

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Électrotechnique



THESE
Présenté par :

OUARI ABBES

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en sciences

Option : Réseaux Electriques Et Haute Tension

Intitulé de la thèse :

*Etude et réalisation d'un système
hybride pour la dépollution des effluents
gazeux*

Présenté devant le jury composé de :

Président	Pr. M. Miloudi	U.D.L. Sidi Bel-Abbès
Directeur de thèse	Pr. F. Miloua	U.D.L. Sidi Bel-Abbès
Co-Directeur de thèse	Pr. A. Tilmatine	U.D.L. Sidi Bel-Abbès
Examineur	Pr. M. Rizouga	UST-Oran
Examineur	Pr. R. Ouiddir	UST-Oran
Examineur	Pr. M. M. Zemat	UST-Oran

Soutenu en : 2022



Remerciement

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés en leur totalité au niveau du Laboratoire de recherche APELEC (Application of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility), Faculté de génie électrique, l'université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes.

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

Je remercie également le professeur Tilmatine Amar, Co-encadrant de ce travail. Son écoute, sa grande disponibilité, l'efficacité et la qualité de son encadrement m'ont permis de mener à bien l'ensemble des travaux de recherche, de communication et de rédaction liés à cette thèse.

Je suis très honoré et je tiens à remercier Monsieur Mohamed MILOUDI Professeur à l'université DJILLALI Liabes, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à messieurs Mohammed El Mouloud ZELMAT, Rabeh OUIDDIR et Mohamed RIZOUGA professeurs à Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf pour avoir acceptés d'examiner la thèse.

J'adresse mes sincères remerciements à mes proches pour leur encouragement et pour leur soutien et leur présence à mes côtés. Sans oublier mes collègues dans le domaine de la recherche et durant les années d'étude, je tiens à les remercier vivement. Enfin, Je voudrais associer à mes remerciements toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

A tous un grand merci.

Table des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Techniques de dépoussiérage dans le domaine industriel.....	3
I.1.Introduction.....	4
I.2. Particules en suspension dans l'air et techniques de traitement.....	4
I.3. Les filtre électrostatiques.....	6
I.3.1. Introduction.....	6
I.3.2. Historique.....	6
I.3.3. Principes de l'électrofiltration.....	7
I.3.4. Les différents types d'électrofiltres.....	9
I.3.4.1. Les électrofiltres secs.....	9
I.3.4.2.Les électrofiltres humides.....	9
I.3.4.3.Les électrofiltres à un seul et double étage.....	10
I.3.4.4.Les filtres à collecteurs plats.....	12
I.3.4.5.Les filtres à collecteur cylindrique.....	13
I.3.5.Modèles de fonctionnement des filtres électrostatiques.....	13
I.3.6.Efficacité de collecte d'électrofiltres.....	13
I.3.7.Vitesse de migration des particules.....	14
I.3.8.Influence de la taille des particules.....	18
I.3.9.Les effets électrohydrodynamiques.....	18
I.3. 10.Avantages et inconvénients des précipitateurs électrostatiques.....	19
I.4.Les dépoussiéreurs à media filtrants.....	20
I.4.1.Introduction.....	20
I.4.2. Historique.....	20
I.4.3. Présentation et fonctionnement des dépoussiéreurs à media filtrants.....	21
I.4.4. Principe de fonctionnement d'un filtre à manches.....	23
I.4. 5. Eléments constitutionnels d'un filtre à manches.....	24
I.4.5.1. Mannequins.....	24

I.4.5.2. Compartiment d'air filtré.....	25
I.4.5.3. Système de décolmatage pneumatique.....	25
I.4.5.3.1. Conséquences du décolmatage pneumatique.....	29
I.4.5.4. Les électrovannes.....	30
I.4.5.5. Air comprimé.....	31
I.4.6. Avantages et inconvénients d'un filtre à manches.....	32
I.5. Conclusion.....	33
CHAPITRE II : Médias filtrants à électret.....	34
II.1. Introduction.....	35
II.2. Matériaux isolants fibreux.....	35
II.3. Classification des différents matériaux fibreux.....	35
II.4. Techniques de fabrication des médias non tissés.....	36
II.5. Efficacité de filtration d'un filtre vierge selon les différents mécanismes de capture des particules.....	40
II.6. Facteurs influant sur l'efficacité de filtration.....	45
II.6.1. Vitesse de filtration et débit d'air.....	45
II.6.2. Humidité.....	45
II.6.3. État de charge des particules.....	46
II.7. Caractérisation de l'efficacité de la collecte.....	46
II.8. Grandeurs caractéristiques d'un media fibreux.....	47
II.8.1. Masse surfacique.....	47
II.8.2. Épaisseur.....	47
II.8.3. Compacité.....	48
II.8.4. Diamètre moyen des fibres.....	48
II.8.5. Longueur spécifique de fibre.....	48
II.8.6. Surface spécifique des fibres.....	49
II.8.7. Orientation des fibres.....	49
II.8.8. Uniformité de répartition des fibres.....	49
II.9. Exemple d'applications des medias fibreux en filtration de l'air.....	50
II.9.1. Filtres industriels.....	50
II.10. Caractérisation de l'état de charge des médias filtrants.....	51
II.10.1 Les électrets.....	51
II.10.2 Méthodes de formation d'électrets.....	52
II.10.3 Méthodes de chargement.....	52

II.10.3.1. Charge par effet triboélectrique.....	53
II.10.3.2. Charge par rouleau électrostatique.....	54
II.10.3.3. Charge par décharge couronne.....	54
II.11. Caractérisation électrique des diélectriques.....	55
II.12. Avantages des nontissés.....	57
II.13. Les inconvénients des non-tissés.....	58
II.14. Conclusion.....	58
CHAPITRE III : Etude de chargement de media filtrant par décharge couronne.	59
III.1. Introduction.....	60
III.2. Présentation de l'effet couronne.....	60
III.3. Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension).....	61
III.4. Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne.....	62
III.5. Les facteurs influençant la décharge couronne.....	63
III.5.1. Facteurs géométriques.....	63
III.5.2. Les facteurs physico-chimiques.....	63
III.5.3. Facteurs électriques.....	65
III.6. Chargement du media filtrant tissé.....	65
III.6.1 But.....	65
III.6.2. Démarche expérimentale.....	65
III.6.2.1. Poste de charge.....	67
III.6.2.2. Poste de la mesure de déclin de charge.....	68
III.6.2.3. Echantillons à charger.....	69
III.7. Etude expérimentale.....	69
III.7.1. Influence de l'amplitude de la tension appliquée.....	70
III.7.2. Influence de la polarité.....	72
III.8. Conclusion.....	73
CHAPITRE VI : Conception et réalisation d'un nouveau filtre hybride	74
VI.1. Introduction.....	75
VI.2. définition de filtre hybride.....	75
VI.3. Technologie des filtres hybrides.....	75
VI.3.1. Collecteur de particules hybride compact (COHPAC).....	76
VI.3.2. Collecteur de particules hybride avancé (AHPC).....	77
VI.3.3. Collecteur à plusieurs étages (MSCTM).....	79
VI.4. Description du nouveau dispositif expérimental réalisé.....	79
VI.4.1. Description.....	80

VI.4.2. Sources d'alimentations.....	81
VI.4.3. L'électro-manche.....	82
VI.4.4. Système d'admission de la poussière.....	83
VI.4.5. Système de nettoyage pneumatique.....	84
VI.4.6. Appareillage de mesure.....	86
VI.5. Principe de fonctionnement du filtre hybride.....	87
VI.6. Essai de filtration par filtre hybride.....	87
VI.7. Nouvelles techniques de monitoring du filtre hybride.....	91
VI.7.1. Introduction.....	91
VI.7.2. Chargement en ligne du manche filtrant.....	92
VI.7.2.1. Banc d'essai.....	92
VI.7.2.2. Procédure expérimentale.....	94
VI.7.3. Résultats et discussion.....	94
VI.7.3.1. Influence de la tension sur la charge acquise par le filtre à manches.....	94
VI.7.3.2. Influence du flux d'air.....	97
VI.7.4. Monitoring du filtre hybride.....	98
VI.7.4.1. Mesure de charge électrique.....	98
VI.7.4.2. Mesure capacitive.....	99
VI.8 Conclusion.....	102
Chapitre V : Paramètres influents sur l'efficacité de collecte Des media filtrants..	103
V.1. Introduction.....	104
V.2. Evolution de l'efficacité avec le colmatage.....	104
V.3. Efficacité de collecte des medias fibreux chargés par décharge couronne	105
V.4. Analyse expérimentale d'un filtre à manches chargé par décharge couronne.....	106
V.4.1. Introduction.....	106
V.4.2. matériel et méthodes.....	107
V.4.3. Résultats et discussion.....	111
V.4.3.1. Influence du diamètre des particules.....	112
V.4.3.2. Influence de la masse injectée sur l'efficacité de collecte du filtre.....	113
V.4.3.3. Détermination du temps de neutralisation du filtre.....	114
V.4.3.4. Effet de la charge sur le temps de fonctionnement.....	115
V.4.3.5. Nouvelle méthode pour la surveillance du filtre.....	116
V.5 Conclusion.....	118
Conclusion générale	120
Bibliographie	122

Liste des abréviations

η_t	Rendement de collection
M_e	Masse totale de particules respectivement à l'entrée du filtre
M_s	Masse totale de particules respectivement à la sortie du filtre
η_f^i	L'efficacité de collection est définie par la relation
$m_s(d_p^i)$	Masses de particules de la classe i à la sortie du précipitateur
$m_e(d_p^i)$	Masses de particules de la classe i à l'entrée du précipitateur
$C_s(d_p^i)$	Concentrations moyennes des particules de la classe i à la sortie du filtre
$C_e(d_p^i)$	Concentrations moyennes des particules de la classe i à l'entrée du filtre
d_p	Diamètre de particule
q_p	Charge électrique de particule
W_E	Vitesse de particule
U_g	Vitesse d'écoulement de gaz
E	Champ électrique uniforme et constant
m_p	Représente la masse de la particule,
F_e	Force électrique
F_f	Force de traînée
$C_f Re_p$	Coefficient de traînée,
S_p	Section droite de la particule
ρ_p	Densité du gaz porteur
We	Vitesse relative de la particule par rapport au gaz.
Re_p	Nombre de Reynolds
\bar{F}_f	Force de frottement entre une particule sphérique et le gaz
η_g	Viscosité dynamique du gaz
λ_g	Libre parcours moyen des molécules du gaz
C_u	Facteur de Cunningham :
ω_{th}	Vitesse de migration théorique
τ_p	Temps de relaxation de la particule considérée

ρ_p	Masse volumique des particules.
M_e	Module d'élasticité,
M_f	Module de flexibilité du medium
F_s	Force de séparation par unité de surface.
a_{max}	Décélération maximale du medium.
w_{res}	Masse surfacique résiduelle après décolmatage
w_c	Masse surfacique additionnelle pendant un colmatage
$\left(\frac{d(\Delta p)}{dt}\right)_{max}$	Variation de perte de charge maximale pendant le décolmatage
η	L'efficacité de collecte globale d'un filtre
C_{amont}	Concentration de particules en amont du media filtrant
C_{aval}	Concentration de particules en aval du media filtrant
ΔP	Perte de charge maximale de fonctionnement du filtre
P_{amont}	Pressions statiques en amont du filtre
P_{aval}	Pression statique en aval du filtre.
α	Compacité du filtre
V_{fibre}	Volume des fibres
V_{total}	Volume du filtre total
Z	Epaisseur (la distance entre la face supérieure et la face inférieure d'un média fibreux)
M_s	Masse surfacique des fibres (g/m^2).
L_{th}	Longueur spécifique ou longueur de fibres unitaires
a_f	Surface spécifique (m^2/g)
ρ_f	Masse volumique de la fibre (g/m^3)
S_{fibres}	Surface des fibres (m^2)
V_{fibres}	Volume des fibres (m^3)
d_f	Diamètre des fibres (m)

Liste des figures

Figure I.1 : Principe de la précipitation électrostatique dans les électrofiltres.....	07
Figure I.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre.....	08
Figure I.3 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique humide.....	10
Figure I.4 : Vue schématique d'un filtre électrostatique Type plaque – plaque.....	11
Figure I.5 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique à deux étages.....	12
Figure I.6 : Schéma explicatif pour le mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles	15
Figure I.7 : Variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules	17
Figure I.8 : Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules.....	18
Figure I.9 : Schémas de différents types de dépoussiéreurs à media filtrants avec décolmatage pneumatique	21
Figure I.10 : Fonctionnement d'une manche.....	24
Figure I.11 : Schéma d'un Modèle de Mannequins.....	24
Figure I.12 : Compartiment de circulation d'air filtré.....	25
Figure I.13 : Différents techniques de décolmatage des manches.....	26
Figure I.14 : Schémas des différentes étapes du mouvement d'une manche lors d'un décolmatage pneumatique	27
Figure I.15 : Manches avant l'usage.....	29
Figure I.16 : Manches détériorées.....	30
Figure I.17 : Electrovanne.....	31
Figure I.18 : Réservoir à air comprimé pour le décolmatage des manches d'un filtre.....	32
Figure II. 1 : Classification des différentes matières utilisées pour la fabrication des fibres.....	36
Figure II. 2 : Médias non-tissés obtenus par différents procédés.....	39
Figure II. 3 : Les quatre principaux mécanismes de collecte des particules.....	41
Figure II. 4 : Efficacité fractionnelle et les mécanismes de capture des particules en fonction de leur tailles	42
Figure II. 5 : Schéma du mécanisme de collecte par impaction.	43
Figure II. 6 : Schéma du mécanisme de collecte par interception.....	43
Figure II. 7 : Schéma du mécanisme de collecte par diffusion brownienne.	44
Figure II. 8 : Schéma du mécanisme de Collecte par effets électrostatiques	45
Figure II. 9 : Manche filtrante.....	50
Figure II.10 : Dispositif de charge par effet triboélectrique.....	54
Figure II.11 : Principe de charge par rouleau électrostatique.....	54
Figure II.12 : Principe de formation d'électret par décharge couronne.....	55
Figure II.13 : Principe de fonctionnement d'une sonde capacitive.....	56
Figure II.14 : Principe de fonctionnement d'une sonde moulin à champ.....	57
Figure III.1 : Différentes configurations de décharge couronne.	61
Figure III.2 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique	62
Figure III.3 : Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression.....	64
Figure III.4 : Montage expérimental utilisé pour la mesure du déclin de potentiel.	66
Figure III.5 : Photographie du dispositif expérimental réalisé.....	67
Figure III.6 : Dispositif de charge par décharge couronne.....	68
Figure III.7 : Schéma du poste de mesure du déclin de charge.....	69
Figure III.8 : Échantillon du Tissus utilisés.	69
Figure III.9 : Position de tissu sur le demi-cylindre.....	70
Figure III.10 : Influence de la décharge sur l'électrofiltre.....	71
Figure III.11 : Déclin de charge (%).	72

Figure VI. 1 : Photographie du Collecteur de particules hybride avancé (AHPC).....	77
Figure VI. 2 : Principe fonctionnement de l'AHPC	78
Figure VI. 3 : Principe de fonctionnement de MSCTM.....	79
Figure VI. 4 : Photographie du dispositif expérimental réalisé.	80
Figure VI. 5 : Photographie du dispositif filtre hybride.....	81
Figure VI. 6 : Différentes sources utilisées.....	82
Figure VI. 7 : Schéma descriptif du l'électro-manche.....	82
Figure VI. 8 : Photographie du l'électro-manche.....	83
Figure VI. 9 : Système d'injection d'air pollué.....	84
Figure VI.10 : Schéma du système de nettoyage pneumatique.....	85
Figure VI.11 : Schéma descriptif de l'armoire électrique.....	85
Figure VI.12 : Photographie du Pasco 550.....	86
Figure VI.13 : Photographie du capacimètre.....	86
Figure VI.14 : Schéma descriptive global du procédé de filtration hybride.....	87
Figure VI.15 : Banc expérimental de filtration hybride réalisé.....	88
Figure VI.16 : Influence de la tension sur l'amplitude de la charge enregistrée.....	89
Figure VI.17 : La Masse non filtré en (%) au niveau du filtre.....	90
Figure VI.18 : Composition du filtre hybride.....	93
Figure VI.19 : Système de mesure de la charge acquise par le media filtrant.....	93
Figure VI.20 : Variation de l'image de la charge électrique en fonction de la tension appliquée.....	86
Figure VI.21 : Variation du maximum de la charge électrique acquise en fonction de la tension appliquée.....	96
Figure VI.22 : Variation du temps de neutralisation du tissu en fonction de la tension appliquée.....	97
Figure VI.23 : Influence du flux d'air $U = 5 \text{ Kv}$	98
Figure VI.24 : Monitoring et mesure de pertes de charge (ΔQ) d'un filtre à manches ;Cas de 2 cycles de colmatage/décolmatage.....	99
Figure VI.25 : Contrôle du dépôt du gâteau de poussière par mesure capacitive.....	100
Figure VI.26 : Variation de la capacité en fonction du temps de fonctionnement.....	101
Figure V.1 : Configuration expérimentale.....	109
Figure V.2 : Schéma du filtre modifié avec mesure en ligne de la charge électrique et de la capacité.	110
Figure V.3 : Evolution de la charge électrique du media filtrant avec le temps de décharge couronne ($V = 5 \text{ kV}$)	112
Figure V.4 : Variation de l'efficacité de collecte media filtrant en fonction du diamètre des particules pour différentes valeurs de la tension appliquée.....	113
Figure V.5 : Variation de l'efficacité de collecte avec la masse totale introduite pour différentes valeurs de la tension appliquée.	114
Figure V.6 : Evolution du temps de décroissance vers la neutralisation totale du media filtrant avec la durée de décharge couronne ($V = 5 \text{ kV}$).....	115
Figure V.7 : Variation de la charge électrique avec le temps de fonctionnement ($\Delta t = 8 \text{ s}$).....	116
Figure V.8 : Variation de la capacité du système avec la masse introduite.....	117
Figure V.9 : Évolution de la charge du filtre à manches (Q) pendant le fonctionnement du BHF ($V = 3 \text{ kV}$).	118

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Procédés de fabrication des médias fibreux en fonction de l'application...	40
Tableau III.1 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative.....	63
Tableau V.1 : Fiche techniques du media filtrant utilisé.....	108

Introduction Générale

La pollution de l'air issue de l'activité humaine peut se manifester par la présence de particules dans une atmosphère extérieure ou intérieure. L'évaluation des concentrations de ces particules et la maîtrise des conditions dans lesquelles elles sont émises revêt un grand intérêt compte tenu de leurs actions nocives sur la santé humaine et sur l'environnement.

Ceci a conduit à une sorte de prise de conscience nouvelle pour l'environnement en tant que progrès pour l'entreprise, ainsi que la maîtrise des pollutions qui s'accorde parfaitement avec le mode d'actions établi par un système de management environnemental. Car depuis quelques années, le management environnemental est devenu le système de management en vogue dans le monde industriel. De ce fait, la norme internationale ISO 14001 est devenue un instrument incontournable de ces démarches qui mobilisent les moyens à la fois humaines, techniques et économiques des dites entreprises.

Etant consciente de cet enjeu, les chercheurs ont mis en place une politique environnementale appuyée sur les standards de la norme ISO 14001, et ce en installant des équipements de dépoussiérage de différentes conceptions et technologies afin de limiter autant que faire se peut les poussières émises des différentes installations.

Les technologies d'épuration des particules diffèrent suivant que l'air à traiter est rejeté dans l'atmosphère ou qu'il est confiné dans un lieu clos. Dans les espaces intérieurs ventilés ou climatisés, la filtration sur médias fibreux non-tissés est couramment utilisée. Les forces électrostatiques de collecte des particules, présentes dans les filtres à manche chargé par effet couronne, augmentent notablement l'efficacité de la filtration des particules plus fines, de taille submicronique [2-3].

Le présent projet, et qui s'intitule " Etude et réalisation d'un filtre hybride pour la dépollution des effluents gazeux ", entre dans le cadre de cette étude. Il se compose de quatre parties principales :

- 1) généralités sur les dépoussiéreurs ;
- 2) Etude de filtre à manche à électret ;
- 3) Etude de chargement de media filtrant par décharge couronne ;
- 4) Etude et réalisation d'un filtre hybride pour dépollution des effluents gazeux ;
- 5) Paramètre influent sur l'efficacité de collecte Des media filtrants.

Dans le premier chapitre nous présentons l'état de l'art des dépoussiéreurs où on a caractérisé les différents modèles, leur conception ainsi que leur domaine d'application à savoir l'influence de la taille des particules sur ces derniers et on est terminé par une petite comparaison ou on a cité quelques avantages et inconvénients. pour finir on a donné la solution idéale pour le nettoyage de ses filtres par système de décolmatage pneumatique.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de l'état des connaissances sur les électrets obtenus à partir des matériaux isolants fibreux, en particulier les médias non-tissés utilisés à la filtration d'air. Une synthèse sur les études de charge de ces matériaux est également faite.

Au troisième chapitre, les mesures de déclin de potentiel de surface (DPS), effectuées sur des échantillons tissés de même dimension, sont présentées et discutées en fonction des conditions de charge par décharge couronne en polarité négative. L'analyse des données expérimentale à l'aide d'un (PASCO scientifique Capstone) nous a permis de mettre en évidence la réponse de base de ce type de matériaux, ainsi que le phénomène de charge à l'interface média tissé.

Dans le chapitre quatre on va présenter un aperçu sur la technologie des filtres hybrides ainsi que sur notre nouveau dispositif expérimental réalisé avec son système de monitoring ensuite nous aborderons les techniques expérimentales qui caractérisent le filtre hybride par rapport aux autres filtres. Dans le cas des dépôts de charges réalisés à des valeurs élevées de la tension de décharge couronne, nous avons pu constater que le filtre hybride présente un bon choix par rapport au filtre à manche.

Le dernier chapitre sera consacré à l'étude expérimentale du filtre à manche d'une configuration modifiée (BHF) pour améliorer l'efficacité de la collecte du filtre médium. Enfin, nous aborderons les techniques expérimentales de monitoring qui caractérisent notre filtre hybride par rapport aux autres filtres similaires.

Techniques de dépoussiérage dans le domaine industriel

I.1.Introduction

De nombreux procédés industriels provoquent des contaminations de l'air sous forme de poussières et particules. Les poussières, selon leurs compositions, peuvent être relativement sans danger tout comme elles peuvent être explosives, corrosives ou encore très toxiques.

