.6H_2O$

II.3.1.2. Description granulométrique

Les divers types de ciment sont obtenus à partir de particules de granulométrie variées. Par exemple, le ciment à prise rapide est produit par broyage fin de particules généralement utilisées dans le ciment de Portland.

L'analyse de la taille des particules de ciment est complexe pour les raisons suivantes :

- La taille des particules est extrêmement variée de 100 μm à moins d'un micron.
- Les particules de ciment sont fortement agrégées à l'état sec. Elles doivent être dispersées correctement dans le but de réaliser les analyses les plus représentatives.
- Les particules de ciment ont une forme irrégulière et leur arrangement est inhomogène.

La figure II.6 montre la distribution granulométrique du ciment, qui donne le volume de particules en fonction de leurs tailles (diamètre).cette figure indique la présence de deux pics de volume pour les gammes de particules de 20 μm et de 5 μm .

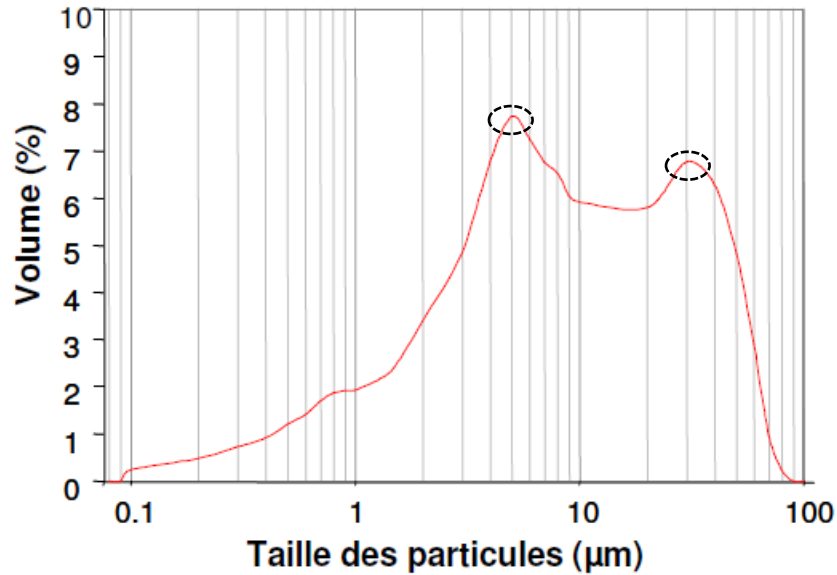


Figure.II.6 : Distribution granulométrique du ciment [38].

La figure II.7 représente une photographie d'un échantillon de ciment utilisé comme particule polluante qui sera injecté dans le précipitateur après plusieurs séries de tamisage, ce dernier sera bien expliqué dans la partie qui suit.



Figure.II.7 : Photographie du ciment utilisé.

Un exemple de répartition par taille des particules de ciment utilisé dans toutes nos expériences est illustré sur la figure.II.8. On peut y voir que la distribution par taille de particules ressemble à une loi log-normale avec un pic autour de 0,2 μm et 0,3 μm et où le nombre de particules est maximal.

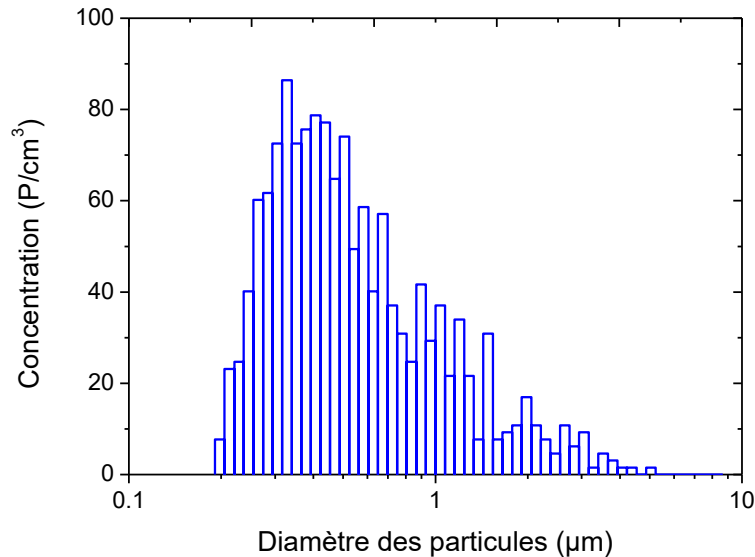


Figure.II.8 : Distribution granulométrique des particules de ciment utilisées.

II.4. Préparation de la poudre de ciment pour l'injection

L'utilisation d'un compteur de particule **Palas Welas 1000** pour mesurer l'efficacité et la distribution des particules a des inconvénients tel que l'intervalle de fonctionnement de cet instrument ainsi que pour l'encrassement des parois ce qui va créer un dysfonctionnement dans le processus de mesure. C'est pour ces causes qu'on a procédé à une série de tamisage afin de séparer les particules de ciment de manière représentative en plusieurs gammes de diamètre.

Le tamisage a été assuré par l'utilisation d'un tamis de marque OCTAGON-digital (Figure.II.9) et plusieurs étages de tamis avec différents diamètres allant de 32 μm jusqu'à 150 μm .



Figure .II.9 : Photographie du tamis utilisé dans les manipulations.

Les manipulations sont effectuées dans un laboratoire de chimie au niveau de l'institut Pprime sous une hotte pour aspirer les poussières ultra fines qui se dégagent de l'opération de tamisage afin d'éviter toute sorte de contamination et de pollution.

Les résultats de ces séries de tamisage de ciment sont représentés dans la figure.II.10:

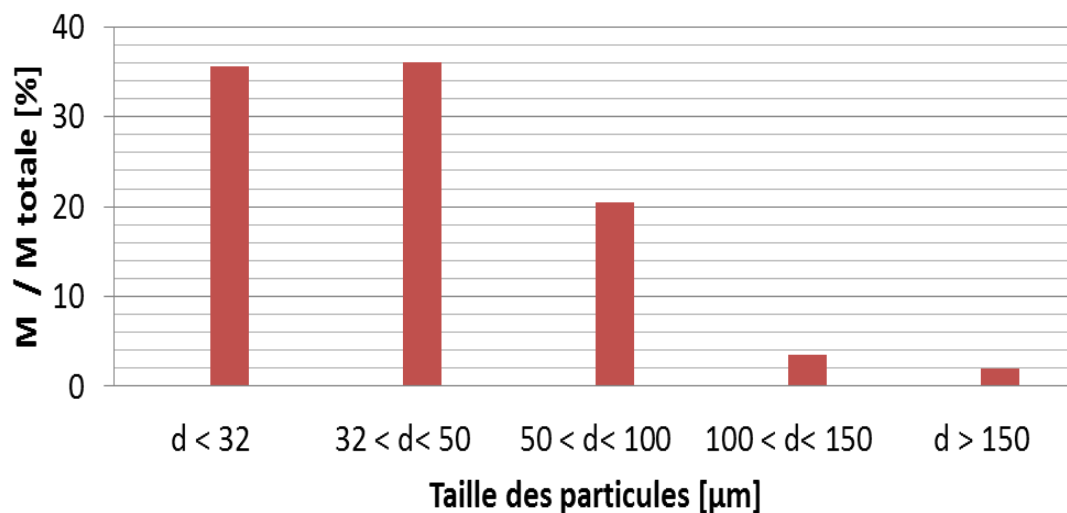


Figure .II.10 : Classification des masses des particules de ciment suivant leurs gammes de diamètres.

La figure .II.10 présente les résultats du tamisage du ciment on trouve une classification massique des particules de ciment suivant leurs diamètres, les particules fines de diamètre inférieur à 32 μm ($d < 32 \mu\text{m}$) représentent une quantité massique très importante par rapport aux grosses particules ($d > 150 \mu\text{m}$).

II.5. Calcul de la constante diélectrique du ciment

La constante diélectrique ϵ du matériau de particules de poussière affecte à la fois la quantité de charge de la saturation et le taux de charge instantanée sur les particules. En supposant que la matière particulaire est homogène, la constante diélectrique efficace du mélange solide peut être estimée à partir de ses constituants par la formule suivante [39]:

$$\epsilon_m^{1/3} = \sum_{i=1}^n v_i \epsilon_i^{1/3} \quad (\text{II.1})$$

Où ;

- v : la fraction de volume

Les densités et les constantes diélectriques des principaux constituants du ciment ϵ (collectées à partir diverses sources dans la littérature).le calcul de la constante diélectrique à partir d'une composition typique nous donne une constante estimé à environ 12 pour notre ciment utilisé et qui varie suivant la composition chimique choisie.

II.6. Protocole de mesure

Avant d'en venir au protocole de mesure proprement dit, précisons que nous procédons à la calibration du granulomètre avant toute série de mesure. L'appareil est calibré avec des particules mono-dispersées de Latex ayant un diamètre équivalent de 0,85 μm .

Le calcul de l'efficacité fractionnaire nécessite trois mesures de concentration : deux mesures électrofiltre à l'arrêt (ou mesures en amont) et une mesure électrofiltre en marche (ou mesure en aval). Etant donné que nous prenons deux mesures avec l'électrofiltre à l'arrêt, il faut qu'il y ait le plus petit écart entre elles pour des raisons de reproductibilité.

Ainsi donc, nous ne tolérons qu'un écart maximum de 10 % entre les deux mesures en amont. Par ailleurs, la concentration de particules pour une mesure en amont doit être comprise entre 2000 et 6000 particule/mesure.

Pour ce faire, il est essentiel d'opérer dans une fenêtre temporelle déterminée par la courbe de distribution granulométrique du ciment. Le respect de ce protocole en plus de quelques règles simples garantit une bonne reproductibilité des mesures. Parmi ces règles,

nous pouvons citer l'utilisation du même type de ciment ou encore l'exécution d'une campagne de mesure dans les mêmes conditions extérieures.

La figure II.11 montre la courbe d'évolution de la concentration du ciment dispersé par le topas. On y voit que la concentration de particules fluctue pendant les premières minutes de l'injection puis se stabilise pendant une durée relativement longue avant de chuter. Les mesures d'efficacité que nous effectuons sont relevées pendant la phase stable de l'injection (phase 2).

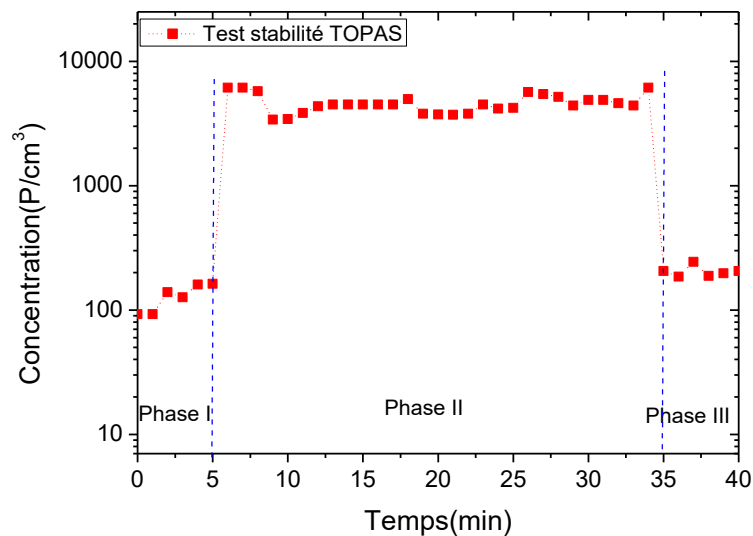


Figure .II.11 : Courbe d'évolution de la concentration du ciment dispersé par le topas

Sa durée varie légèrement d'une expérience à l'autre mais est de toute évidence assez longue pour effectuer une série de mesures sans avoir à ouvrir le générateur de particules. Nous laissons s'écouler les cinq premières minutes puis nous effectuons des mesures durant 30 minutes.

Une mesure d'efficacité dure au total environ 60 s réparties entre les trois mesures de concentration (Arrêt / Marche / Arrêt), à raison de 10 s par mesure et par intervalle de pause (figure III.12). Des mesures complémentaires ont montré que l'augmentation de la durée de la mesure au-delà de 10 s n'avait pas d'incidence majeure sur le résultat final.

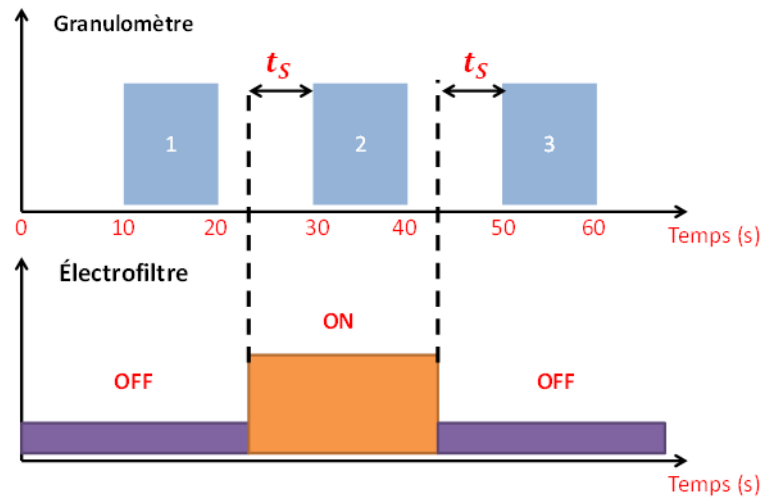


Figure .II.12 : Schéma illustratif du protocole de mesure de l'efficacité de collecte (t_s est le temps nécessaire pour la stabilisation de la concentration).

La notion conventionnelle d'efficacité de collecte des particules de masse / volume n'est pas adaptée au cas des particules submicroniques. Dans cette étude, l'efficacité de collecte en termes de nombre / volume est considérée. L'efficacité de collecte (η) est définie comme suit :

$$\eta(\%) = \left[1 - \frac{N_{On}}{N_{Off}} \right] \cdot 100 \% \quad (\text{II.2})$$

Où ;

- N_{On} : le nombre de particules par cm^3 pour toutes les classes dans le cas de présence de la décharge couronne
- N_{Off} : le nombre de particules par cm^3 pour toutes les classes dans le cas d'absence de décharge couronne

II.7. Comsol multiphysics

II.7.1. Présentation

La simulation numérique est devenue un élément nécessaire dans les domaines des sciences et de l'ingénierie. Elle permet la compréhension et la modélisation du fonctionnement des systèmes physiques réels.

Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques utilisant différents outils mathématiques dont la technique des éléments finis ou la méthode des différences finies. La simulation numérique permet d'étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

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

Différents modules physiques existent sous Comsol, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures, les équations mathématiques, plasma, optimisation, trajectoires des particules. Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est un des points forts de ce logiciel.

On trouve également un ensemble de modèles pour les EDP classiques : équation de Laplace, équation de Poisson, équation d'onde, équation de Helmholtz, équation de la chaleur et équation de type convection-diffusion.

Ce logiciel contient des outils de maillage automatique et semi-automatique, dont le maillage tétraédrique libre et le maillage extrudé. L'algorithme par défaut génère automatiquement un maillage tétraédrique pour les solides, et une combinaison maillage tétraédrique et du maillage extrudé pour les fluides.

On peut également définir une séquence de maillage pour contrôler la séquence de création du maillage. Une séquence de maillage permet d'utiliser conjointement des éléments tétraédriques, prismatiques ou hexaédriques et elle peut être pilotée par paramètres. De plus on trouve même des maillages qui correspondent à des physiques (plasma, CFD) bien définies.

COMSOL Multiphysics fait appel aux méthodes d'analyse numérique à la pointe de la technologie pour créer et résoudre les modèles. Les modules complémentaires utilisent différentes méthodes, comme la méthode des éléments finis, la méthode du volume fini, la méthode des éléments de frontière et les méthodes de suivi des particules, mais COMSOL Multiphysics privilégie la méthode des éléments finis, qui autorise des couplages multiphysiques illimités, et ceci est un élément de différenciation unique de COMSOL Multiphysics [40], la figure II.13 montre l'interface globale de ce logiciel.

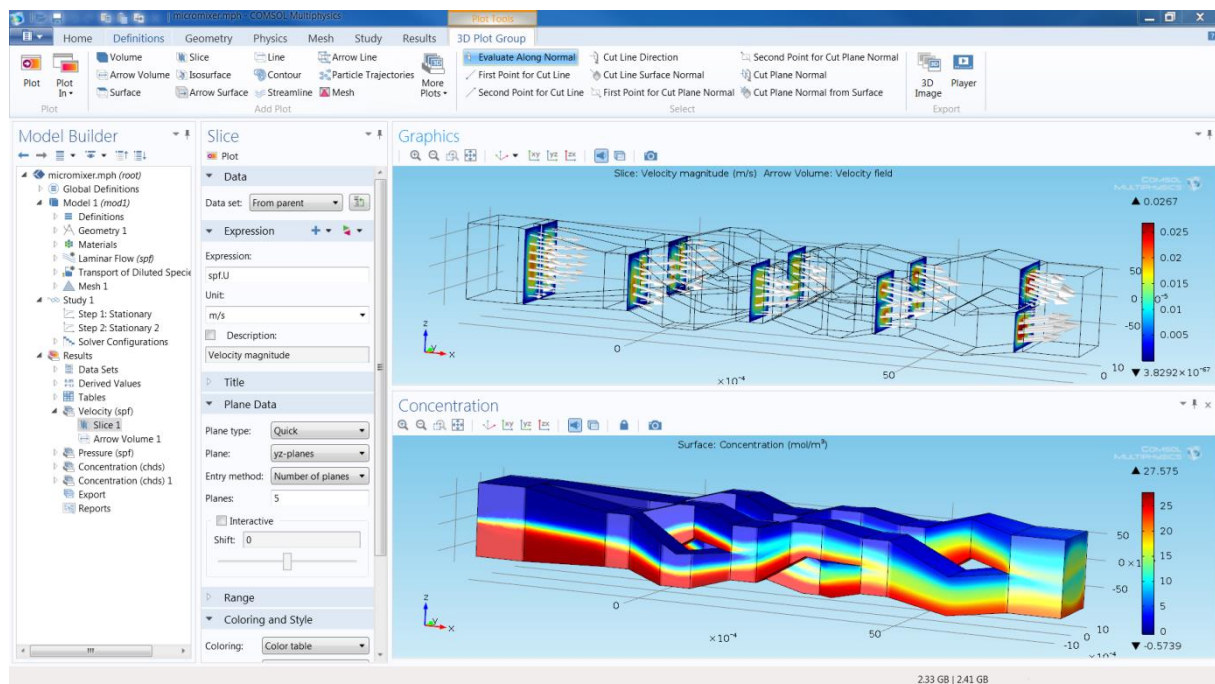


Figure II.13 : Interface de travail du Comsol multiphysics

Le processus de modélisation et de simulation numérique sous Comsol Multiphysics nécessite plusieurs étapes :

- ✓ La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- ✓ La définition de sa géométrie soit en 1D ou en 2D ou en 3D.
- ✓ La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.

- ✓ Implantation des conditions aux limites qui dépendent de la physique utilisée.
- ✓ Maillage
- ✓ La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- ✓ La visualisation des résultats.

II.8. Méthode des éléments finis MEF

La méthode des éléments finis a pris un départ considérable avec le développement des moyens informatiques. Dès les années 1960, elle est devenue fréquente, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, cette méthode numérique est indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles [41].

II.8.1.Principe de la méthode

La plupart des problèmes de physique peuvent se formuler ainsi : trouver un champ (scalaire, vectoriel et tensoriel) $u(x, t)$ satisfaisant à un ensemble d'équations aux dérivées partielles et d'équations ordinaires en tout point x d'un domaine Ω à tout instant t ,

$$P(u(X, t)) = 0, X \in \Omega \quad (\text{II.3})$$

Respectant des conditions aux limites (éventuellement fonction du temps) sur la frontière $\partial\Omega$ de ce domaine par exemple du type $\partial\Omega = (\partial\Omega_D \cup \partial\Omega_N)$:

$$\begin{cases} u(X, t) = u_{\partial\Omega_D}, X \in \partial\Omega_D \\ \frac{\partial}{\partial n} u(X, t) = u_{\partial\Omega_N}, X \in \partial\Omega_N \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

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

$$\sum_{i=1}^n \Omega_i = \Omega \quad (\text{II.5})$$

$$\forall (i, j) \in \llbracket 1, n \rrbracket^2 = (i \neq j) \rightarrow (\widehat{\Omega}_i \neq \widehat{\Omega}_j) \quad (\text{II.6})$$

Où ;

- $\widehat{\Omega}_i$ désigne l'intérieur de Ω_i .

Autrement dit, les Ω_i sont une partition de Ω comme illustré par la figure .II.14.

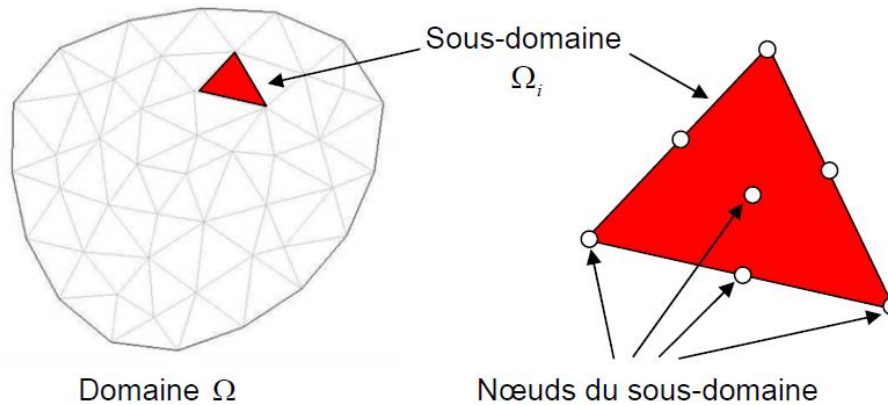


Figure II.14 : Représentation du domaine discrétisé Ω et d'un de ses sous-domaines

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

Le champ dans chaque sous-domaine Ω_i est déterminé par un nombre fini de valeurs de ce champ (ou valeurs de ses dérivées) en des points choisis arbitrairement dans le sous-domaine appelés nœuds. Le champ local est une interpolation entre les valeurs aux nœuds. Le sous-domaine muni de son interpolation est appelé élément.

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

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

1. On se pose un problème physique sous la forme d'une équation différentielle ou aux dérivées partielles à satisfaire en tout point d'un domaine Ω , avec des conditions aux limites sur la frontière $\partial\Omega$.

2. On construit une formulation intégrale du système différentiel à résoudre et de ses conditions aux limites : c'est la formulation variationnelle du problème ;
3. On divise Ω en sous-domaines : c'est le maillage. Les sous-domaines sont appelés mailles ;
4. On choisit la famille de champs locaux, c'est-à-dire à la fois la position des nœuds dans les sous-domaines et les polynômes (ou autres fonctions) qui définissent le champ local en fonction des valeurs aux nœuds (et éventuellement des dérivées). La maille complétée par ces informations est alors appelée élément ;
5. On ramène le problème à un problème discret. La solution approchée est entièrement déterminée par les valeurs aux nœuds des éléments.

Le problème fondamental de la MEF peut se résumer en deux questions :

- a. Comment choisir le problème discret dont la solution est proche de la solution exacte?
 - b. Quelle signification donner au terme exact ?
6. On résout le problème discret : c'est la résolution ;
 7. On peut alors construire la solution approchée à partir des valeurs trouvées aux nœuds et en déduire d'autres grandeurs : c'est le post-traitement ;
 8. On exploite la solution pour juger de sa qualité numérique. Les étapes de 1 à 5 sont souvent rassemblées sous le nom de prétraitement.

Actuellement, le travail de ces différentes étapes est assisté par un grand nombre de logiciels comme le Comsol multiphysics. Il reste que pour maîtriser leur utilisation, il est indispensable de comprendre les fondements de la méthode, notamment les étapes 3 et 4, ne serait-ce que pour choisir en toute connaissance de cause parmi les options que ces logiciels proposent [42].

II.8.2. La méthode variationnelle

Sans le démontrer, nous acceptons le théorème de l'analyse fonctionnelle suivant :

$$\left[\forall \beta(X) : \int_{\Omega} \beta(X) h(X, t) dv(X) = 0 \right] \leftrightarrow (\forall X \in \Omega : h(X, t) = 0) \quad (\text{II.7})$$

Où $\beta(X)$, $h(X, t)$ et Ω doivent satisfaire certaines conditions de régularité qu'on n'explicitera pas ici. Résoudre l'équation différentielle (III.3) est donc équivalent à chercher $u(X, t)$ tel que :

$$\int_{\Omega} \beta(X) P(u(X, t)) dv(X) = 0 \quad (\text{II.8})$$

Avec les conditions aux limites (équation .III.4). Cette formulation est une formulation variationnelle du problème. On peut trouver d'autres formulations équivalentes à (équation.III.8) déduites par des transformations mathématiques (par intégration par parties par exemple, où la formulation sera dite faible).

II.8.2.1. Discrétisation de la formule variationnelle

Le principe de l'approximation par éléments finis est le suivant : On définit la formulation variationnelle que l'on cherche à satisfaire avec les u déterminés par les valeurs aux nœuds. Il va de soi que ce problème n'a généralement pas de solution si l'on conserve la condition absolue $\forall \beta(X)$ (à moins que l'on cherche la solution exacte).