Les conséquences sont notamment des explosions et la pollution particulaire des ateliers de travail. Mis à part l'inconfort résultant d'une exposition à un empoussièrément trop important, il y a l'apparition de maladies professionnelles. La prévention des maladies professionnelles n'exige que l'exposition des personnes aux polluants soit évitée ou réduite aux niveaux les plus faibles possibles.

À cause des nombreuses conséquences de la poussière, la filtration de l'air est une préoccupation majeure dans de nombreux secteurs industriels. Les dépoussiéreurs n'ont pas pour seule tâche d'éliminer les particules solides présentes dans les effluents gazeux. Ils doivent aussi offrir un air bien filtré. Pour la plupart des gens, un dépoussiéreur est une machine qui sert à filtrer l'air. Cependant pour offrir un air bien filtré, il faut une bonne efficacité de filtration.

I.2. Particules en suspension dans l'air et techniques de traitement

Les particules en suspension dans l'air, ou aérosols, sont constituées de substances solides et/ou liquides, présentant une vitesse de chute le plus souvent négligeable. La présence de particules en suspension dans l'air est principalement due à la pollution atmosphérique [1].

Les poussières fines (ou microparticules) en suspension dans les gaz sont formées par la désintégration de liquides ou solides ou par la conversion des gaz en particules. Ils peuvent aussi résulter de la mise en suspension de poudre ou de la désagrégation d'agglomérats. Ces particules en suspension dans l'air, encore appelées aérosols, sont donc constituées de substances solides et/ou liquides, présentant une vitesse de chute le plus souvent négligeable. Les particules en suspension constituent un ensemble extrêmement hétérogène de polluants divers, minéraux ou organiques ; ces particules sont composées de matières vivantes ou non et ont une taille variant de quelques nanomètres à une centaine de micromètres.

La taille de particules est le paramètre le plus important pour caractériser le comportement des aérosols (presque toutes les propriétés des aérosols dépendent de la taille de particules). Il existe presque toutes les formes et tailles de particules suivant leur nature et selon qu'elles proviennent d'agrégats de matière solide ou liquide en suspension dans l'air ambiant. On distingue ainsi classiquement deux types de particules : les PM10 (Particulate Matter) qui sont celles dont le diamètre moyen n'excèdent pas 10 μm et qui proviennent principalement des véhicules (en particulier de ceux équipés d'un moteur diesel) et les PM25 dont le diamètre moyen est inférieur à 25 μm et qui sont majoritairement émises par des sources fixes. Les particules les plus petites, de diamètre inférieur à 10 μm , sont susceptibles de pénétrer le plus profondément dans l'appareil broncho-pulmonaire [2-3].

Les particules ou poussières ne constituent pas un polluant ordinaire. Alors que pour toutes les autres substances, il suffit de mesurer le poids des émissions pour avoir une idée exacte sur la façon dont évolue la qualité de l'air, pour les particules le problème est plus complexe. En effet, leur toxicité n'est pas directement liée à leur poids. Au contraire, les particules les plus fines sont généralement considérées comme les plus dangereuses en raison de la difficulté à les piéger par des filtres, de leur capacité à pénétrer plus profondément dans l'appareil respiratoire et de leur plus long temps de suspension dans l'air. De nombreuses techniques de filtration de l'air destinées à répondre au problème croissant de la pollution atmosphérique ont été mises au point, notamment pour le secteur industriel. Selon la nature du gaz, la taille ou la concentration des particules, il existe quatre catégories :

- Les filtres mécaniques,
- Les filtres hydrauliques,
- Les filtres à manche,
- Les filtres électriques ou électrofiltres.

Dans notre étude on va s'intéresser uniquement au filtre à manche et les filtres électrostatiques.

I.3. Les filtres électrostatiques

I.3.1. Introduction

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, 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 celle des ambiances de travail (brouillards d'huile, poussières de bois, ...). Leur efficacité est extrêmement élevée, notamment pour les particules micronique et submicroniques ou d'autres systèmes sont peu efficaces [4].

I.3.2. Historique

Le principe de fonctionnement de l'électrofiltre est connue depuis 1820, mais la première application industrielle connue d'électrofiltre remonte à début 1880 et a été utilisée presque simultanément en Allemagne et en Angleterre. A cette époque la haute tension est produite par friction de diélectriques et stockée dans des bouteilles de Leyde (condensateur primitif) ou par des bobines de Ruhmkorff. Les isolants naturels utilisent (bakélite, mica, verre) ne permettent pas de travailler à des tensions dépassant 10-15 kV. Les premiers électrofiltres ne sont installés que lorsque la valeur marchande des particules récupérées (fumées d'acide sulfurique, fumées d'oxydes métalliques) justifie leur construction, au-delà de toute considération environnementale. Des efficacités de collecte de 90-95 % sont donc largement suffisantes, la quantité restante coutant trop cher à précipiter. Comme aucune législation contre les rejets gazeux n'est en vigueur, la situation n'évoluera que dans les cas de pollutions extrêmes (cimenteries et fours a plomb). On s'aperçoit rapidement de l'intérêt économique d'avoir les plus grands espaces inter-électrodes possibles, malgré les difficultés à produire des très hauts voltages. Les électrofiltres industriels ont donc historiquement des dimensions gigantesques, d'autant plus importantes que le gaz circule à très faible vitesse (1,5 à 1,8 m/s). Les puissances volumiques de travail de l'époque (1919) sont de l'ordre de 0,3 J/L pour les cimenteries et de l'ordre de 1 J/L globalement [5]. Un grand pas en avant a été réalisé lorsque Walter Deustch mis au point la relation théorique liant l'efficacité de filtration, le débit traite et la surface collectrice (1922). Cette relation est alors utilisée pendant 50 ans par les ingénieurs, puis modifiée par Matts et Ohnfeldt pour être un peu plus réaliste. Enfin à titre

anecdote, des applications de précipitation électrostatique sont à l'étude pour l'abattement des brouillards naturels dans les zones de transports routiers ou maritimes denses [6].

I.3.3. Principes de l'électrofiltration

L'électrofiltration ou précipitation électrostatique est basée sur trois étapes fondamentales (Figure I.1) :

- Chargement électrique des particules en suspension dans les gaz à traiter ;
- Collecte des particules chargées sous l'action d'un champ électrique ;
- Récupération des particules collectées.

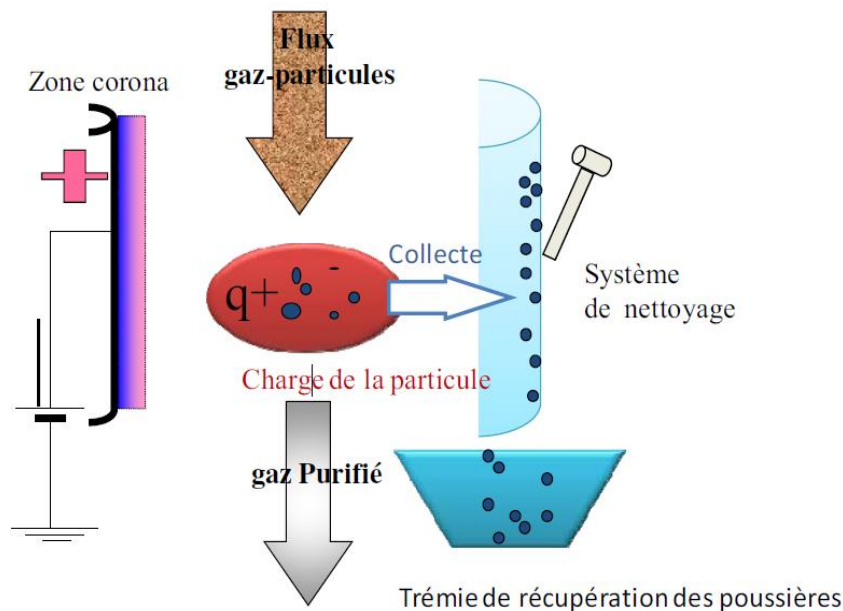


Figure I.1 : Principe de la précipitation électrostatique dans les électrofiltres

Dans les électrofiltres les plus simples, fil-cylindre concentriques, un potentiel électrique très élevé est appliqué au fil, appelé électrode émettrice, il est placé dans l'axe du cylindre, appelé électrode collectrice, qui lui est reliée à la terre (Figure I.2) :

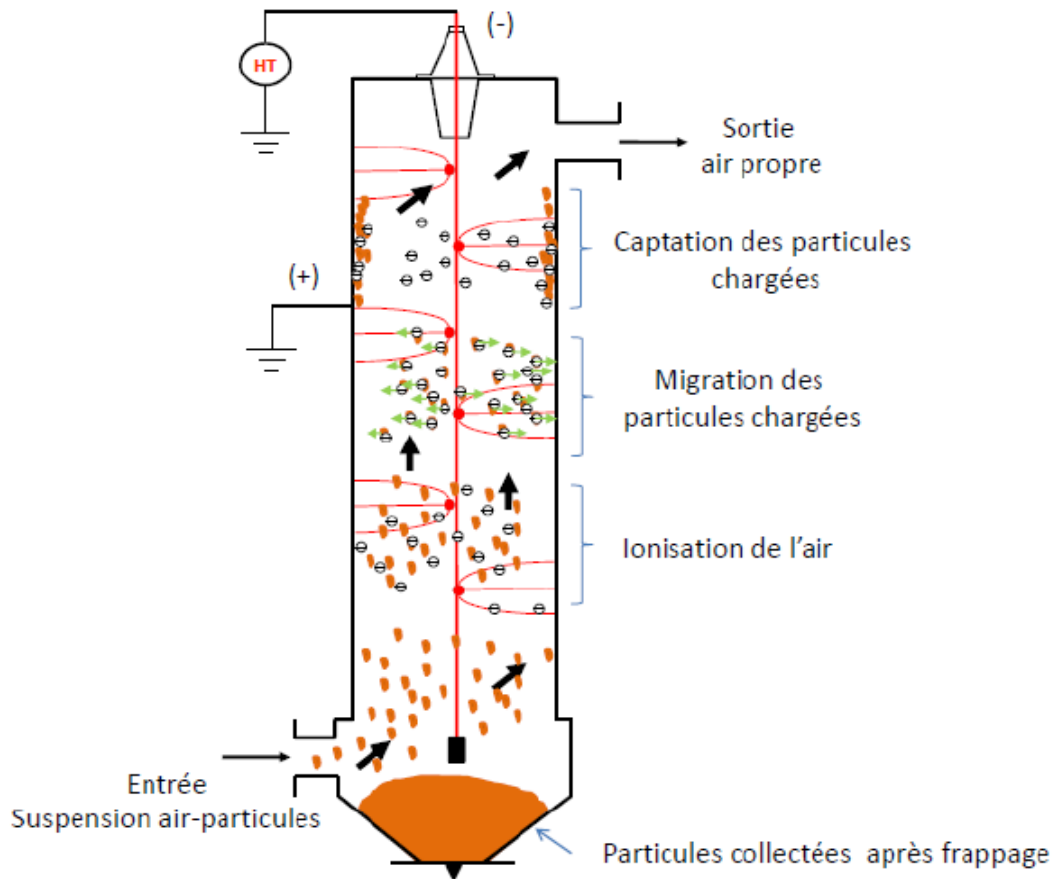


Figure I.2 : Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre

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

Ces ions sont attirés vers les particules en raison de la distorsion locale du champ électrique, causée par la différence de permittivité relative entre les particules et le gaz. Les particules captent les ions positifs et se chargent jusqu'à atteindre une charge limite lorsque le champ électrique de répulsion, dû aux charges acquises, est équilibré par le champ électrique de distorsion.

Les particules chargées positivement subissent alors une force due au champ électrique qui les conduit vers l'électrode reliée à la terre. Les particules isolantes ne peuvent pas perdre leur charge au contact de cette électrode. Elles adhèrent ainsi à la paroi jusqu'à ce qu'elles soient enlevées par lavage, grattage ou frappe. Les particules conductrices, quant à elles, perdent leur charge au contact de la paroi et se chargent en

polarité opposée. La précipitation électrique n'est donc utilisable que pour des particules relativement isolantes [7-10].

I.3.4. Les différents types d'électrofiltres

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 :

- Les électrofiltres secs.
- Les électrofiltres à un seul étage.
- Les électrofiltres à double étage.
- Les électrofiltres humides.
- Les filtres à collecteurs plats.
- Les filtres à collecteur cylindrique.

I.3.4.1. Les électrofiltres secs

N'occasionnent que de faibles pertes de charges (50-100 Pa) et sont recommandés pour le traitement de grands débits gazeux – plusieurs milliers de $m^3.h^{-1}$. L'efficacité d'épuration peut atteindre 99% sur des particules de diamètre supérieur à $1\mu m$. Le minimum d'efficacité se situe pour des particules de diamètre compris entre 0,1 et $1\mu m$ [11]. Ces électrofiltres sont composés d'un caisson (pour les électrofiltres à plaques), d'une ou plusieurs électrodes émissives, d'une ou plusieurs électrodes collectrices (plaques ou conduit cylindrique), d'un système d'extraction et de récupération des poussières (marteaux ou système de mise en raisonnant) et d'une alimentation haute tension (de 30 à 120 kV pour un courant de 20 à 600 mA).

I.3.4.2. Les électrofiltres humides

Utilisent un film d'eau ruisselant sur la ou les électrodes collectrices. L'effluent gazeux à traiter est, en amont du filtre, saturé en vapeur d'eau, ce qui permet d'obtenir une efficacité de collecte supérieure à celle d'un électrofiltre sec. Cela permet également d'épurer le gaz porteur de polluants gazeux. Les avantages de cette technologie sont multiples : Le film ruisselant étant mis à la terre, il n'est pas nécessaire d'utiliser des plaques collectrices en matériau conducteur, les performances de collecte sont indépendantes de la résistivité des particules, le réentraînement des particules collectées est inexistant et les particules submicroniques sont collectées plus facilement (elles

servent de noyaux de condensation à la vapeur, leur taille augmente jusqu'à dépasser la gamme du minimum de filtration).

Néanmoins, l'adjonction d'un film d'eau ruisselant sur les électrodes collectrices entraîne des surcoûts non négligeables en matière d'investissement, d'exploitation, et de retraitement de la phase liquide. De plus, il devient difficile, voire impossible, de valoriser les particules collectées comme les cendres issues de la combustion du charbon dans une centrale thermique sont réutilisées pour la fabrication de ciment. La figure I.3 présente un schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique humide [12].

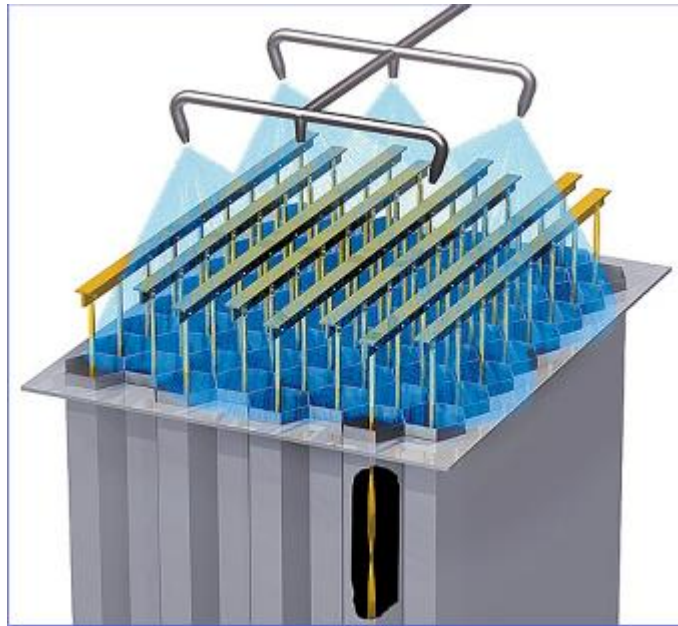


Figure I.3 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique humide

I.3.4.3. Les électrofiltres à un seul et double étage

Parmi les électrofiltres à un seul étage, ceux du type plaque – plaque sont les plus répandus. Ici, les électrodes de dépôts sont des plaques parallèles et équidistantes et le gaz est ionisé à partir d'électrodes ionisantes situées dans les plans verticaux à mi-distance entre les plaques (Figure I.4). En général, les électrodes de collecte sont soumises périodiquement au frappement, ce qui permet de décoller les agrégats afin de les retenir dans des bacs spéciaux placés dans la partie inférieure du filtre.

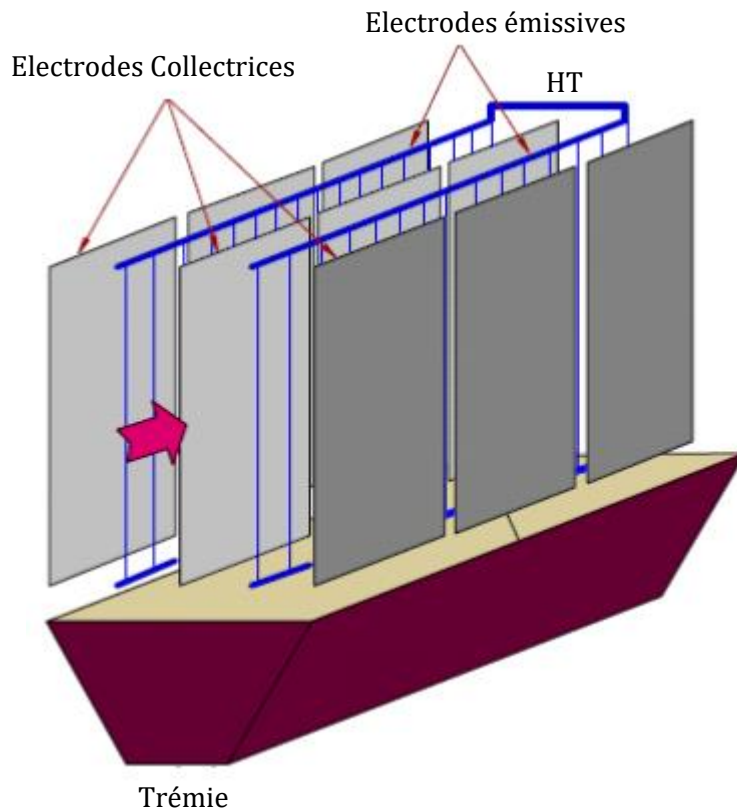


Figure I.4 : Vue schématique d'un filtre électrostatique Type plaque – plaque.

Les précipitateurs industriels ayant des longueurs de plusieurs dizaines de mètres, sont divisés en plusieurs segments nommés champs. Chaque champ a sa propre alimentation électrique, indépendante des autres parties de l'électrofiltre ; cela permet l'adaptation des conditions électriques en fonction de la taille et de la concentration des particules dans chaque champ.

Les filtres électrostatiques à double étage sont équipés d'un premier étage ionisant dans lequel les particules sont chargées suivies d'un filtre électrostatique proprement dit. Ils ont une construction plus compliquée ce qui conduit à des coûts de fabrication plus élevés. C'est la principale raison pour laquelle ces appareils ont des dimensions réduites et sont utilisés principalement dans des installations de conditionnement d'air. Les deux étages d'un tel filtre sont alimentés séparément en tension ce qui nécessite en général une double source de haute tension.

Le premier étage constitue la zone d'ionisation, comporte des électrodes de décharge en forme de fil ou de tube. Les électrodes de collecte peuvent être soit des plaques parallèles, soit des cylindres coaxiaux. La figure I.5 présente une vue schématique d'un électrofiltre à deux étages ayant des électrodes de collecte sous forme de plaques. Ce type de précipitateur ne dispose pas de système de battage par frappe car le risque de

renvoi des poussières est trop important. La récupération des particules se fait souvent par lavage des électrodes. Afin d'avoir une production faible d'ozone, une haute tension de polarité positive est appliquée aux électrodes ionisantes.

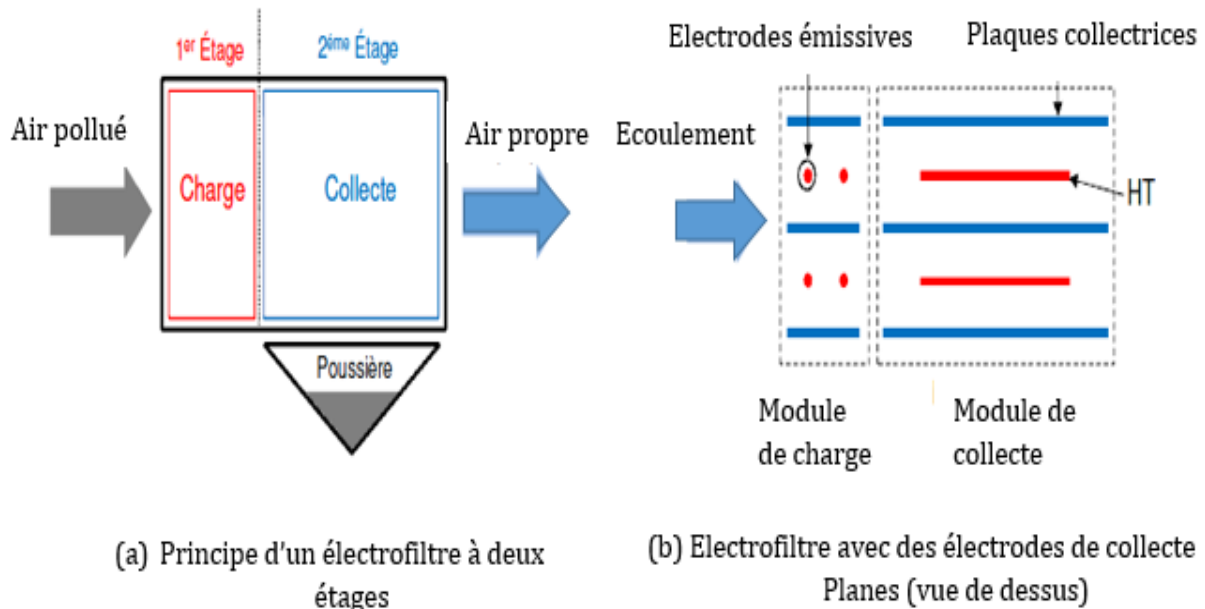


Figure I.5 : Schéma simplifié d'un précipitateur électrostatique à deux étages

Le dimensionnement d'électrofiltre est extrêmement complexe, il dépend de très nombreux paramètres : le débit, la température et la composition chimique de l'effluent à traiter, la nature des particules polluantes à épurer, leur répartition granulométrique, leur résistivité et leur concentration [13].

1.3.4.4. Les filtres à collecteurs plats

Les filtres à plaques sont surtout utilisés sur des installations à très fort débit gazeux et lorsque l'encombrement de l'appareil n'est pas une contrainte sur le site d'installation. En effet, on peut multiplier à souhait les zones de capture, les mettre en parallèle, en série ou combiner les deux et ainsi augmenter les capacités d'épuration du système.

Cette géométrie a été la première utilisée en milieu industriel à cause de sa simplicité de réalisation, de la facilité avec laquelle on peut récupérer les particules agglomérées sur les plaques de collecte (après frappage des plaques, les particules tombent dans un réceptacle placé hors du flux gazeux, ce qui évite leur réentraînement dans le circuit). Du fait de leur grande utilisation, ils ont également fait l'objet de nombreuses études expérimentales et numériques [14-17].

I.3.4.5. Les filtres à collecteur cylindrique

Sont utilisés sur des installations à débit plus faible (plusieurs centaines de $m^3.h^{-1}$) et s'intègrent plus aisément sur des systèmes nécessitant un encombrement réduit. Généralement, les électrodes émissives sont des fils, tubes ou rubans sur lesquels sont adjointes des pointes ou des aspérités permettant de renforcer le champ électrique local et ainsi de favoriser l'apparition et le développement des décharges électriques.

I.3.5. Modèles de fonctionnement des filtres électrostatiques

Estimer l'efficacité de séparation d'un nouveau précipitateur électrostatique en vue de sa réalisation pratique reste encore un problème difficile. L'importance d'un dimensionnement correct représente finalement un problème économique, car entre le gabarit d'un filtre et son coût total de fabrication, il y a une liaison très étroite.

Au cours du temps plusieurs travaux ont été menés pour créer des modèles théoriques capables d'offrir des informations sur le rendement du fonctionnement de certaines installations. Au début, il y a eu des approches simples, semi-implicites, qui ont leurs racines dans les observations directes sur le fonctionnement des électrofiltres déjà existants.

Ce sont les modèles qu'on appelle analytiques ; ils permettent de décrire l'efficacité de collecte en fonction de paramètres géométriques, électriques et mécaniques. De nos jours, le développement des moyens de calcul ont permis de mettre au point des modèles numériques, basés sur la simulation des phénomènes produit au sein d'un électrofiltre [18-19].

I.3.6. Efficacité de collecte d'électrofiltres

Les performances globales du fonctionnement d'un filtre électrostatique sont quantifiées par une grandeur nommée efficacité totale de collection (ou rendement de collection) η_t définie par la relation :

$$\eta_t = 1 - \frac{M_s}{M_e} \quad \text{I.1}$$

Où M_e et M_s représentent la masse totale de particules respectivement à l'entrée et à la sortie du filtre. Souvent, dans la littérature, η_t est appelée efficacité totale massique de collection.

Les particules qui se trouvent dans une suspension représentent un système dispersé (les particules ont des tailles différents). En général, dans le cas des précipitateurs électrostatiques, les particules supposées sphériques sont groupées en fonction de leur dimension, en classe de taille. Chaque classe de taille est caractérisée par un diamètre moyen d_p . On appelle efficacité fractionnaire de collection η_f , le rendement de collection pour les particules d'une taille donnée. Par exemple, pour la classe i , l'efficacité de collection est définie par la relation (I.2) [1] :

$$\eta_f^i = 1 - \frac{m_s(d_p^i)}{m_e(d_p^i)} = 1 - \frac{C_s(d_p^i)}{C_e(d_p^i)} \quad \text{I.2}$$

Où $m_e(d_p^i)$, $m_s(d_p^i)$ sont les masses de particules de la classe i à l'entrée et à la sortie du précipitateur. L'efficacité fractionnaire peut être exprimée aussi en termes de concentrations, dans l'expression (I.2), $C_e(d_p^i)$ et $C_s(d_p^i)$ étant les concentrations moyennes des particules de la classe i à l'entrée et à la sortie du filtre.

I.3.7. Vitesse de migration des particules

L'ensemble des méthodes analytiques pour calculer η_f est basé sur le concept de vitesse de migration des particules par rapport à l'air. En présence du champ électrique, les particules chargées présentes à l'intérieur d'un électrofiltre subissent une force proportionnelle à la charge électrique ; c'est la force de Coulomb. La présence de cette force a comme résultat un mouvement des particules vers les plaques collectrices, ce processus est appelé migration des particules (Figure I.6). Dans un premier temps, nous nous proposons de caractériser ce processus de migration, dans le cas simple correspondant aux hypothèses suivantes :

- Les particules sont sphériques, solides et indéformables ; il n'y a aucune interaction entre elles ;
- Les particules en mouvement perturbent l'écoulement gazeux de façon négligeable ;
- L'écoulement du gaz laminaire et plan, donc la composante de vitesse du gaz dans la direction perpendiculaire aux plaques est nul ;
- La répartition spatiale du champ électrique à l'intérieur du filtre est uniforme.

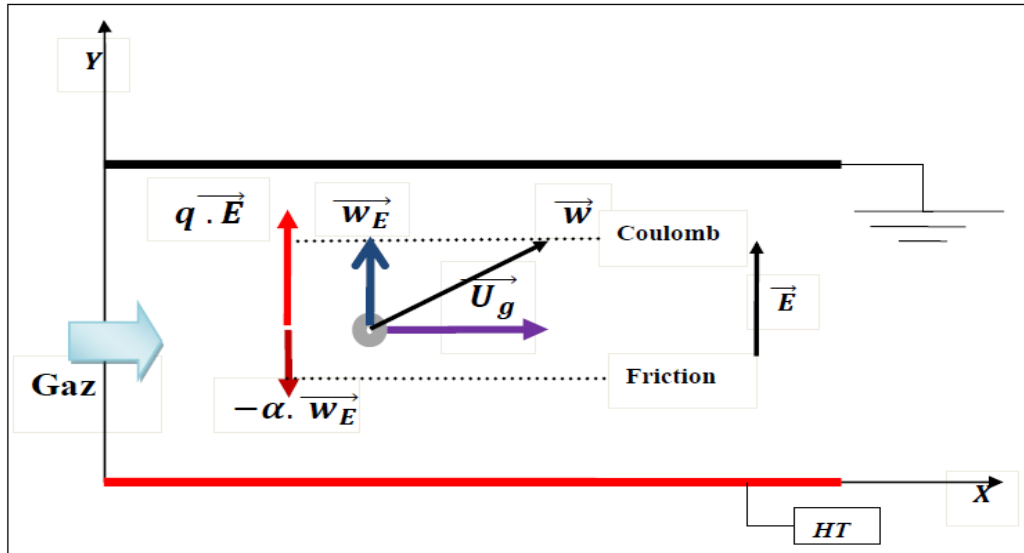


Figure I.6 : Schéma explicatif pour le mouvement d'une particule chargée entre deux plaques parallèles

Soit une particule de diamètre d_p , de charge électrique q_p et de vitesse W_E , se trouvant dans un écoulement de gaz de vitesse U_g soumise à un champ électrique supposé uniforme et constant E (Figure I.6). Le déplacement de celle-ci à l'intérieur du précipitateur est donné par la relation d'équilibre mécanique :

$$m_p \cdot \frac{d\bar{W}_E}{dt} = \bar{F}_e + \bar{F}_t \quad \text{I.3}$$

Où m_p représente la masse de la particule, F_e et F_f sont la force électrique et la force de traînée données par les expressions suivantes [1] :

$$\bar{F}_e = q_p + \bar{E} \quad \text{I.4}$$

$$F_f = C_f(Re_p) \cdot S_p \cdot \frac{\rho_p}{2} \cdot W_E \cdot \bar{W}_E \quad \text{I.5}$$

Dans la relation (I.6) $C_f(Re_p)$ est le coefficient de traînée, S_p représente la section droite de la particule (la section de particule interceptée par le fluide), ρ_p et la densité du gaz porteur et We est la vitesse relative de la particule par rapport au gaz. Le coefficient de traînée dépend du nombre de Reynolds Re_p de la particule qui représente le rapport entre les forces d'inertie et les effets visqueux :

$$Re_p = \frac{d_p \cdot W_E}{\nu_g} \quad \text{I.6}$$

Où V_g est la viscosité cinématique du gaz. Si $Re_p \ll 1$, condition respectée dans le cas des électrofiltres [1], lorsque les particules ont un diamètre inférieur à 20 μm , le coefficient de traînée à l'expression suivante :

$$C_f = \frac{24}{Re_p} \quad (I.7)$$

Dans cette situation, la force de frottement entre une particule sphérique et le gaz est donnée par la relation de Stokes :

$$\bar{F}_f = -3\pi\eta_g \cdot d_p \cdot \bar{W}_E \cdot \frac{1}{C_u(d_p, \lambda_g)} \quad (I.8)$$

Où η_g est la viscosité dynamique du gaz. Si la dimension de la particule est comparable au libre parcours moyen des molécules du gaz λ_g ; les particules vont se déplacer dans un milieu discontinu. Dans ce cas. L'expression (I.9) doit être corrigée par le facteur de Cunningham :

$$C_u = 1 + 1.246 \frac{2\lambda_g}{d_p} + 0.42 \frac{2\lambda_g}{d_p} \exp\left(-0.87 \frac{d_p}{2\lambda_g}\right) \quad I.9$$

La figure I.7 présente la variation du facteur de Cunningham en fonction du diamètre des particules dans le cas de l'air ambiant ($\lambda_g = 0,065 \mu\text{m}$). En remplaçant dans la relation (I.3) l'expression de chaque force ; la migration de la particule est caractérisée par la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\omega_E}{dt} + \frac{3\pi\eta_g d_p}{m_p \cdot C_u} \cdot \omega_E - \frac{q_p}{m_p} \cdot E = 0 \quad I.10$$

La vitesse W_E d'une particule dans la direction normale aux plaques est connue dans la littérature sous le nom de vitesse de migration (drift velocity en anglais).

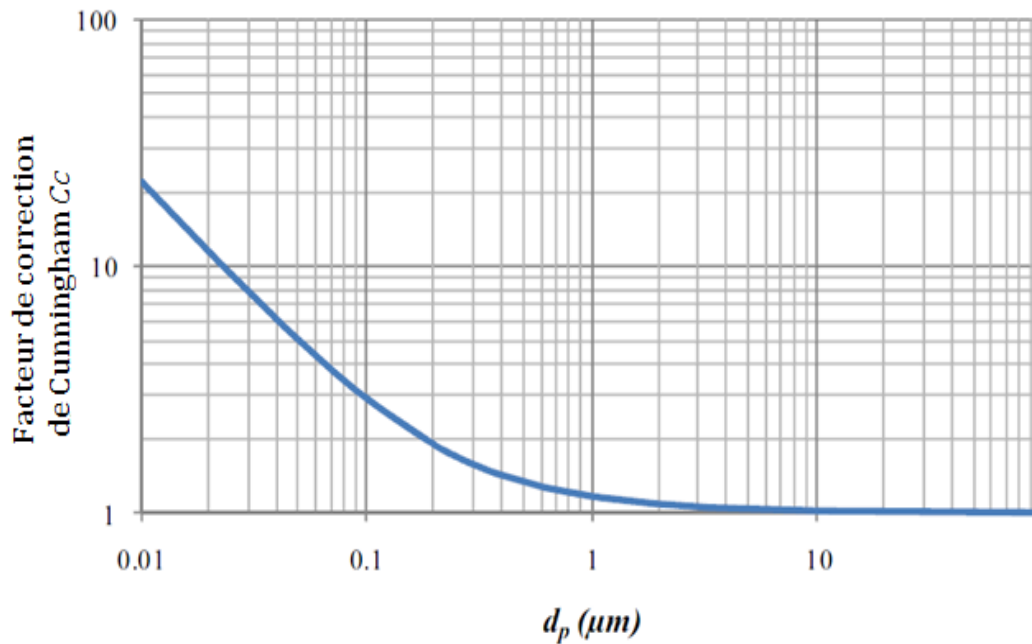


Figure I.7 : Variation du facteur de correction de Cunningham en fonction du diamètre des particules

Si on considère qu'au moment initial $t = 0$, la vitesse ω_E de particule est nulle, la solution de la relation (I.10) donne l'évolution suivante au cours du temps :

$$\omega_E(t) = \omega_{th} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right] \quad \text{I.11}$$

Où ω_{th} est appelée vitesse de migration théorique et à l'expression suivante :

$$\omega_{th} = \frac{q_p \cdot E}{3\pi\eta_g \cdot d_p} C_u \quad \text{I.12}$$

Dans la relation (I.12), τ_p est le temps de relaxation de la particule considérée, qui dépend de la masse et de la taille de particule ainsi que de la viscosité dynamique du gaz porteur :

$$\tau_p = \frac{m_p}{3\pi\eta_g \cdot d_p} C_u = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18\eta_g} C_u \quad \text{I.13}$$

Où ρ_p est la masse volumique des particules. Le temps τ_p caractérise le comportement transitoire de la particule jusqu'au moment où celle-ci se déplace avec la vitesse constante ω_{th} .

On remarque que le temps de relaxation est indépendant des conditions électriques à l'intérieur du filtre. La figure I.8 montre les variations de τ_p , en fonction du diamètre des

particules. Il faut noter que pour les fines particules ($d_p \leq 1 \mu\text{m}$) ce temps est très faible ($\tau_p \leq 10 \mu\text{s}$) [20-21].

La vitesse théorique dans la relation (I.12) représente, dans cette approche, la valeur stationnaire de la vitesse des particules dans la direction du champ électrique (perpendiculaire sur les plaques collectrices) : elle caractérise le processus de migration des particules à l'intérieur de l'électrofiltre. L'ensemble des modèles analytiques sont basées sur ce concept.

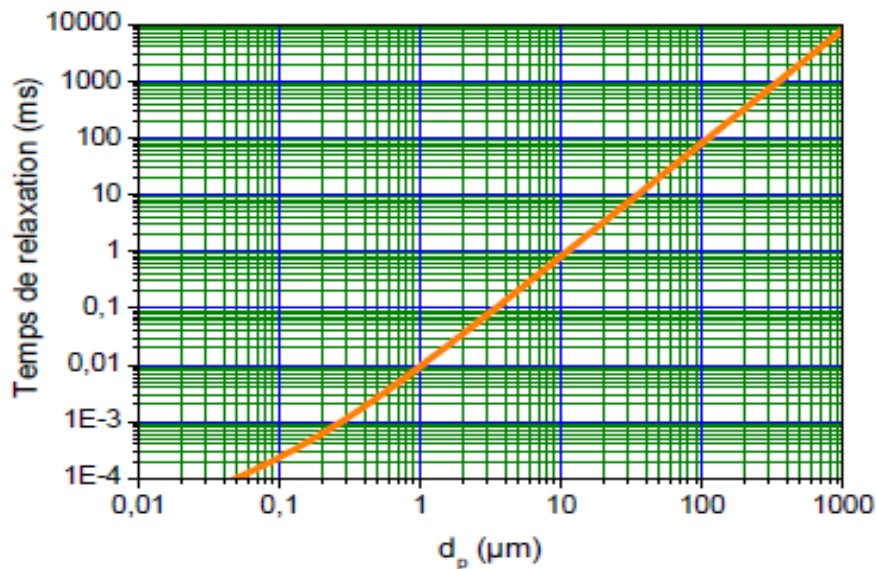


Figure I.8 : Variations du temps de relaxation en fonction du diamètre des particules
 $\eta_g = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ et $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$)

I.3.8. Influence de la taille des particules

Comme abordé précédemment la vitesse de migration des particules w_{th} devient minimale pour les tailles de particules comprise entre 0,1 et 1 μm , entraînant la diminution de la collecte des particules situées dans cette gamme de tailles. Par ailleurs, les grosses particules de taille supérieure à 10 μm sont faciles à collecter mais, elles semblent les plus vulnérables au réentraînement lors des opérations de frappe [5-6] [22-23].

I.3.9. Les effets électrohydrodynamiques

Le comportement des particules chargées dans un précipitateur électrostatique industriel est largement déterminé par le champ électrique ainsi que par l'écoulement principal et secondaire du gaz (vent ionique). De nombreuses investigations expérimentales sur l'origine de la turbulence et l'écoulement secondaire ont été

réalisées. La turbulence est selon les auteurs, engendrée par différents phénomènes qui ont pour conséquence la modification de l'efficacité de l'ESP qui est fonction :

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

I.3. 10. Avantages et inconvénients des précipitateurs électrostatiques

a) Avantages

Ces purificateurs éliminent efficacement les fumées et les brouillards d'huile en les aspirants directement à la source ou dans l'ambiance des ateliers. L'air est traité par précipitation électrostatique puis refoulée à l'extérieur ou dans les locaux en période de chauffage, si qu'évite une perte de calories considérable, les servitudes sont minimales : pas de matières filtrantes à changer. Un simple nettoyage suffit.

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

b) Inconvénients

La réalisation de tel précipitateur a semblé nécessaire aux yeux des industriels du domaine du dépoussiérage. Plusieurs sociétés ont réalisé des précipitateurs électrostatiques pour traiter les brouillards d'huile et les fumées plus ou moins grasses. Ces émanations présentent des nuisances incompatibles avec les principes actuels de conditions de travail et de sécurité.

L'air pollué peut avoir des effets nocifs sur l'organisme, notamment sur le système respiratoire et le système gastro-intestinal (résorption par la peau, manifestations allergiques).

D'autre part, les vapeurs et les brouillards d'huile se condensent sur les murs, les plafonds, les vitres, dans les canalisations électriques, provoquant le vieillissement

prématuré de toutes les installations industrielles. De plus, ces émanations rendent les sols glissants, ce qui peut être à l'origine d'accidents [24].

On peut aussi citer autre inconvénients à savoir :

- Hauts coûts d'installation.
- Haut besoin en espace, dû aux dimensions larges de l'équipement.
- Risque d'exploitation, des mesures de sécurité sont nécessaires. La distribution appropriée du flux de gaz, la résistivité du gaz, la conductivité de fines particules.
- Pendant l'ionisation du gaz, de l'ozone (gaz nocif) est produite par les électrodes de décharge à charge négative.

I.4. Les dépoussiéreurs à media filtrants

I.4. 1.Introduction

L'opération de dépoussiérage se définit comme la séparation mécanique entre une phase continue gazeuse d'une part (de l'air par exemple) et un solide d'autre part (des poussières par exemple).

Parmi les différentes techniques de dépoussiérage, les séparateurs sur medium fibreux sont les dispositifs les mieux adaptés aux poussières fines. C'est pourquoi ils constituent le mode de traitement de l'air le plus répandu au niveau du dépoussiérage industriel [25].

I.4. 2. Historique

Les premières applications industrielles des installations à filtres à manche ont été mises au point pour la récupération de matières contenues dans les fumées produites lors des opérations d'extraction et de raffinage de métaux non ferreux. Dès 1852, un certain S.T. Jones a déposé un brevet pour un filtre à manche unique pour la récupération de fumées d'oxyde de zinc aux Etats-Unis. Des améliorations majeures ont été apportées après 1950, bien que de nombreuses recherches aient été effectuées et un grand nombre de brevets accordés auparavant.

Dans les années 70 et 80, des améliorations ont été apportées car une législation de plus en plus sévère a obligé les installations industrielles, les centrales électriques et les usines d'incinération à utiliser des moyens de limitation de la pollution atmosphérique.

Ceci a naturellement créé un marché important pour les fabricants d'installations de dépolluage [26].

I.4. 3. Présentation et fonctionnement des dépollueurs à media filtrants

Un filtre à manches se compose de trois parties (Figure I.9) :

- Une enceinte de filtration dans laquelle sont suspendues des manches ou des poches.
- Une partie supérieure comprenant le système de nettoyage des manches et l'accès aux éléments filtrants (coiffe du dépollueur).
- Une partie inférieure constituée d'une trémie conique de récupération des poussières [27].

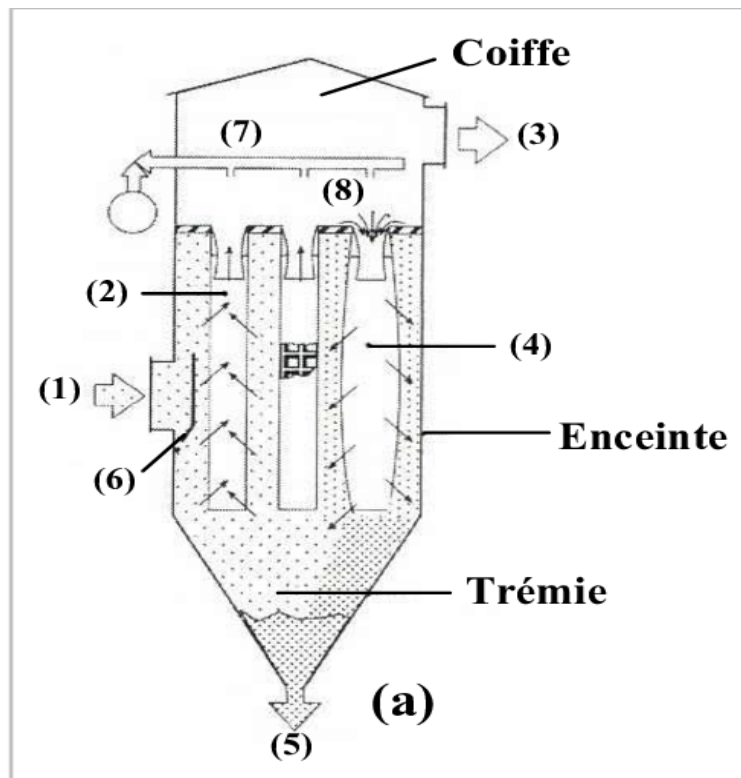


Figure I.9 : Schémas de dépollueurs à media filtrants avec décolmatage pneumatique

- (1) Air + poussières
- (2) Manche
- (3) Air dépollué
- (4) Manche en décolmatage
- (5) Poussières sédimentées
- (6) Déflecteur
- (7) Rampe de distribution

(8) Injection d'air comprimé

Après captage dans un atelier, l'air chargé en poussières pénètre dans le caisson de filtration et rencontre généralement un déflecteur sur lequel s'impactent les plus grosses particules. L'air traverse les manches de l'extérieur vers l'intérieur. Pendant la phase de colmatage, les poussières sont retenues sur la surface externe des manches et s'accumulent sous forme d'une couche appelée gâteau de filtration (Figure I.10). L'air filtré remonte à l'intérieur des manches et est évacué par la partie supérieure du caisson, la coiffe. La filtration d'air empoussiéré s'accompagne inévitablement d'une augmentation de la perte de charge consécutive à la formation du gâteau. Les éléments filtrants doivent donc être périodiquement régénérés par décolmatage, l'objectif étant de récupérer des propriétés aérauliques voisines de celles du filtre neuf. Le système de régénération le plus fréquemment utilisé est le décolmatage pneumatique. L'injection d'air comprimé à l'intérieur des manches provoque le détachement du gâteau de particules qui tombe sous forme d'agglomérats de différentes tailles dans la trémie constituant la partie basse du caisson et qui sont ensuite évacués par une écluse rotative. Ce fonctionnement basé sur une succession de cycles de colmatage et de décolmatage conditionne les performances des dépoussiéreurs à media filtrants.