On ne vérifie donc cette équation que pour certains $\beta_i(X)$ uniquement. A chaque $\beta_i(X)$ correspond une équation scalaire fonction des valeurs aux nœuds. Il suffit de les choisir (linéairement) indépendantes et en nombre n égal au nombre d'inconnues.

Les fonctions $\beta_i(X)$ sont appelées fonctions test ou encore fonctions de pondération. On est ainsi ramené à résoudre un système algébrique de n équations à n inconnues. Si l'opérateur P est linéaire, le système d'équations obtenu suite à cette discrétisation est également linéaire. Si en revanche, il est non linéaire, une méthode de linéarisation itérative, telle la méthode Newton-Raphson ou la méthode de Douglas, est utilisée.

Il existe une infinité de manières de choisir les n $\beta_i(X)$. Chacune d'entre elles engendre une variante de la MEF et chacune aboutit à une solution approchée différente. La seule condition impérative est que le choix des $\beta_i(X)$ conduise à un système algébrique régulier (à solution unique). Des théorèmes d'analyse numérique suggèrent certains choix pour lesquels la solution approchée \tilde{u} est garantie unique et convergente vers la solution exacte quand le maillage se raffine [42].

Pour un problème mono-dimensionnel, la fonction test chapeau (linéaire par morceaux, voir figure.II.15) satisfait souvent à ces contraintes, mais des fonctions plus élaborées (polynomiales en général) peuvent tout aussi bien être utilisées.

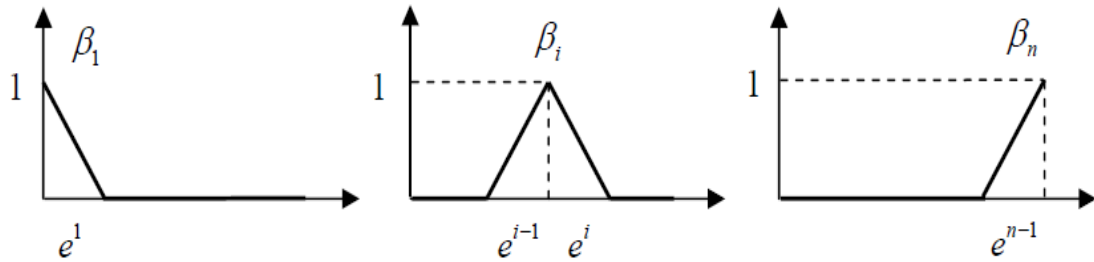


Figure.II.15 : La fonction test $\beta_i(X)$ et le sous-domaine Ω_i auquel elle correspond forment l'élément e^i . On vérifie que ces fonctions test sont indépendantes par paires.

La construction du système d'équations algébriques à résoudre s'appelle assemblage. Les choix faits précédemment (les fonctions test et les fonctions d'interpolation) conduisent à un système d'équations non symétrique en général.

Afin d'obtenir des systèmes symétriques (pour lesquels on dispose d'algorithmes numériques de résolution plus efficaces) l'on utilise des fonctions test identiques aux fonctions d'interpolation ; c'est la méthode de Galerkin.

II.9. Présentation des différents modules utilisés

La résolution de la simulation des trajectoires des particules nous a poussé à passer par plusieurs étapes qui sont :

- a. La simulation de la décharge couronne dans une configuration axisymétrique (fil-cylindre) pour voir l'effet du champ poissonnien sur la trajectoire. Notre objectif était de modéliser le phénomène électrostatique en présence de la charge d'espace ce qui a nécessité de résoudre les équations de maxwell en utilisant les module PDE's et aussi le module électrostatique pour visualiser le champ Laplacien.
- b. La simulation de l'écoulement laminaire incompressible où le choix a été fait pour faciliter la simulation et la rendre plus cohérente au moyen de calcul. Cette modélisation est assurée par l'utilisation du module CFD (CFD Module).
- c. La Résolution du Suivi de Particules ou la trajectoire de particules dans un environnement où le champ électrostatique est présent est faite par le module de suivi des particules (Particle Tracing Module).

II.9.1. Module PDE's

Comsol Multiphysics facilite la tâche de résolution des systèmes équations différentielles partielles de second ordre (PDE) dans l'espace soit stationnaire ou dépendante du temps dans un, deux et trois dimensions.

Pour le cas de notre simulation on a utilisé la forme générale PDE (g) représenté par les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{ll} e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \Gamma = f & \text{dans } \Omega \quad (\text{II. 9}) \\ -n \cdot \Gamma = G + \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^T \mu & \text{Sur } \partial\Omega \quad (\text{II. 10}) \\ 0 = R & \text{Sur } \partial\Omega \quad (\text{II. 11}) \end{array} \right.$$

Où la première équation est une équation différentielle partielle, la deuxième et la troisième sont les conditions aux limites de Newman et Dirichlet respectivement.

Les termes Γ , F , G et R sont des coefficients. Ils peuvent être les coordonnées des fonctions de l'espace, la solution u , et les dérivés spatiaux de u . Les coefficients f , g , et R sont des scalaires, alors Γ est le vecteur de flux. L'indice supérieur «T» dans la condition limite de Neumann désigne la transposée. La μ variable est un multiplicateur de Lagrange.

II.9.2. Module AC/DC

Le module AC/DC permet de simuler le champ électrique, magnétique et électromagnétique dans des applications statiques et à basses fréquences. Les applications type concernées sont les condensateurs, les inducteurs, les isolateurs, les bobines, les moteurs, les actionneurs et les capteurs. Le module comporte des outils spécialisés pour extraire automatiquement des simulations les valeurs de paramètres tels que la résistance, la capacitance, l'inductance, l'impédance, la force et le couple.

La méthode de travail de base de ce module et les autres modules cités dans cette section est décrite par les étapes suivantes : inspirer la géométrie, choisir les matériaux, sélectionner une interface AC/DC appropriée, définir les limites et les conditions initiales, créer automatiquement le maillage des éléments finis, résoudre et visualiser les résultats.

Le sous-module ou l'interface électrostatique du module AC/DC a été utilisé afin de calculer le champ électrique (Laplacien) dans la géométrie de notre précipitateur [40].

La figure.II.16 Représente un exemple typique de l'interface du module AC/DC où ils sont mentionnées les différentes composantes de ce dernier tel que la fenêtre graphique, le model builder et les fenêtres de visualisation des résultats.

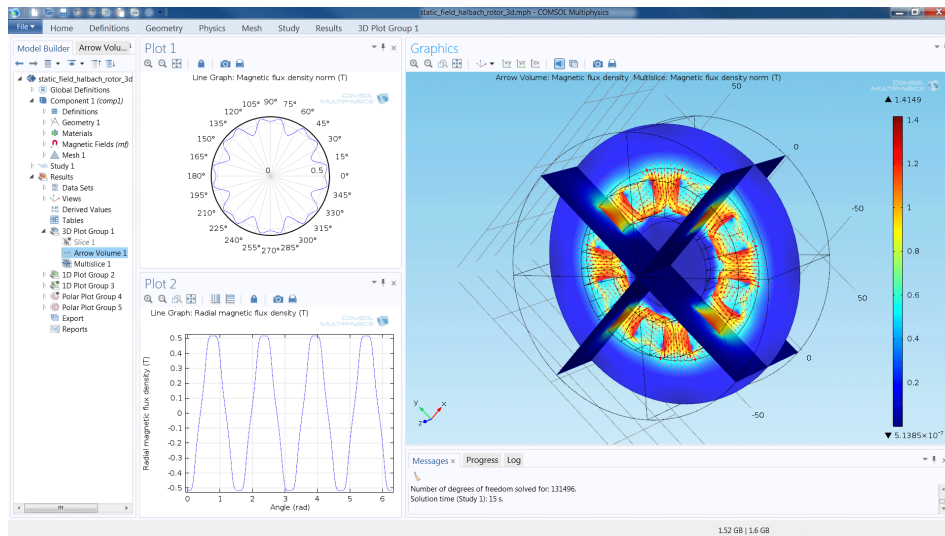


Figure .II.16 : Exemple de l'interface du module AC/DC.

II.9.3. Module écoulement de fluide (CFD module)

Le module CFD constitue une base de simulation de composants et de systèmes impliquant des écoulements, des plus simples aux plus complexes. A l'instar de tous les autres modules de la suite de produits COMSOL, le CFD Module propose des interfaces physiques prêtes à l'emploi, où l'utilisateur précise les données d'entrée de son modèle.

Les interfaces physiques propres au Module CFD permettent de modéliser la plupart des écoulements, comme les écoulements compressibles et incompressibles ou poreux, etc. le tout dans les régimes d'écoulement laminaire ou turbulent, représenté par la figure.II.17.

Le Module CFD est un outil de simulation en mécanique des fluides (plus couramment CFD, en anglais Computational Fluid Dynamics). Ce module contient plusieurs interfaces qui sont [40] :

- Ecoulement monophasique
- Ecoulement compressible
- Ecoulement diphasique
- Ecoulement en milieu poreux
- Machines tournante
- Ecoulement en couche mince

- Ecoulement à travers des filtres
- Ecoulement des fluides et transfert de chaleur
- Ecoulement réactif

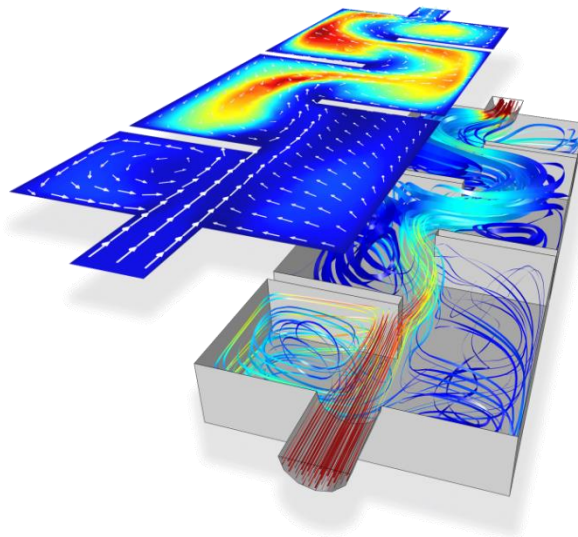


Figure .II.17 : Exemple du module CFD « Comparaison de l'écoulement dans une approximation 2D d'un modèle 3D de réacteur turbulent avec déflecteur».

II.9.4. Module de suivi des particules (particles tracing)

Le Module de suivi des particules (Particle Tracing) donne un plus aux fonctionnalités du COMSOL pour permettre à ce dernier de calculer les trajectoires des particules dans un liquide ou un gaz sous l'effet du champ électrique ou magnétique, notamment dans le cadre d'interactions particule-particule et particule-champ. Les particules peuvent ou non avoir une masse. Leur mouvement est régi par les lois de Lagrange, Newton et Hamilton tirées de la mécanique classique.

Des conditions aux limites peuvent être appliquées aux particules sur les parois de la géométrie afin de laisser les particules s'immobiliser, adhérer, rebondir, disparaître et se réfléchir. On peut définir des conditions aux parois où la vitesse des particules après une collision est typiquement une fonction de la vitesse des particules incidentes et du vecteur normal aux parois.

Des particules secondaires, libérées lorsque les particules incidentes heurtent une paroi, peuvent être définies. Le nombre de particules secondaires et leur fonction de

distribution de la vitesse peuvent être des fonctions de la vitesse des particules primaires et de la géométrie des parois.

Les particules peuvent aussi adhérer à une paroi selon une expression arbitraire ou une probabilité de collision. Il est également possible d'ajouter d'autres variables au modèle pour calculer des quantités, telles que la masse, la température ou la rotation des particules. La figure II.18 représente un exemple de suivi de particules sous l'effet du champ électrique pour un ensemble de buses d'injection [40] :

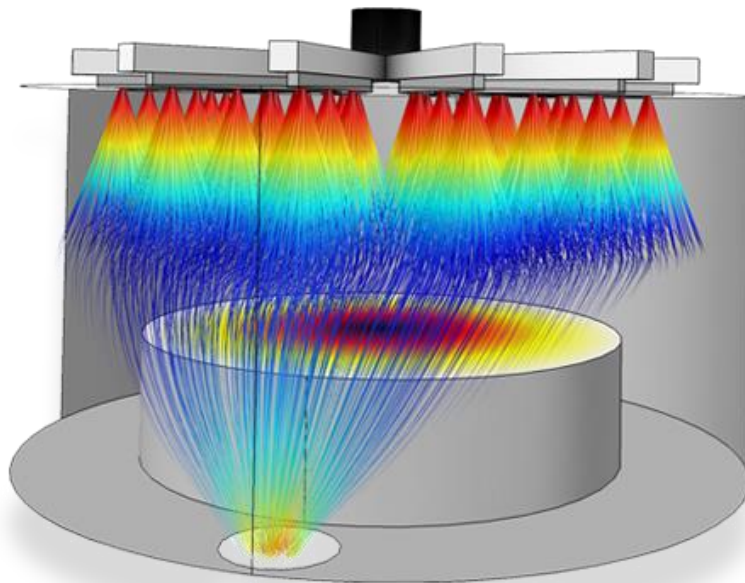


Figure .II.18 : Exemple du module suivi de particules d'un ensemble de buses d'injection.

Ce module est un outil de traitement permettant une visualisation très précise des trajectoires calculées des particules. Celles-ci sont représentées par des points, des queues de comète, des lignes ou des tubes, visualiser des animations directement dans l'interface graphique qui peuvent être exportées dans des fichiers. Si les trajectoires de nombreuses particules sont simulées, il est possible de les filtrer en définissant une expression logique. Le comportement de groupes des particules peut être projeté sur une dimension plus petite et visualisé à l'aide de cartes de Poincaré ou de portraits de phase.

De plus, des opérations appliquées aux particules pour calculer et tracer les valeurs maximales, minimales, moyennes ou entières de certaines quantités sur toutes les particules. Les données de trajectoire des particules sont évaluées et enregistrées dans un tableau de résultats. La visualisation des distributions de vitesse et d'énergie des particules est représentée à l'aide d'histogrammes 1D ou 2D [40].

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu sur le banc expérimental et ces différentes parties tel que l'alimentation haute tension et le système d'injection de particules de ciment ainsi les différents instruments de mesure (multimètre, anémomètre, compteur de particule) en évoquant les caractéristiques techniques et les principes de fonctionnement de ces derniers.

Les particules de ciments utilisés pour alimenter le système d'injection de pollution sont issues de plusieurs compagnies de tamisage dont on alimente notre système par des particules de diamètre inférieur à $32\mu\text{m}$ pour respecter la gamme de mesure du compteur de particule et aussi pour éviter l'encrassement des parois du walas.

En outre, La validation de la mesure de l'efficacité est assurée par une série de trois mesures dans un intervalle de temps afin de comparer les différentes concentrations de particules dans notre précipitateur pour les trois cas ON-OFF-ON.

De plus on présente de brèves notions sur le logiciel Comsol multiphysique utilisé pour notre simulation dans lesquelles on a cité la méthode des éléments finis qui est utilisée dans les calculs, ainsi que les différentes étapes de la simulation et les différents modules que nous avons utilisés dans notre modélisation.

Les détails de notre modélisation vont être abordés dans le chapitre IV, en évoquant la géométrie, les conditions aux limites, le maillage et les résultats.

Chapitre III

Modélisation et simulation des trajectoires des particules

Chapitre III

Modélisation et simulation des trajectoires des particules

III.1. Introduction

Afin de comprendre les phénomènes physiques quel que soit leur nature (chimique ou électrique, mécanique) on doit présenter un modèle mathématique ou théorique pour modéliser et faciliter la compréhension de certains phénomènes qu'on observe dans la pratique dont on n'arrive pas à trouver des explications physiques à ces derniers.

L'objectif de ce travail est le développement d'un code de calcul pour la simulation du champ électrique est la clé de la modélisation du fonctionnement d'un filtre électrostatique, dans cette partie la modélisation numérique de la configuration de décharge couronne de type file cylindre dissymétrique (asymétrique). Le code Comsol Multiphysics-5.0[®] basé sur la méthode des éléments finis a été utilisé.

Dans le problème qui nous intéresse, la détermination du potentiel pour une distribution de charge donnée est assez facile car mathématiquement, les conditions aux limites associées à l'équation de Poisson sont bien connues. Par contre il y a une difficulté en ce qui concerne le choix des conditions aux limites à associer à l'équation de conservation de la charge.

Dans les études disponibles pour des configurations simples bidimensionnelles, les auteurs ont utilisé la loi de Peek pour fixer, comme condition aux limites qui concerne cette équation de conservation de la charge, la valeur du champ électrique sur le fil. Mais une telle condition est valable seulement pour un simple fil.

Nous rappellerons que le problème du champ électrique modifié par une charge d'espace injectée est mathématiquement bien posé lorsque l'on impose comme autre condition aux limites la donnée de la densité de charge volumique sur l'électrode injectrice.

Dans ce chapitre on commence par la définition précise du problème puis on présente la méthode numérique et les hypothèses utilisées pour résoudre l'équation de conservation de la charge et l'équation de Poisson. Ces définitions seront suivies par le modèle théorique ainsi que les conditions aux limites

L'estimation du champ électrique et la distribution de densité de courant dans l'espace inter-électrodes est compliquée en raison de la présence du phénomène de décharge en couronne.

Le calcul analytique de la densité de charge d'espace ne peut être élaboré que pour des arrangements particuliers dans certaines hypothèses simplificatrices [43].

Le calcul de distribution de densité champ électrique et la charge peut être fait en utilisant plusieurs modèles comme la méthode des différences finies [44], la méthode des éléments de frontière avec la méthode des caractéristiques (MOC) [45], élément de frontière combinée avec la méthode des différences finies [46] et un modèle qui combine des différences finies et éléments finis, la technique de simulation de charge (CSM) [47].

Dans cette modélisation de la décharge couronne monopolaire, le champ électrique est résolu par une technique combinée basée sur le Laplace et les équations de Poisson. L'hypothèse de Kaptzov (limité à la zone de l'électrode de fil où la décharge couronne est présente fortement) est approximativement satisfaite par l'introduction d'une loi d'injection, ce qui donne la densité de charge d'espace injecté en fonction du champ local [27].

Notre modèle contient tous les phénomènes importants qui affectent le processus de précipitation électrostatique: champ électrique, la densité de charge d'espace, et la dynamique d'écoulement des particules et même leurs trajectoires.

Les valeurs calculées sont comparées à celles obtenues expérimentalement afin d'évaluer la précision des résultats issues de la simulation. Les caractéristiques courant-tension calculées sont comparées à celles mesurées effectuées sur un précipitateur électrostatique de laboratoire ESP en configuration asymétrique fil-cylindre.

Par ailleurs, l'efficacité de la collecte issue à partir de l'étude expérimentale est comparée à l'efficacité calculée par simulation. Enfin la trajectoire des particules est effectuée à partir de la simulation afin de mieux comprendre les phénomènes qui affectent le fonctionnement du précipitateur électrostatique.

III.2. Hypothèses et approximations

III.2.1. Approximation de Deutsch

Pour des applications technologiques, Deutsch est l'initiateur des hypothèses simplificatrices pour résoudre le problème de décharge dans l'espace inter-électrodes. Il suppose que [48,49] :

- La charge d'espace générée par la décharge couronne affecte seulement l'amplitude et non la direction du champ électrique.
- La densité de la charge d'espace est constante dans la région inter-électrode.
- Le champ électrique sur l'électrode passive n'est pas affecté par la présence de la charge d'espace, c'est à dire il garde sa valeur Laplacienne.

La première approximation est largement utilisée et discutée pendant plusieurs années et dont la validité est restée pendant longtemps en doute. Elle est connue sous le nom de "*première approximation de Deutsch*".

III.2.2. Approximation de Popkov

Popkov a repris les travaux de Deutsch en 1949. Il garde la première approximation et a apporté d'autres approximations supplémentaires dont :

- La région inter-électrode est constituée uniquement d'une charge d'espace monopolaire (la zone d'ionisation est négligée).
- La mobilité des ions est constante.
- La diffusion thermique des ions est négligée.
- Le champ électrique à la surface de l'électrode active demeure à sa valeur seuil.

III.2.3. Approximation de Kaptsov

L'augmentation de la tension appliquée, c'est à dire l'augmentation du champ électrique conduit immédiatement à l'accroissement de la densité de la charge d'espace tendant à réduire le champ électrique à la surface de l'électrode active.

Ces effets contradictoires équilibrent le champ à sa valeur seuil et, comme première approximation, le champ électrique à la surface de l'électrode active est supposé indépendant de la tension appliquée au-delà de la tension seuil.

Cette invariance du champ est souvent utilisée dans les modèles numériques proposés jusqu'à nos jours. Elle est connue sous le nom de "*supposition de Kaptsov*".

La validité de cette approximation n'est pas justifiée dans le cas des électrodes de faibles rayons de courbures ($2R < 1 \text{ mm}$). Cependant, l'accroissement du champ est faible dans le cas des électrodes de diamètre $2R > 1 \text{ mm}$ [48,49].

Pour le cas de notre simulation, nous avons appliqué l'hypothèse de kaptzov afin de simuler le champ électrique en présence de la charge d'espace alors on a supposé que :

- La décharge couronne est uniforme.
- Une seule espèce d'ions est injecté par la couronne de la zone d'ionisation à la zone de dérive.
- Le champ électrique à la surface de l'électrode active demeure à sa valeur seuil
- La décharge couronne est constante et mono polaire.
- La mobilité des ions (μ_0) est constante et indépendante du champ électrique.
- La diffusion thermique des ions est négligée.

III.3. Equations et conditions aux limites

III.3.1. Modèle mathématique

Lorsqu'un potentiel électrique est appliqué entre les deux électrodes, une charge d'espace est formée et un courant électrique circule en continu entre les deux électrodes. La tension appliquée et la charge d'espace contribuent à la génération d'un champ électrique de forte intensité entre les électrodes.

Dans l'air, la description mathématique du champ monopolaire ionisé est gouvernée par l'équation de Poisson [47,50]. :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_c}{\epsilon_0} \quad (\text{III.1})$$

Où ;

- E : est le champ électrique.
- ρ_c : la densité de charge d'espace (C.m^{-3})
- ϵ_0 : la permittivité diélectrique de l'air.

Le potentiel électrique est défini à partir de l'intensité du champ électrique, comme suit :

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (\text{III.2})$$

Les ions chargés sont accélérés sous l'effet des forces de Coulomb dans le champ électrique et se déplacent vers l'électrode de masse dans la zone de dérive. Les charges créent un courant électrique dont la densité (\vec{J}) résulte de la contribution de la conduction ($\mu_i \rho_c$) (mouvement des ions sous champ électrique par rapport à l'écoulement d'air), la convection ($\rho_c \vec{U}$) (transport de charges avec l'écoulement d'air), et de la diffusion ($D_n \nabla \rho_c$) [51, 52].

$$\vec{J} = \mu_i \rho_c \vec{E} + \rho_c \vec{U} - D_n \nabla \rho_c \quad (\text{III.3})$$

Où ;

- J : est la densité de courant est le vecteur de vitesse du gaz,
- μ_i : est la mobilité ionique et
- D_n : est le coefficient de diffusion de charge.

Il s'avère que la diffusion des ions est négligeable par rapport à la conduction [52]. Le déplacement des charges par l'écoulement d'air est aussi un phénomène qui peut être négligé [53]. et l'équation se simplifie comme suit [54] :

$$\vec{J} = \mu_i \rho_c \vec{E} \quad (\text{III.4})$$

L'équation de la conservation de la densité de courant à l'état stationnaire est donnée par :

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (\text{III.5})$$

Les équations couplées de décharge couronne sont résolues en utilisant la forme générale des équations aux dérivées partielles de la distribution du potentiel électrique et la conservation de la charge. Une loi d'injection est introduite pour satisfaire l'hypothèse de Kaptzov. Le champ électrique critique E_0 peut être calculé à partir du critère analytique d'ionisation en utilisant l'équation de Peek [55, 56].

La dynamique de fluide pour le flux d'air à l'état incompressible est décrite en utilisant les équations de Navier-Stokes et l'équation de continuité (conservation de la masse) [54, 57] :

$$\rho_{air} \vec{U} \cdot \nabla \vec{U} = -\nabla p + \mu_{air} \nabla^2 \vec{U} - \rho_{air} \nabla V \quad (\text{III.6})$$

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (\text{III.7})$$

Où ;

- ρ_{air} est la densité d'air
- p : est la pression d'air et
- μ_{air} : est la viscosité dynamique de l'air.

Les équations (4) - (9) sont soumises à des conditions aux limites appropriées pour le cas d'un précipitateur électrostatique dans une configuration asymétrique fil-cylindre. La migration des particules est régie par l'équation ci-dessous [20]:

$$m_p \frac{d\vec{w}}{dt} = \vec{F}_e + \vec{F}_d \quad (\text{III.8})$$

Où ;

- \vec{F}_e : est la force de Coulomb.
- \vec{F}_d : est la force de traînée.
- \vec{w} : est la vitesse de la particule.
- m_p : est la masse de la particule.

Dans ce travail, l'effet de la force de gravité sur le mouvement des particules est négligé. La force électrique est donnée par l'équation [20]:

$$\vec{F}_e = q_p \vec{E} \quad (\text{III.9})$$

Où ;

- q_p : est la charge de particules qui augmente avec le temps de séjour.