Suivant les applications et les besoins, ces équipements peuvent être configurés différemment. Il existe des dépoussiéreurs à manches et des dépoussiéreurs à poches. Les manches sont cylindriques et disposées verticalement. Les poches sont des éléments rectangulaires et disposées horizontalement.

A surface filtrante égale, les poches occupent un volume moindre que les manches et occasionnent un encombrement et un poids plus faibles. Les manches sont cependant plus faciles à confectionner et cela se traduit par un prix au mètre carré plus faible et une plus large utilisation. La littérature concernant les dépoussiéreurs à poches est d'ailleurs inexistante.

Le dépoussiéreur peut être ou non divisé en plusieurs cellules indépendantes associées en parallèle, de sorte qu'un compartiment puisse être isolé pendant le décolmatage ou la maintenance. Les cellules peuvent alors être mises hors service et nettoyées les unes après les autres pendant que d'autres restent en fonctionnement. On parle alors de décolmatage « offline », c'est-à-dire avec arrêt du débit d'air à épurer dans

le compartiment en nettoyage. Cette configuration permet également d'intervenir dans un compartiment (par exemple pour changer des manches) sans arrêter le fonctionnement d'autres compartiments. Les dépoussiéreurs compartimentés sont équipés d'une surface de filtration plus importante de sorte à pouvoir traiter le même débit de gaz lorsqu'une cellule est isolée. Leur coût augmente en conséquence. Lorsque le filtre n'est pas compartimenté, les manches sont nettoyées sans arrêt du débit d'air. On parle dans ce cas de décolmatage « on-line ». Ce type de dépoussiéreur est moins coûteux car il est constitué d'un seul caisson et met en œuvre une surface de filtration plus faible. Cette technique de dépoussiérage peut atteindre de hauts niveaux de séparation tout en étant capable de s'adapter à de grandes variabilités de la charge en particules. Ainsi, les media fibreux sont fréquemment utilisés pour séparer les particules de l'air pour des concentrations allant de quelques g.m-3 à plusieurs centaines de g.m-3. Les performances d'un dépoussiéreur à media filtrants sont liées à ses caractéristiques de construction, à ses capacités de décolmatage, à ses conditions opératoires de fonctionnement et principalement au choix du medium filtrant.

I.4. 4. Principe de fonctionnement d'un filtre à manches

Après captage dans un atelier, l'air chargé en poussières pénètre dans le caisson de filtration et rencontre généralement un déflecteur sur lequel s'impactent les plus grosses particules.

L'air traverse les manches de l'extérieur vers l'intérieur. Pendant la phase de colmatage, les poussières sont retenues sur la surface externe des manches et s'accumulent sous forme d'une couche appelée gâteau de filtration. L'air filtré remonte à l'intérieur des manches et est évacué par la partie supérieure du caisson, la coiffe. La filtration d'air empoussiéré s'accompagne inévitablement d'une augmentation de la perte de charge consécutive à la formation du gâteau. Les éléments filtrants doivent donc être périodiquement régénérés par décolmatage, l'objectif étant de récupérer des propriétés aérauliques voisines de celles du filtre neuf. Le système de régénération le plus fréquemment utilisé est le décolmatage pneumatique.

L'injection d'air comprimé à l'intérieur des manches provoque le détachement du gâteau de particules qui tombe sous forme d'agglomérats de différentes tailles dans la trémie constituant la partie basse du caisson et qui sont ensuite évacués par une écluse

rotative. Ce fonctionnement basé sur une succession de cycles de colmatage et de décolmatage conditionne les performances des dépoussiéreurs à media filtrants [25].

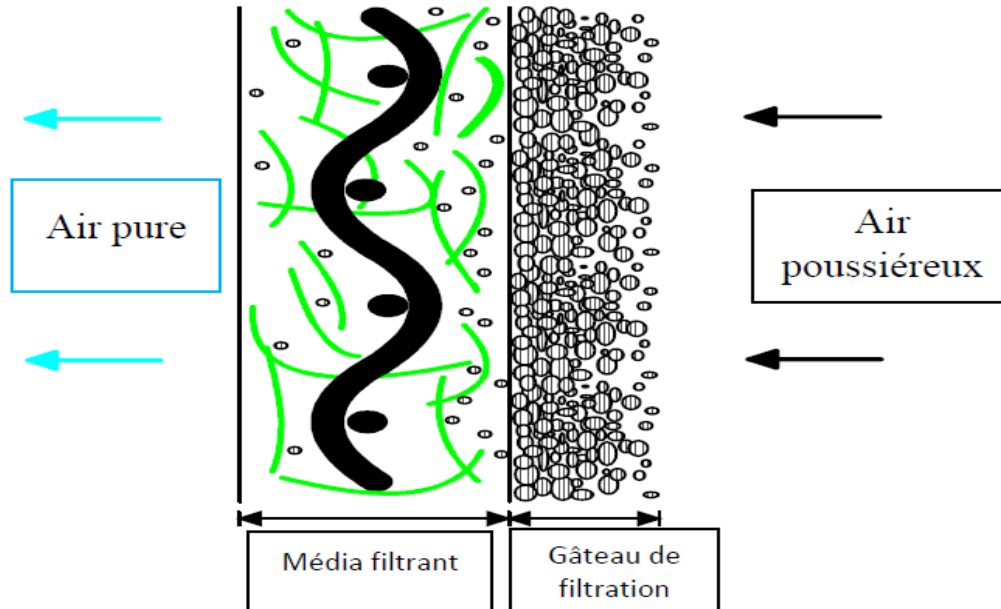


Figure I.10 : Fonctionnement d'une manche

I.4. 5. Eléments constitutionnels d'un filtre à manches

I.4. 5.1. Mannequins

Ce sont des cadres métalliques utilisés pour supporter les manches filtrants en formant un assemblage cylindrique rigide. La partie intérieure est fermée alors que la partie supérieure est ouverte, contenant un éjecteur venturi (Figure I.11) [28] :



Figure I.11 : Schéma d'un Modèle de Mannequins

I.4. 5.2. Compartiment d'air filtré

Comme montre la figure I.11 c'est à cet endroit que sont installés les systèmes d'injection d'air de décolmatage. On peut accéder à ce compartiment grâce à des portes situées en dessous de la carcasse du filtre. Certaines opérations de vérification ou maintenance nécessitent de s'y introduire entièrement [29].



Figure I.12 : Compartiment de circulation d'air filtré

I.4. 5.3. Système de décolmatage pneumatique

Pour maintenir le débit d'air constant en limitant les pertes de charges, les filtres sont nettoyés à l'aide de chocs pneumatiques par air comprimé (décolmatage). Le système de nettoyage des manches est situé dans la partie haute du bardage et agit sur la sortie des manches. Le décolmatage permet de détacher les particules de poussières fixées sur l'extérieur des manches. Dans un premier temps, un effet sonique décolle la poussière en surface. Un deuxième effet contrecourant est créé par l'air induit lors de l'injection et envoie les poussières vers la trémie. Les rampes de décolmatage sont reliées au réservoir d'air comprimé par des électrovannes, ces électrovannes sont gérées par un automate qui analyse les informations de pertes de pression données par un pressostat différentiel. Le pressostat compare la pression atmosphérique à la pression dans le filtre, Si la différence préétablie est atteinte le décolmatage est déclenché. Le pressostat sert aussi à allumer un voyant sur le coffret pour alerter d'un colmatage trop avancé et imposer un contrôle du filtre. Il existe plusieurs techniques de décolmatage des manches ultrasons (vibrations acoustiques) (Figure I.13) ;

- Secouage (vibrations mécaniques) ;

- Contre-courant (injection d'un grand volume d'air à contre-courant sous faible pression).
- Pneumatique (injection d'un petit volume d'air à contre-courant sous haute pression).

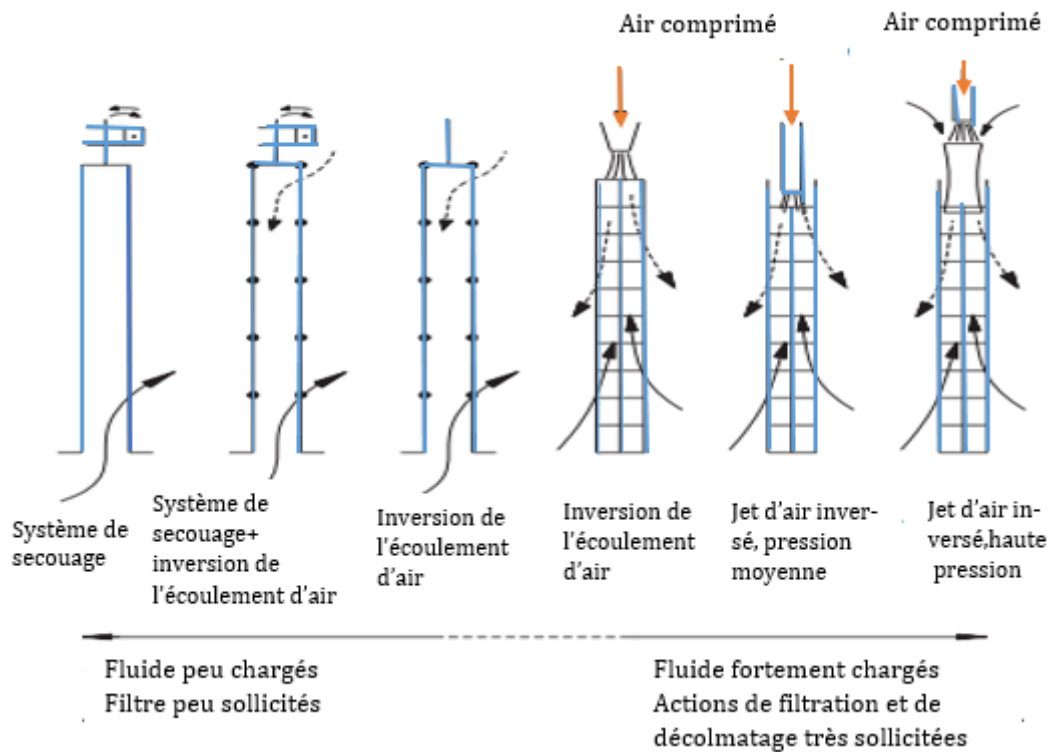


Figure I.13 : Différents techniques de décolmatage des manches

a) Décolmatage à l'air comprimé (Pneumatique) :

Le décolmatage pneumatique est obtenu en déformant très brusquement le tissu filtrant par envoi d'un fort débit d'air sur la surface propre du filtre, à contre-courant sous haute pression (2 à 6 bars) pendant un temps très court (quelques centaines de millisecondes). Cet à-coup de pression stoppe également le mécanisme de filtration pendant un court instant, et provoque une inversion du sens de passage de l'air, du fait de l'introduction d'un volume d'air de décolmatage à l'intérieur de la manche (Figure I.14). Pendant la phase de décolmatage, l'air circule donc de la surface propre du medium (intérieur de la manche) vers la surface externe de la manche sur laquelle est venu se former le gâteau. Le nettoyage pneumatique s'applique individuellement à chaque élément filtrant par un jet axial d'air comprimé qui assure à la fois l'isolement du circuit d'aspiration de l'élément en nettoyage et le décollement de la couche de particules de son support.

Le décolmatage peut être réalisé suivant un intervalle de temps prédéfini ou avec une fréquence asservie à une perte de charge maximale prédéfinie. En conséquence, la durée entre chaque impulsion est très variable et peut être comprise entre quelques minutes et plusieurs heures.

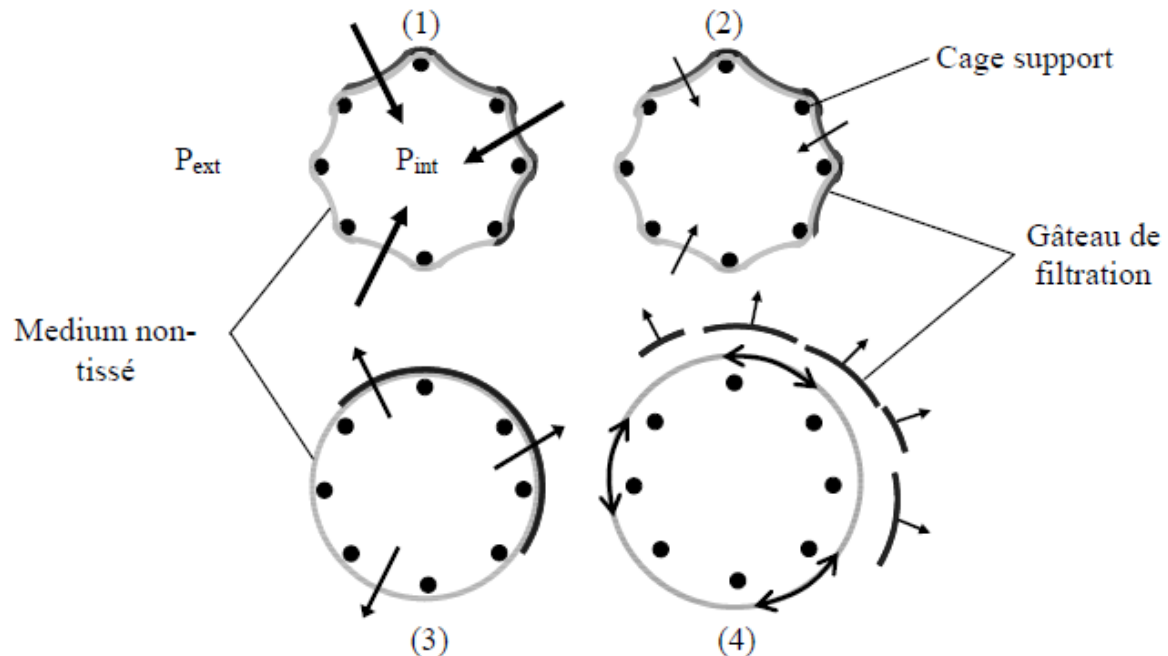


Figure I.14 : Schémas des différentes étapes du mouvement d'une manche lors d'un décolmatage pneumatique
 P_{int} : pression intérieure, P_{ext} : pression extérieure

Le décolmatage pneumatique a connu un véritable essor avec l'apparition et le développement des media non-tissés aiguilletés. Ce procédé exclut l'emploi des media tissés car la capacité de nettoyage est trop grande et se traduit par une baisse de l'efficacité de filtration. De plus, les tissés soumis à ce régime de nettoyage brutal subissent des usures trop rapides car ils ne présentent pas une assez bonne résistance mécanique.

Les mécanismes de détachement du gâteau liés au décolmatage pneumatique ne sont pas encore bien compris. Le dimensionnement des installations de dépoussiérage, le choix des media et des paramètres du décolmatage, sont encore très dépendants de données empiriques. Bien souvent, les constructeurs de dépoussiéreurs et les manufacturiers de filtres répondent aux demandes en puisant dans leur expérience du métier plutôt qu'en s'appuyant sur des connaissances scientifiques précises des mécanismes et des comportements [30].

b) Décolmatage a ventilateur à basse pression (contrecourant) :

Un ventilateur centrifuge délivre un volume d'air de décolmatage important, à une pression de l'ordre de 500 daPa. Cet air est acheminé successivement vers chaque rangée de manches par un ensemble mobile. Tout problème concernant le décolmatage a des conséquences très graves sur l'intégralité du système de filtration. L'accumulation du gâteau de poussière entraîne d'énormes pertes de charge pouvant mener jusqu'à rendre le système totalement inefficace. Les mouvements du medium filtrant sont principalement gouvernés par deux paramètres :

- Le module d'élasticité (M_e),
- Le module de flexibilité (M_f) du medium.

Ces deux paramètres ont mis à profit la notion de décélération du medium pour définir la force de séparation qui est créée lors d'un décolmatage :

$$F_{s=} (w_{res} + w_c) \times amax \quad (I.14)$$

Avec

F_s : La force de séparation par unité de surface.

$amax$: La décélération maximale du medium.

w_{res} et w_c : la masse surfacique résiduelle après décolmatage et la masse surfacique additionnelle pendant un colmatage [30].

$amax$: La décélération maximale subie par le medium :

$$amax = \frac{M_f}{(M_e.(w_{res}+w_c))^{1/2}} \left(\frac{d(\Delta p)}{dt}\right)max \quad (I.15)$$

Avec :

$\left(\frac{d(\Delta p)}{dt}\right)max$: La variation de perte de charge maximale pendant le décolmatage.

L'efficacité de décolmatage est améliorée par l'utilisation de media de faible élasticité (Module M_e petit) et très flexibles (Module M_f grand) ; par contre, plus le grammage d'un medium ou la masse de particules déposées sont grandes, plus l'accélération subit par le medium pendant un à-coup de pression de décolmatage est petite. Montrent par ailleurs que pour avoir une action efficace, le décolmatage doit présenter une variation de la perte de charge,

$$\left(\frac{d(\Delta p)}{dt}\right) > 6.105 Pa. s^{-1} \quad (I.16)$$

I.4.5.3.1. Conséquences du décolmatage pneumatique

Le décolmatage est la source principale de problèmes sur les dépoussiéreurs à manches. Il peut notamment entraîner des inhomogénéités locales de la vitesse de filtration sur la surface d'une manche, une progression du colmatage interne d'un medium, un vieillissement et une usure prématurés de la structure fibreuse, ou une forte augmentation de la concentration en particules à l'aval des manches. D'autres problèmes, telles qu'une compression du gâteau, une augmentation progressive de la perte de charge résiduelle ou encore l'apparition de disparités dans les résistances à l'écoulement entre les manches, peuvent également être constatés et nuire au bon fonctionnement d'un dépoussiéreur.

- **Détérioration des manches résultant d'un usage prolongé :**

La détérioration des manches filtrantes constitue un problème financier du fait du coût de fonctionnement lors de l'exploitation du dépoussiéreur et un problème majeur car la dégradation des éléments filtrants peut conduire à des baisses d'efficacité de filtration significative.

La figures I.15 et la figure I.16 montre un modèle d'un Manches avant et après l'usage.



Figure I.15 : Manches avant l'usage.



Figure I.16 : Manches détériorées

Pour des raisons de coût d'investissement et de concurrence, un grand nombre de constructeurs travaillent en effet avec des conditions opératoires trop proches du point limite d'utilisation des media. Une vitesse de filtration trop importante apporte, par exemple, un excès de perte de charge par colmatage interne du medium et provoque une détérioration prématurée des éléments filtrants. En revanche, si la surface de filtration est correctement dimensionnée et le décolmatage bien dimensionné, les séparateurs sur media fibreux s'avèrent dans le temps des appareils très fiables. En moyenne, la durée de vie d'une manche est estimée à 5 ans.

I.4. 5.4 Les électrovannes

La régulation industrielle consiste à maintenir une grandeur physique ou chimique égale à une grandeur cible prédéfinie. Cette science du contrôle des fluides utilise le plus souvent comme organe correcteur une vanne automatique, vanne à clapet(s) commandée par un servomoteur. Commandée électriquement, cette électrovanne permet d'autoriser ou d'interrompre par une action mécanique, la circulation d'un fluide ou d'un gaz dans un circuit (Figure I.17).

Ce type de dispositif est fréquemment utilisé dans des secteurs tels que la métallurgie, la chimie, la pétrochimie, les aciéries, les verreries, le traitement thermique et l'agro-alimentaire [19].

Une électrovanne fonctionne généralement en « tout ou rien », sur deux positions : ouverte ou fermée. Les électrovannes de type proportionnelles fonctionnent par définition de façon progressive et selon une certaine amplitude, en faisant varier le signal

électrique et donc le débit du fluide circulant au travers de la vanne. La régulation de ce fluide peut alors se faire de façon continue de 0 à 100% du débit maximum nominal. Ces électrovannes et électrovalve sont généralement pilotées à distance au moyen d'une télécommande [31].

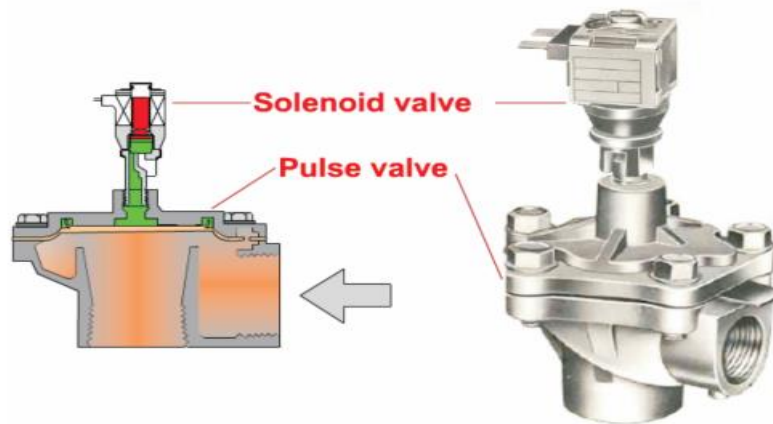


Figure I.17 : Electrovanne

Les domaines d'utilisation d'une électrovanne eau sont nombreux. On peut citer entre-autres l'alimentation à distance, la distribution par dérivation, mais aussi l'entretien et la maintenance de réseaux hydrauliques, ainsi que la purge des réservoirs et des tuyauteries. Pour un équipement fiable et un pilotage à distance d'un réseau d'eau, faites confiance aux produits proposés par Conrad.

Une électrovanne est composée de deux parties :

- Une tête magnétique constituée principalement d'une bobine, tube, culasse, bague de déphasage, ressort(s).
- Un corps, comprenant des orifices de raccordement, obturés par clapet, membrane, piston, etc. selon le type de technologie employée. L'ouverture et la fermeture de l'électrovanne sont liées à la position du noyau mobile qui est déplacé sous l'effet du champ magnétique engendré par la mise sous tension de la bobine.