Le choix de la théorie de charge des particules est un point critique dans ce travail de simulation. A l'intérieur d'un précipitateur électrostatique les particules sont chargées par deux mécanismes différents: le mécanisme de charge par champ due aux ions présents dans le gaz qui se déplaçant le long des lignes de champ, peuvent atteindre la surface de la particule. Le mécanisme de charge par diffusion provoquée par les ions de diffusion [20].

Le mécanisme de charge des particules dépend de leurs tailles. Pour les grosses particules ($> 1 \mu\text{m}$), le mécanisme de charge par champ est plus important. La théorie de charge est développée en 1932 par M. Pauthenier et M. Moreau-Hannot [58]. Ce processus dépend éventuellement du champ électrique appliqué et les propriétés des particules. Le mécanisme de charge par diffusion est dominant pour les petites particules ($< 0,1 \mu\text{m}$).

De nombreuses théories sont élaborées pour décrire ce processus tels que N. A. Fuchs [59, 60] et HJ White [21].

Cependant, certains chercheurs ont développé des modèles pour combiner entre les deux mécanismes, afin d'évaluer la charge des particules comprise entre 0,1 et 1 μm où la fois le mécanisme de la charge par champ et par la diffusion prend place, par exemple, on peut trouver les modèles de Cochet [61], Smith et McDonald [62] et Lawless et Altman [63].

Dans ce travail, pour des raisons de simplicité, nous considérons que le diamètre des particules est de l'ordre de 1 μm . Par conséquent, la contribution du mécanisme de la charge par diffusion peut être ignorée dans le modèle numérique.

La valeur maximale de la charge (q_p^s) peut être obtenue à partir du mécanisme de charge par champ (taille des particules $\gg 0,1 \mu\text{m}$) et de la charge des particules en fonction du temps sont données par les équations de Pauthenier [58] :

$$q_p^s = 3\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon_r}{\epsilon_r + 2} d_p^2 E \quad (\text{III.10})$$

$$q_p = q_p^s \left(\frac{t}{t + \tau_f} \right) \quad (\text{III.11})$$

Où ;

- d_p : est le diamètre de la particule
- ϵ_r : la permittivité relative de la particule),
- τ_f : est le temps de charge donné par l'équation suivante:

$$\tau_f = \frac{4\epsilon_0}{\mu_i \rho_c} \quad (\text{III.12})$$

La force de traînée \vec{F}_d , représente la force de l'air qui s'oppose au mouvement des particules dans un écoulement et agit comme un frottement, donnée par l'équation suivante [20]:

$$\vec{F}_d = \frac{1}{2} C_d \cdot S_P \cdot \rho_{air} \cdot V_{rel} \cdot \vec{V}_{rel} \quad (\text{III.13})$$

Où ;

- V_{rel} : est la vitesse relative de la particule par rapport au gaz
- C_d : est le coefficient de traînée donné par la formule suivante (pour $d_p \ll 20 \mu m$ [6]):

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad (III.14)$$

Où ;

- Re_p : est le nombre de Reynolds de la particule.
- S_p : est la section de la particule interceptée par le gaz donné par l'équation suivante:

$$S_p = \frac{\pi}{4} (d_p)^2 \quad (III.15)$$

III.4. Conditions aux limites

III.4.1. Partie électrostatique

La géométrie du domaine de la simulation et les conditions aux limites des variables calculées sont présentées à la Figure. III.1.

L'équation de Poisson est résolu dans le domaine avec deux conditions aux limites de type Dirichlet:

- La tension du fil actif est égale à la tension appliquée $V_{\text{wire}} = V_{\text{appliquée}}$.
- La tension au niveau du cylindre est fixée à zéro $V_{\text{cylindre}} = 0$.

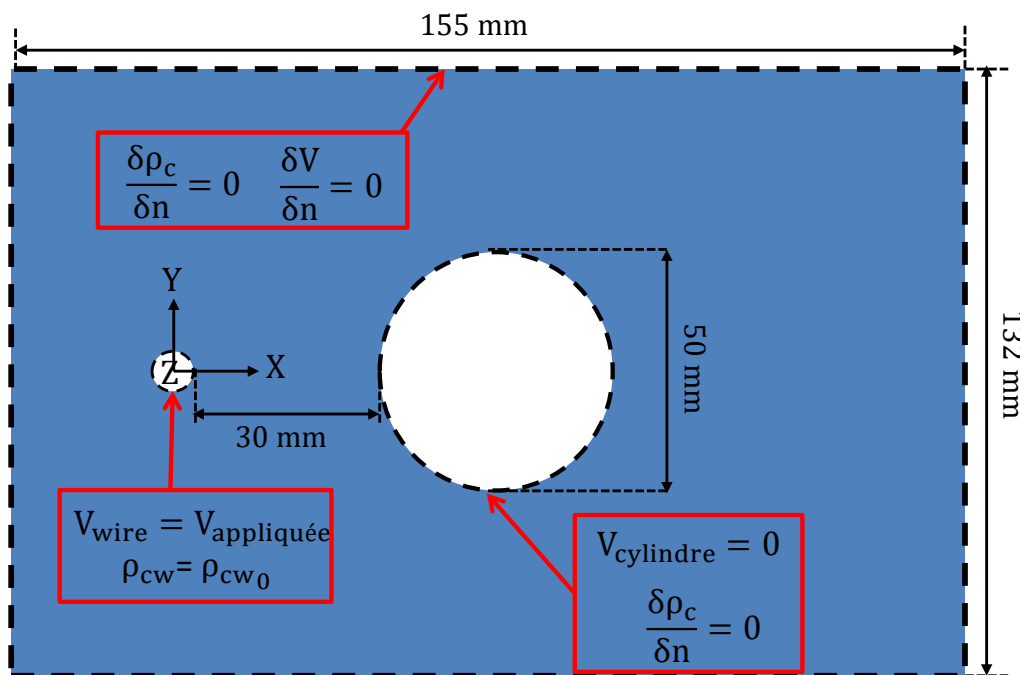


Figure.III.1 : Domaine de calcul et conditions aux limites.

Les conditions aux limites de Newman ($\frac{\delta \rho_c}{\delta n} = 0$ and $\frac{\delta V}{\delta n} = 0$) sont imposées sur toutes les frontières, sauf à la surface du fil actif, où la densité de charge est fixée à ρ_{cw} . La mise en œuvre de cette condition au limite n'est pas facile, parce que la densité de charge sur la surface du fil est inconnue a priori.

En commençant par une estimation initiale (ρ_{cw0}), ρ_{cw} est ajustée de manière itérative jusqu'à ce qu'une condition auxiliaire est satisfaite. Celle-ci exige que le champ électrique à la surface du fil est égale à la valeur du champ critique, qui reste constant pendant la décharge [50, 56].

Les valeurs expérimentales des courants de décharge sont utilisées pour estimer les densités de la charge d'espace à proximité de l'électrode de haute tension. Pour chaque valeur de tension appliquée, le processus commence avec une valeur initiale de la densité de la charge d'espace sur le fil actif (ρ_{cw0}). Ensuite, la distribution du champ électrique est évaluée en résolvant l'équation de Poisson, afin d'obtenir le courant de décharge, la valeur numérique (simulation) du courant de la décharge est comparée avec celle issue de l'expérimentale, ce qui va générer une nouvelle valeur de la densité de charge d'espace qui sera mise à jour.

Ce processus est répété jusqu'à ce que la valeur de la densité de la charge d'espace injecté ρ_{cw} donne un courant de décharge proche de l'expérimental. Enfin, une loi d'injection de charge d'espace est élaborée en fonction de la tension appliquée.

Les paramètres utilisés pour la simulation sont résumés dans le tableau III.1.

Tableau.III.1. Constantes de la simulation et leurs valeurs [27].

Constantes	Valeurs
Diamètre de la particule, d_p	1 μm
La permittivité du vide, ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \text{ C.V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
La permittivité relative du ciment, ϵ_r	12
Champ électrique critique, E_0	$1.224 \times 10^7 \text{ V.m}^{-1}$
Température, T	23°C
La mobilité des ions négative, μ_i^-	$2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
La mobilité des ions positive, μ_i^+	$1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
La viscosité dynamique de l'air, μ_{air}	$1.8 \times 10^{-5} \text{ kg. m}^{-1} \text{ s}^{-1}$

III.4.2. Dynamique des fluides et mouvement des particules

L'écoulement d'air est décrit par les équations de Navier-Stokes. Dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement apparaît un terme source qui exprime la force de Coulomb. Le gaz est supposé être à la température ambiante et à pression atmosphérique avec une densité et une viscosité constante pour un écoulement laminaire. Les conditions aux limites de la dynamique des fluides et la trajectoire des particules sont résumées dans le tableau III.2.

Tableau.III.2 : Conditions aux limites de la dynamique des fluides et la trajectoire [27].

	Écoulement	Mouvement des particules
entrée du domaine	0.1 m/s	100
Sortie du domaine	No pressure	Freeze
Fil actif	non-glissement	Freeze
Cylindre de collection	non-glissement	Freeze

III.5. Domaine de simulation

La résolution des équations décrites précédemment est faite en régime stationnaire sauf le mouvement des particules qui est en fonction du temps, l'outil numérique utilisé est le COMSOL-Multiphysics 5. 0. Des simulations préliminaires ont validées que la longueur de l'espace environnant a d'influence sur notre calcul (problème de convergence) ce qui nous a forcé à diminuer la longueur de notre model afin d'arriver à une convergence.

La figure III.2 représente l'ensemble des domaines de calcul de la simulation. Le domaine se compose d'une électrode de masse avec un diamètre de 50 mm et une électrode active de diamètre 0.2 mm avec un espace inter électrodes de 30 mm où se produit la décharge couronne. Le domaine correspond à l'espace environnant avec les dimensions suivantes (155 mm x132 mm).

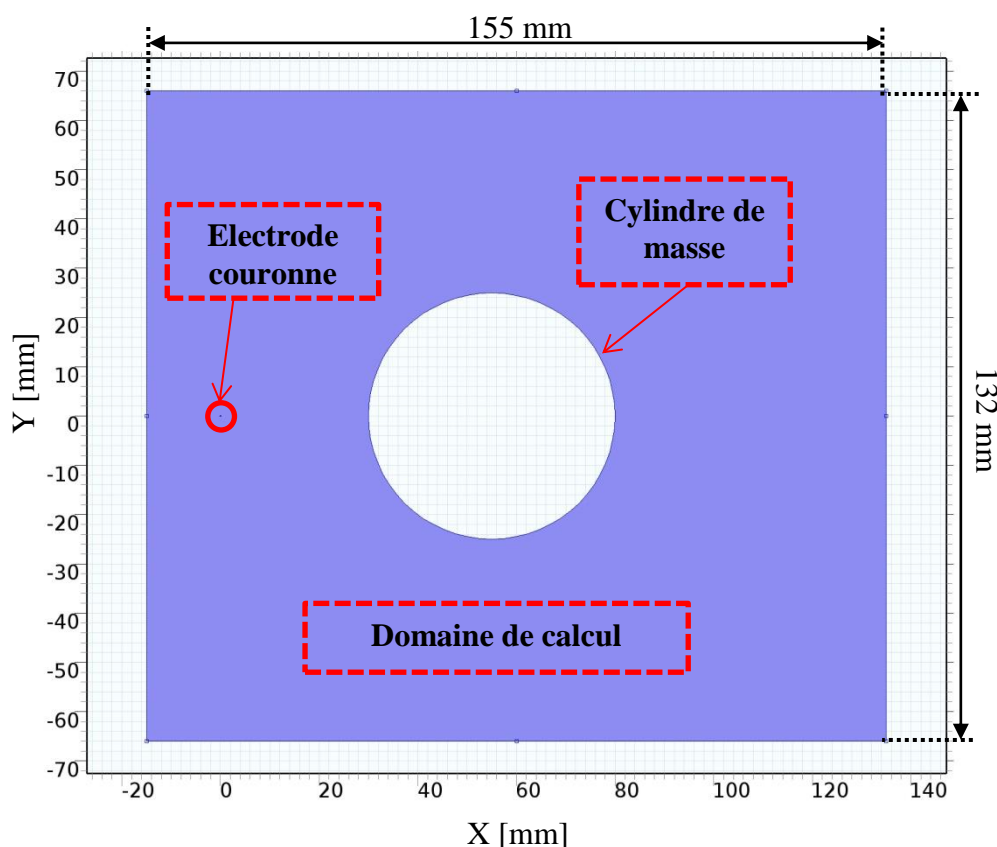


Figure.III.2 : Représentation 2D de la configuration file/cylindre asymétrique.

III.6. Analyse de sensibilité des résultats au maillage

Afin d'étudier la sensibilité des résultats au maillage, nous avons testé quatre maillages différents (grossier, fin, très fin et extrêmement fin), l'utilisation des maillages grossier, fin et très fin cause un problème de divergence dans le calcul, dans ce cas est quasiment impossible d'avoir une convergence dans calcul vu les moyens de calcul que nous disposons, nous avons donc sélectionné le maillage extrêmement fin. Etant donné que le champ électrique varie dans l'espace à proximité de l'électrode de décharge, un raffinement du maillage est nécessaire à proximité de l'électrode active ou couronne (fil de 0.1 mm de rayon).

Un raffinement au niveau de l'électrode de masse a un effet négligeable sur les résultats de la simulation. Dans cette étude, un maillage triangulaire extrêmement fin été adopté finalement (Figure III.3). La convergence est assurée lorsque la différence entre deux itérations successives est inférieure à 10^{-4} .

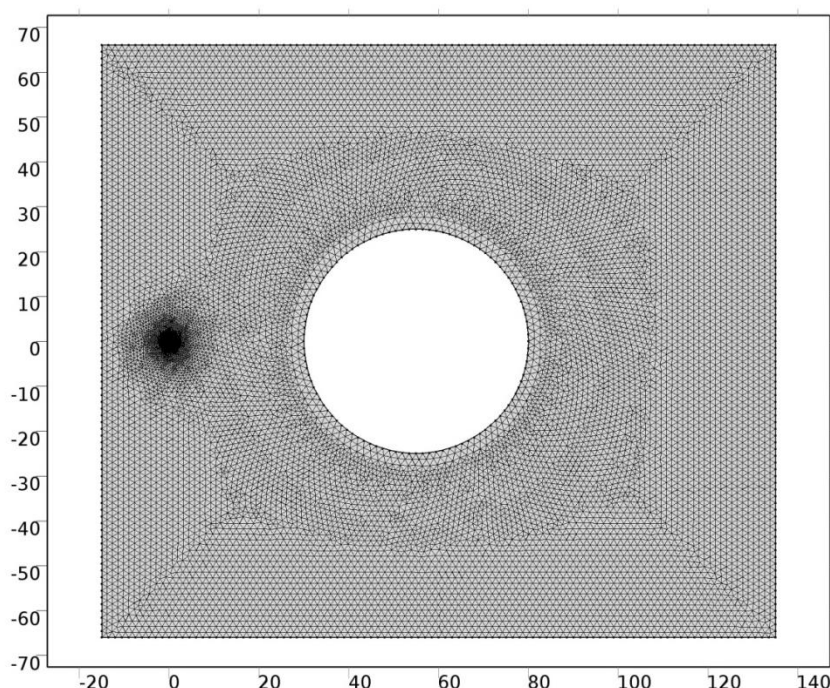


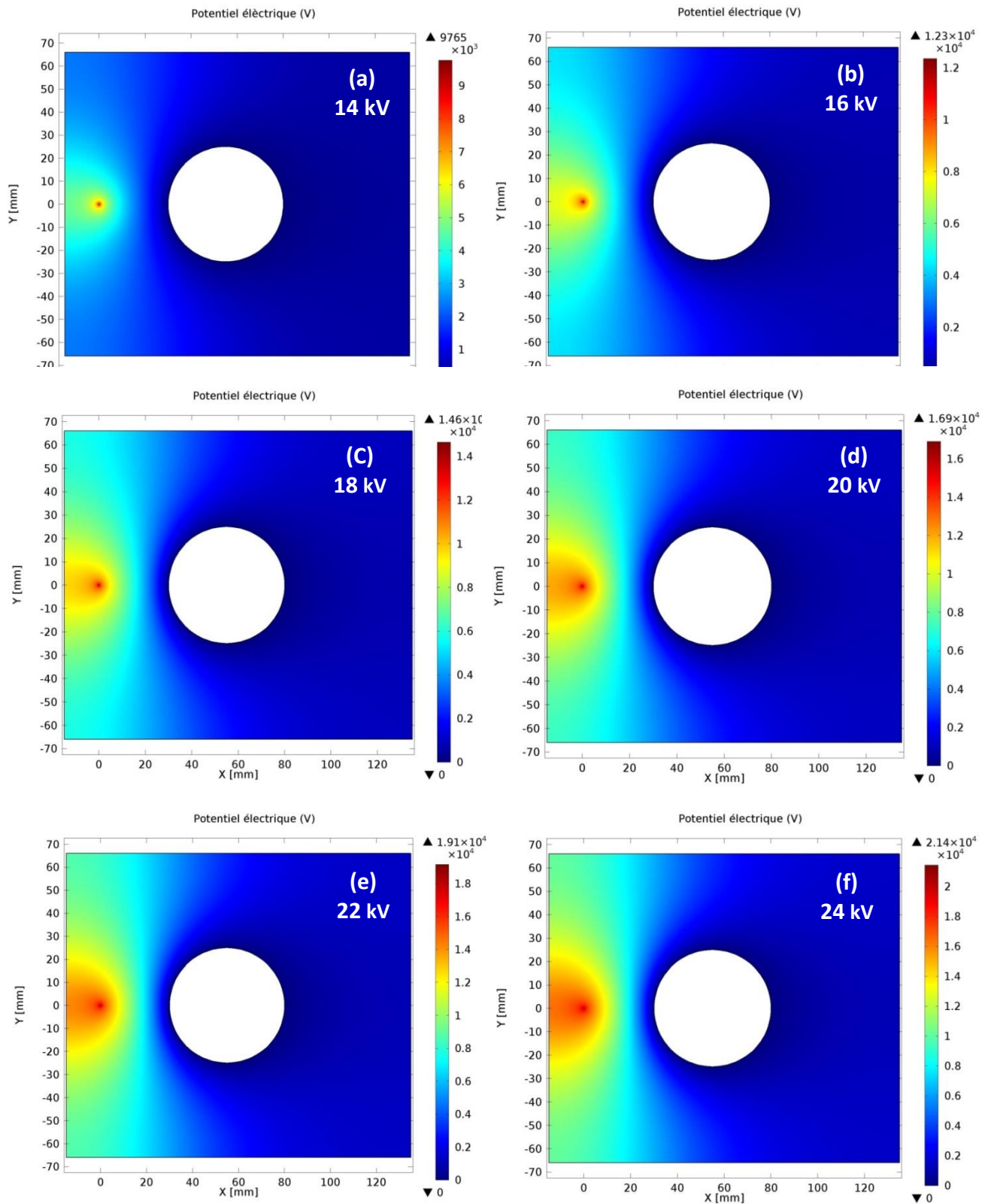
Figure.III.3 : Maillage triangulaire extrêmement fin utilisée.

III.7. Résultats et discussions

III.7.1. Distribution du potentiel électrique dans la zone de la décharge

Dans cette partie, on s'intéresse à étudier la distribution du potentiel électrique dans la zone de la décharge, l'intervalle qui sépare l'électrode couronne (fil) et l'électrode de masse

l'électrode collectrice), dans le plan X-Y. Les barres de couleur indiquent les amplitudes du potentiel électrique étudié, pour les tensions appliquées V_i allant de 14 kV jusqu'à 30 kV.



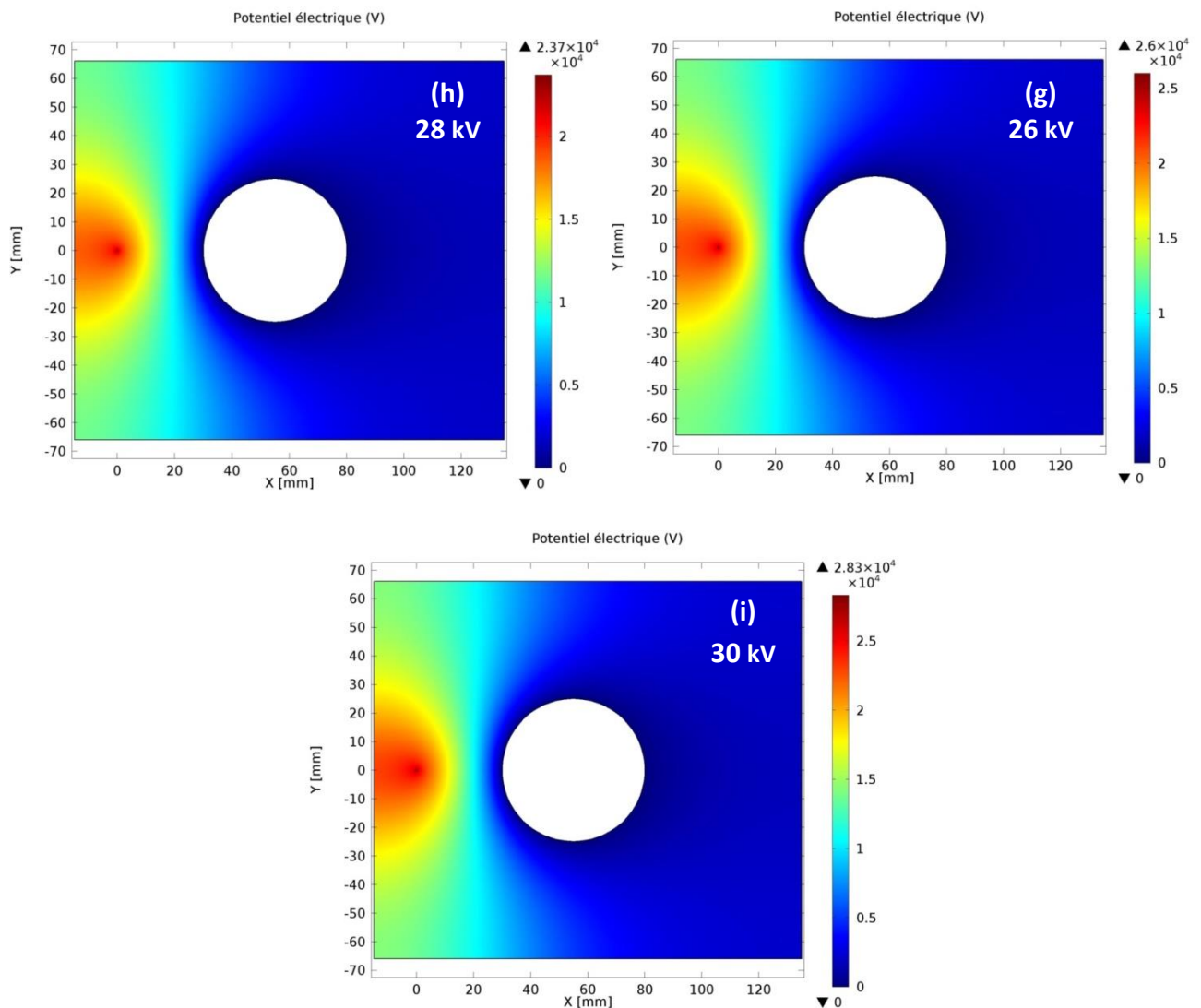


Figure.III.4 : Distribution 2-D du potentiel électrique pour les différentes tensions appliquées $U= 14 \text{ kV} - 30 \text{ kV}$.

La figure III.4 (a, b, c, d, e, f, g, h, i) montre respectivement les résultats numériques de la distribution du potentiel électrique, les valeurs du potentiel électrique sont plus élevées à la surface de l'électrode couronne et diminue en allant vers le cylindre de masse.

La figure III.5 montre le profil du potentiel électrique pour différents niveaux de tension applique (18 kV, 22 kV, 26 kV et 30 kV) en présence d'une charge d'espace injecté par une loi bien définie utilisée dans le code de calcul. Le potentiel tracé (figure.III.5) représente une coupe droite dans l'espace inter-électrodes en une dimension suivant l'axe des X, et à partir du point ($x= 0$, $y= 0$) jusqu'à la surface du cylindre (l'électrode collectrice) avec les coordonnées suivante ($x= 0$, $y= 30 \text{ mm}$).