I.4. 5.5. Air comprimé

Le filtre est raccordé à une alimentation en air comprimé. Souvent, il comporte une nourrice assurant un débit instantané suffisant. Le système d'air comprimé doit être sec, propre et utilisé avec une pression effective allant de 3 à 6 bars. Le réservoir d'air comprimé et connectez les soupapes et les tubes de soufflage comme indiqué sur la

(Figure I.18). De façon à économiser l'usure des manches filtrantes, et à maintenir un gâteau optimal, on devra chercher la pression minimale nécessaire au maintien d'une perte de charge correcte au niveau du filtre (entre 80 et 250 daPa) [32].

L'air comprimé est envoyé successivement dans des rampes par l'intermédiaire d'électrovannes spécialement conçues pour cet usage. Elles ont la particularité de pouvoir offrir une grande ouverture de passage (jusqu'à 2 °) avec un temps de réponse très court (quelques dixièmes de seconde) [32-33].



Figure I.18 : Réservoir à air comprimé pour le décolmatage des manches d'un filtre.

I.4. 6. Avantages et inconvénients d'un filtre à manches

a) Avantages

- Possibilité d'efficacité de collecte très élevée avec une large gamme de charges de grains d'entrée et de grandeurs granulométriques. Dans certaines limites, les collecteurs de tissu ont une constance de la pression et de l'efficacité statiques, pour une gamme plus large de tailles de particules et de concentrations que tout autre type de collecteur de poussière unique.
- Efficacité de la collecte non affectée par la teneur en soufre du carburant de combustion comme dans les ESP.
- Réduction de la sensibilité à la distribution granulométrique.
- Pas d'exigences de haute tension.
- Les poussières inflammables peuvent être collectées.
- L'utilisation de fibres spéciales ou d'auxiliaires filtrants permet l'élimination submicronique de fumée et de fumée.
- Collecteurs disponibles dans une large gamme de configurations, tailles et emplacements d'entrée et de sortie.

b) Inconvénients

- La durée de vie des tissus peut être considérablement raccourcie en présence d'atmosphères acides ou alcalines élevées, en particulier à des températures élevées.
- La température de fonctionnement maximale est limitée à 550 degrés Fahrenheit, à moins que des tissus spéciaux ne soient utilisés.
- La collecte de matériaux hygroscopiques ou la condensation de l'humidité peut entraîner un bouchage du tissu, une perte d'efficacité de nettoyage, de grandes pertes de pression.
- Certaines poussières peuvent nécessiter des traitements de tissus spéciaux pour faciliter la réduction des fuites ou pour faciliter l'enlèvement des gâteaux.
- Les manches en tissu ont tendance à brûler ou à fondre facilement à des températures extrêmes.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents types d'électrofiltres et leurs applications. Le rendement de ces précipitateurs est indiscutable, mais pratiquent beaucoup de problèmes entrave leur bon fonctionnement de façon continue.

Nous venons de voir aussi des techniques de dépoussiérage à media filtrants qui occupe une place importante dans le domaine de dépollution industriel.

Étant donné les exigences relatives aux media filtrants ; leurs utilisation dépendent et varient avec l'équipement de filtration utilisé et les matériaux traités, différents aspects doivent être pris en considération lors du développement et de la sélection d'un média filtrant pour une tâche de filtration donnée

Le chapitre suivant présente l'état des connaissances sur les électrets obtenus à partir des matériaux isolants fibreux, en particulier les médias non-tissés utilisés à la filtration d'air. Une synthèse sur les études de charge de ces matériaux est également effectuée.

Médias filtrants à électret

II.1.Introduction

À partir des années 1960, avec le développement des fibres synthétiques et des polymères, les médias non-tissés ont vu le jour pour répondre au besoin massif en matériaux textiles dans le monde. Ce nouveau procédé permet à de nombreuses entreprises de l'industrie du textile d'émerger, grâce à une production en grande quantité et surtout à moindre coût, ainsi qu'à l'efficacité du processus de fabrication. Le taux de croissance de la production des matériaux textiles non-tissé dans le monde en 2011 était d'environ 8%, ce taux est en nette progression tous les ans. Les principaux fabricants sont les Etats-Unis, l'Europe et la Chine. L'INDA prévoit un accroissement de la production des matériaux textiles non-tissés en Inde, ce qui lui permettra de rejoindre ce trio d'ici 2035. Ces statistiques sur la production des non-tissés montrent l'intérêt de ceux-ci, qui n'est pas seulement économique [34].

II.2. Matériaux isolants fibreux

Le terme de média fibreux regroupe tous les médias à base de fibres c'est-à-dire les médias tissés, tricotés et non-tissés. La grande majorité des médias adaptés à la filtration sont les médias fibreux non-tissés. Ainsi, nous présenterons uniquement les médias fibreux non-tissés dans cette partie et nous assimilerons le terme de médias fibreux à médias fibreux non-tissés [35-38].

Un média non-tissé un est un matériau textile qui se présente sous la forme d'une nappe ou d'un voile, composés de fibres liées entre elles grâce à des méthodes mécaniques, chimiques ou thermiques [39-40]. Selon les associations INDA (International Nonwovens & Disposable Association) et EDANA (European Disposable And Nonwoven Association), ces fibres peuvent être orientées dans une direction préférentielle ou au hasard. Les liaisons entre les fibres sont réalisées par friction, adhésion ou cohésion [41].

II.3. Classification des différents matériaux fibreux

Les fibres textiles sont classées principalement en fonction de leur origine. Il existe deux grandes familles, naturelle et chimique. Toutes les fibres d'origine naturelle, sont issues soit d'une source végétale, d'une source animale, ou minérale. En ce qui concerne les fibres chimique, on parle de fibres organiques et inorganiques. Les fibres chimiques organiques comprennent les fibres produites à partir de la cellulose régénérée comme la viscose, le modal, le cupros, l'acétate, etc. ou de polymères fabriqués comme l'acrylique,

le nylon, le polyéthylène, le polypropylène, etc. Les fibres inorganiques comprennent toutes les fibres produites à partir de métaux ou de céramiques [42].

Le schéma de la figure II.1 illustre la classification des différentes matières utilisées pour la formation des fibres [43].

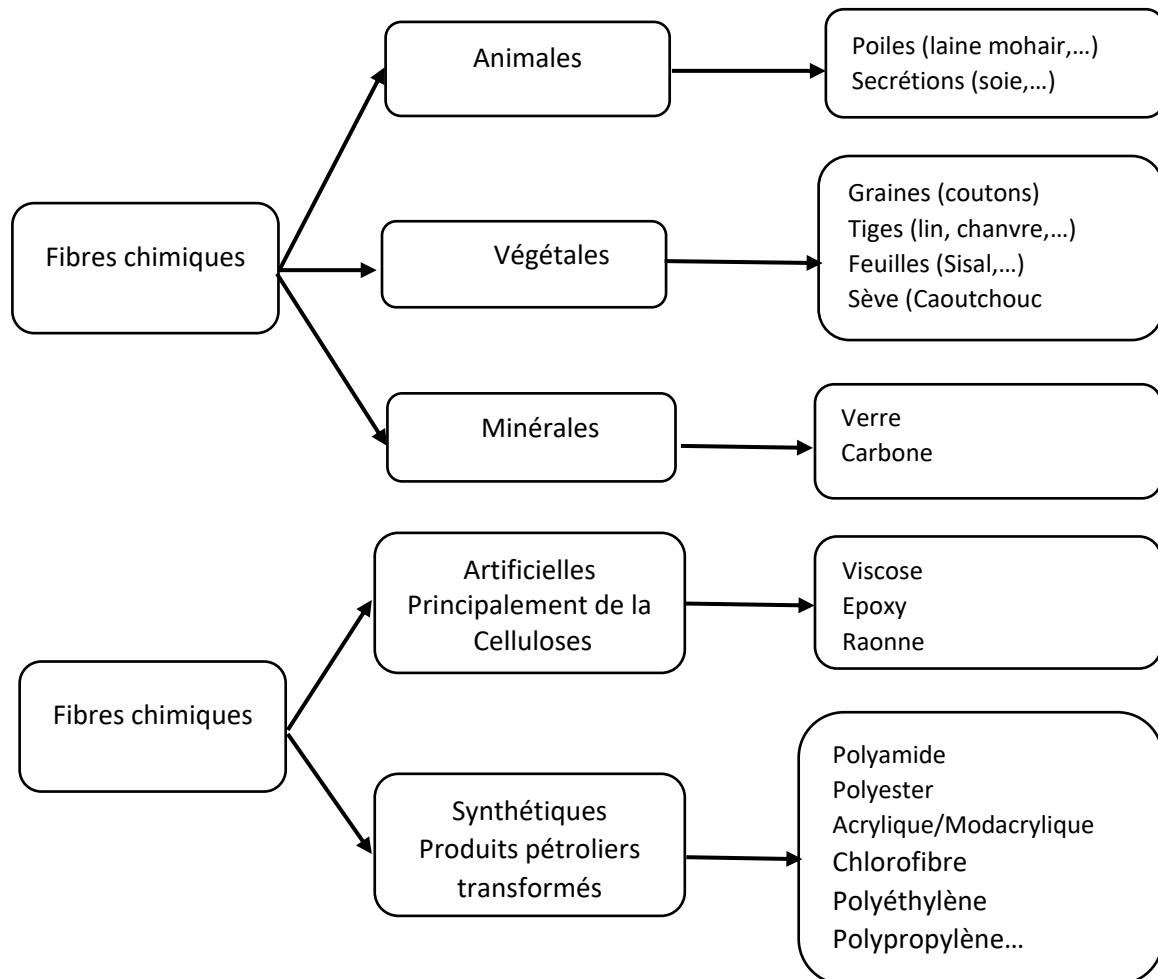


Figure II.1 : Classification des différentes matières utilisées pour la fabrication des fibres

II.4. Techniques de fabrication des médias non tissés

Outre, le choix et la préparation des fibres, la conception de médias fibreux non-tissés nécessite deux étapes : la fabrication d'une nappe fibreuse et sa consolidation. Les caractéristiques de cette nappe déterminent les propriétés physiques du produit final et dépendent en grande partie de la géométrie de la nappe *i.e.* l'orientation des fibres (direction prédominante ou aléatoire), leur forme (droites, accrochées, ondulées), l'espacement entre fibres et leur enchevêtrement. Les caractéristiques de la nappe sont bien évidemment influencées par le diamètre, la longueur et la masse des fibres mais également par les propriétés chimiques et mécaniques du ou des matériaux utilisés. Le

choix de la méthode de fabrication d'une nappe dépend de la longueur des fibres. À l'origine, les procédés utilisés pour la formation de nappe à partir de fibres de longueur moyenne (20 cm à 1 mètre) étaient le cardage puis la mise en couche, procédés par voie sèche ou (*dry laid*) largement employés dans le domaine textile. Pour des fibres plus courtes, des technologies proches de celles de la fabrication du papier étaient employées. Bien que ces technologies soient encore exploitées, de nouvelles méthodes ont été développées. Par exemple, les nappes peuvent être obtenues à partir de fibres suspendues en milieu aqueux puis séchées (*wet laid*) ou à partir de filaments formés de granules polymères extrudés (*spun bonded*) [44-45].

Afin d'assurer la cohésion des réseaux, la consolidation de la nappe est le plus souvent réalisée par l'intermédiaire d'un procédé d'aiguilletage. Des procédés d'hydroliage (hydro enchevêtrement) permettent éventuellement d'entrelacer les fibres les unes autour des autres. Enfin, les nappes fibreuses sont séchées afin d'ajuster leur compacité et de consolider thermiquement l'ensemble. La fabrication d'un non-tissé se déroule en plusieurs étapes : [46].

Étape 1 : Formation du voile

L'industrie des matériaux fibreux utilise principalement quatre procédés de base pour la formation du voile et la fabrication des produits non tissés.

- **La voie sèche** (*Drylaid*) La voie sèche regroupe généralement tout ce qui est cardé/nappé. Issu de la voie textile, on retrouve les mêmes machines de base que pour des applications filature qui ont évolué pour le non-tissé. Les cardes nettoient, individualisent et parallélisent les fibres qui sont orientées de façon préférentielle selon le sens machine. Dans le cas de la filtration, le voile est généralement nappé (superposition de voiles) puis consolidé par aiguilletage. Une consolidation thermique complémentaire est souvent réalisée pour bloquer la structure. On obtient dans ce cas un produit plutôt épais destiné à des filtres grossiers. Pour des médias plus fins, on peut directement calandrer le voile. En effet, ces médias ne possèdent pas de bonnes propriétés de filtration notamment en terme d'efficacité mais sont bon marché et possèdent une excellente capacité de rétention des poussières. Leur faible efficacité de filtration est due au diamètre moyen de fibres qui est de l'ordre de 10 à 500 μm . Ce procédé permet non

seulement l'utilisation d'une large gamme de fibres, naturelles ou chimiques, mais aussi de réaliser facilement des mélanges de fibres.

- **La voie humide** (Wet laid) Le procédé par voie humide incorpore des fibres de diverses natures (notamment des fibres de verre et de cellulose pour le cas de la filtration) en suspension dans l'eau, qui sont ensuite diluées et essorées. Le principal intérêt du procédé est d'obtenir une surface fibreuse à des vitesses élevées (jusqu'à 1000m/min). Les principales limitations concernent la longueur de fibres et la flexibilité de la machine, plutôt adaptée à de grandes productions.

Ce procédé conduit à des non tissés plutôt isotropes, homogènes et fermés, ce qui explique leur utilisation dans la fabrication de filtres à haute et ultra haute efficacité. On utilise généralement la fibre de verre pour ces filtres car ce sont les fibres les plus fines que l'on puisse obtenir par voie directe (0,2 à 1 μm). De plus on associe généralement la cellulose et les fibres de verre afin d'obtenir un média beaucoup plus compact.

- **La voie fondue** Les procédés voie fondue partent du polymère sous forme de granulé qui sera fondu extrudé puis filé afin de former directement une nappe de filaments. Dans le cas où la phase de formation consiste après filage à refroidir, étirer et déposer des filaments sur un tapis en mouvement, on parlera de « spunbond ». Dans le cas où le polymère est soufflé par air chaud avant même de le refroidir, on parlera alors de « meltblown ». On utilise exclusivement des fibres thermoplastiques comme le polypropylène et le polyester. Cette technique est souvent associée à une consolidation thermique par calandrage.
- **La voie aérodynamique** (Air laid) regroupe les procédés qui projettent des fibres directement sur un tapis pour générer un média fibreux.

Etape 2 : Consolidation des fibres

La consolidation des voiles formées peut être mécanique, chimique ou thermique.

En raison de la diversité des procédés non-tissés, une large gamme de produits peut être obtenue). Il est possible d'obtenir des médias fibreux avec des diamètres moyens de fibres entre 0,5 et 500 μm , des épaisseurs entre 20 à 500 μm ou encore atteindre des masses surfaciques de 3 à 2000 g/m^2 . Les médias fibreux peuvent alors avoir de nombreuses propriétés intéressantes : mécaniques (compressibilité, résistance...),

physiques (thermique, acoustique...), d'écoulement et d'absorption (perméabilité à l'air, absorption de liquide...) et chimiques (déperlance, résistant au feu, oléophobe...).

Etape 3 : Finition

En dernière phase de fabrication des médias non-tissés, des opérations supplémentaires sont mises en place pour modifier les propriétés du produit ou d'y ajouter d'autres particularités afin de l'adapter aux besoins de l'application visée. Un grand nombre de substances chimiques peuvent être utilisées à cet effet, ainsi que plusieurs procédés mécaniques : enduction, impression, floccage, teinture. La combinaison des textiles non-tissés avec d'autres matières permet de former des produits complexes.

La figure II.2 montre quelques exemples de médias non-tissés obtenus par différents procédés, les images sont obtenues grâce à un microscope électronique à balayage.

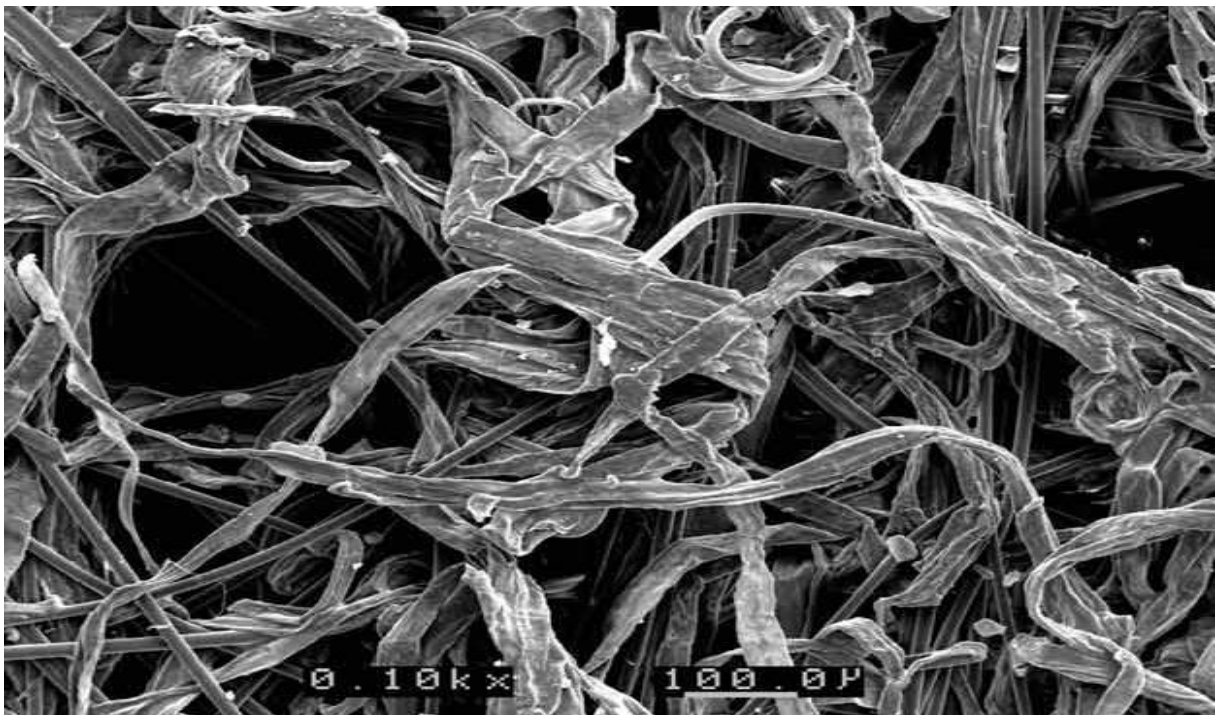


Figure II.2 : Médias non-tissés obtenus par différents procédés

Le Tableau II.1 résume les différentes technologies citées ci-dessus et leurs applications dans la filtration et la purification de l'air [47- 49].

Type de filtre	Technique de fabrication	Matière utilisées
Filtre ultra haute efficacité	Voie humide Voie humide+electrospinning	Fibre de verre, cellulose, PA6
Filtre haute efficacité	Voie humide Voie humide+electrospinning	Fibre de verre, cellulose PA6
Filtres fins	Voie humide Nappage aérodynamique Meltblown Voie cardée aiguilletage ou hydroliage	Fibre de verre, cellulose, Polyester, polyamide
Filtres grossiers	Spunbond Voie cardée aiguilletage ou hydroliage Nappage aérodynamique	Fibre de verre Polypropylène, Polyamide, Polyester, cellulose,
Demie – masques de filtration	Meltblown, Spunbond(SMS)	Polypropylène, Polyester

Tableau II.1 : Procédés de fabrication des médias fibreux en fonction de l'application

II.5. Efficacité de filtration d'un filtre vierge selon les différents mécanismes de capture des particules

Un aérosol est défini comme une suspension de particules solides ou liquides dans un milieu gazeux présentant une vitesse de chute négligeable avec une taille inférieure à 100 μm . Il existe une grande variété d'aérosols (bio, minéraux, chimiques...) qui peuvent aller du nanomètre au millimètre. Dans le cadre de nos travaux, la zone granulométrique étudiée se situe entre des diamètres de particules de 0.01 à 10 μm . Communément appelées, micro et ultrafiltration. Pour illustrer les différents effets de filtration, nous supposerons que les particules sont sphériques et que si une particule touche une fibre du filtre elle sera attirée sous l'effet des forces de Van Der Waal et y adhérera.

A l'état neuf, un filtre sera caractérisé par sa perte de charge (ΔP) la plus faible possible afin de garantir une dépense énergétique minimale et une efficacité de filtration (E) élevée [50].

On considère que l'efficacité totale d'un filtre est la somme des efficacités unitaires de collection des fibres. Plusieurs mécanismes physiques vont entrer en jeu afin de capturer les particules. (Figure II.3) :

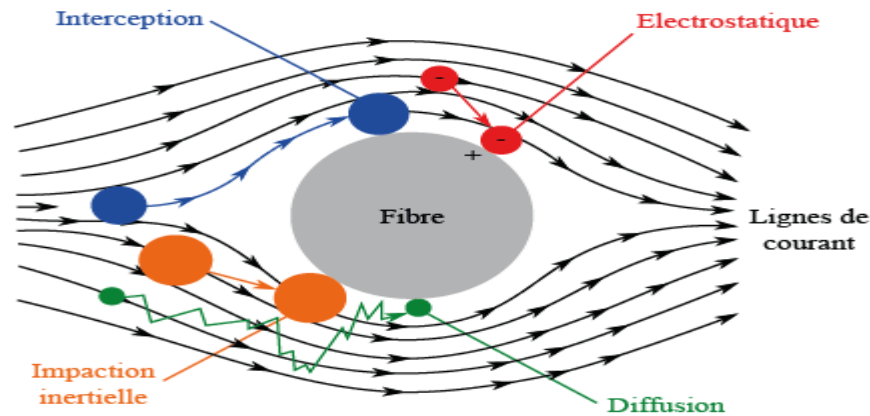


Figure II.3 : Les quatre principaux mécanismes de collecte des particules

Pour ce qui concerne les particules à collecter, la liste des facteurs influant inclut leur composition physico-chimique, leur diamètre, leur concentration, et leur état de charge. Pour le filtre, les facteurs ayant une influence significative sur la capture de particules sont les suivants :

- Le diamètre des fibres ;
- Le diamètre des pores ;
- La densité surfacique et volumique des fibres ;
- La compacité du filtre ;
- L'état de charge des fibres.

Indépendamment des caractéristiques des particules et du filtre citées ci-dessus, d'autres facteurs sont à prendre en compte, notamment les conditions atmosphériques (humidité et température), la vitesse, le débit de filtration des particules et la viscosité du fluide. Les analyses des chercheurs convergent vers la même conclusion, à savoir l'existence de deux mécanismes de capture, mécanique et électrostatique [51]. Par rapport aux filtres mécaniques, composés uniquement de fibres, les filtres électrostatiques, autrement appelés « filtres à électret », ont la particularité d'avoir subi un dopage par dépôt de charges électriques.

Dans le cas des filtres mécaniques, la collecte des aérosols sur les filtres s'effectue par l'action simultanée de différents mécanismes :

- La diffusion Brownienne pour les aérosols de $dp < 0,1 \mu\text{m}$,
- L'interception pour les aérosols de taille supérieure à $0,1 \mu\text{m}$,

- L'impaction inertielle pour les aérosols de taille supérieure à $1 \mu\text{m}$,
- La sédimentation pour les aérosols de grande taille $dp > 10 \mu\text{m}$,
- Les mécanismes électrostatiques (toutes tailles d'aérosols). Figure II.4 [52].

L'importance de ces mécanismes est fonction de plusieurs paramètres relatifs à taille des aérosols filtrés.

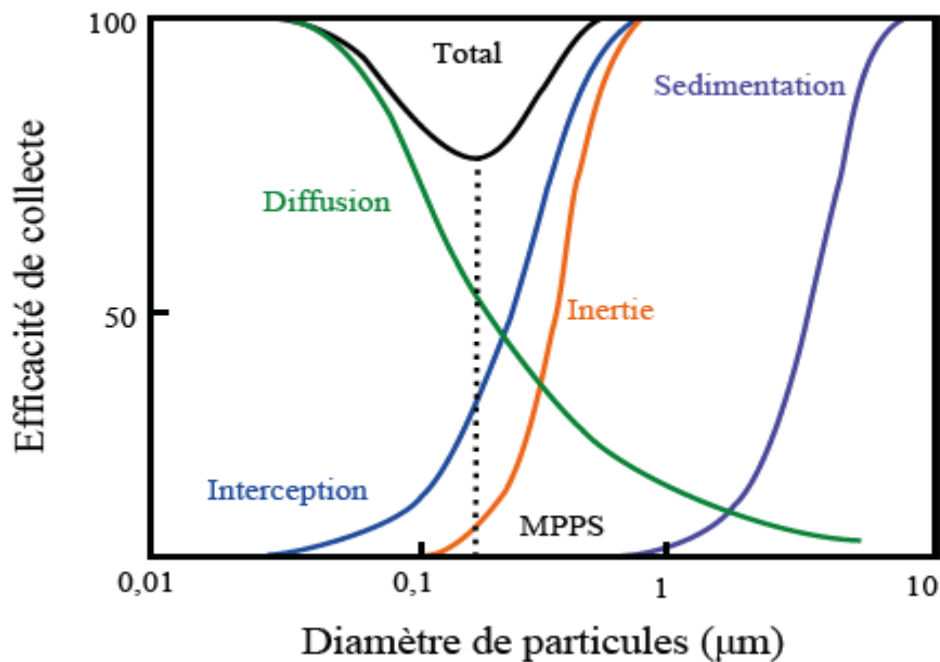


Figure II.4 : Efficacité fractionnelle et les mécanismes de capture des particules en fonction de leurs tailles

○ Impaction inertielle

Le phénomène d'impaction inertielle est similaire à l'interception directe. Néanmoins, dans le cas présent, en raison d'une inertie plus élevée liée à une masse plus élevée, les particules quittent la trajectoire de la ligne de courant d'air et entrent en collision avec les fibres (Figure II.5). Ce phénomène concerne les particules d'un diamètre supérieur à $1 \mu\text{m}$. Diverses corrélations entre l'efficacité totale théorique tenant compte des trois mécanismes et l'efficacité expérimentale ont été proposées par de nombreux auteurs. Aucune de ces corrélations ne donne un bon accord avec l'ensemble des efficacités déterminées expérimentalement. L'explication vient du fait que toutes les caractéristiques structurales ne sont pas prises en compte. Actuellement, seules les caractéristiques de la structure (comme le diamètre moyen des fibres, l'épaisseur du filtre et sa compacité), de l'aérosol (taille et masse volumique) et des conditions opératoires

(vitesse de filtration) sont pris en compte dans les calculs [53]. Des travaux récents portent sur l'amélioration de ces modèles en intégrant des caractéristiques structurales telles que la distribution du diamètre des fibres, l'uniformité du voile du non tissé ou encore les combinaisons de fibres...

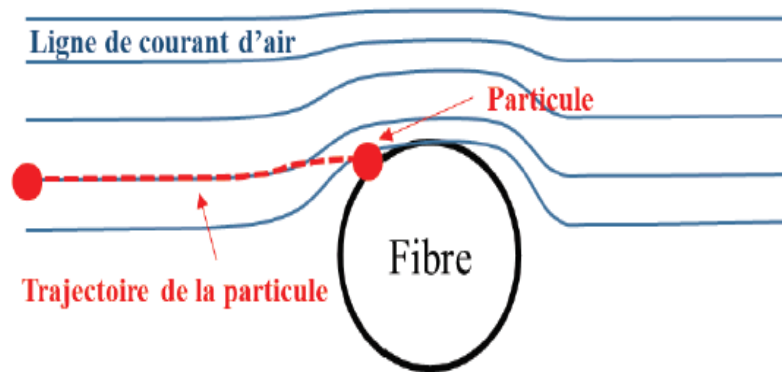


Figure II.5 : Schéma du mécanisme de collecte par impaction

○ Interception

Concerne les particules de taille supérieure à $0,1 \mu\text{m}$. En raison de sa faible inertie, une particule suit les lignes de courant qui contournent les fibres. Elle sera alors interceptée lorsque la distance de la particule par rapport à la surface de la fibre est inférieure à son rayon [54].

L'effet d'interception ne dépend pas de la vitesse de l'air sauf si la variation est suffisamment importante pour modifier le tracé du flux d'air autour de la fibre. L'effet s'accroît lorsqu'il y a augmentation de la taille de la particule, diminution du diamètre de la fibre et réduction de la distance entre les fibres (figure II.6).

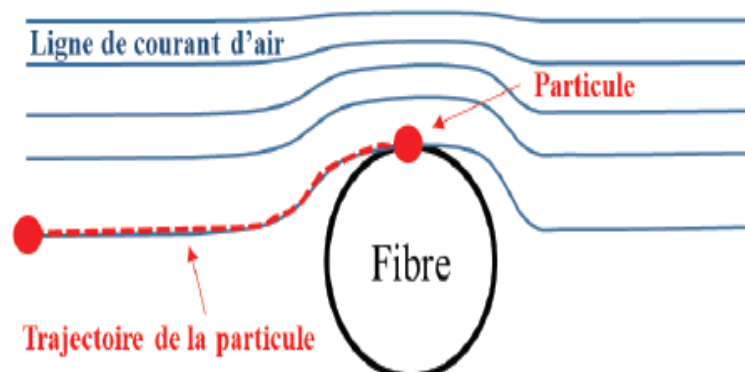


Figure II.6 : Schéma du mécanisme de collecte par interception

- **Diffusion**

Les particules $<1\mu\text{m}$ vont avoir un mouvement indépendant et aléatoire qui va se superposer à la trajectoire due au flux d'air figure II.7 [55]. Elles sont influencées par le mouvement brownien des molécules d'air, c'est-à-dire que les molécules d'air font vibrer les particules et si elles entrent en contact avec les fibres du filtre, elles y adhèrent.

La probabilité pour que les particules entrent en contact avec les fibres augmente lorsqu'il y a diminution de la vitesse, du diamètre de la particule et du diamètre de la fibre[56].

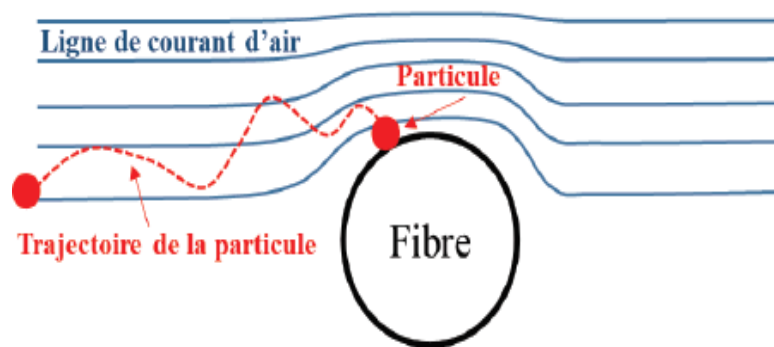


Figure II.7 : Schéma du mécanisme de collecte par diffusion brownienne

- **Collecte par effets électrostatiques**

Les particules ou les fibres du filtre peuvent porter des charges électriques et donc entraîner des interactions électrostatiques. Les forces électrostatiques entraînant ces interactions sont de nature différente selon le ou les porteurs de charge Figure II.8. Ces forces électrostatiques sont utilisées dans le cas de filtres dits électrets dont les fibres, généralement en polymère, possèdent une distribution de charges électrostatiques permettant d'améliorer l'efficacité du medium (du moins tant que les fibres sont chargées) sans influencer la perte de charge ΔP du medium [57].

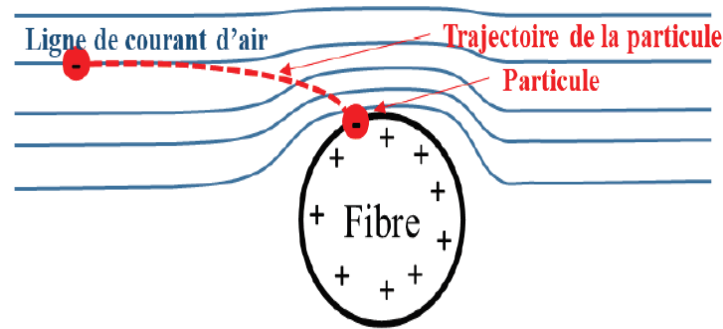


Figure II.8 : Schéma du mécanisme de Collecte par effets électrostatiques

II.6. Facteurs influant sur l'efficacité de filtration [49]

II.6.1. Vitesse de filtration et débit d'air

La vitesse de filtration et le débit d'air peuvent grandement influencer sur l'efficacité de filtration globale des filtres à fibres, car ils modifient l'apport des mécanismes de diffusion, d'interception et électrostatique. À faible vitesse de filtration, les forces de diffusion et électrostatiques contribuent significativement à l'efficacité de captation du fait d'un temps de séjour plus long. Lorsque la vitesse de filtration augmente, le mécanisme d'interception devient prépondérant, et l'influence de la diffusion sur l'efficacité de captation se voit considérablement réduite. On s'attend donc à ce que l'efficacité de filtration diminue de façon notable à vitesse de filtration élevée.

II.6.2. Humidité

L'humidité est un des facteurs qui peuvent influencer sur l'efficacité de filtration. Les effets de l'humidité ne sont pas bien compris du fait qu'ils ont peu été étudiés. L'efficacité de filtration augmentait lorsque l'humidité relative augmentait dans le cas des grosses particules. Une augmentation de la force capillaire à HR élevée augmenterait l'adhérence entre les fibres filtrantes et les particules. Cependant, l'attraction entre filtres et particules sous l'effet de la force capillaire n'est vraiment forte que dans le cas des plus grosses particules.

À la différence des études sur les filtres mécaniques, les études sur les filtres électrostatiques (filtres chargés) ont démontré que l'efficacité de filtration diminue lorsque l'humidité augmente. La raison en est qu'un taux d'humidité élevé entraîne une réduction des charges sur les fibres filtrantes et les particules. La capacité des filtres électret à capter des particules diminue lorsque la charge de surface diminue sous l'effet d'une augmentation de l'HR [58].

II.6.3. État de charge des particules

L'état de charge des particules est un autre facteur qui influe grandement sur l'efficacité de filtration des filtres mécaniques et électrostatiques. L'augmentation de l'efficacité de filtration est liée à l'augmentation de l'attraction électrostatique résultant de la force coulombienne et de la force image. Des essais sur l'efficacité de collecte à travers un filtre en fibre de verre à différents états de charge de particules de 2 nm à 100 nm ont montré que l'efficacité de filtration des particules non chargées était beaucoup plus faible que pour les particules chargées, et que cette différence d'efficacité diminuait avec la réduction de la taille des particules. Ils ont expliqué que ce phénomène était dû au fait que la diffusion constitue le principal mécanisme de dépôt des nanoparticules, et que le procédé en cause augmente l'effet de la diffusion dans le cas des particules de plus petite taille.

II.7. Caractérisation de l'efficacité de la collecte

Dans cette section, nous définirons les équations utilisées pour le calcul de l'efficacité de collecte fractionnaire et globale. Nous nous intéresserons par la suite à la classification des filtres en tenant compte du facteur de qualité et de la perte de charge.

A) Efficacité de collecte

Les éléments principaux caractérisant un filtre sont l'efficacité de collecte et la perte de charge. L'efficacité de collecte (η) définit la capacité d'un média filtrant à retenir des particules dans un écoulement d'un fluide. On mesure la concentration de particules en amont (C_{amont}) et en aval (C_{aval}) du média filtrant, puis on détermine le rapport de filtration. Le rapport suivant détermine l'efficacité de collecte globale d'un filtre [57].

$$\eta = 1 - \frac{C_{\text{aval}}}{C_{\text{amont}}} \quad \text{II.1}$$

B) Perte de charge

Il s'agit du deuxième paramètre important permettant d'évaluer la qualité du filtre. En effet, la durée de vie du filtre dépend directement de l'évolution de la perte de charge occasionnée par le filtre au cours du procédé de filtration. Dans la pratique, une perte de charge (ΔP) maximale de fonctionnement du filtre est généralement fixée. La perte de charge se définit comme la différence de pression statique entre l'amont et l'aval du filtre, notées respectivement (P_{amont}) et (P_{aval}).

$$\Delta P = P_{amont} - P_{aval} \quad \text{II.2}$$

La perte de charge traduit donc une résistance à l'écoulement de l'air. Celle-ci ne doit pas dépasser un seuil fixé au risque de perturber le fonctionnement du système voire d'endommager le filtre, ce qui entraînerait un relargage des particules capturées dans le circuit. Un effort important a donc été consenti ces dernières années afin, d'une part de chercher le meilleur compromis conduisant à un média caractérisé par une efficacité de filtration maximale tout en ayant une perte de charge minimale, et d'autre part, de minimiser l'évolution de la perte de charge liée au colmatage afin d'optimiser la durée de vie de filtre [59-61].

II.8. Grandeurs caractéristiques d'un média fibreux

II.8.1. Masse surfacique

La masse surfacique M_s représente la masse des fibres pour une unité de surface. La méthode la plus simple pour mesurer la masse surfacique est de peser une surface connue d'un échantillon. Dans le cas de médias fibreux, elle s'exprime en gramme par mètre carré (g/m^2).

II.8.2. Épaisseur

L'épaisseur Z représente la distance entre la face supérieure et la face inférieure d'un média fibreux. Cette distance est difficile à déterminer dans les cas des médias fibreux, car ils sont plus ou moins compressibles.

Le plus souvent, la mesure s'effectue selon la norme ISO 9073-15 :2007. Elle propose de placer l'échantillon entre une plaque de métal et un pied presseur puis de mesurer l'écart entre la plaque et le pied presseur. Cet écart correspond alors à l'épaisseur. La norme précise la surface minimum du pied presseur de 2500 mm^2 , un temps de contact de 10 secondes, une pression de 0,1 kPa ou de 0,5 kPa selon la compressibilité de l'échantillon. Ce protocole est simple et rapide à mettre en œuvre, mais il présente l'inconvénient de compresser l'échantillon avec le pied presseur.

Pour mesurer l'épaisseur sans compresser l'échantillon, d'autres méthodes ont été testées. Tout d'abord, il y a le test de Washburn qui s'appuie sur la corrélation entre la vitesse d'imbibition d'un liquide par le média fibreux et l'épaisseur. Cette méthode

nécessite cependant un dispositif adapté à la mesure de l'imbibition ainsi qu'un solvant qui mouille parfaitement le média fibreux.

Une autre méthode consiste à mesurer l'épaisseur à l'aide d'un microscope. Cette méthode permet de mesurer l'épaisseur d'un média fibreux sans compression. Cependant, elle nécessite un nombre important de précautions à savoir un alignement précis entre l'échantillon et le microscope, une coupe nette de l'échantillon ainsi qu'un grand nombre de mesures [62].

II.8.3. Compacité

Elle exprime le rapport du volume des fibres par le volume du filtre total. Les filtres utilisés en filtration de l'air ont généralement des compacités inférieures à 0,1 [50]. À partir de l'épaisseur Z , de la masse surfacique M_s et de la masse volumique des fibres ρ_f , elle peut être calculée selon l'équation II.3 [62].

$$\alpha = \frac{V_{\text{fibre}}}{V_{\text{total}}} = \frac{M_s}{Z\rho_f} \quad \text{II.3}$$

Elle peut aussi être exprimée en fonction de la porosité ϵ , fraction de vide d'un média fibreux ou volume des pores V_{pores} , comme dans l'équation II.4.

$$\alpha = \frac{V_{\text{pores}}}{V_{\text{total}}} \quad \text{II.4}$$

II.8.4. Diamètre moyen des fibres

Un média non-tissé possède la particularité de posséder différentes tailles de fibres ainsi le terme diamètre de fibres est ambigu, car il correspond à la fois au diamètre d'une fibre particulière et à un diamètre représentatif de l'ensemble des fibres d'un média fibreux. Pour nous, le terme diamètre de fibres correspondra au diamètre d'une fibre particulière tandis que le terme diamètre moyen des fibres df correspondra à un diamètre représentatif de l'ensemble des fibres d'un média fibreux.

II.8.5. Longueur spécifique de fibre

La longueur spécifique ou longueur de fibres unitaires correspond à la somme des longueurs de chacune des fibres comprises dans une surface unité. Elle peut se calculer à partir de l'épaisseur Z , du diamètre moyen des filaments df et la compacité α selon

l'équation II.5. Elle s'exprime en mètre par mètre carré (m/m^2) ou en kilomètre par mètre carré (km/m^2).

$$L_{th} = \frac{4\alpha Z}{\pi d_f^2} \quad \text{II.5}$$

II.8.6. Surface spécifique des fibres

La surface spécifique a_f exprime la superficie réelle d'un média fibreux par unité de masse ou de volume. Dans le cas d'un média fibreux avec des fibres cylindriques, elle est exprimée théoriquement selon l'équation II.6 suivante :

$$a_f = \frac{S_{fibres}}{V_{fibres}} = \frac{4}{\rho_f d_f} \quad \text{II.6}$$

Avec :

a_f : Surface spécifique (m^2/g)

ρ_f : Masse volumique de la fibre (g/m^3)

S_{fibres} : Surface des fibres (m^2)

V_{fibres} : Volume des fibres (m^3)

d_f : Diamètre des fibres (m)

II.8.7. Orientation des fibres

L'orientation des fibres représente l'alignement des fibres les unes par rapport aux autres au sein d'un média fibreux. Selon les procédés utilisés pour le fabriquer, les fibres sont alignées de manière plus ou moins aléatoires. L'orientation des fibres est notamment importante pour les propriétés mécaniques du média.

En effet, une orientation aléatoire des fibres impliquera des propriétés isotropes tandis qu'une orientation privilégiée des fibres impliquera des propriétés anisotropes.

II.8.8. Uniformité de répartition des fibres

Au niveau macroscopique, la répartition des fibres au sein d'un média semble uniforme. Toutefois, localement, l'épaisseur, la compacité et la masse surfacique ne sont pas constantes. Selon les procédés et les conditions de mise en œuvre, ces hétérogénéités locales peuvent être importantes et influencer les propriétés finales du média [62].

II.9. Exemple d'applications des médias fibreux en filtration de l'air

Comme mentionné en introduction, les médias fibreux sont très fréquemment utilisés pour la filtration de l'air ou l'épuration des fumées.

II.9.1. Filtres industriels

Les installations industrielles telles que les centrales thermiques, les usines chimiques, les cimenteries ou les fonderies utilisent les filtres industriels à manches filtrantes pour minimiser l'émission de polluants. Les manches filtrantes sont composées d'un média fibreux dans lequel s'insère un support métallique qui maintient la forme de la manche (Figure II .9).



Figure II .9 : Manche filtrante

Le principe de fonctionnement des dépoussiéreurs à manches filtrantes est simple. Le gaz contenant les particules traverse les manches filtrantes. Lors de ce passage, les particules sont collectées et s'accumulent à la surface extérieure de la manche filtrante pour former un gâteau de particules (colmatage). Le gâteau de particules augmente alors la perte de charge. Pour limiter la perte de charge, un système décolmate les manches filtrantes lorsque la perte de charge atteint une valeur critique. Le plus souvent, le décolmatage s'effectue par à-coups d'air comprimé à contre-courant afin de briser le gâteau qui tombe sous forme d'agrégats dans une trémie de collecte. Le matériau (Laser Induced Pressure Pulse [LIPP]), l'effet électroacoustique (Pulsed Ce système permet de

traiter des débits importants de poussières de manière très efficace, mais nécessite des investissements de départ importants.

II.10. Caractérisation de l'état de charge des médias filtrants

Les matériaux diélectriques ne se comportent pas tous de la même manière après un dépôt de charges. Ils ont des aptitudes différentes à piéger et à conserver les charges électriques. Selon la nature du diélectrique et de l'information souhaitée pour caractériser son état de charge, la technique utilisée sera différente. Plusieurs techniques développées à la fin des années 1970 et généralisées dans les années 1980 avaient pour objectif une représentation de la répartition volumique de la densité des charges injectées dans les matériaux diélectriques solides. Il s'agit de techniques utilisant la propagation d'une onde de pression Electro Acoustic, [PEA], la propagation d'une onde thermique (Thermal Step Method [TSM], ou Laser Intensity Modulation Method [LIMM]), entre autres [63-65].

La mesure des charges d'espace n'est pas la seule façon de caractériser la réponse d'un matériau diélectrique. D'autres techniques sont utilisées, comme par exemple la mesure du déclin et de la cartographie du potentiel de surface, ou encore la mesure de la conductivité et de la permittivité avec la spectroscopie diélectrique [66]. D'autres techniques utilisent la mesure de courant comme par exemple la mesure des courants thermo-stimulés (CTS), ou encore la mesure du courant de conduction (MCC) [67]. Toujours dans la mesure du courant, on retrouve la « Méthode Miroir » (MM) et « ICM » « Influence Current Measurement », ces techniques donnent une information sur le piégeage des charges, sur le courant de surface et sur le courant d'influence lors de la charge. La microscopie à balayage électronique quant à elle permet de donner en plus une information sur la structure microscopique des matériaux [68-70].