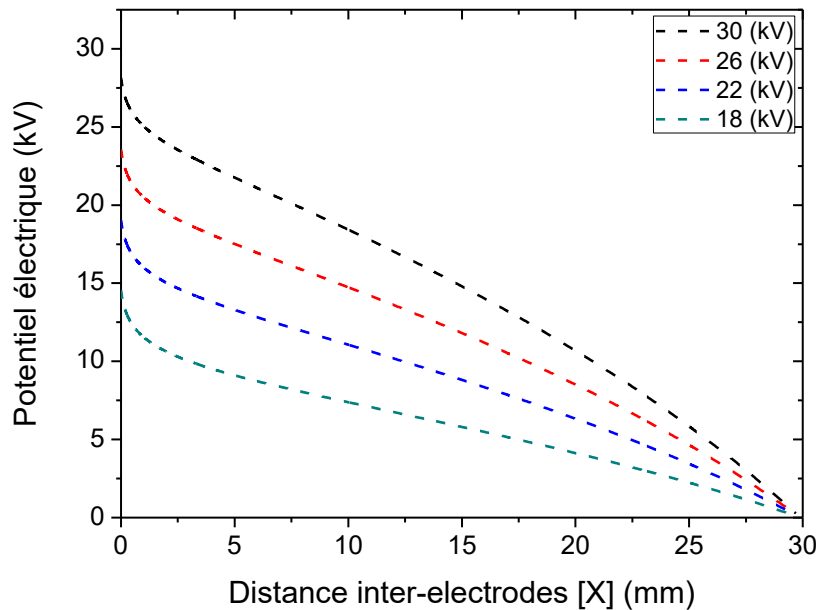
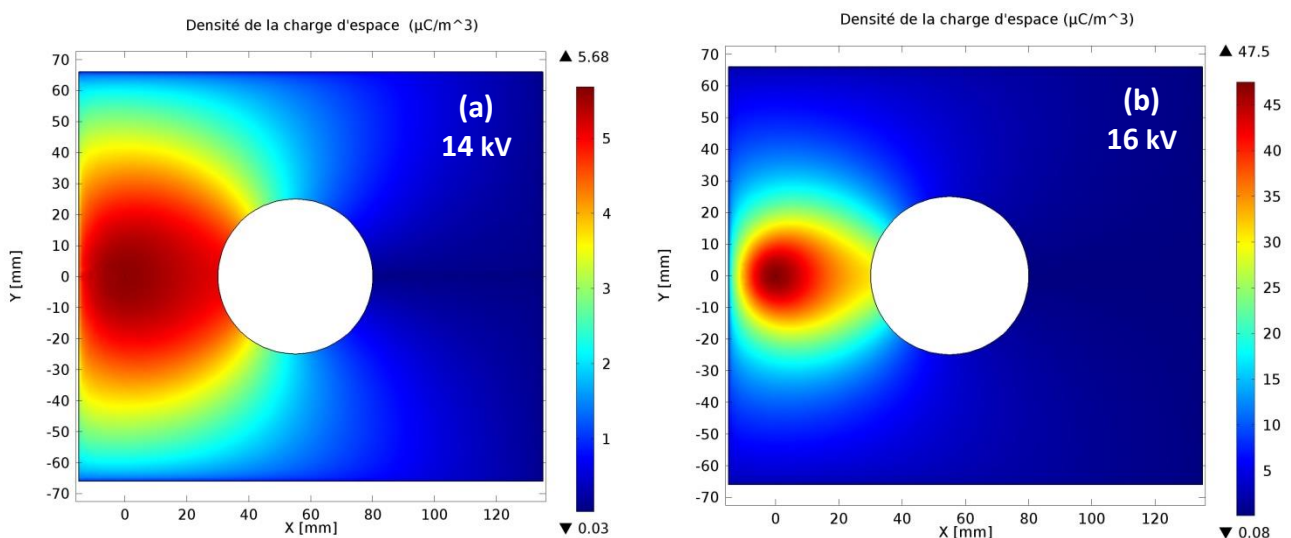


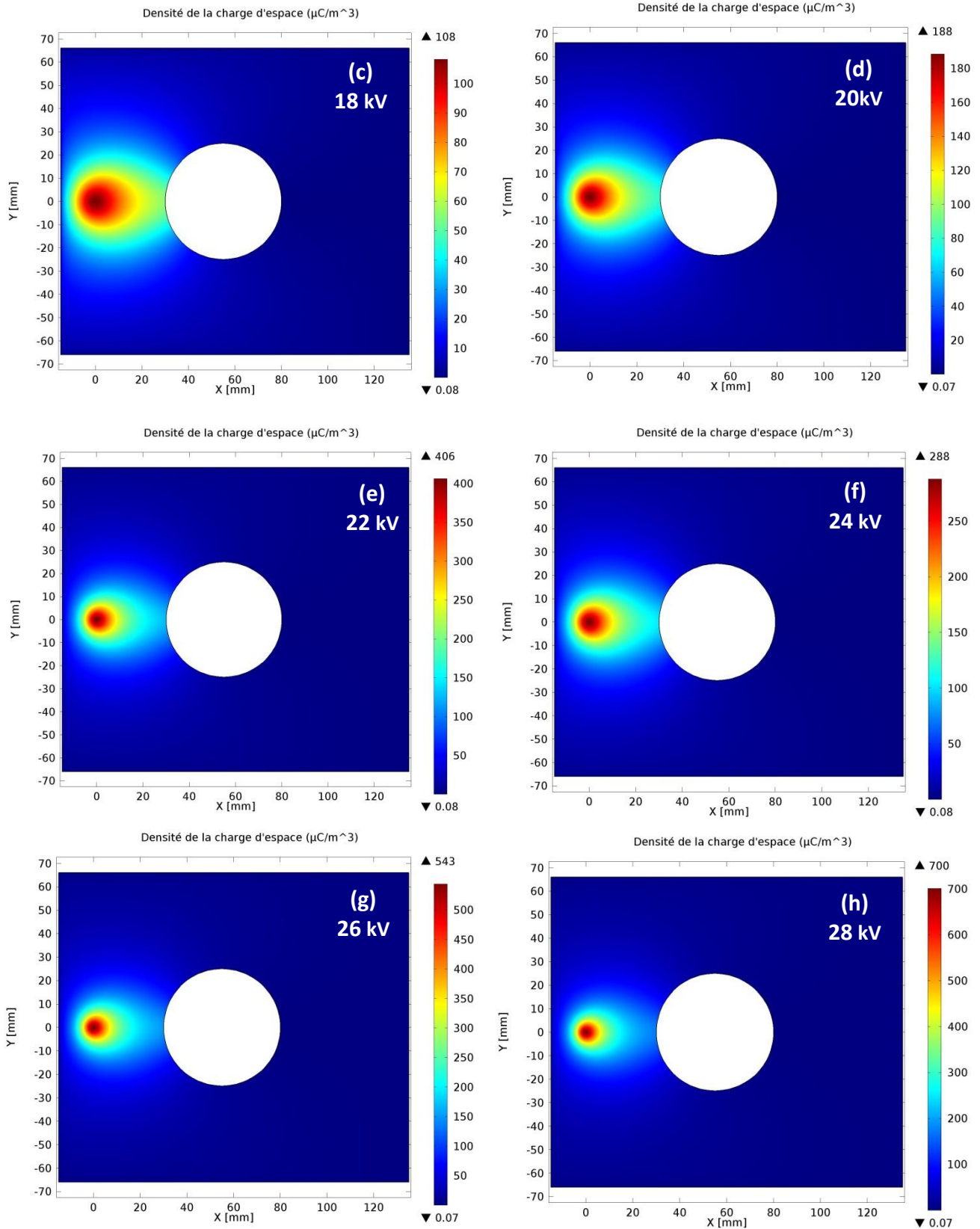
Figure.III.5 : Profil du potentiel électrique tout au long de la distance inter-électrodes ($X = 0$).

Les résultats numériques (figure III.5) montrent que le potentiel électrique diminue de façon monotone avec la position X . Sa valeur est très importante à proximité de la zone d'ionisation et atteint zéro à la surface du cylindre mis à la terre. Le profil du potentiel électrique est à peu près la même pour toutes les tensions appliquées.

III.7.2. Distribution de la charge d'espace dans l'espace inter-électrodes

Dans cette partie, notre préoccupation principale est d'étudier la distribution de la charge d'espace injectée dans la zone de la décharge (l'intervalle qui sépare l'électrode active (fil de 0.1 mm de rayon) et l'électrode de masse (l'électrode collectrice)), dans le plan X - Y . Les barres de couleur indiquent les grandeurs de la charge d'espace étudiées, pour différentes tensions appliquées V_i allant de 14 kV jusqu'à 30 kV.





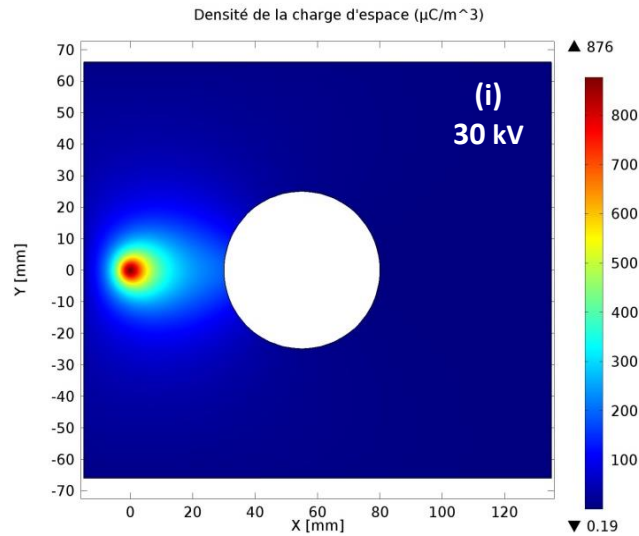


Figure.III.6 : Distribution 2-D du champ électrique pour les différentes tensions appliquées $U=14\text{ kV--}30\text{ kV}$.

La figure III.6 (a, b, c, d, e, f, g, h, i) illustre respectivement les résultats numériques de la distribution de la charge d'espace injectée, les valeurs de la charge d'espace sont plus intenses à la surface de l'électrode couronne et diminue en allant vers le cylindre de masse. La charge d'espace à la surface de l'électrode active qui est maximale, varie de $5,68\ \mu\text{C}/\text{cm}^3$ pour une tension faible ($U=14\text{ kV}$) à $876\ \mu\text{C}/\text{cm}^3$ pour une tension élevée ($U=30\text{ kV}$).

La figure III.7 montre le profil de la charge d'espace injectée pour différents niveaux de tension appliquées (18 kV, 22 kV, 26 kV et 30 kV). La charge d'espace tracée (figure.III.7) représente une coupe droite dans l'espace inter-électrodes en une dimension suivant l'axe des X et à partir du point ($x=0, y=0$) jusqu'à la surface du cylindre (l'électrode collectrice) avec les coordonnées suivantes ($x=30\text{ mm}, y=0$).

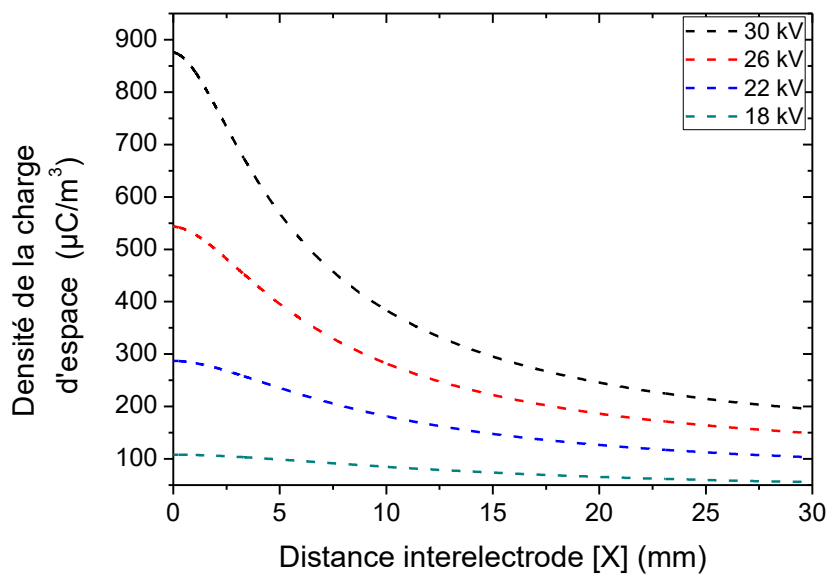


Figure.III.7: Profil de la charge d'espace dans la zone active ($X=0$).

Les résultats numériques (Figure.III.7), montrent que la charge d'espace diminue aussi comme le potentiel et le champ suivant la position X. Sa valeur est très importante à proximité de la zone d'ionisation et atteint zéro à la surface du cylindre mis la terre. Le profil de la charge d'espace est le même pour les différents niveaux de tension appliqués.

III.7.3. Distribution du champ électrique

La Figure III.8 représente l'intensité du champ électrique dans la partie inter-électrodes ou le champ est très fort autour du fil couronne (on peut le voir clairement si on agrandit la zone active) et diminue en fonction de la distance inter-électrodes.

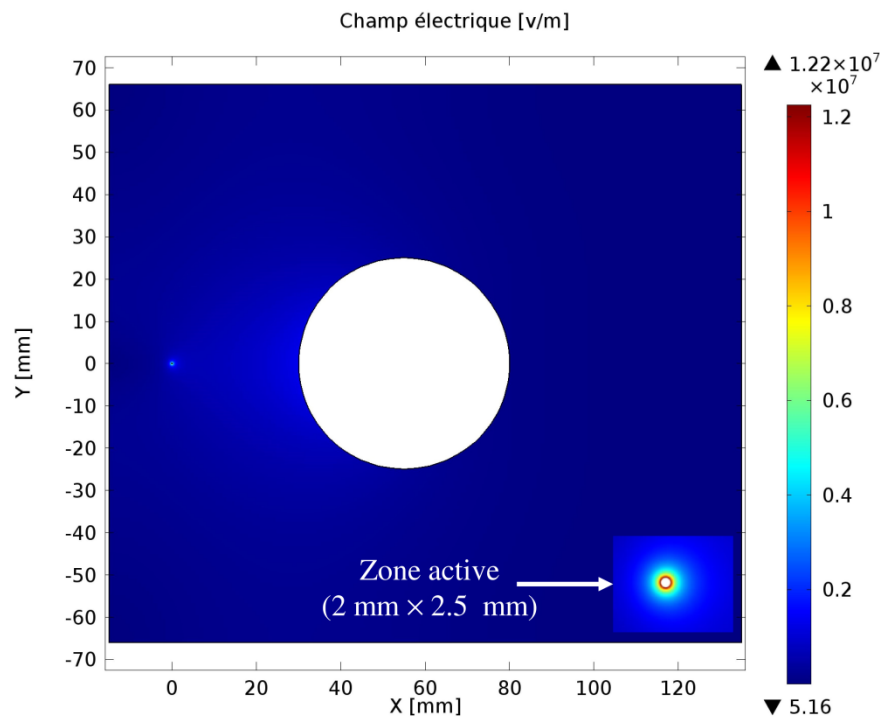


Figure.III.8 : Distribution 2-D du champ électrique pour une tension $U= 30$ kV.

La figure.III.9 indique une coupe droite du champ électrique tracé dans l'espace inter-électrodes en une dimension, suivant l'axe des X à partir du point ($x= 0$ mm, $y= 0$ mm) jusqu'à la surface du cylindre (l'électrode collectrice) avec les coordonnées suivante ($x= 30$ mm, $y=0$).le champ est tracé dans le cas de la présence de la décharge (charge d'espace injectée) et le cas où il y pas de charge injectée.

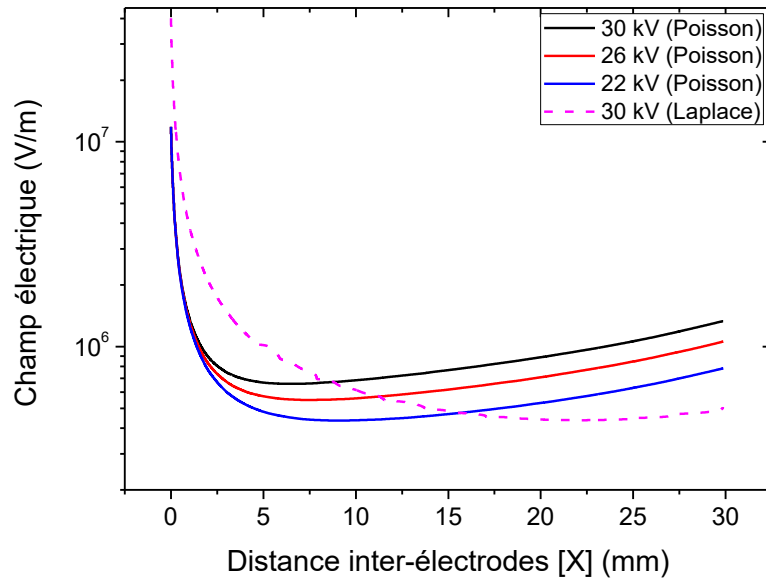


Figure. III. 9 : Profil du champ électrique tout au long de la distance inter-électrodes ($X = 0$).

L'effet de la charge d'espace sur la distribution du champ électrique est évoqué dans la Figure.III.9 où le champ poissonnien et le champ Laplacien sont tracés ensemble afin de les comparer.

Dans la région d'ionisation, à proximité du fil de décharge, le champ poissonnien est plus faible et reste constant à la surface du fil tel qu'il est supposé en simulation on s'articule sur l'hypothèse de Peek [64]. Cela est dû à l'effet écran de charge d'espace produit dans cette région.

D'autre part, la concentration d'ions à proximité de l'électrode de masse augmente le champ électrique global par rapport au champ Laplacien ce qui est cohérent avec les études précédentes [50, 65].

III.7.4. Caractéristiques courant-tension

Après avoir calculé les valeurs du potentiel électrique et du champ électrique ainsi que la distribution de la charge d'espace injectée on compare les deux caractéristiques courant-tension numérique et expérimentales pour les deux polarités (positives et négative) et les différents niveaux de tension, cette comparaison approuve si notre code de calcul satisfait notre hypothèse de départ qui est l'hypothèse de Kaptzov [27, 64].

La figure III.10 élucide cette comparaison entre le courant de la décharge couronne issu de l'expérimentale et celui de la simulation.

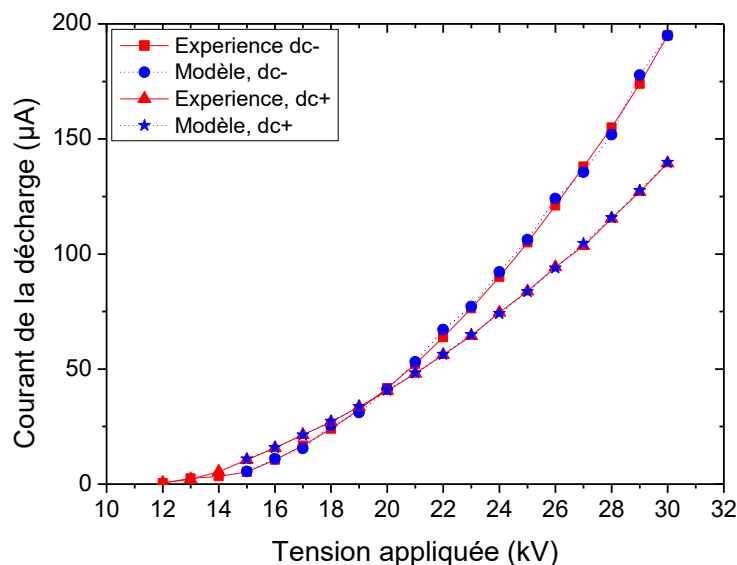


Figure.III.10 : Comparaison entre le courant numérique et expérimentale pour les deux polarités positive et négative.

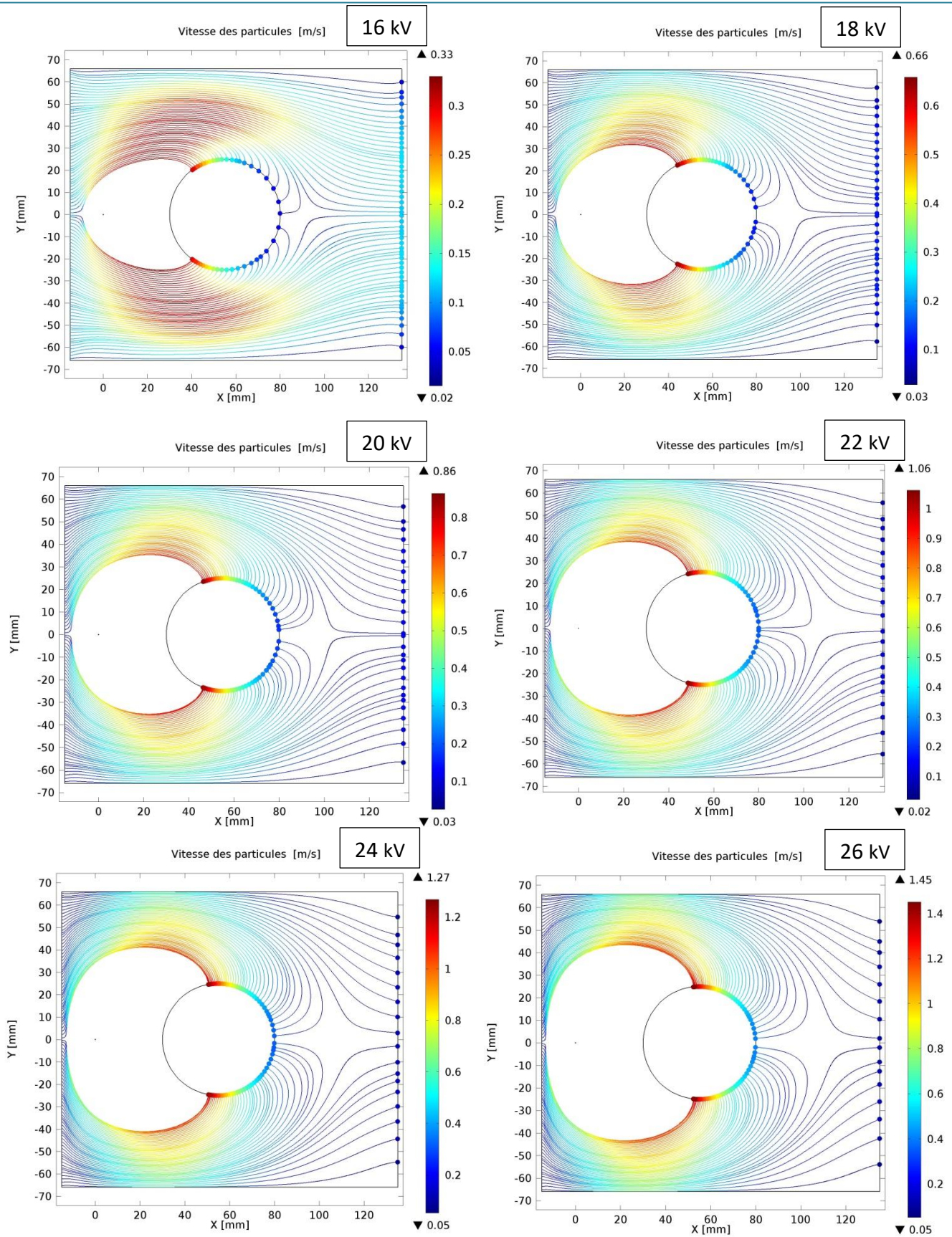
Sur la Figure.III.10, on peut constater que les résultats numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux. La tension seuil et la tendance non linéaire du courant en fonction de la tension sont très bien prédites. Que ce soit à faible ou à haute tension, le modèle a toutefois tendance à surestimer légèrement le courant de décharge réel.

III.7.5. Trajectoire des particules

Dans cette partie, on représente un modèle numérique simplifié qui est élaboré et testé afin d'étudier la trajectoire des particules à l'intérieur de notre précipitateur électrostatique asymétrique fil-cylindre.

Ce modèle contient tous les phénomènes essentiels qui affectent le processus de précipitation électrostatique: champ électrique, densité de charge d'espace qui sont déjà calculé dans les sections antécédentes, la charge des particules et le flux de particules.

La trajectoire des particules et le gradient de vitesse sont illustrés dans la figure.III.11, pour les différents niveaux de tensions appliquées et pour un diamètre de la particule (1 μm).



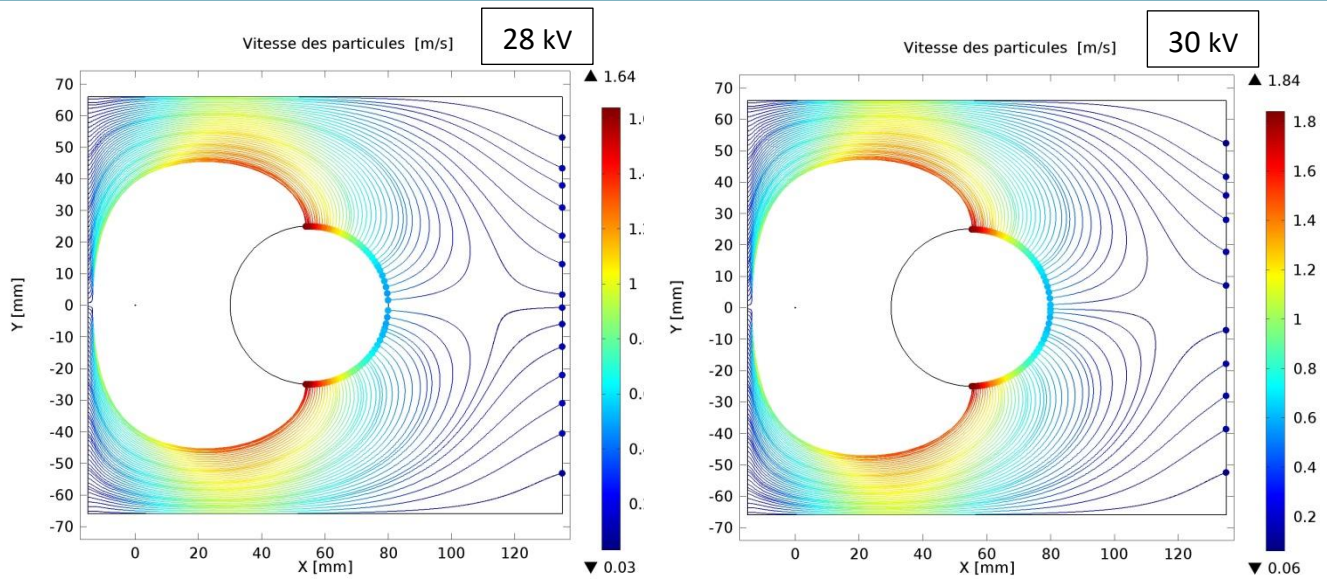


Figure.III.11: Résultat de la Simulation des trajectoires la particule dan sun ESP avec une configuration asymétrique fil-cylindre ESP. Conditions: $\mu_i^- = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $E_0 = 1.224 \times 10^7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, vitesse de l'écoulement à l'entré = $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, Domaine de simulation = $155 \times 132 \text{ mm}^2$, Diamètre de la particule $d_p = 1 \text{ }\mu\text{m}$, Tension appliquée $U = 16 \text{ kV}$ jusqu'à 30 kV .