Dans cette section, le rappel des techniques connues de la littérature pour la charge des médias sera suivi d'une synthèse sur les méthodes de caractérisation de l'état de charge, pour terminer par une présentation des caractéristiques de la collecte des médias filtrants [71].

II.10.1. Les électrets

Par analogie avec les aimants permanents (MAGNETS), le terme électret a été introduit en 1892 par Olivier Heaviside pour désigner les diélectriques à polarisation permanente. Ainsi, l'électret produit un champ électrique sans aucune source externe. Ce n'est qu'en 1919 que Mototaro Eguchi a pu donner la première confirmation

expérimentale, où il réussit à fabriquer un électret par application d'un champ électrique à un échantillon de cire de Carnauba en cours de refroidissement à partir de sa température de fusion. Les molécules polaires de cette cire, libres de s'orienter sous champ électrique au voisinage de la température de fusion, restaient figées avec l'orientation imposée au retour à l'état solide, bien que le champ appliqué a été supprimé. La polarisation rémanente était comprise typiquement entre 10^{-4} et 10^{-5} C.m⁻², et pouvait persister plusieurs années.

Un électret est défini comme un diélectrique qui porte une polarisation induite. Cette polarisation est quasi permanente, c'est-à-dire que le temps de déclin est plus long que la durée de son utilisation. La polarisation est due à des charges électriques réelles sur la surface ou/et dans le volume du matériau ou bien aux dipôles orientés et figés dans le volume. Les électrets sont essentiellement des matériaux désordonnés tels que les polymères et les minéraux amorphes.

Les électrets sont utilisés soit sous forme de films minces, soit sous forme de structures fibreuses [72-73].

II.10.2. Méthodes de formation d'électrets

Selon les modes de formation des électrets, ces derniers sont classés en deux familles, les électrets dipolaires et les électrets à charge d'espace. En effet, les charges électriques qui peuvent être créées et piégées dans un diélectrique pour former un électret sont de deux catégories majeures : des monocharges appelées charges réelles, et des dipôles orientés appelés charges liées.

Il existe plusieurs méthodes de formation des électrets à charge d'espace. La polarisation provient de charges des deux signes. Ces charges peuvent être obtenues par séparation d'hétérocharges présentes et piégées dans le matériau et/ou par injection d'homocharges au niveau des électrodes lors de l'opération de polarisation. La polarisation peut également provenir d'un excès de charges apportées par d'autres processus tels que la décharge couronne, l'implantation électronique (canon d'électrons), ou la triboélectricité (contact + frottement) [74].

II.10.3. Méthodes de chargement

Un corps chargé électriquement est la manifestation d'une accumulation ou d'une perte de charges électriques. En effet, lorsqu'un corps est en équilibre, il est électriquement neutre. Ce corps sera électrisé lorsque quelques-uns de ses atomes auront

soit gagné, soit perdu un ou plusieurs électrons rompant ainsi l'équilibre et la neutralité. On dit alors que ce corps possède une charge électrique.

Il y a de nombreux modes d'électrisation possibles par :

- Frottement (triboélectricité).
- Contact (transfert direct de charges).
- Ionisation (émissions d'ions sous haute tension).
- Influence (à l'aide d'un champ électrique).
- Clivage (fragmentation).
- Effet photoélectrique.
- Emission thermoélectronique.
- Ballo-électricité (agitation des particules dans un flux de gaz) etc....

Les méthodes les plus répandues étant l'effet triboélectrique, par transfert de charges à l'aide d'un rouleau électrostatique et par décharge couronne. Ces techniques sont les plus utilisées pour charger les diélectriques en vue de la caractérisation de leur aptitude à garder l'état d'électrisation.

II.10.3.1. Charge par effet triboélectrique

L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux, sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact. Le frottement impliquant des contacts suivis de séparations, il améliore les conditions de charge (Figure II.10) [75-76].

Lorsque deux matériaux différents et électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation [77].

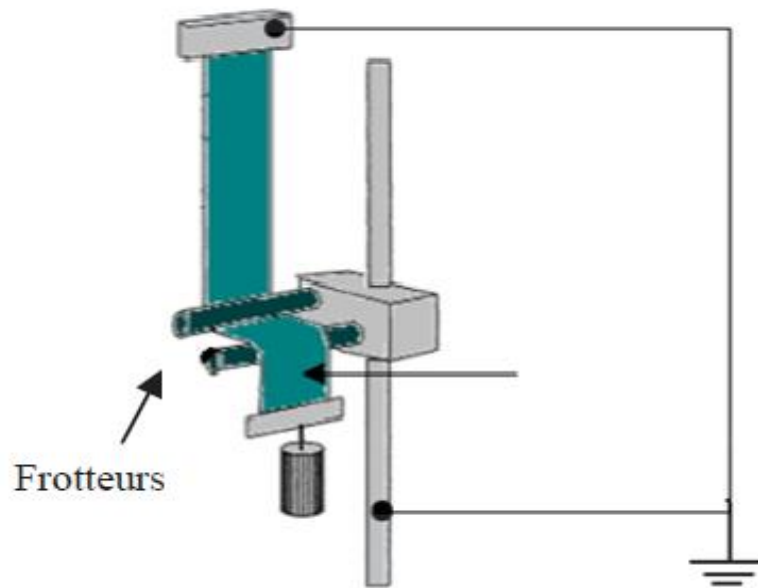


Figure II.10 : Dispositif de charge par effet triboélectrique

II.10.3.2. Charge par rouleau électrostatique

Le contact entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrisation (Figure II.11). Un diélectrique peut être aussi chargé avec un rouleau électrostatique en contact avec la surface libre de l'échantillon et dont le potentiel de charge est aussi contrôlé par la source haute tension [78- 79].

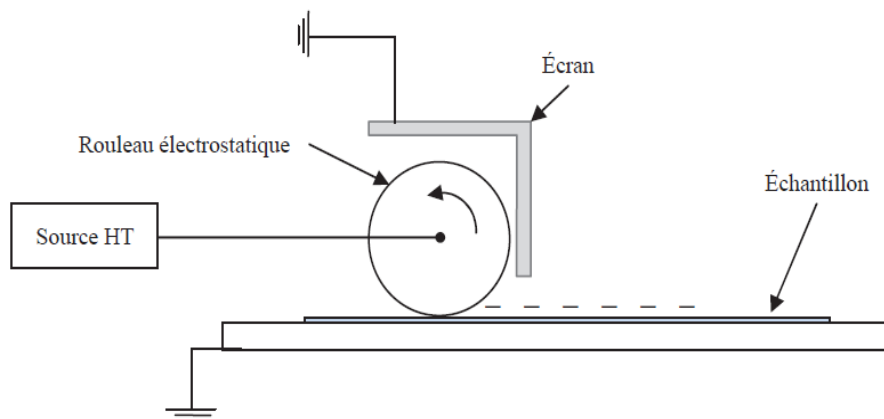


Figure II.11 : Principe de charge par rouleau électrostatique

II.10.3.3. Charge par décharge couronne

Ce procédé de formation est basé sur la génération de décharge couronne en appliquant une tension assez élevée (dizaines de kV) à une électrode de faible rayon de courbure (centaines de micromètres) située à une certaine distance (plusieurs centimètres) par rapport à un plan de masse (Figure II.12) [80-81].

L'électrode active peut être une pointe, plusieurs pointes disposées en forme de peigne, ou un fil très fin. Le champ électrique dans l'espace inter électrodes est non uniforme, son intensité au voisinage de l'électrode active est assez élevée pour que l'air soit ionisé. Le diélectrique est posé sur le plan de masse. Sous l'action du champ électrique, il reçoit des charges de même polarité que l'électrode couronne.

La charge d'un média filtrant par effet couronne offre la possibilité d'utiliser des sources d'alimentation variées (positive, négative, alternative, impulsionnelle, pulsée...). Par conséquent, les résultats de dépôt de charges varient d'une source à l'autre. La figure illustre le principe de formation d'électret par décharge couronne (négative) [82-83].

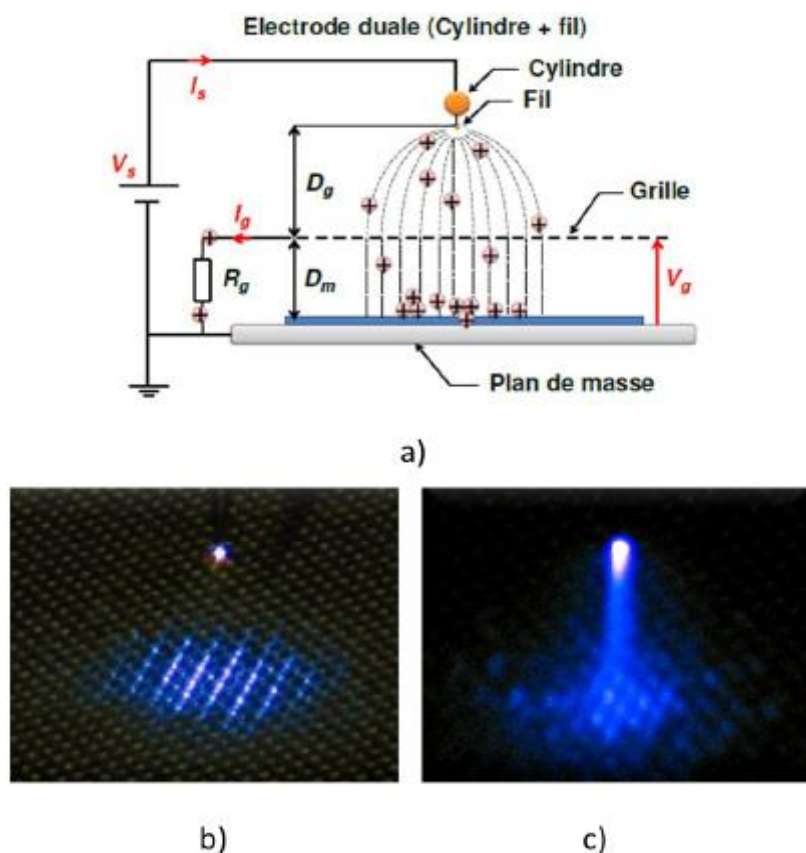


Figure II.12 : Principe de formation d'électret par décharge couronne

II.11. Caractérisation électrique des diélectriques

La caractérisation électrique des matériaux diélectriques comporte le plus souvent deux types de mesures :

- Mesure de courant ;
- Mesure de potentiel (ou charge).

Nous allons voir dans les prochains paragraphes les principales méthodes utilisées pour la mesure de potentiel de surface sans contact (sonde capacitive, moulin à champ, sonde à condensateur vibrant).

A) Sonde capacitive

Les sondes capacitatives sont formées d'un conducteur sur lequel une charge d'influence est mesurée. Ces capteurs fournissent une mesure du champ vu par la sonde et non pas une mesure absolue du potentiel. La distance entre la sonde et la surface de mesure influe la mesure. La figure II.13 illustre le schéma de principe d'une sonde capacitive [84].

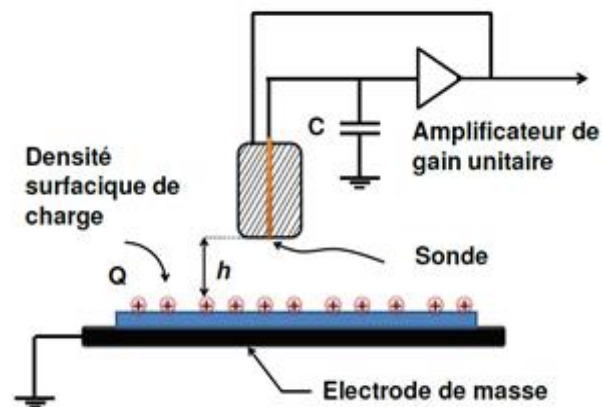


Figure II.13 : Principe de fonctionnement d'une sonde capacitive

Cette méthode est simple à mettre en œuvre et elle est peu coûteuse, cependant elle est sensible à la présence de particules chargées.

B) Moulin à champ

Les moulins à champ fonctionnent dans la même logique que les sondes capacitatives, seulement il y a une évolution par rapport à ces dernières, notamment l'utilisation d'une surface de mesure plus large qui permet d'éviter les dérives systématiques des sondes capacitatives. La figure II.14 représente le schéma de principe de cette sonde à moulin à champ. Une ailette tournante est placée devant l'ailette sensible. La modulation de la charge induite, obtenue par la modulation de la surface exposée au champ incident, génère un signal alternatif proportionnel au champ, ainsi le signal généré peut être amplifié à l'aide d'un système de détection synchrone.

L'abréviation PSD (Phase-Sensitive Detection) correspond à un détecteur synchrone.

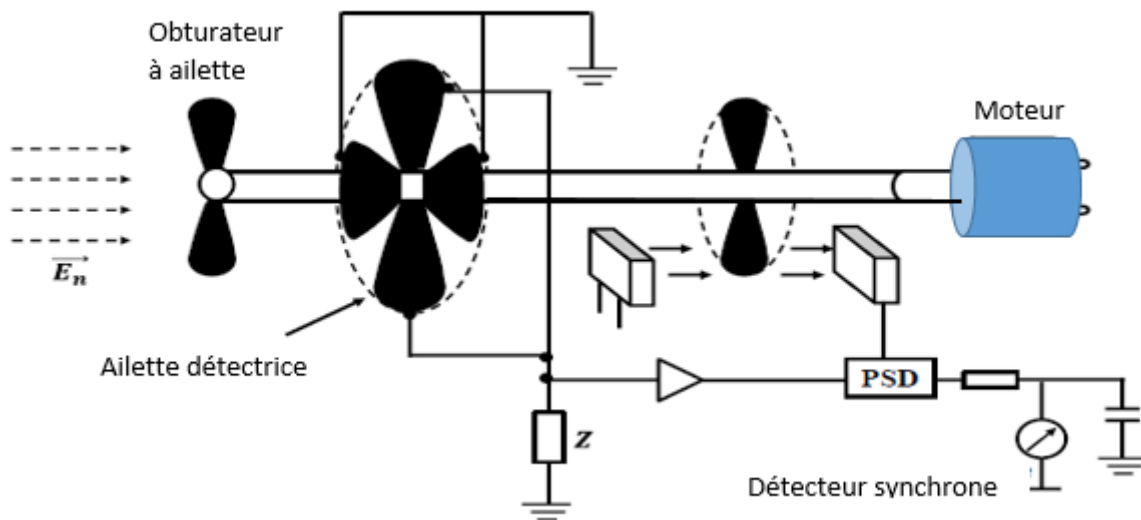


Figure II.14 : Principe de fonctionnement d'une sonde moulin à champ [43]

II.12. Avantages des non-tissés

Parmi les avantages majeurs des non-tissés pour l'industrie figurent essentiellement le fait de passer directement de la matière première au produit fini à l'aide d'un seul processus en continu. De plus le coût de fabrication des non-tissés reste généralement abordable puisque la matière première est utilisée directement sans passer par d'autres processus de finissage comme dans les autres procédés de fabrication des textiles. En dehors de cette approche de production de masse, l'industrie des non-tissés peut également produire une très large gamme de produits. Allant des non-tissés pour l'isolation qui contiennent juste 2 à 3% de fibres en volume à des renforts rigides où la teneur en fibres dépasse les 80% en volume. Les différents processus de fabrication se divisent en deux grandes parties, la préparation des fibres pour produire un voile en continu et la consolidation de l'empilement de ces derniers.

Les techniques de formation des non-tissés jouent aussi un rôle important dans le processus de fabrication, à savoir qu'on peut avoir des types des produits différents en changeant uniquement de technique de consolidation, ce qui permet un large choix pour les fabricants et l'obtention d'une multitude de produit avec des coûts de fabrication moins élevés. Finalement le choix des non-tissés permet de recycler plusieurs matières contrairement aux textiles tissés ou tricotés. Les processus de fabrication des non-tissés permettent aussi d'utiliser de très courtes fibres pour certaines applications, trop courtes pour la filature [85-86].

II.13. Les inconvénients des non-tissés

Les non-tissés ont également certains inconvénients qui limitent leur utilisation. Par exemple, leur performance mécanique est généralement moins élevée par rapport aux textiles tissés.

II.13. Conclusion

Ce chapitre présente un état de l'art des mécanismes de filtration des aérosols par des filtres à fibres et montre qu'il s'agit de phénomènes complexes, faisant interagir les propriétés physico-chimiques des aérosols et les caractéristiques structurelles du filtre. Ce chapitre présente un panel de technologies non tissées utilisées dans la fabrication des filtres qui permettent de couvrir l'essentiel de la normalisation appliquée aux filtres dans une zone où les particules se révèlent les plus pénétrantes.

Les études réalisées depuis une quarantaine d'années montrent que l'association des forces électrostatiques (force de Coulomb, force diélectrophorétiques,...) aux forces mécaniques (diffusion, interception et impaction inertielle) contribue significativement à l'amélioration de l'efficacité de collecte des medias non-tissés. Plusieurs techniques de charge de ces medias ont été étudiées par de nombreux chercheurs. Le meilleur contrôle de dépôt de charges peut être fait avec le système de charge « triode ». Il sera adopté aussi pour la réalisation des études présentées dans les chapitres suivants de cette thèse.

La caractérisation de l'état de charge des matériaux diélectriques peut être réalisée avec plusieurs techniques (thermique, acoustique, électroacoustique). Parmi ces techniques, la mesure du déclin de potentiel électrique de surface s'est imposée par sa simplicité et son caractère non intrusif (mesure sans contact). Elle sera utilisée par la suite de ce travail.

Etude du chargement des medias filtrants par décharge couronne

III.1. INTRODUCTION

Les phénomènes de décharge électrique, étudiés pourtant depuis près de deux siècles [87], font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques. On pourrait s'étonner de cet état de fait mais on comprendrait vite que cela n'est dû qu'à la très grande complexité du phénomène et des mécanismes qui le constituent. Cependant de grandes avancées ont été faites ces dernières décennies dans l'amélioration des moyens de diagnostic des premiers instants de la décharge et donc dans l'étude des mécanismes d'initiation. Cela a permis d'accroître les connaissances sur le phénomène et d'avancer dans les applications qui ont d'ailleurs connu de bien plus larges expansions [88].

Nous présentons dans ce chapitre la phénoménologie de la charge électrostatique dans un champ électrique affecté par décharge couronne. Les mécanismes de décharge sont expliqués et on présente, d'une manière critique, l'étude pratique sur la caractérisation des performances des media filtrant chargées électriquement.

III.2. Présentation de l'effet couronne

Le terme effet couronne englobe l'ensemble des phénomènes se produisant dans un milieu gazeux au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure [89], porté à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique soit supérieur au champ disruptif de ce gaz. Ce type de décharge ne nécessite aucune source d'ionisation externe pour se développer.

C'est une décharge autonome qui, pourtant, nécessite un électron germe pour l'amorcer.

La décharge couronne se manifeste dans plusieurs configurations d'électrodes (Figure III.1) Ce phénomène est d'une grande importance dans l'ingénierie en HT où les champs électriques sont inévitables. Il est responsable des pertes dans les lignes de transport d'énergie et conduit souvent à la détérioration de l'isolation sous l'action combinée de la décharge et des composants chimiques qu'elle produit [90].

Ainsi la décharge couronne présente des aspects utiles (traitement de surface, précipitateurs électrostatiques, destruction des polluants par DC, générateurs d'ozone...etc.) Et des aspects nuisibles (pertes de puissance dans les lignes de transport d'énergie, défaut d'isolation, perturbations radioélectriques..., etc.). L'effet couronne se manifeste par

l'apparition d'effluves lumineux entourant le conducteur HT et l'apparition d'un crépitement audible [89].

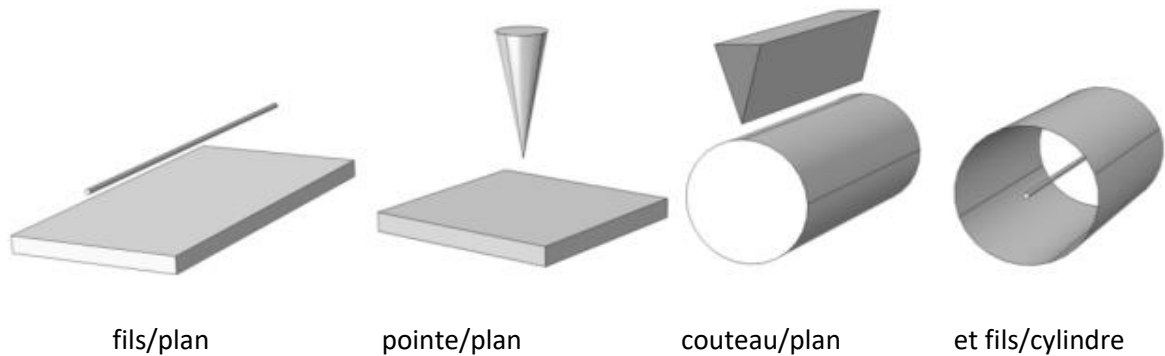


Figure III.1 : Différentes configurations de décharge couronne.

La difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc électrique. Cette transition est accompagnée par une forte augmentation de courant circulant dans la décharge et une hausse de la température de gaz et par conséquent le plasma généré est proche de l'équilibre thermodynamique et la puissance injectée dans le gaz est majoritairement dissipée par effet de Joule [91].

Dans La majorité des applications utilisant des décharges couronne, on cherche à éviter le passage à l'arc pour ne pas détériorer les électrodes et pour optimiser les processus de formation d'espèces actives en fonction de l'énergie injectée.

III.3. Différents régimes de la décharge (caractéristique courant-tension)

La figure III.2 de références [92] décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. La courbe permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge couronne.