Des exemples typiques des trajectoires de particules dans le cas de plusieurs valeurs de tension appliquée (16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 et 30 kV) sont exposés sur La figure.III.11. L'écoulement d'air est dirigé vers la droite avec un nombre initial de particules égale à 100. La barre de couleur indique l'ampleur de la vitesse des particules.

Pour les deux grandeurs de tension, toutes les particules se déplacent autour du fil actif. Par conséquent, une région libre des particules est observée dans l'espace inter-électrode. Ceci indique que les particules acquièrent rapidement des charges électriques ayant la même polarité que l'électrode couronne. Ensuite, les forces électriques puissantes déplacent les particules vers l'électrode collectrice (le cylindre). À l'intérieur de la zone de dérive, l'amplitude de la vitesse des particules résulte des deux forces, force électriques et force de trainée.

En fait, la vitesse maximale est limitée à environ $0,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour 16 kV, mais elle peut atteindre jusqu'à $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour une tension de l'ordre de 30 kV. En conséquence, une grande quantité de particules est collectée sur le cylindre à des tensions plus élevées. L'efficacité de collecte est d'environ 42% à 16 kV et 90% pour 30 kV [27, 64].

La surface sur laquelle sont déposées les particules diminue avec l'augmentation de la tension. Par ailleurs, les particules sont collectées principalement sur la face arrière du cylindre dans une zone où le champ électrique est moins intense.

Le modèle numérique proposé est un outil simple qui permet la compréhension des trajectoires des particules à l'intérieur du précipitateur électrostatique dans une configuration asymétrique fil-cylindre. Toutefois, les hypothèses de l'étude sont loin d'être des conditions réelles.

La contribution de l'effet du vortex qui se présente derrière le cylindre sur les trajectoires des particules n'est pas prise en compte dans ce travail. En outre, la contribution du mécanisme de chargement de la diffusion sur la charge totale des particules n'est pas mise en œuvre. En conséquence, plus de développements sont nécessaires afin de rendre la simulation plus proche de la réalité.

III.7.6. Efficacité de collection

Cette dernière partie est consacrée au calcul numérique de l'efficacité de collecte par le comptage du nombre de particules à la sortie (la limite du domaine de calcul) en utilisant le logiciel Microsoft Excel pour traiter les données issues de la simulation et les comparées avec celle de l'expérimental pour la même gamme de taille de particule.

Les valeurs expérimentales utilisées (figure.III.12) sont issues de l'efficacité fractionnaire des particules de la classe [1 - 1.075 μm].

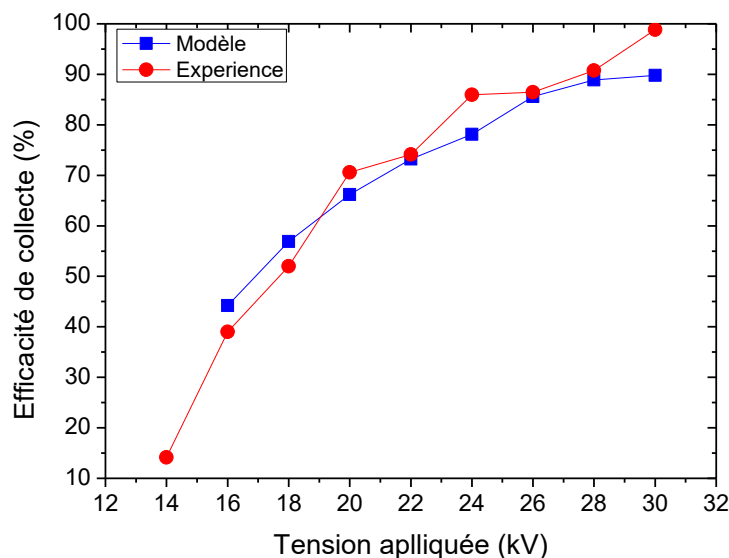


Figure.III.12: Comparaison entre l'efficacité numérique et expérimentale pour une particule de diamètre de 1 μm dans le cas d'une décharge couronne négative.

La figure.III.12 présente la comparaison entre l'efficacité de collecte numérique et expérimentale pour la taille de particule de la classe 1 μm dans le cas d'une décharge couronne négative. Les résultats indiquent que les rendements numériques sont proches de rendements expérimentaux, en raison de la loi d'injection de la densité de charge d'espace à la surface du fil.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle numérique composé de trois physiques couplées dans une configuration fil-cylindre asymétrique a été résolu efficacement en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Les principaux résultats de cette simulation sont les suivants :

- Les résultats numériques illustrés sont très proche des valeurs expérimentales. Par exemple, la confirmation de la dépendance quadratique entre le courant de décharge couronne et la tension appliquée.
- Les résultats de L'efficacité de collecte numériques sont cohérent à ceux de l'expérimentale dans une large gamme de tensions appliquées.
- La simulation des trajectoires des particules indique que les particules sont collectées principalement sur la face arrière du cylindre jusqu'à une zone où le champ électrique est moins intense.

Chapitre IV

Résultats expérimentaux et interprétations

Chapitre IV

Résultats expérimentaux et interprétations

IV.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les résultats expérimentaux de notre précipitateur (prototype de laboratoire) réalisé au sein de l'institut Pprime –université de Poitiers, cette réalisation nous a permis d'étudier un électrofiltre avec une nouvelle configuration asymétrique différente de la configuration axisymétrique classique.

Notre conception est basée essentiellement sur la création d'une décharge couronne dans un système de décharge (fil-cylindre) qui induira la charge des particules qui seront orientées dans une direction appropriée. Ceci à l'avantage de séparer les particules polluantes de l'air d'une part et de réduire l'impact des phénomènes anormaux (le back corona et le phénomène de réentraînement) qui affectent l'efficacité de filtration du dispositif d'autre part.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la description du banc expérimental, où on va schématiser le précipitateur fil-cylindre réalisé ainsi que les deux configurations étudiées (un seul fil-cylindre et trois fil-cylindre), en citant ainsi les principales parties du montage expérimental.

Toutefois, une caractérisation électrique est élaborée afin de valider le fonctionnement de notre nouvelle configuration asymétrique et la comparer à la configuration classique, voir ainsi la consommation énergétique de notre prototype pour les deux configurations conçues.

La fiabilité de notre précipitateur électrostatique avec la nouvelle configuration doit être validée en effectuant des séries d'expérience concernant l'efficacité de filtration du précipitateur pour les deux configurations et même les différentes polarités et niveaux de tension appliquées.

Enfin, ce chapitre a été consacré à l'évaluation du fonctionnement de notre précipitateur réalisé en fonction du temps ainsi que l'étude de l'apparition de la décharge couronne en retour (back corona) et son effet sur la caractéristique courant-tension et sur l'efficacité de collecte globale.

IV.2. Objectifs

Les précipitateurs électrostatiques (ESP) sont des dispositifs universels pour le nettoyage des gaz industriels des particules solides et liquides. L'efficacité de collecte élevée (plus de 99%) et la consommation énergétiques faibles sont les principaux avantages des ESP'S.

Les électrofiltres peuvent être classés en fonction de la géométrie de l'électrode de collecte (de type cylindrique ou plaque, tapis roulant), le sens d'écoulement de gaz (écoulement vertical ou horizontal) ainsi que système de récupération des particules de (ESP secs à l'aide des vibreurs ou électrofiltres humides avec de l'eau) [20, 66].

Dans une recherche récente, H. Ando et al [24] .Ont développé un dépoussiéreur électrostatique sur la base de l'électrode mobile (MEEP) muni brosse rotative pour enlever la poussière collectée comme expliquée dans le premier chapitre.

Ce dispositif répond à la nécessité de certaines industries qui éjectent des particules de poussière avec une résistivité élevées afin de résoudre le problème de réentraînement [25].

L'une des plus simples et intéressantes nouvelles géométries permettant le déplacement de l'électrode de collecte est l'utilisation d'un ESP asymétrique fil-cylindre.

Ce dispositif a le même principe de fonctionnement que les autres précipitateurs exploités actuellement, la contribution se présente dans la configuration qui est asymétrique ce qui va nous permettre de séparer mécaniquement la partie génération de décharge couronne de la partie de collecte ainsi que le choix d'une électrode de collecte cylindrique mobile (tournante) afin de récupérer les particules collectées sur la surface de cette dernière et même avoir une homogénéisation de cette couche qui adhère sur la surface de l'électrode de collecte due à la rotation uniforme de la partie mobile. .

L'étude de la dynamique de l'écoulement de gaz dans cette configuration nous a aidé à approuver ce choix technique, on peut expliquer brièvement cette dynamique qui nous a éclairé un point très important qui est la zone derrière le cylindre qui représente une zone calme c'est-à-dire écoulement avec une vitesse négligeable qui n'influe pas sur le processus de récupération des particules malgré la présence des vortex derrière (on une distance assez important pour placées le système de récupération raclette ou brosse rotatif)

La configuration de notre précipitateur électrostatique faite au début de la recherche est représentée dans la figure IV.1, le dispositif est simple, il est composé d'une électrode active (fil d'acier) et une électrode de collecte (électrode en inox) le support en téflon assure la tenue mécanique de l'ensemble, une raclette fixe ou une brosse rotatif.

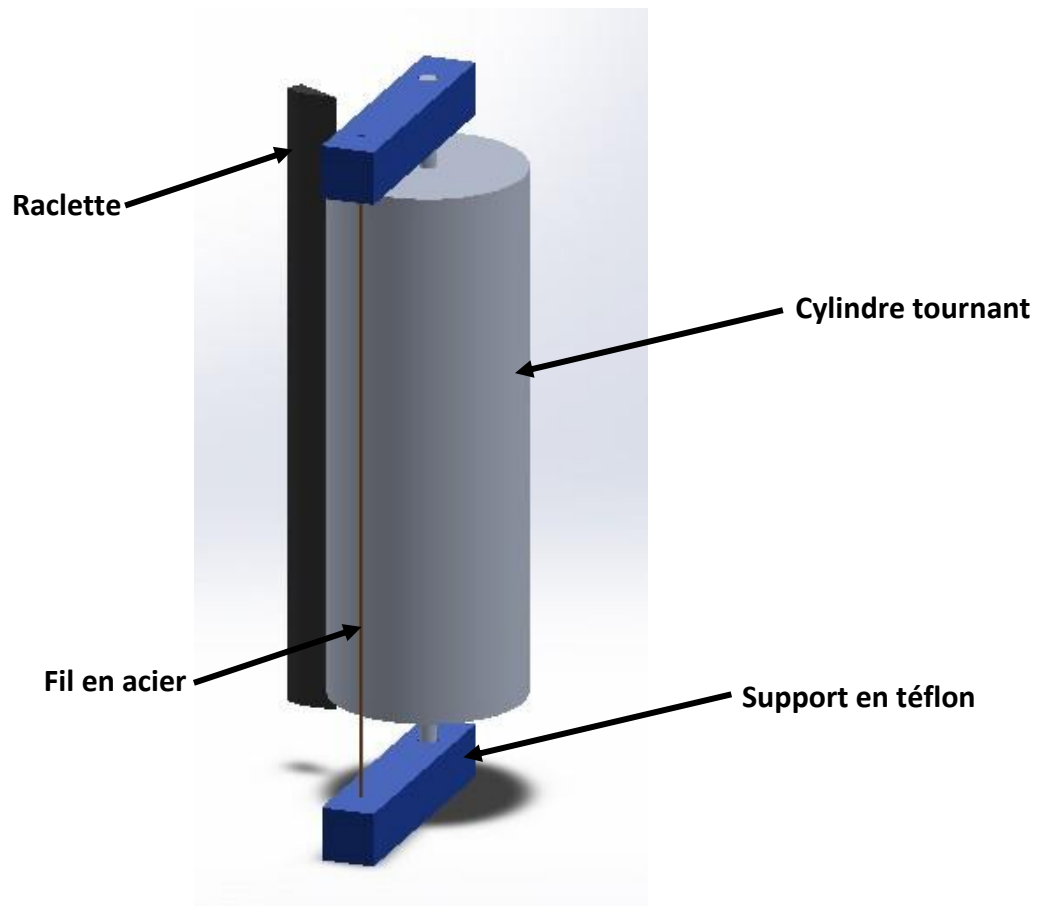


Figure .IV.1 : Schéma simplifié d'un précipitateur de type asymétrique fil-cylindre.

Cette première partie de conception a été faite au niveau du laboratoire de science & techniques de l'eau LSTE, Université de Mascara.

La suite de notre travail a été achevée au sein de l'Institut Prime-Université de Poitiers, où nous avons conçu un nouveau précipitateur électrostatique de laboratoire très simple du point de vue géométrique et même pour la partie de collecte on a préféré de baser notre travail sur la validation de cette nouvelle configuration avec une électrode fixe.

IV.3. Montage expérimental

Le montage expérimental (simplifié) utilisé est Représenté dans la figure IV.2, le montage comporte une alimentation haute tension continue qui peut être positive ou négative et un voltmètre (afin de mesurer la tension aux bornes d'une résistance shunt et en déduire le courant).

Lorsque les courants à mesurer sont inférieurs à $10 \mu\text{A}$, nous utilisons un pico ampèremètre KEITHLEY de la série 6514, directement relié à l'électrode de masse.

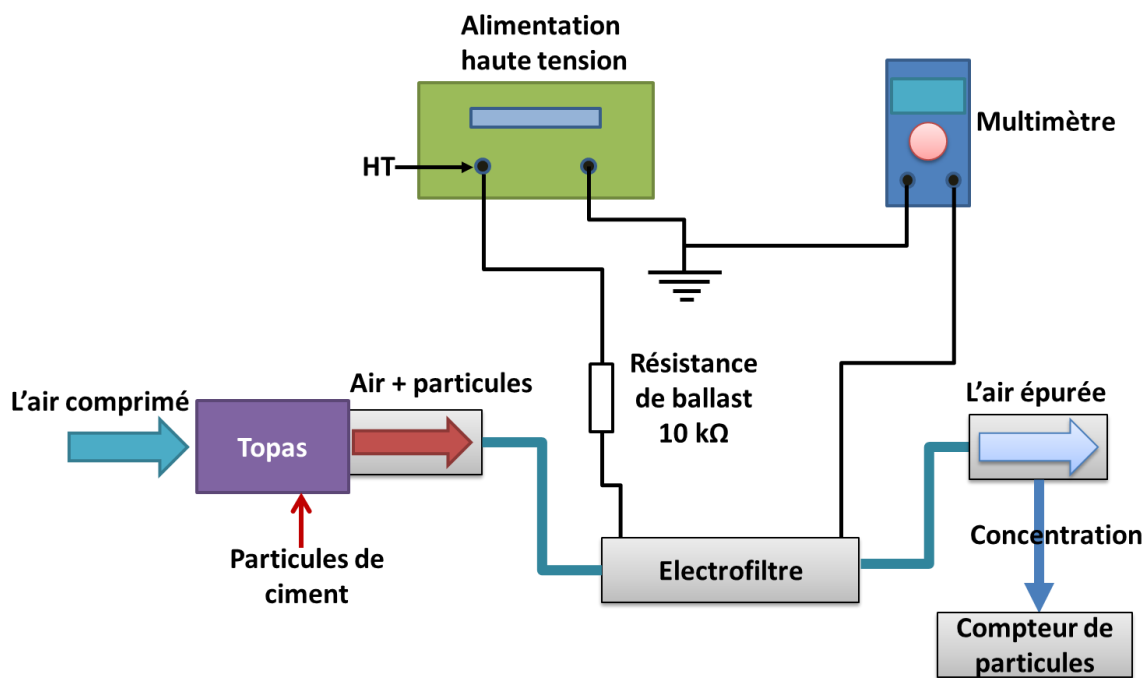


Figure.IV.2 : Schéma simplifié du montage expérimental.

Pour ce travail, nous avons étudié notre filtre électrostatique dans une configuration asymétrique fil-cylindre où on a fixé l'électrode de collecte afin de valider que cette configuration et comparer ces résultats par rapport à ceux des électrofiltres classiques.

Toutes les manipulations qui suivent sont faites pour deux configurations réalisées la première on utilisant un seul fil figure IV.3 –a et la deuxième qui se compose de trois fil actif figure.IV.3-b, cela va nous permettre d'étudier l'influence du nombre de fil sur le fonctionnement de notre précipitateur réalisé.

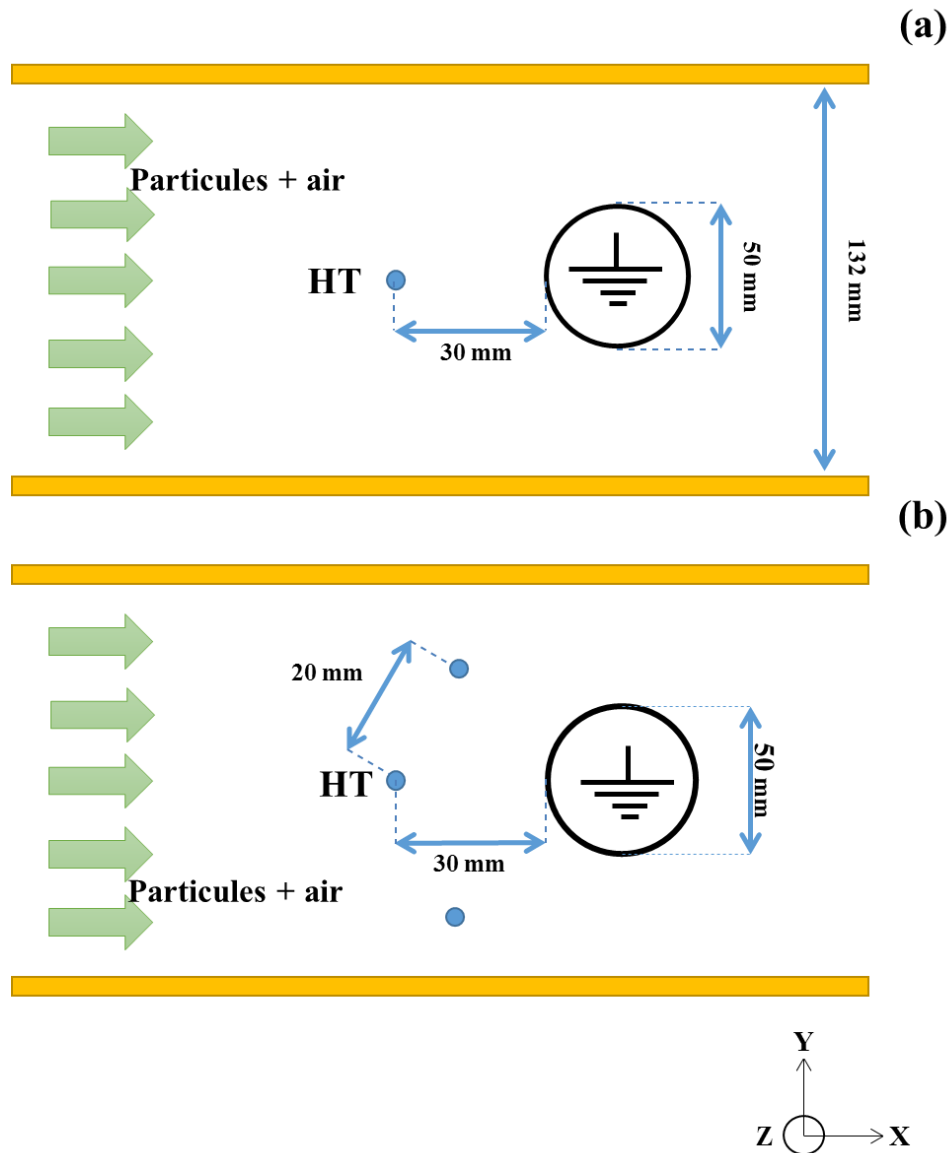


Figure.IV.3 : Schéma descriptif des deux configurations étudiées (1 fil et 3 fils),

(a): 1 fil ESP, (b): 3 fils ESP

Le model réalisé (Figure IV.4) comporte une électrode de collecte fixe en inox avec 50 mm de diamètre et 132 mm de hauteur ainsi que des fils (électrodes couronne) en acier avec un diamètre de 0.2 mm, ces électrodes sont placées dans un canal rectangulaire fabriqué de Polyméthacrylate de méthyle (Pmma) avec les dimensions suivantes (500mm x 132 mm x132 mm), ces dimensions calculées sont imposées afin de tranquilliser l'écoulement surtout à proximité de la zone de précipitation.

Le canal rectangulaire est doté de deux cônes, un cône divergent à l'entrée pour réduire la vitesse de l'écoulement et même pour l'homogénéiser en utilisant un grillage qui joue le même rôle d'un nid d'abeille et l'autre qui est convergent à la sortie.

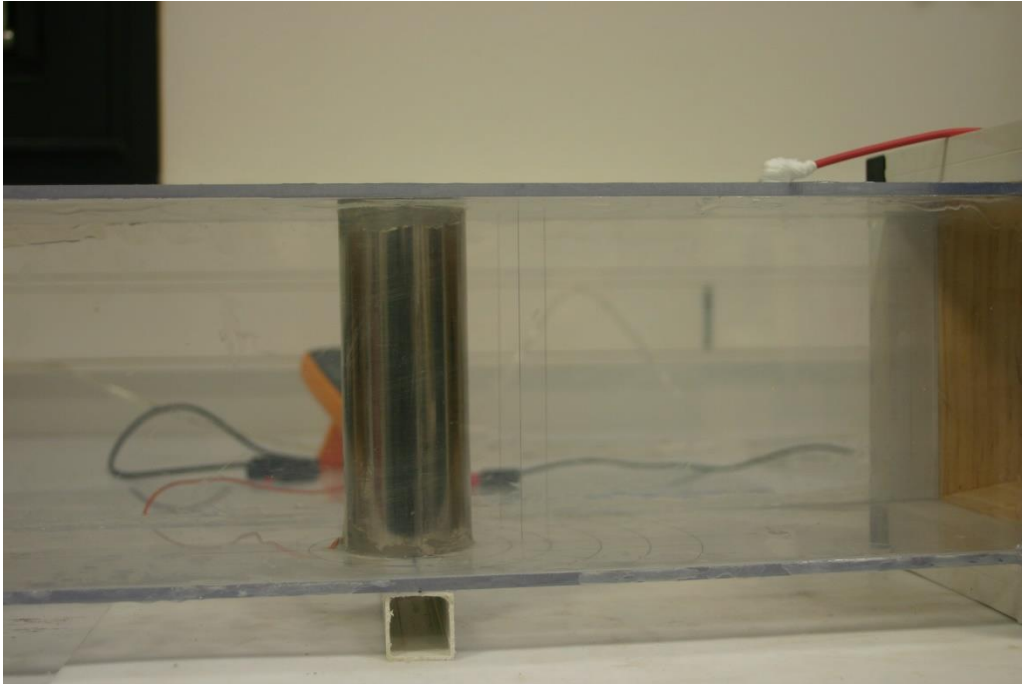


Figure .IV.4 : Photographie du précipitateur réalisé -cas de trois fils.

Parmi les difficultés qu'on a eues au niveau de la conception est la méthode avec laquelle on peut tenir les fils bien étirés et mis en parallèle par rapport à l'électrode de collecte, cela est fait à l'aide d'une pièce en cuivre représentée dans la figure.IV.5 :



Figure .IV.5 : Pièce de serrage de l'électrode active

Cette pièce est utilisée généralement pour le serrage des câbles de frein des vélos, l'inconvénient c'est qu'elle est en métal donc on essaye de l'isoler par une couche de téflon afin d'éviter la création de décharge couronne sur cette partie.

IV.4. Caractéristique électriques

IV.4 .1. Caractéristiques courant-tension

Dans cette partie, on représente les caractéristiques courant-tension ainsi que la puissance consommée obtenues avec l'électrofiltre conçu pour les deux configurations (un seul fil et trois fils), cette étude est faite avec et sans particules polluantes.

La figure.IV.6 représente les caractéristiques courant-tension de l'ESP pour les deux polarités positive et négative, avec et sans la présence de particules de ciment. L'échelle de droite indique la densité de courant à l'électrode collectrice.

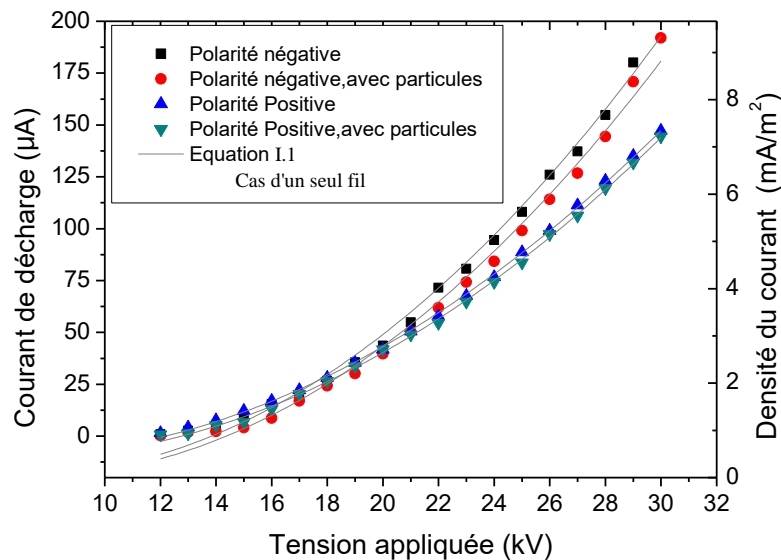


Figure .IV.6 : Caractéristique courant-tension –cas d'un seul fil ($T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 44\%$).

Le courant augmente progressivement avec l'augmentation de la tension appliquée, cela lorsque le potentiel appliqué devient supérieur à la tension seuil de déclenchement de la décharge couronne. À une tension donnée, le courant de décharge en polarité négative est plus important à celui de la polarité positive, ce qui est dû à la différence entre la mobilité apparente des porteurs de charge négative par rapport à ceux positifs [67, 68, 69].

Le courant de décharge moyen (I) est une fonction non-linéaire de la tension appliquée (V), la relation entre le courant et la tension peut être exprimée par une formule (équation I.1) simple développée théoriquement pour le cas des configurations fil-cylindre axisymétrique et fil-plan ainsi que la configuration étudiée dans ce travail, donc ce modèle théorique reste valable même dans le cas d'une configuration asymétrique [43].

Pour une tension appliquée, la valeur du courant de la décharge couronne diminue ce qui est due à la présence des particules de ciment dans la zone de décharge (zone active), expliqué par la mobilité des particules qui est plus faible par rapport à celle des ions.

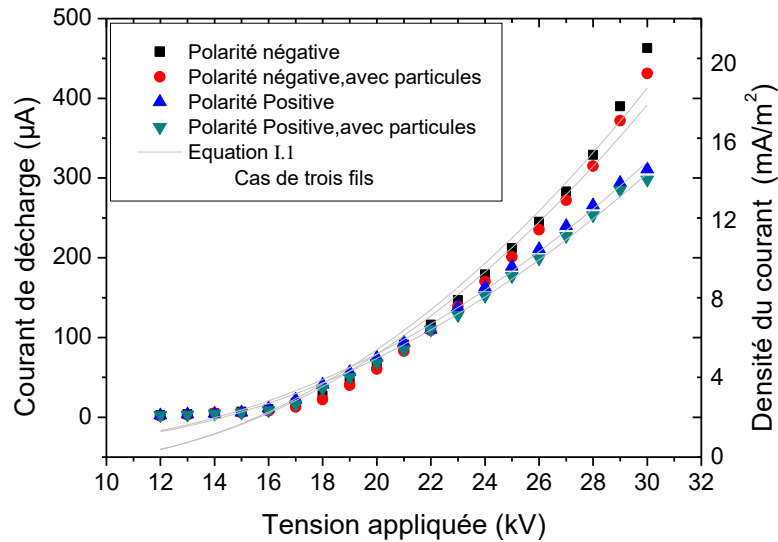


Figure .IV.7 : Caractéristique courant-tension –Cas de trois fils (T = 23 °C, RH = 44 %).

Quelle que soit la polarité, le courant de la décharge augmente avec le nombre d'électrodes haute tension utilisées. Cependant, le courant corona généré par trois fils est inférieur à trois fois la valeur mesurée dans le cas d'un seul fil ($I_{1\text{Fil}} < I_{3\text{Fils}} < 3 I_{1\text{Fil}}$). Ceci est dû à l'interaction du champ électrique entre deux fils haute tension successifs [69].

La relation empirique entre le courant et la tension est valide même pour le cas de trois fils ou on peut le voir sur la superposition de la plupart des points de l'allure du courant sur la courbe de tendance qui est représenté par l'équation I.1.

IV.4 .2. Coût énergétique

La figure IV.8 et figure IV.9 montrent la consommation d'énergie qui est évidemment plus faible dans le cas de polarité positive pour le cas d'un seul fil-ESP et trois fils-ESP.

Les valeurs maximales obtenues avant l'apparition de la décharge disruptive (arc) ne dépassent pas 0,2 W pour la polarité négative dans le cas d'un seul fil -ESP et 0,45 pour le cas de trois fils-ESP.

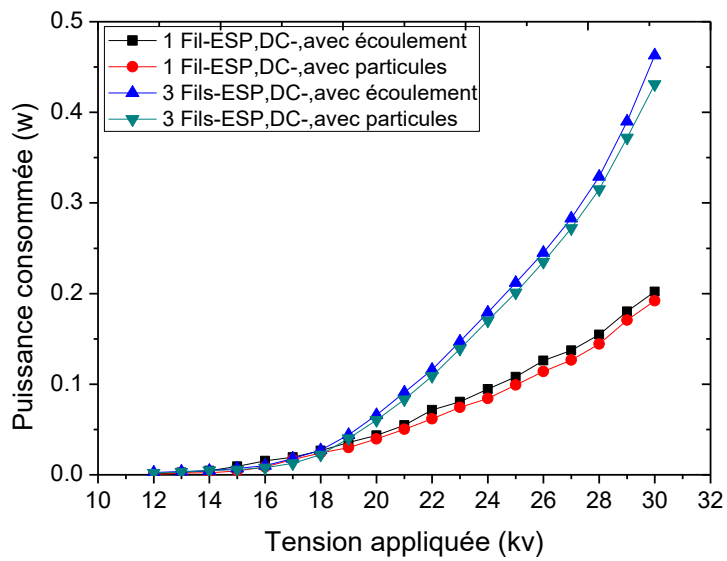


Figure .IV.8 : Puissance consommée en fonction de la tension appliquée – en polarité négative (T = 23 °C, RH = 44 %).

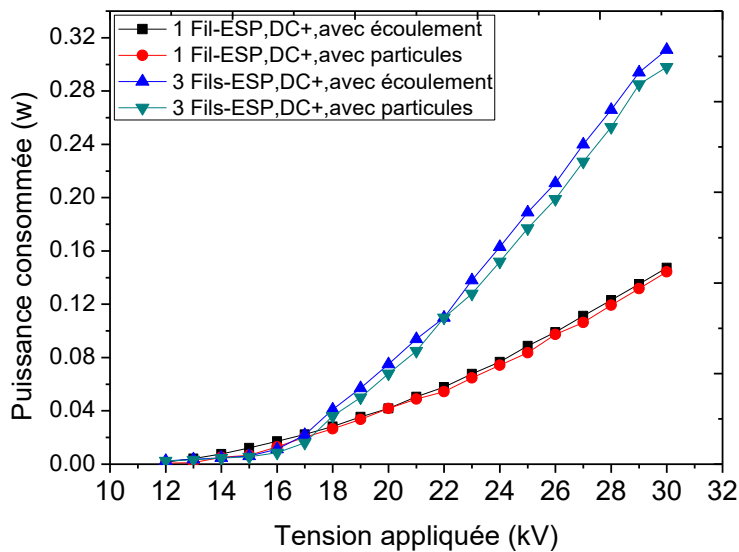


Figure .IV.9 : Puissance consommée en fonction de la tension appliquée – en polarité positive (T = 23 °C, RH = 44 %).

IV.4 .3. Morphologie de la décharge couronne dans la configuration fil-cylindre asymétrique

La morphologie des décharges couronne positive et négative pour les deux configurations (1 fil-ESP et 3 fils-ESP) à une tension proche de celle du claquage est représentée sur la Fig. IV.10.

On constate que même pour la géométrie asymétrique fil-cylindre, la décharge couronne négative produit des spots actifs discrets le long du fil couronne appelés ‘tufts’ tandis que la décharge couronne en polarité positive produit une gaine lumineuse uniforme toute au long de l’électrode active [70, 71].

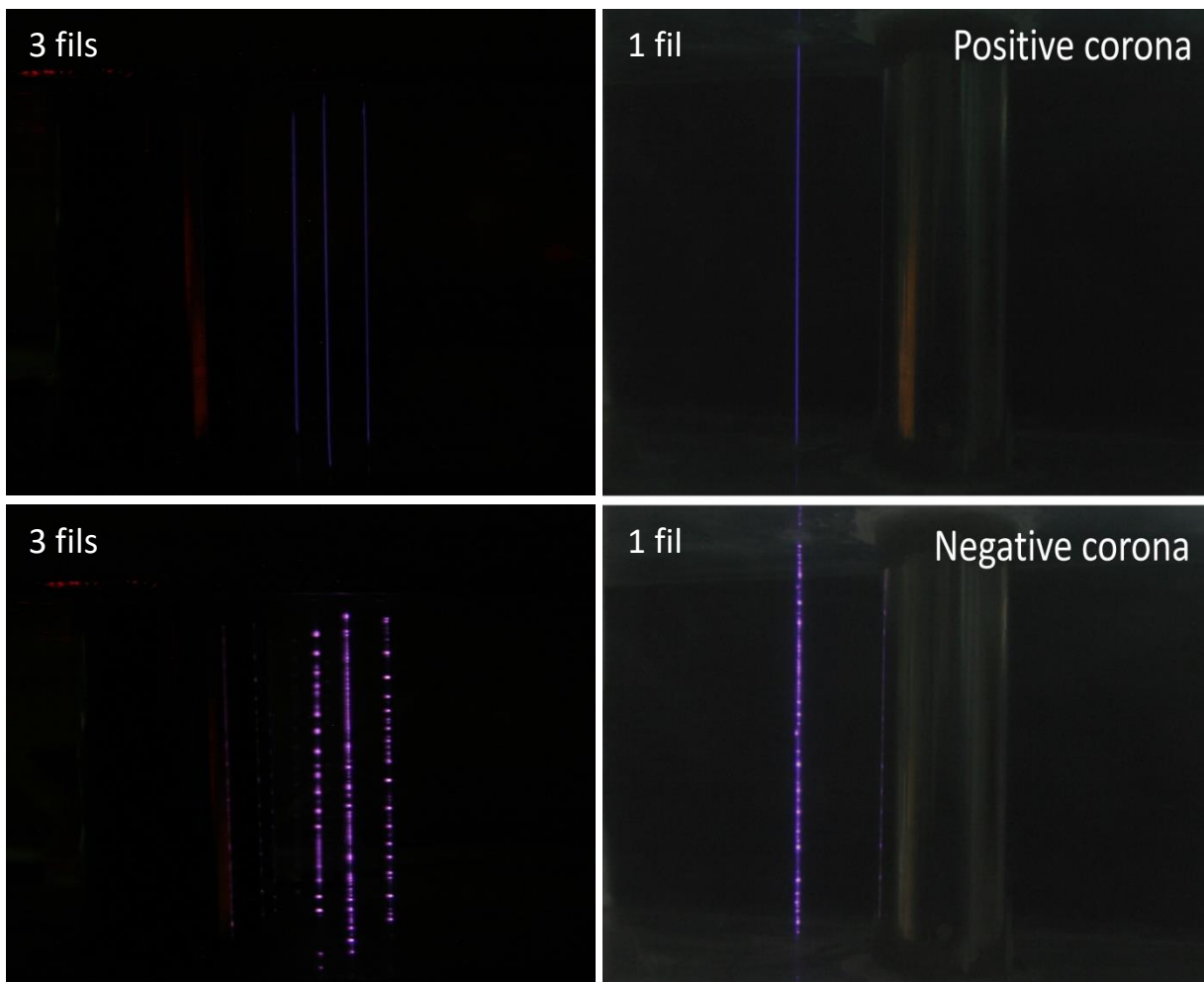


Figure .IV.10 : Morphologie de la décharge couronne en polarité positives et négatives. Conditions expérimentales: tension = 30kV, résolution = 3072 × 2048 pixels, le temps d'exposition = 8 s, pas de particules dans l'espace inter-électrodes.

IV.5. Concentration et la distribution de taille des particules

La figure IV.11 montre la distribution des tailles typiques des particules de ciment à la sortie de notre précipitateur avec et sans décharge couronne. Les résultats montrent une large distribution de taille des particules de ciment allant de 0,18 à 5 μm .

Sans décharge couronne, le diamètre moyen des particules est d'environ 0,4 μm qui correspond à une concentration d'environ 80 particules par cm^3 .

Quand une haute tension de 30 kV est appliquée, une décharge couronne est générée autour de l'électrode active, ce qui va causer diminution de la concentration des particules pour toutes les tailles. Pour une plage de diamètre supérieur à 1 μm , la concentration de particules est presque nulle. Ceci indique qu'une grande quantité de particules injectées à l'intérieur de notre précipitateur seront chargées électriquement et recueillie sur l'électrode reliée à la terre [27].

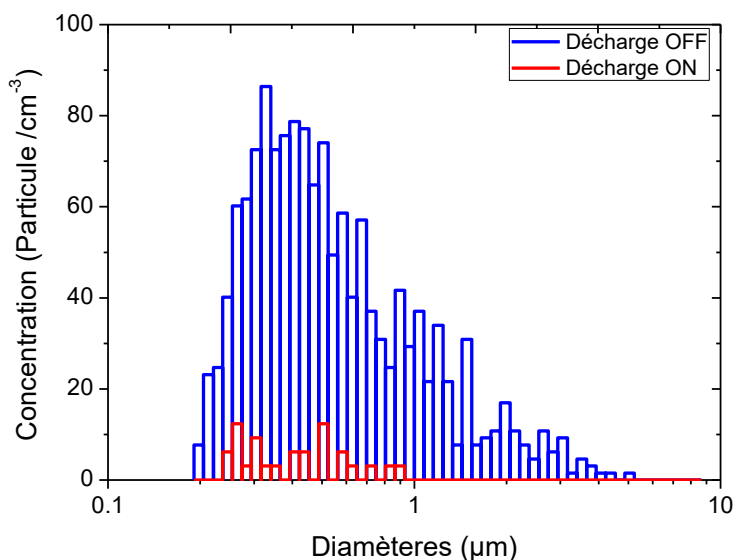


Figure .IV.11 : Distribution de la taille des particules du ciment à la sortie du précipitateur avec et sans décharge couronne (polarité négative).

IV.6. Efficacité de collecte

La courbe d'efficacité figure IV.12 montre la variation de l'efficacité de collecte sous polarités négative et positive respectivement pour la configuration d'un seul fil. Dans le cas de la décharge couronne négative, la collecte atteint rapidement à 93 % à 30 kV, même si le courant est relativement faible 195 μA .

En polarité positive, avec la même tension de 30 kV (100 μ A) pour atteindre cette efficacité de collecte moins importante par rapport à l'efficacité de collecte en polarité négative. Cela s'explique par le fait que la décharge couronne négative charge légèrement plus les particules dans une large gamme de taille de particule par rapport à la décharge couronne positive [72, 73, 74].

De plus, la décharge couronne négative produit des spots actifs discrets le long du fil de décharge tandis que la positive produit une gaine lumineuse uniforme [17, 21]. Ainsi, l'interaction entre l'écoulement primaire et l'écoulement secondaire (vent électrique) semble être plus prononcée dans la décharge couronne négative.

La turbulence induite par le vent électrique augmente la charge des particules et peut être à l'origine de l'amélioration du rendement dans le cas de couronne négative.

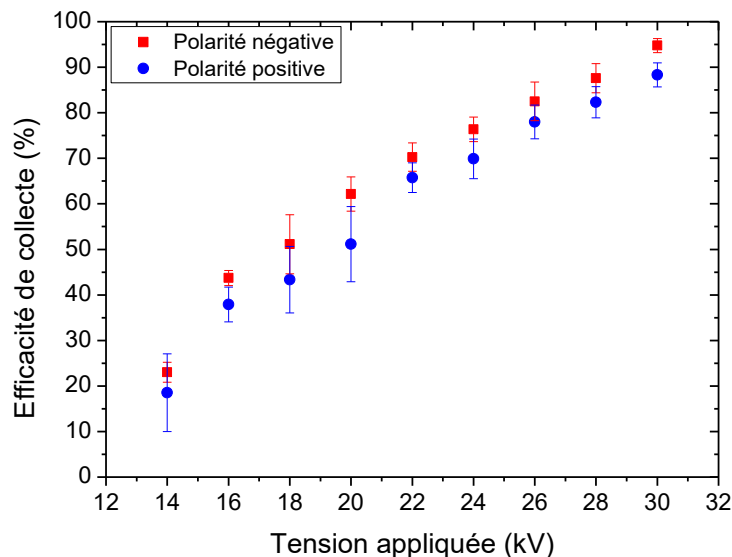


Figure. IV.12 : Efficacité de la collecte en fonction de la tension appliquée.

L'évolution de l'efficacité fractionnaire de collecte en fonction de la taille des particules pour des différents niveaux de tension appliquées est illustrée sur la Figure IV.13. Quelle que soit la tension appliquée, l'efficacité augmente nettement avec la taille des particules dans la gamme de 0,18 à 5 μ m.

Le rendement est supérieur à 99,9% pour la taille de particule supérieure à 1 μ m pour une tension de 30 kV. Ceci peut être expliqué par l'amélioration du processus de charge des particules qui accroit avec la croissance du diamètre des particules, le mécanisme de charge

par champ est le principal processus de charge surtout pour la gamme de particules avec un diamètre supérieures à 1 μm [74].

Par ailleurs, l'efficacité fractionnaire de collecte est limitée à environ 90% pour des particules d'environ 0,2 μm à cause de la tension appliquée qui doit dépasser les 30 kV cela va causer la rupture de la décharge ou le claquage.

On peut remarquer quelques fluctuations sur des valeurs de rendement de collecte en raison des changements de concentration de particules au cours des expériences.

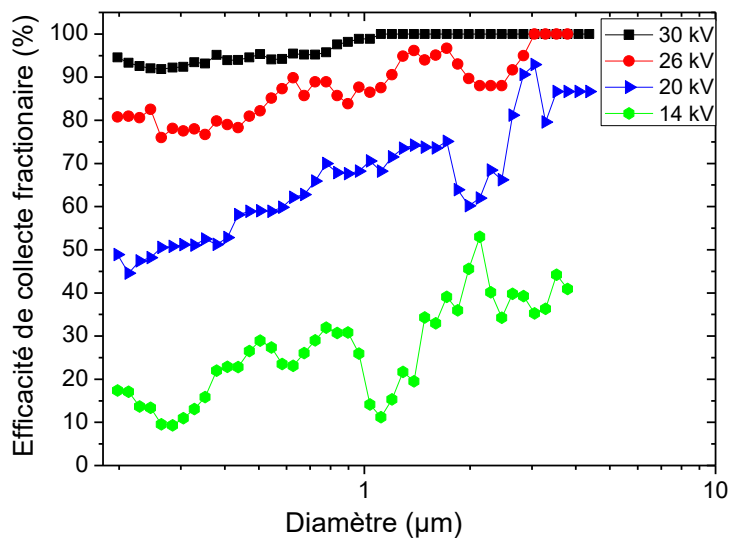


Figure .IV. 13 : Efficacité de collecte fractionnaire en fonction du diamètre (cas d'un seul fil).

La figure IV.14 montre l'évolution du rendement de collecte en fonction de la consommation d'énergie électrique pour les deux polarités positive et négative pour la configuration d'un seul fil.

Les résultats montrent qu'une efficacité de collecte élevée (jusqu'à 95%) peut être atteinte avec une consommation relativement faible d'énergie (inférieure à 0,2 W). Cependant, pour la même efficacité, la décharge couronne négative consomme nettement moins d'énergie (0,2 W) par rapport à celle positive (0.15 W).

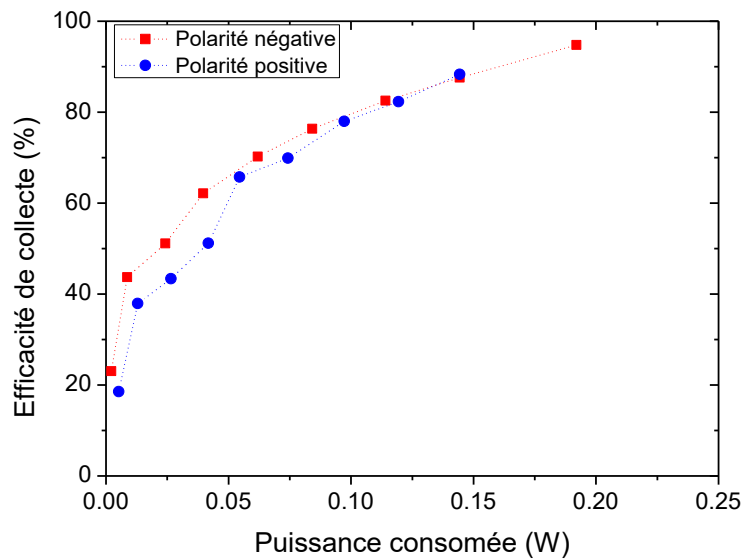


Figure .IV.14 : Efficacité de la collecte en fonction de la puissance consommée (cas d'un seul fil).

La figure IV.15 montre l'évolution du rendement en fonction de la consommation d'énergie électrique dans les deux configurations 1 fil-ESP et 3 fils-ESP pour les deux polarités utilisées. Les résultats montrent qu'on peut atteindre une efficacité de collecte élevée avec une consommation relativement faible d'énergie (inférieure à 0,2 W) dans le cas d'un seul fil. En outre, pour la même efficacité de collecte, le précipitateur électrostatique dans le cas de trois fils est vulnérable de point de vue énergétique (0,45 w) par rapport à la configuration d'un seul fil.

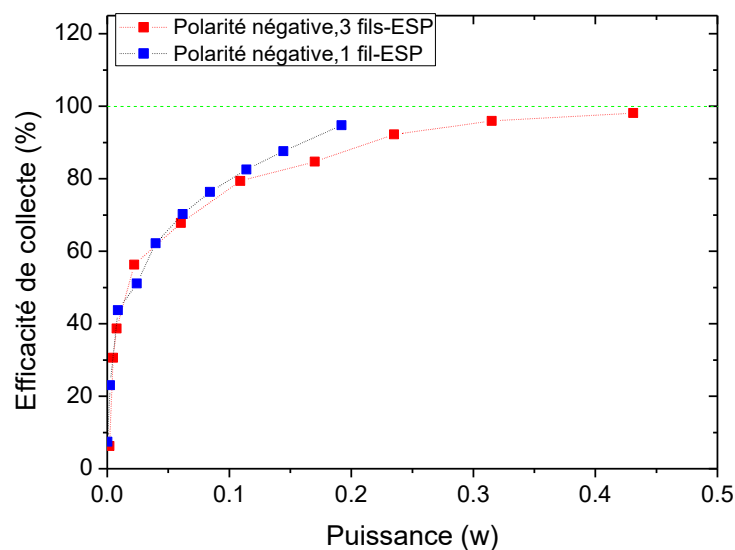


Figure .IV.15 : Efficacité de la collecte en fonction de la puissance consommée.

La figure IV.16 montre l'évolution de l'efficacité de collecte en fonction de la tension appliquée pour les deux décharges couronne négative et positive. Avec l'augmentation de la tension appliquée, la collection augmente et peut atteindre 95% dans le cas d'un seul fil-ESP et 98% dans le cas des trois fils-ESP sous -30 kV (polarité négative).

Pour une tension donnée, le rendement de collecte est nettement plus élevé dans le cas d'une polarité négative par rapport à la polarité positive pour les deux configurations. En raison de la grande mobilité des ions négatifs, le processus de charge des particules conduit à des valeurs supérieures des charges dans le cas de corona négative [74].

En outre, l'interaction entre le flux primaire et le flux secondaire (vent électrique) semble être relativement forte dans le cas de décharge couronne négative en raison de la différence entre les distributions spatiales des décharges couronnes positive ou négative le long du fil [73].

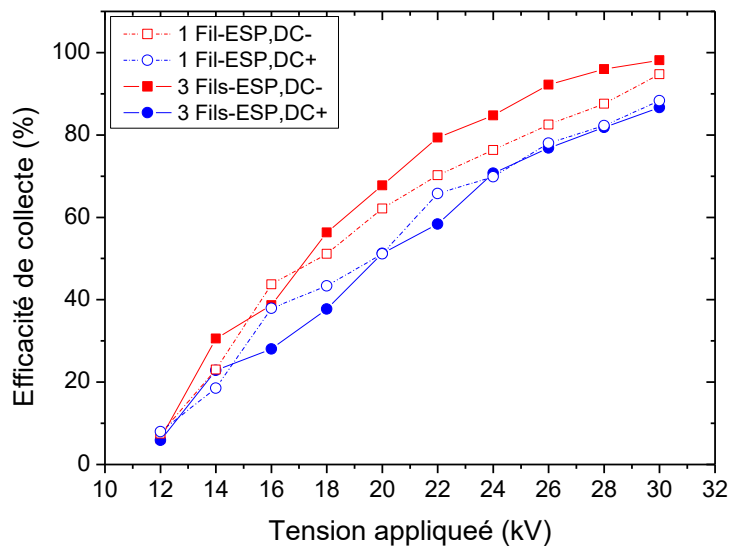


Figure. IV.16 : Efficacité de la collecte en fonction de la tension appliquée.

La Figure IV.17 et la figure IV.18 présentent l'évolution de l'efficacité fractionnaire de collecte en fonction de la taille des particules pour des différents niveaux de tension appliquée (14,16,18,20,22,24,26, 28 et 30 kV) dans le cas d'un seul fil et le cas de trois fils respectivement, dans ces figures on peut voir l'effet de l'instabilité de la distribution des particules de ciment dans le temps qui influe sur la mesure où on voit bien beaucoup de fluctuations dans la visualisation de l'efficacité fractionnaire.

La taille des particules est un élément important pour ce qui concerne la charge des particules. En effet, plus la taille d'une particule augmente plus sa charge électrique est importante. Cependant, ces arguments ne sont plus admissibles pour les particules dont la taille est inférieure à 0,2 μm pour lesquelles l'influence de l'agitation brownienne est très importante. Dans la gamme qui nous employons (de 0,3 à 10 μm) ce phénomène n'est pas sensible et l'efficacité de collecte mesurée augmente toujours avec la taille des particules (Figure .IV.17 et IV.18). Ce phénomène est conforme à la loi de charge de Cochet.

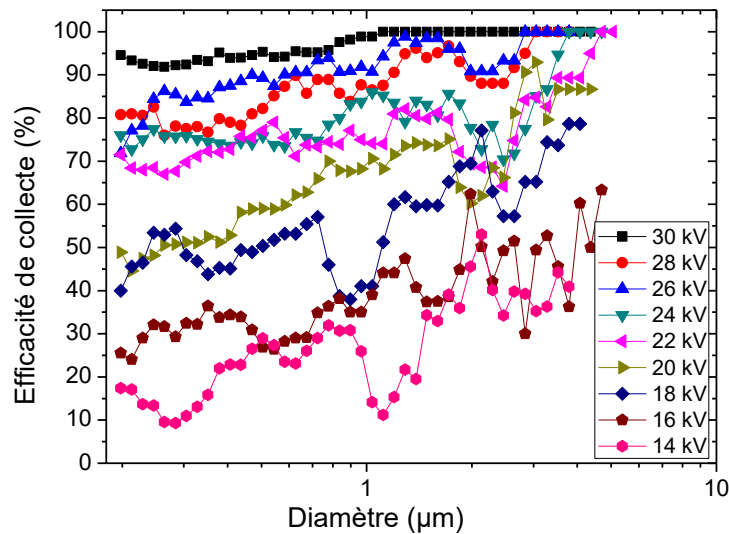


Figure .IV.17 : Efficacité de collecte fractionnaire en fonction du diamètre (cas de 1 Fil-ESP).

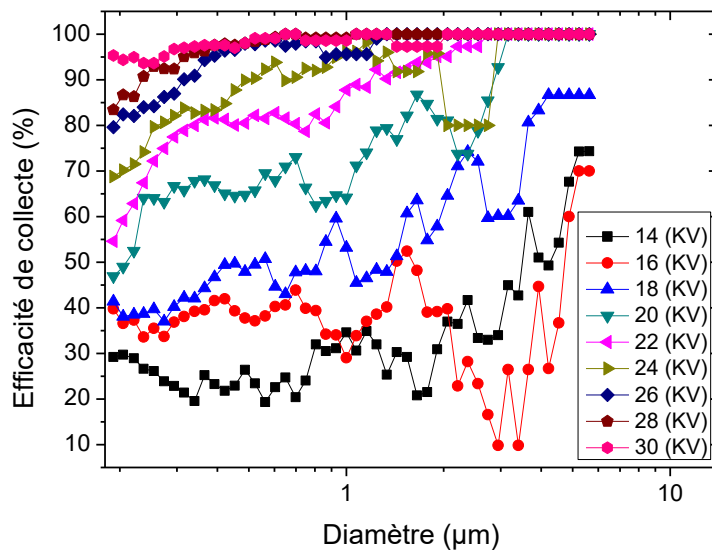


Figure .IV.18 : Efficacité de collecte fractionnaire en fonction du diamètre (cas de 3 Fils-ESP).

Une photographie des particules collectées sur la surface de l'électrode collecte ainsi que l'épaisseur de la couche de ciment qui adhère sur cette surface est illustré dans la figure IV.19 Et figure. IV.20.



Figure. IV.19 : Photographie des particules collectées sur l'électrode de collecte. (Photo prise après 9 h de fonctionnement).

Une couche bien compactée de particules de ciment se forme durant les 9 heures de fonctionnement de notre précipitateur de type asymétrique fil-cylindre qui adhère sur la surface de l'électrode de collecte.



Figure .IV.20 : Photographie de la zone de collection agrandie (Photo prise après 9 h de fonctionnement).

IV.7.Effet du débit du gaz sur l'efficacité de collecte

L'effet du débit de l'écoulement des particules sur l'efficacité de collecte est illustré sur la Figure IV.21. La vitesse d'écoulement du gaz varie entre 0,1 m / s à 0,3 m / s. L'efficacité de collecte diminue avec l'augmentation du débit, car le temps de séjour des particules dans la partie active diminue ce qui va affecter le processus de la charge des particules qui a un rapport direct avec le temps de séjours [71].

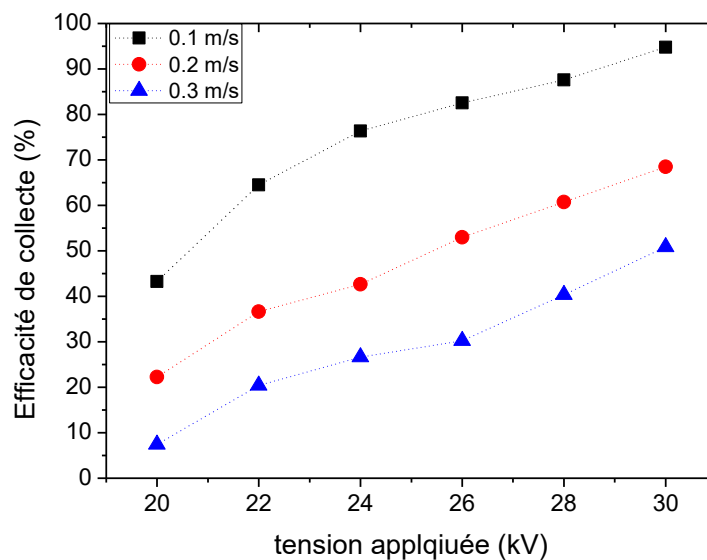


Figure .IV.21 : Effet du débit sur l'efficacité de la collecte.

IV.8. Evaluation des performances du précipitateur asymétrique fil-cylindre

Dans cette partie on étudie le fonctionnement de notre précipitateur électrostatique fil-cylindre asymétrique durant 9 heures pour une seule configuration choisi après avoir fait un rapport entre efficacité et la consommation d'énergie électrique.

La suite des expériences est faite seulement sur la configuration un seul fil-cylindre (1 Fil-ESP), afin de déterminer le changement de fonctionnement vis-à-vis la caractéristique de courant-tension qui va nous mener à visualiser le phénomène de la back corona et même l'efficacité de collecte en fonction du temps de fonctionnement, donc on va évaluer les performances de fonctionnement de notre électrofiltres.

La figure IV.22 montre l'évolution du courant de la décharge couronne en fonction de la tension appliquée durant une durée de 9 heures avec la présence de la pollution (filtre en plein mode opératoire) sous les conditions atmosphériques citées dans légende de la figure.

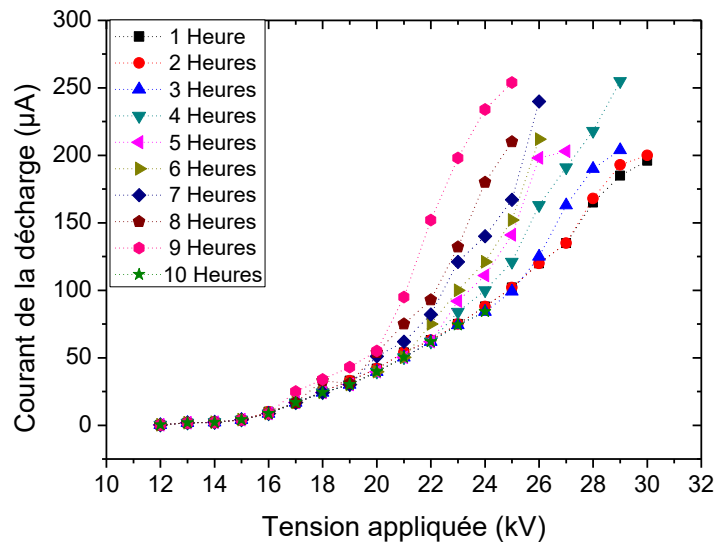


Figure. IV.22 : Evaluation du courant de la décharge en fonction de la tension appliquée pendant une durée de fonctionnement ($T = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RH} = 44 \%$).

Les caractéristiques courant-tension (V-I) de notre décharge couronne sont relevées chaque une heure de fonctionnement afin de visualiser l'effet du dépôt des particules de ciment sur l'électrode de collecte sur le courant mesuré. On constate que l'évaluation courant-tension pour les premières heures correspond à la caractéristique courant-tension de la

configuration fil-cylindre asymétrique quand l'électrode de collecte est quasiment propre (pas de couche de particules polluante sur l'électrode) exprimée par l'équation I.1.

Après 4 heures de fonctionnement, on aperçoit qu'une déformation importante de la caractéristique courant-tension où on peut atteindre des valeurs de courant de décharge plus important pour des tensions inférieure à celle du cas normal, cette modification de caractéristique est due à la présence d'une décharge inverse ou décharge couronne en retour (back corona)[75, 76]. Le tableau IV.1 illustre des valeurs de courant dans le cas où une décharge en retour est présente :

Tableau .IV.1 : évolution du courant de la décharge en fonction du temps et la tension appliquée.

Temps	1Heure	3Heures	6 Heures	9 Heures
Tension appliquée	30 kV	29 kV	26 kV	25 kV
Courant	196 μ A	204 μ A	212 μ A	254 μ A

Le champ critique de la back corona dépend de plusieurs paramètres, y compris la forme géométrique des particules de et la compacité de la couche de poussière qui adhéré sur la surface de l'électrode de collecte. Sa mesure est complexe à cause de la résistivité de la couche de particules qui est fortement variable.

Il est important de souligner que le champ électrique critique de la back corona n'est pas le champ de claquage du diélectrique (la couche des particules de ciment), donc il représente le champ de la rupture diélectrique de l'air [76].

La figure IV.23 nous montre une photographie de la décharge couronne au sein de notre précipitateur électrostatique en polarité négative pour une tension de 30 KV ainsi que la présence de quelque spot lumineux d'une nouvelle décharge couronne en retour ou dite back corona qui se produit sur la surface de l'électrode de collecte en allant vers l'électrode active, causé par la formation d'une couche de particule de ciment épaisse avec une résistivité importante.

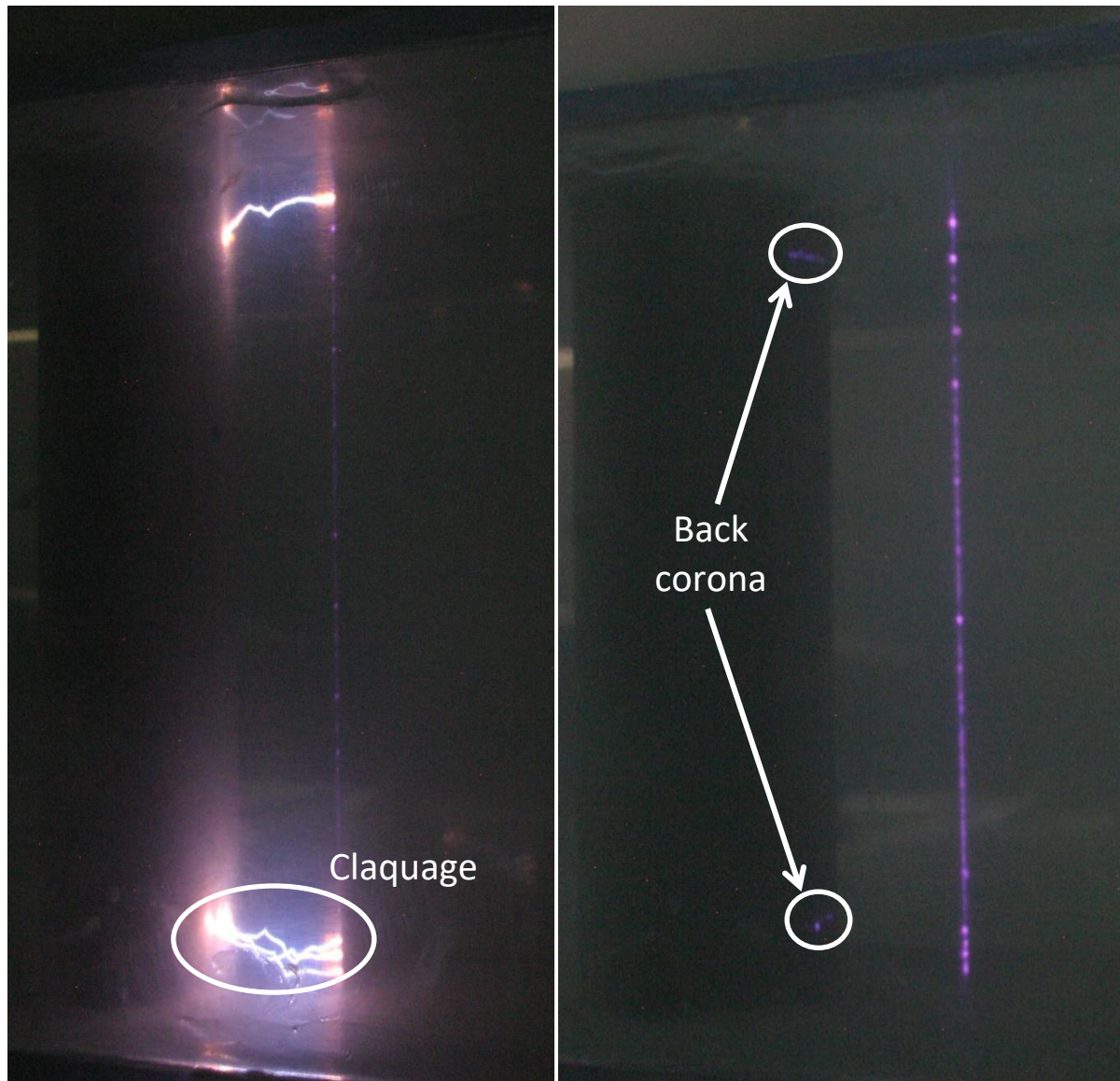


Figure .IV.23 : Photographie de la décharge en retour (back corona).

Le principe de la création d'une décharge inverse ou en retour (back corona discharge) est présenté par la figure IV.24.

La décharge couronne en retour apparaît à cause de la résistivité importante des couches de poussières déposée sur la surface de l'électrode de collecte, le potentiel de surface de la couche de particules augmente de manière régulière dans le temps du au flux d'ions qui arrivent en permanence à la surface de la couche [76, 77].

L'augmentation du potentiel de la surface induit une réduction de la différence de potentiel entre le fil et le cylindre.

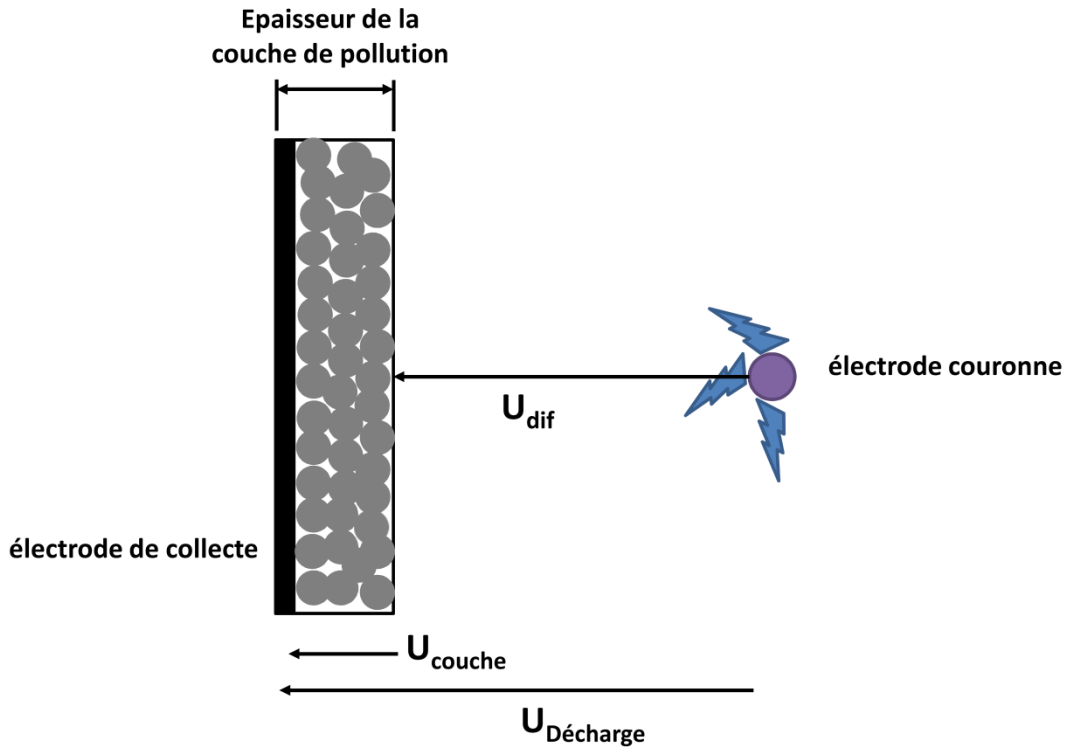


Figure. IV.24 : Principe d'apparition d'une décharge en retour [77].

Ce phénomène atteint sa limite lorsque la tension appliquée à la couche de poussière devient suffisamment élevée pour créer un champ électrique dans la couche supérieur au champ critique d'ionisation de l'air ($E > 2 \cdot 10^6$ V/m) contenu dans les pores (l'espace entre les particules collectées). Cette dernière va provoquer des claquages (l'accumulation de charges dans la couche entraîne la charge des capacités contenues dans la couche jusqu'à leur claquage).

Les claquages provoquent la libération d'ions positifs dans l'espace inter-électrodes. En compensation de l'excédent de charges négatives, une décharge se produit et des ions positifs sont émis vers l'électrode négative : c'est une décharge en retour.

La valeur du champ électrique de claquage se situe entre 10^6 et 10^7 V/m pour les couches de poussières. Le champ qui se situe sur la surface de la couche de pollution collectée peut être estimé à partir de la résistivité et la densité de courant selon la loi d'Ohm [77]:

$$E = \rho \cdot J \quad (IV.1)$$

Où :

- ρ : la résistivité
- J : la densité du courant

La décharge en retour provoque la remise en suspension des particules collectées (phénomène inverse à celui de la collection) appelé aussi le réentraînement des particules collectées qui vont se mélanger avec le gaz et diriger ensuite vers la sortie ce qui va affecter le processus de collection de notre précipitateur. la figure IV.25 montre les particules enlevées par le passage à l'arc constaté lors des essais effectués dans des zone de présence de la décharge en retour.

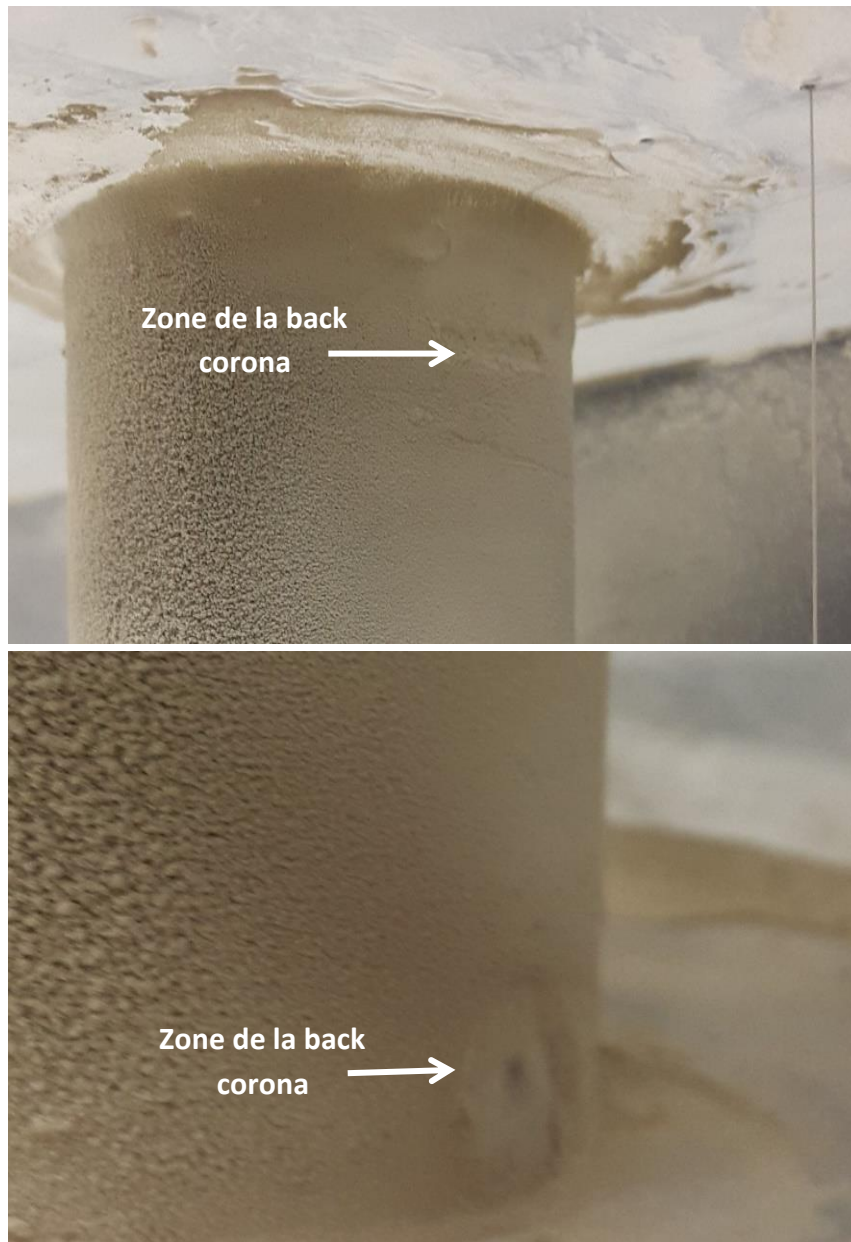


Figure IV.25 : Photographie de l'effet de la décharge couronne en retour sur les particules collectées.

L'efficacité de collecte fractionnaire de notre précipitateur 1 fil-ESP est donnée dans la figure IV.26.

L'accroissement de l'épaisseur de la couche de particule collectée sur la surface de collecte engendre une diminution de l'efficacité de collecte globale et même l'efficacité de collecte fractionnaire présentée par la figure IV.26,

Lors des claquages, l'électrofiltre perd toute son efficacité. Ainsi, un électrofiltre efficace allie à la fois une tension au fil suffisamment élevée pour charger fortement les particules mais assez faible pour éviter les claquages.

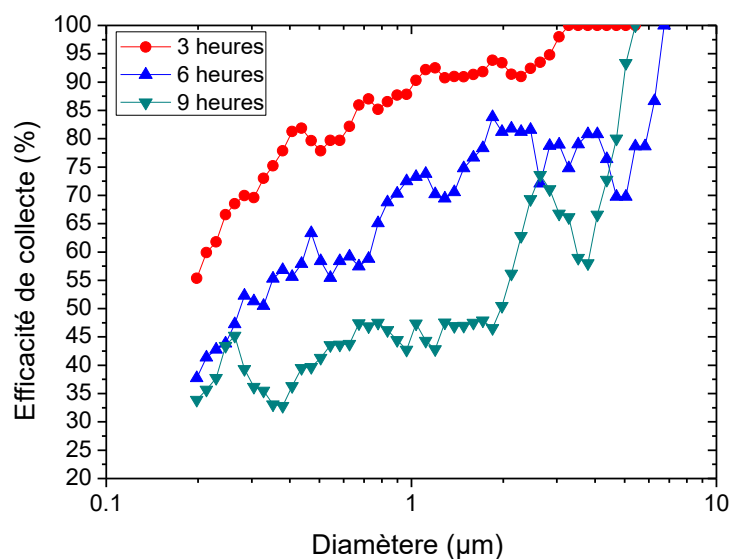


Figure .IV.26 : Evolution de l'efficacité fractionnaire en fonction du temps.

Figure .IV.27 montre l'évolution de l'efficacité de la collecte avec le temps dans le cas d'un fil-ESP, avec une tension appliquée négative (-30 kV). Au début de l'opération, l'efficacité de collecte est légèrement plus faible qu'environ 90%, parce que l'électrode de collecte est propre. Avec l'augmentation de la durée de fonctionnement, l'efficacité de collecte diminue progressivement. Après environ 9 h de fonctionnement, le rendement chute à 45% vers le bas, ce qui indique que l'électrode de collecte est couverte par une épaisse couche de particules de ciment.

Les ions positifs créés par les décharges en retour sur la couche de particules captées, qui sont attirés par l'électrode négative, circulent dans l'espace inter électrodes et rencontrent les particules chargées négativement et les ions négatifs [76, 77].

Les ions positifs neutralisent ces particules. Ce qui va affecter le processus de charge donc la diminution, l'efficacité de collection de l'ESP diminue. Le phénomène le plus important, la libération de charges positives au niveau de l'électrode positive augmente la différence de potentiel dans l'ESP ce qui provoque le passage à l'arc (claquage).

Cette expérience nous a menée à déterminer le temps fonctionnement critique (environ 3 h) qui peut être utilisé pour commander le système de nettoyage qui sera attribué à notre réalisation dans mes prochaines études.

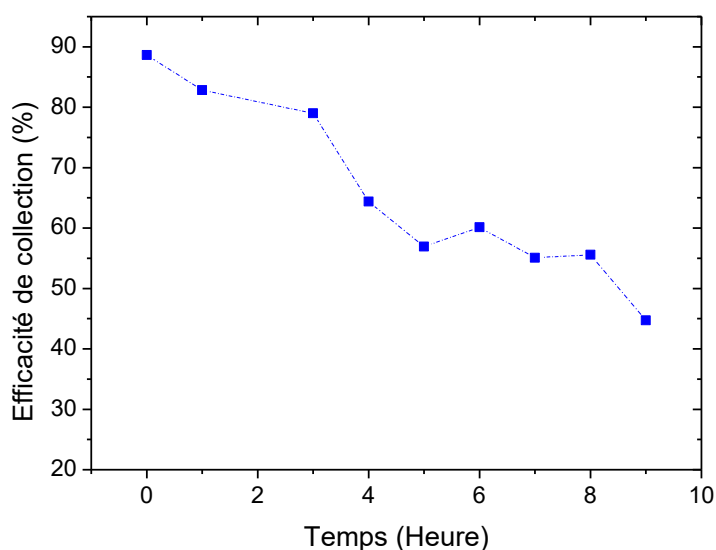


Figure .IV.27 : Evolution de l'efficacité de collecte en fonction du temps de fonctionnement dans le cas d'un 1 fil-ESP, avec une tension appliquée négative.

IV.9. Conclusion

A travers ce chapitre, une étude expérimentale a été élaborée sur un dépoussiéreur électrostatique avec une configuration asymétrique fil-cylindre dans le cas d'un seul fil-ESP et de trois fils-ESP. Ce qui nous a permis d'étudier les caractéristiques courant-tension pour les deux configurations et d'évaluer l'efficacité de collecte des particules de ciment qui ont une résistivité élevée telles que celles libérées par les procédés de fabrication du ciment.

L'efficacité de collecte des particules de ciment allant de 0,18 à 5 μm ont été estimées pour des différentes amplitudes de tension continues appliquées (DC) pour les deux polarités

positives et négatives. L'effet du débit et de la durée de fonctionnement sont également pris en considération. Les principaux résultats de cette recherche sont les suivants :

1. Les mesures électriques montrent que le comportement de la décharge couronne est similaire à celle obtenue dans la configuration classique de fil-cylindre axisymétrique pour les deux configurations.
2. l'efficacité de collecte de l'ESP peut atteindre 95% dans le cas d'un seul fil-ESP et 98% dans le cas de trois fils-ESP pour une décharge couronne négative (-30 kV), ce qui confirme la fiabilité de notre nouvelle géométrie asymétrique fil-cylindre. Cependant, l'efficacité de collecte fractionnaire est limitée à environ 90% pour les particules d'environ 0,2 μm à cause de la tension de claquage.
3. L'efficacité de la collecte diminue avec l'augmentation du débit de l'écoulement. Cela indique la nécessité d'agrandir la zone active pour améliorer le processus de chargement des particules ajoutant des fils couronne.

D'autres recherches sont prévues pour évaluer l'effet de la rotation de l'électrode de collecte sur l'efficacité de collection des particules de ciment.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif du présent travail était d'apporter un nouveau système d'épuration des effluents gazeux ou traitement de l'air pollué par la précipitation électrostatique (système basé sur la décharge couronne), c'est pour cela qu'on a réalisé un prototype d'électrofiltre dans une nouvelle configuration asymétrique fil-cylindre afin de résoudre le problème de récupération des particules collectées sur la surface de l'électrode de collecte pour garder le bon fonctionnement des précipitateurs électrostatiques à long terme.

Le prototype de laboratoire réalisé nous a permis d'étudier cette nouvelle configuration dans le cas où l'électrode de collecte est immobile dont le but primordial est la validation de la fiabilité de notre système par rapport aux systèmes existants cela du point de vue électrique et d'efficacité de collecte.

Le premier chapitre a été dédié à la recherche bibliographique, ce qui nous a permis de construire une synthèse bibliographique sur la pollution atmosphérique, ses principales causes, son influence sur la santé humaine et l'environnement mais aussi les différentes techniques de luttés possibles. D'autre part l'élaboration d'une synthèse sur la décharge couronne dans le cas d'une configuration fil-cylindre pour mieux comprendre ce phénomène pertinent dans le domaine de la précipitation électrostatique.

Un aperçu sur le banc expérimental et ses différentes parties tel que l'alimentation haute tension, le système d'injection de particules de ciment et les différentes phases de préparation des particules polluantes (tamisage) et même la validation de la technique de mesure de l'efficacité est présentée dans le deuxième chapitre, l'objectif c'était la préparation du banc expérimental avant de passer à l'étape de l'étude paramétrique pour avoir des résultats fiables.

Le code calcul élaboré se compose de trois physiques couplées dans une configuration asymétrique fil-cylindre a été résolu efficacement en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Les principaux résultats de cette simulation sont les suivants :

- Les résultats numériques illustrés sont très proche de valeurs expérimentales. Par exemple, la confirmation de la dépendance quadratique entre le courant de décharge couronne et la tension appliquée.
- Les résultats de L'efficacité de collecte numériques sont cohérent à ceux de l'expérimentale dans une large gamme de tensions appliquées.
- La simulation des trajectoires des particules indique que les particules sont collectées principalement sur la face arrière du cylindre jusqu'à une zone où le champ électrique est moins intense.

Le troisième chapitre est suivi d'une étude expérimentale élaborée sur un dépoussiéreur électrostatique avec une configuration asymétrique fil-cylindre dans le cas d'un seul fil-ESP et de trois fils-ESP. Ce qui nous a permis d'étudier les caractéristiques courant-tension pour les deux configurations et d'évaluer l'efficacité de collecte des particules de ciment qui ont une résistivité élevée telles que celles libérées par les procédés de fabrication du ciment.

L'efficacité de collecte des particules de ciment allant de 0,18 à 5 μm ont été estimées pour des différentes amplitudes de tension continues appliquées (DC) pour les deux polarités positives et négatives. L'effet du débit et de la durée de fonctionnement sont également pris en considération. Les principaux résultats de cette recherche sont les suivants :

- Les mesures électriques montrent que le comportement de la décharge couronne est similaire à celle obtenue dans la configuration classique de fil-cylindre axisymétrique pour les deux configurations.
- l'efficacité de collection de l'ESP peut atteindre 95% dans le cas d'un seul fil-ESP et 98% dans le cas de trois fils-ESP pour une décharge couronne négative (-30 kV), ce qui confirme la fiabilité de notre nouvelle géométrie asymétrique fil-cylindre. Cependant, l'efficacité de collecte fractionnaire est limitée à environ 90% pour les particules d'environ 0,2 μm à cause de la tension de claquage.
- L'efficacité de la collecte diminue avec l'augmentation du débit de l'écoulement. Cela indique la nécessité d'agrandir la zone active pour améliorer le processus de chargement des particules on ajoutant des fils couronne ou par la modification de la géométrie (agrandir les dimensions).

D'autres recherches seront prévues pour évaluer l'effet de la rotation de l'électrode de collecte sur l'efficacité de collection des particules de ciment, en particulier pour des conditions à long terme. Un perfectionnement de la simulation est programmé dans les travaux qui suivent ce travail de thèse, on élaborera un code de calcul numérique qui prend en considération la majorité des phénomènes physiques tel que les forces diélectrophorétiques, les vortex derrière l'électrode de collecte et la charge des particules qui sont des paramètres pertinents dans la précipitation électrostatique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Marc Abadie. Contribution à l'étude de la pollution particulaire: rôle des parois, rôle de la ventilation. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de la Rochelle, 2000.
- [2] Hinds, W.C. Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles. John Wiley & Sons, 1982.
- [3] Christian Seigneur. Environnement atmosphérique et qualité de l'air, Cours, Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique, France, 2011.
- [4] F. Kherbouche, Étude expérimentale d'un précipitateur électrostatique, à un seul étage mémoire de magister, Université de Mascara, 2011.
- [5] Des poudres de meilleure qualité grâce à la recherche, Université de Lorraine, 2015 <http://factuel.univ-lorraine.fr/node/2703> , consulté le 01/11/2016.
- [6] Bowen, B.D. and Masliyah, J.H. Drag Force on Isolated Axisymmetric Particles in Stokes Flow ,Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol 51, pp. 8-15, 1973.
- [7] Fontan J. Les pollutions de l'air, les connaître pour les combattre. Édition Vuibert, Paris. , 2003.
- [8] P. Le Cloirec. Les composés organiques volatils dans l'environnement, édition Lavoisier ,1998.
- [9] air-parif. Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l'air et des travaux d'air-parif sur ces polluants, air-parif, surveillance de la Qualité de l'Air en Ile-de-France – Octobre 2008.
- [10] Bastien Albriet. Modélisation numérique des aérosols à l'échelle locale. Thèse de doctorat, Ecole des Ponts Paris-Tech, 2007.
- [11] Anne-Laure BORIE. Pollution atmosphérique et santé : les sujets à risque en Limousin, états des lieux des attentes locales pour une information plus ciblée, thèse de doctorat, Université de Limoges, 1982.
- [12] American Thoracic Society. Health effects of outdoor air pollution, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 1996; 153:3-50.
- [13] Diane Dubois. Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement, thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2006.

- [14] F. Fresnet. Traitement par plasma non thermique des effluents issus d'un moteur fonctionnant dans des conditions d'excès d'air , Thèse de doctorat, Université de Paris 11, 2001.
- [15] E .Marode. Le traitement des effluents gazeux par plasmas froids, REE n° 4, avril 1998.
- [16] J.M.Cormier. Dépollution des effluents gazeux par plasma, A la pointe de l'instrumentation et de la technologie, université d'Orléans. 2004.
- [17] B. Dramane. Précipitation électrostatique de particules submicronique par décharge à barrière diélectrique – étude électrique, granulométrique et aérodynamique, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2009.
- [18] C. D. Cooper and F. C. Alley. Air pollution control, a design approach, Third Edition Waveland Press, 2002.
- [19] N. Zouzou. Cours de Précipitateurs électrostatiques, concepts et théories, Master Génie Électrique, Université de Poitiers, 2012.
- [20] K.R. Parker, Applied Electrostatic Precipitation, Chapman &Hall, 1997.
- [21] H.J. White, Industrial electrostatic precipitation, Addison Wesley, 1963.
- [22] B. Benamar. La faisabilité de l'electrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique l'Université Henri Poincaré, Nancy, novembre 2008.
- [23] A.Krupa, A.Jaworek. Dust Particles Removal by Wet-type Electrostatic Scrubber. 11th Conf. ELECTROSTATICS 2003, Edinburgh, 23-27 March 2003.
- [24] H. Ando, N. Shiromaru, Y. Mochizuki, Recent Technology of moving electrode electrostatic precipitator, Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol. 5 (2011) 130-134.
- [25] T. Misaka, T. Oura, M. Yamazaki, Improvement of reliability for moving electrode type electrostatic precipitator, in: Proc. 10Th International Society for Electrostatic Precipitation ICESP, Cairns, Australia, June 25 - 29, 2006.
- [26] Special Electrostatic Precipitator: Rotary tube type Electrostatic precipitator, Mitsubishi Hitachi Power Systems, Consulté le 01/11/2016.
<https://www.es.mhps.com/en/products/atmosphere/dustcollection/electrostaticprecipitator/specialelectrostaticprecipitator/index.html>
- [27] F. Kherbouche, Y.Benmimoun, A.Tilmatine, A. Zouaghi, N. Zouzou, Study of a new electrostatic precipitator with asymmetrical wire-to-cylinder configuration for cement particles collection, Journal of Electrostatics, Volume 83, October 2016, Pages 7–15.

- [28] J. Bricard, M. Cabane and G. Madelaine. Formation of atmospheric ultrafine particles and ions from trace gases. *J. of Colloid and Interface Science*, 58-1, 113-124, 1977.
- [29] POINTU, A.M. Décharge électrique – Techniques de l'ingénieur D322.
- [30] 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.
- [31] P. Cooperman, A theory for space charge limited currents with application to electrical precipitation, *AIEE. Trans.* 79 (1960) 47-50.
- [32] J. Dupuy. Effet de couronne et champs ionisés, *revue générale d'Electricité*, 67, 2, PP85-104, 1958.
- [33] K. Adamiak & P. Atten. Simulation of corona discharge in point-plane configuration, *Journal of Electrostatics*, Vol. 61, pp. 85-98, 2004.
- [34] Solid Aerosol Generator SAG 410, principle and specifications.
<http://www.topas-gmbh.de/en/produkte/sag-410/>
- [35] F. Miloua. Modélisation expérimentale des précipitateurs électrostatiques à fonctionnement intermittent, alimentés par des hautes tensions continues, thèse de doctorat, Université Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2010.
- [36] R. Gouri. Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré. Application aux particules submicroniques, thèse de doctorat, université de Poitiers, 2012.
- [37] R.H. Bogue. *Chemistry of Portland cement*. Rheinhold (Publishers) ,1955.
- [38] Mesure de la Taille de Particules de Ciment avec le Granulomètre CILAS 990e, Note d'application, CILAS.
<https://www.cilas.com> consulté le 01/11/2016.
- [39] B.Y. Guo, J. Guo, A.B. Yu, Numerical modelling of electrostatic precipitation: effect of gas temperature, *J. Aerosol Sci.* 77 (2014) 102-115.
- [40] COMSOL Multiphysics®, www.comsol.com.
- [41] A. Kara. Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué, Mémoire de magister, Université de Sétif, 2013.
- [42] A.M. Benselma. Modélisation numérique du comportement d'une particule sous champ électrique dans les microsystèmes : de la déformation au déplacement, thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier -Grenoble, 2005.
- [43] P.Cooperman. A theory of space-charge-limited currents with application to electrical precipitation, *AIEE Trans.*, 79, 47-50, 1960.

- [44] P.A. Lawless, L.E. sparks. A mathematical model for calculating effects of back corona in wire-duct electrostatic precipitators, *J. Electrostat*, 51, 242-256, 1980.
- [45] H. Igarashi, S. Sakai, T. Nakamura, T. Morinaga, T. Honma, A boundary element analysis of space charge field in a corona device. *IEEE Trans. Magn.*, 29, 1508-151, 1983.
- [46] B.S. Rajanikanth, N. Thirumaran. Prediction of pre-breakdown V-I characteristics of an electrostatic precipitator using a combined boundary element finite difference approach. *Fuel Process. Technol*, 76, 159-186, 2002.
- [47] B. Benamar, E. Favre, A. Donnot and M.O. Rigo1. Finite Element Solution for Ionized Fields in DC Electrostatic Precipitator, in: Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference, Grenoble, 2007.
- [48] A. Bouteffeha, Etude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans des configurations d'électrodes de type « triode », Thèse de Doctorat, Université Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2015.
- [49] A. Bendaoud, Modélisation du champ électrique et de l'effet couronne dans les installations de haute tension, Thèse de Doctorat, Université Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2004.
- [50] A. Kasdi, Computation and measurement of corona current density and V-I characteristics in wires-to-plates electrostatic precipitator, *J. Electrostat*. 81, pp1-8. , 2016.
- [51] M. Hamdi. Etudes thermiques et dynamiques de l'intensification des transferts par vent ionique - Application au procédé de séchage, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2014.
- [52] A. Castellanos. Coulomb-driven Convection in Electrohydrodynamics, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, No. 6, pp 1201-1215,1991.
- [53] SA. Ould Ahmedou, M. Havet. Analysis of the EHD enhancement of heat transfer in a flat duct, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 16, N° 2, 489-494.2009
- [54] S. Karpov, I. Krichtafovitch, Electrohydrodynamic flow modeling using FEMLAB, in: Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Users Conference; Grenoble, 2007.
- [55] N. A. Kaptzov, *Elektricheskie involentia v gazakh i vakuume*, OGIz, Moscow, URSS, 1947, pp. 587-630.
- [56] K. Adamiak. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: a review, *J. Electrostat*. 71 (2013) 673-680.

- [57] N. E. Jewell-Larsen, S. V. Karpov, I. A. Krichtafovitch, V. Jayanty, C.-P. Hsu, A. V. Mamishev. Modeling of corona-induced electrohydrodynamic flow with COMSOL Multiphysics, in: Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2008, Minneapolis, USA, June 17-19, 2008.
- [58] M. Pauthenier, M. Moreau-Hanot. La charge des particules sphériques dans un champ ionisé, *J. Phys. et Radium*. 3, 590–613, 1932.
- [59] N. A. Fuchs. The charges on the particles of aerocolloids, *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Geograficheskaya, Geofizicheskaya*, 11 (1947) 341.
- [60] N. A. Fuchs. On the stationary charge distribution on aerosol particles in a bipolar ionic atmosphere, *Geofisica Pura e Applicata*, 56 (1963) 185-193.
- [61] R. Cochet, Lois de charge des fines particules (submicroniques). Etudes théoriques-Contrôles récents. Spectres de particule, Proc. Colloque Interne. N° 102 "La physique des forces électrostatiques et leurs applications", CNRS, Paris, (1961) 331–338
- [62] W. B. Smith, J. R. McDonald. Development of a theory for the charging of particles by unipolar ions. *J. Aerosol. Sci.*, 7 (1976) 151–166.
- [63] P.A. Lawless, R.F. Altman. ESPM: an advanced electrostatic precipitator model, *IEEE Ind. Appl.* 29th IAS Annual Meeting, Denver, USA, (1994), pp. 1519–1526.
- [64] F. Kherbouche, Y. Benmimoun, A. Tilmatine, A. Zouaghi, N. Zouzou, Simulation of particles trajectory inside an electrostatic precipitator in asymmetrical wire-to-cylinder configuration, 10ème conférence française d'électrostatique SFE 2016, Aout 2016.
- [65] M. Abdel-Salam, A. Eid. Finite Element Simulation of Corona in Wire-Duct Precipitators, in: *IEEE 37th IAS Annual Meeting*, pp. 1383-1389, 2002.
- [66] D. Patiño, B. Crespo, J. Porteiro, E. Villaravid, E. Granada. Experimental study of a tubular-type ESP for small-scale biomass boilers. Preliminary results in a diesel engine, *Powder Technol.* 288 (2016) 164–175.
- [67] S. Oglesby, G.B. Nichols. *Electrostatic Precipitation*. Marcel Dekker, New York, 1978.
- [68] G.P. Reichel, J.M. Mäkelä, R. Karch, J. Necid. Bipolar charging of ultrafine particles in the size range below 10 nm, *J. Aerosol Sci.* 27 (1996) 931-949.
- [69] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj. Effect of relative humidity on current–voltage characteristics of an electrostatic precipitator, *J. Electrostat.* 70 (2012) 20-24.
- [70] J.S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley. *Handbook of Electrostatic Processes*, Marcel Dekker Edition, NY, 1995.

- [71] B. Dramane, “Précipitation électrostatique de particules submicronique par décharge à barrière diélectrique – étude électrique, granulométrique et aérodynamique”, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2009.
- [72] N. Zouzou, E. Moreau, G. Touchard. Précipitation électrostatique dans une configuration pointe-plan, *J. Electrostat.* 64 (2006) 537–542.
- [73] H.-J. Schmid, H. Buggisch. On the modeling of particle transport in electrostatic precipitators, in: *Proceedings of the 7th International Conference of Electrostatic Precipitators ICESP*, September 20–25, Kyongju, Korea (1998), pp. 121–131.
- [74] J. H. Ji, J. Hwang, G. N. Bae, Y. G. Kim. Particle charging and agglomeration in DC and AC electric fields, *J. Electrostat.* 61 (2004) 57–68.
- [75] M. Ni, X. Wang, G. Xiao, K. Qiu, G. Yang, X. Gao, K. Cen. Development of back corona discharge in a wire-cylinder electrostatic precipitator at high temperatures, *Powder Technology*, 286 (2015) 789–797.
- [76] J.P. Borra. Etude des problèmes liés aux précipitateurs électrostatiques pour le traitement des cendres volantes ; conception et test d’un dispositif de mesure de la résistivité des couches poreuses, Rapport final, SUPELEC – LPGP, janvier 1999.
- [77] G. Bacchiega, I. Gallimberti, V. Arrondel, N. Caraman , M. Hamlil . Back-corona model for prediction of ESP efficiency and voltage-current characteristics, *ICESP X*, Australia 2006.

Abstract

The main objective of this thesis is to study a new electrostatic precipitator (ESP) with asymmetrical wire-to-cylinder configuration. Our laboratory scale ESP is investigated experimentally and numerically. Where we evaluate the collection efficiency of high resistivity particles such as the ones released from cement manufacturing processes.

The experiments are performed with cement particles ranging from 0.18 to 5 μm with a mean size of about 0.4 μm . An aerosol spectrometer is employed for characterizing the size distribution of these particles at the outlet of the ESP. The collection efficiency is estimated for various dc applied voltage magnitudes and for both positive and negative polarities.

The electrical measurements show that behavior of corona discharges is similar to that obtained in symmetrical wire-to-cylinder configuration. Results show that the particle collection efficiency of the ESP can reach 95 % in the case of negative corona discharge.

In order to understand the particle trajectories inside the ESP, the experimental results are compared with data obtained from numerical simulation by using a coupled model. Numerical results indicate that the particles can be collected on the hole collecting electrodes even in the area where the electric field is less intense.

Keywords: Electrostatic precipitator, corona discharge, high resistivity particles, asymmetrical geometry, collection efficiency.

Résumé

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier un précipitateur électrostatique (ESP) dans une nouvelle configuration asymétrique fil-cylindre. Notre précipitateur électrostatique (prototype de laboratoire) est étudié expérimentalement et numériquement. Où nous évaluons l'efficacité de collecte des particules de haute résistivité telles que celles produites des procédés de fabrication du ciment.

Les expériences sont réalisées avec des particules de ciment allant de 0,18 à 5 μm avec une taille moyenne d'environ 0,4 μm . Un spectromètre d'aérosol est utilisé pour caractériser la distribution de taille de ces particules à la sortie de l'ESP. L'efficacité de la collecte est estimée pour diverses grandeurs de tension appliquées en courant continu et pour les deux polarités positive et négative.

Les mesures électriques montrent que le comportement des décharges couronne est semblable à celui obtenu en configuration axisymétrique fil-cylindre. Les résultats montrent que l'efficacité de collecte de notre électrofiltre peut atteindre 95% dans la polarité négative.

Afin de comprendre les trajectoires des particules à l'intérieur de l'ESP, les résultats expérimentaux sont comparés avec les données obtenues à partir de la simulation numérique en utilisant un modèle couplé. Ces résultats numériques indiquent que les particules peuvent être collectées sur des zones bien déterminées de l'électrode de collecte où le champ électrique est faible.

Mots clés: précipitateur électrostatique, décharge corona, particules de haute résistivité, géométrie asymétrique, efficacité de la collecte.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه المذكرة هو دراسة لمرسب كهروستاتيكي في شكل هندسي جديد لا متماثل (سلك - أسطوانة)، حيث قمنا بدراسة تجريبية ورقمية لهذا نموذج مخبري، و قمنا بتقييم مردوديته في جمع جزئيات ذات مقاومة عالية مثل تلك التي تنتج في عملية تصنيع الاسمنت، أجريت هذه التجارب باستعمال جزئيات الاسمنت من 0.18 إلى 05 ميكروميتر ذات متوسط حجمي يقدر بـ 0.4 ميكروميتر، تقدر مردودية هذا نموذج لعدة قيم من كمون الكهربائي المطبق، فالقياسات الكهربائية تدل على أن سلوك التفريغ الكهربائي (كورونة) في هذه الحالة مماثل للسلوك الناتج في حالة استعمال شكل هندسي متماثل (سلك - أسطوانة) وأظهرت النتائج أن مردودية هذا مرسب الكهروستاتيكي يمكن أن تصل إلى 95%، ومن أجل فهم مسار الجزئيات داخل مرسب الكهروستاتيكي تمت مقارنة النتائج التجريبية مع البيانات الرقمية التي تم حصول عليها من المحاكاة، تشير هذه النتائج أن الجسيمات يكمن استقطابها في مناطق محددة جيدا على أسطوانة حيث يكون الحقل الكهربائي ضعيف.

الكلمات المفتاحية: مرسب الكهروستاتيكي، التفريغ الكهربائي (كورونة) ، جزئيات ذات مقاومة عالية، شكل هندسي لا متماثل، مردودية.