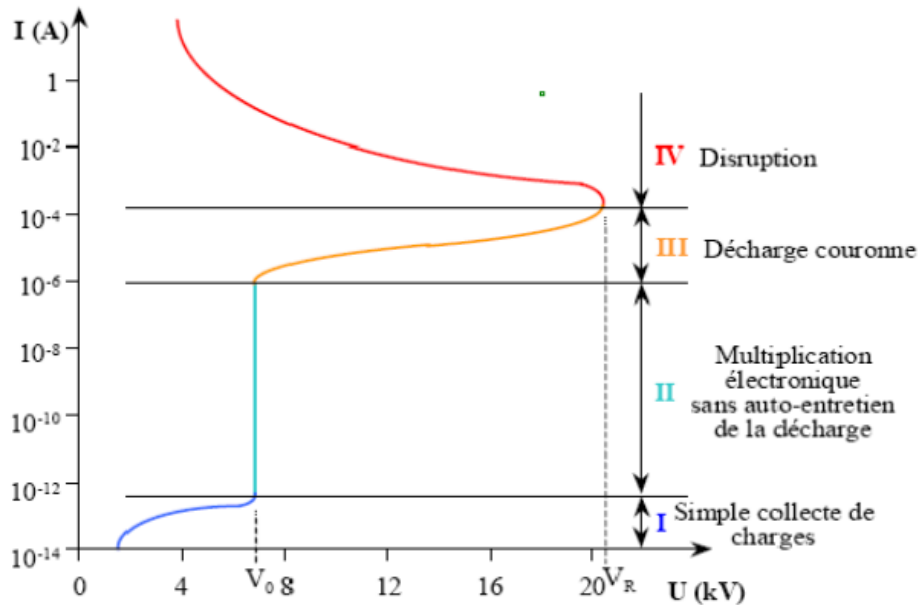


Figure III.2 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique

III.4. Effet de la polarité sur le processus de développement de la décharge couronne

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure. Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon, d'une décharge couronne négative. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente. La décharge couronne négative se produit beaucoup plus qu'une décharge couronne positive par contre la décharge complète intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative [93].

Pour la décharge couronne négative, l'avalanche électronique prend naissance sur la pointe et se dirige vers l'électrode plane. Par contre en polarité positive, les électrons libres naturels et ceux créés lors des avalanches électroniques se déplacent vers l'anode dans la zone où le champ électrique est le plus intense.

III.5. Les facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne, on distingue trois facteurs essentiels :

III.5.1. Facteurs géométriques

- Rayon de la courbure : L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.
- Distance inter-électrodes : Il apparait clairement que le courant est plus important et croit plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites

La nature des électrodes : La nature des électrodes et la tension appliquée influent sur la mobilité ionique comme le montre le tableau III.1 [94].

Tension positive	$\mu : [m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}]$ à $d=0.5cm$
Electrode en aluminium	8.10^{-5}
Electrode en aluminium	$7,4.10^{-5}$
Electrode en acier	12.10^{-5}
Tension négative	$\mu : [m^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}]$ à $d=0.5cm$
Electrode en cuivre	4.10^{-5}
Electrode en aluminium	$2,9.10^{-5}$
Electrode en acier	$4,5.10^{-5}$

Tableau III.1 : Influence de la nature des électrodes sur la mobilité ionique en tension positive et négative

Nous observerons une grande mobilité ionique avec des électrodes en acier qu'avec des électrodes en aluminium quelle que soit la polarité de la tension appliquée.

III.5.2. Les facteurs physico-chimiques

- **La température :** Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente. Par contre si l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la pression, ceci influe donc sur le produit.

- **L'humidité** : L'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'air est très importante surtout dans le cas où le champ électrique est non uniforme. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la plus grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation . Le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions toujours plus basses pour 90% que pour 5% d'humidité relative [95]. Cette différence pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente.
- **La pression** : L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant. La figure III.3 montre l'effet de la pression sur la décharge [93].

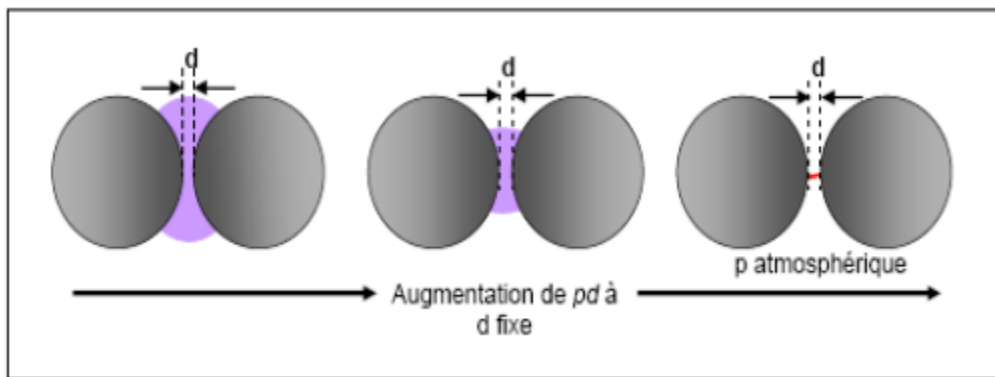


Figure III.3 : Schéma d'évolution de la décharge observée en fonction de la pression

- **La densité de l'air** : Les paramètres climatiques et particulièrement la densité de l'air influencent la tension d'amorçage des intervalles d'air.

La tension « U_d » donnée par l'équation III.1 est proportionnelle à la densité de l'air :

$$U_{dn} = \frac{U_d K_h}{\delta} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

U_d : Tension de claquage dans les conditions normales.

K_h : Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

III.5.3. Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative.

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente[96].

III.6. Chargement du media filtrant tissé

III.6.1 But

Les matériaux filtrant utilisés dans les filtres à air assurent une haute efficacité de la collecte des particules de poussière, à une faible perte de charge (chute de pression) C. Les filtres à base de media filtrant tissé sont couramment utilisés pour la collecte des particules submicroniques dans les gaz pollués.

Ils comportent des charges électrostatiques piégées dans les tissus du média filtrant. Ces charges renforcent d'avantage l'efficacité du filtre et permettent la collecte des particules plus fines que celle collectées par les filtres mécaniques .

III.6.2. Démarche expérimentale

L'installation expérimentale (Figure III.4), que nous avons conçue, permet la caractérisation des médias tissés chargés par décharge couronne. La mesure de déclin de la charge de l'échantillon au cours du temps se fait par l'introduction du média filtrant à l'aide d'une pince isolante dans une cage de Faraday reliée à une interface d'acquisition (Pasco Capstone 550) connecté à un ordinateur afin de réaliser l'obtention des données via une carte d'interface.

Les mesures sont automatiquement enregistrées sur ordinateur à travers le système d'acquisition géré par le logiciel PASCO scientifique Capstone.

La méthode consiste à charger le tissu à l'aide d'une configuration fil-demi cylindre

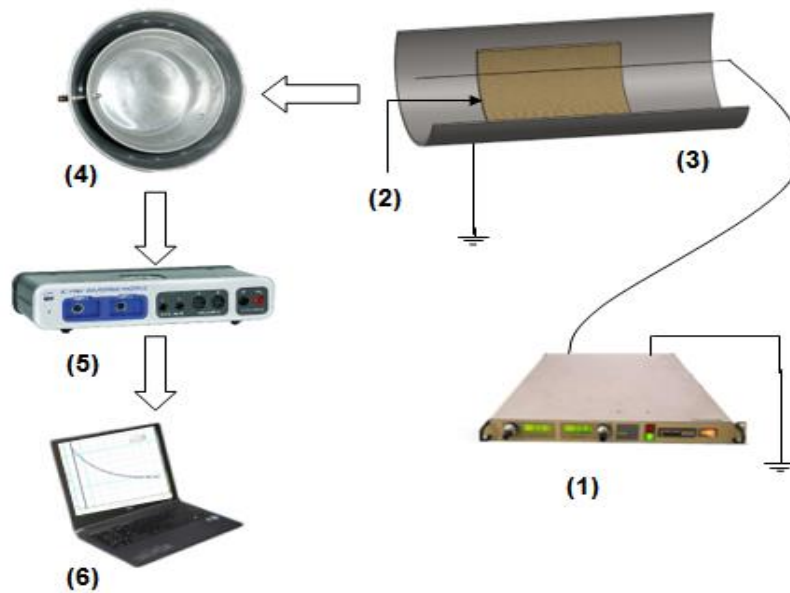


Figure III.4 : Montage expérimental utilisé pour la mesure du déclin de potentiel

- (1) Générateur Haute Tension Continue ;
- (2) Media filtrant ;
- (3) Electrodes fil-demi cylindre ;
- (4) Cage Faraday ;
- (5) Interface d'acquisition PASCO 5500
- (6) Ordinateur.

L'installation expérimentale, sur laquelle l'ensemble des mesures électrostatiques sont réalisées, est constituée de deux postes ; un poste de mesure de la charge électrique et un poste de charge. La figure III.5 illustre l'ensemble de ces postes ainsi que les instruments expérimentaux utilisés. Sur le premier poste, la charge de la surface du média est obtenue en l'exposant, durant un temps défini, à une décharge couronne générée dans une configuration d'électrodes dite « fil-demi-cylindre ».

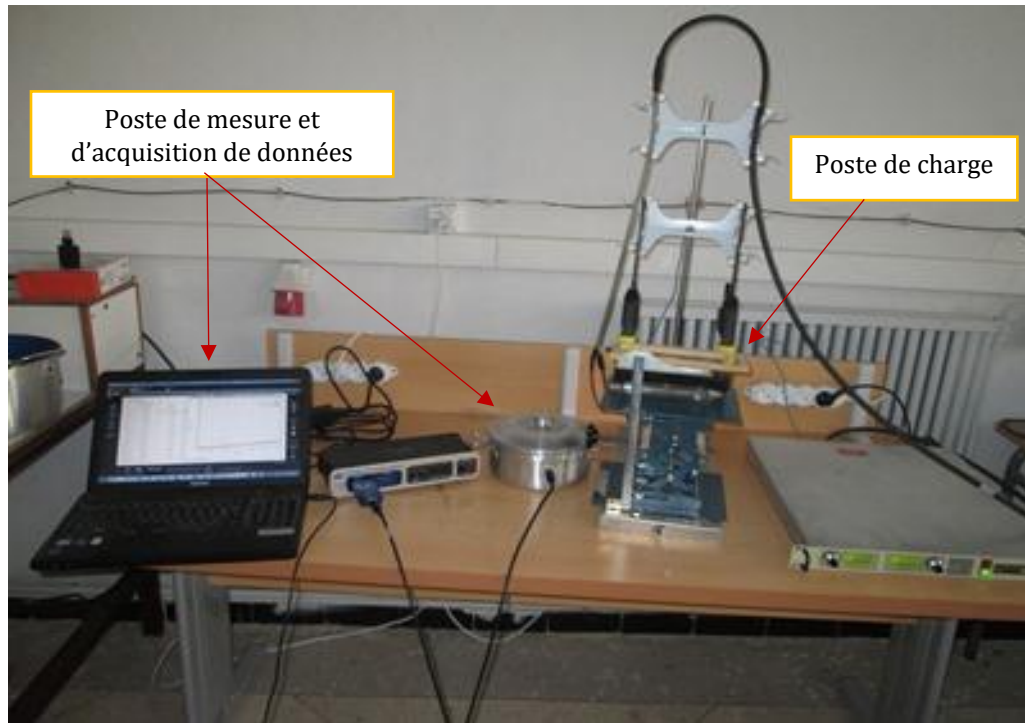


Figure III.5 : Photographie du dispositif expérimental réalisé

III.6.2.1. Poste de charge

Les phénomènes de décharges électriques, font toujours l'objet de recherche active auprès des scientifiques depuis longtemps pour charger des isolants, elles permettent d'effectuer cette opération dans l'air et sans contact. Elle est largement exploitée pour tester des matériaux diélectriques et étudier leurs réponses à une charge d'espace.

La figure III .6 regroupe des caractéristiques générales de ce poste de charge que nous avons utilisé pour le chargement du média filtrant tissé par la décharge couronne générée.

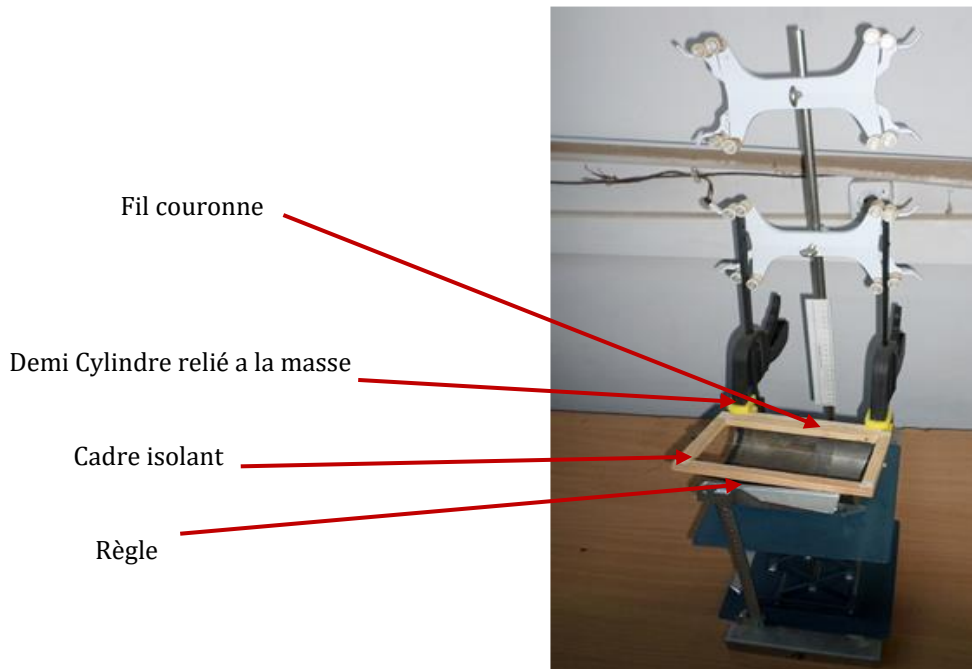


Figure III.6 : Dispositif de charge par décharge couronne

Le poste de charge est constitué par un fil couronne relié à un générateur haute tension continue, une demi cylindre relié à la masse pour crée un champ non uniforme, et une Platform pour varié la distance inter-électrode

III.6.2.2. Poste de la mesure de déclin de charge

Une fois que le média est chargé par décharge couronne, il est transféré, à l'aide d'une pince isolante vers le deuxième poste qui est dédié à la mesure de déclin de charge (Figure III.7) Le temps de transfert, entre la fin de la décharge couronne et le début de la mesure, est très bref, l'acquisition des données s'effectue par une interface connectée à un instrument virtuel développé sous l'environnement Pasco Capstone.

L'approche expérimentale adoptée dans cette étude repose sur la méthode du déclin de potentiel de surface (DPS). Celle-ci consiste à suivre en fonction du temps l'évolution du potentiel de surface de l'échantillon préalablement chargé et laissé libre. Pour chaque essai, une série de mesures sont effectuées dans des mêmes conditions et à chaque fois sur un échantillon neuf.



Figure III.7 : Schéma du poste de mesure du déclin de charge

III.6.2.3. Echantillons à charger

Les mesures ont été réalisées sur un échantillon de médias tissés de mêmes dimensions et d'épaisseur de 2mm (Figure III.8).

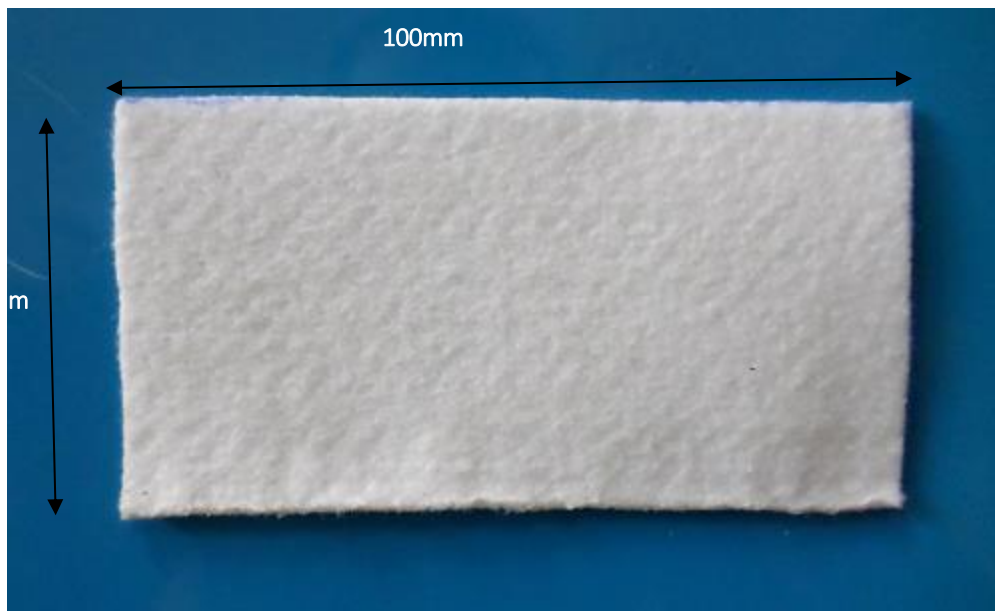


Figure III.8 : Échantillon du Tissus utilisés

III.7. Etude expérimentale

Les résultats obtenus sont effectués en fonction de l'amplitude et la polarité de la tension appliquée, et la distance inter-électrode.

III.7.1. Influence de l'amplitude de la tension appliquée

Le principe de la méthode du déclin de potentiel en surface (DPS) est de suivre en fonction du temps l'évolution du potentiel de surface d'un échantillon préalablement chargé par décharge couronne. La mesure du potentiel en surface de l'échantillon au cours du temps à partir du logiciel PASCOScientific Capstone (Figure III.9), permet de fournir des informations sur le mode d'écoulement (surfaciques) des charges déposées et sur la mobilité de ces charges.



Figure III.9 : position de tissu sur le demi-cylindre

Dans le cadre de cette expérience, nous avons appliqué des décharges couronnes continues négative haute tension de courte durée (environ 30 secondes) de manière à ne pas dégrader physiquement en surface les échantillons. Des décharges de -12 kV, -16 kV et -20 kV ont permis de donner les graphes représentés sur la figure III.10.

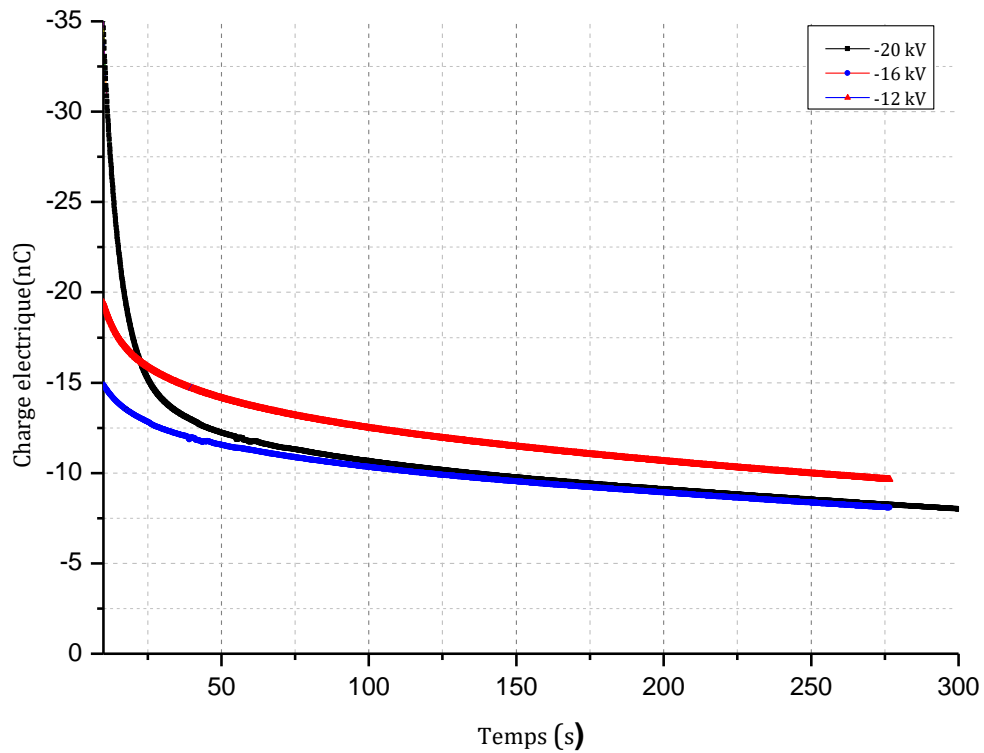


Figure III.10 : Influence de la décharge sur l'électrofiltre

Dans cette partie, nous avons essayé de regarder l'effet de la densité de charge déposée sur le comportement du déclin de potentiel en surface. Les mesures sont reportées sur la figure III. 11, qui montre l'évolution temporaire du DPS pour différentes valeurs du potentiel de dépôt.

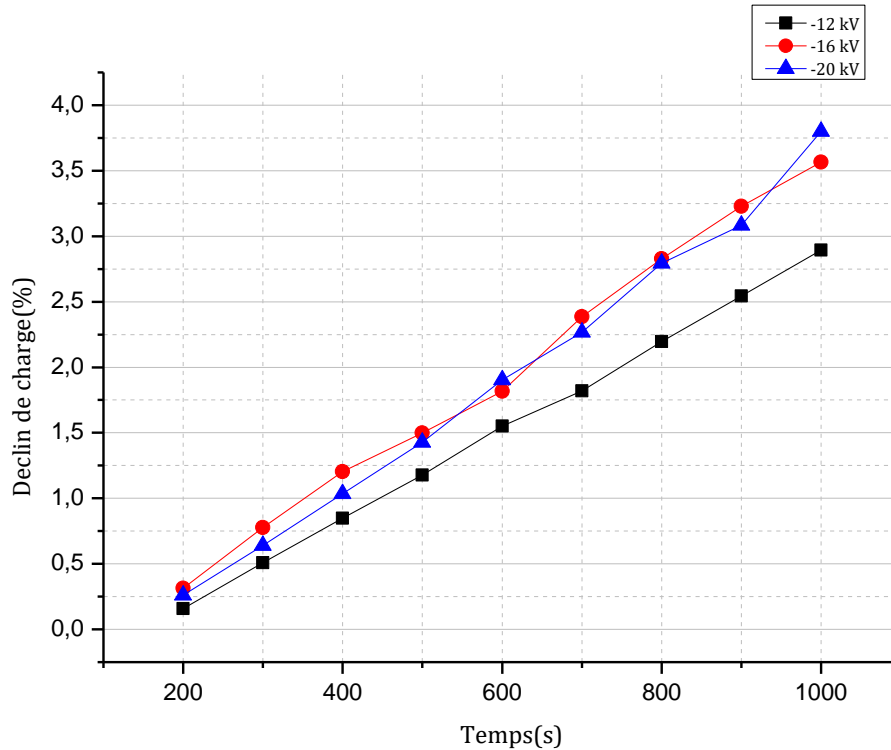


Figure III.11 : Déclin de charge (%)

On observe, durant les premiers instants une déclinaison très importante de l'échantillon. Au bout d'un certain temps, la charge est presque totalement disparue de la surface de l'échantillon. Pour une décharge de -12kV, la déclinaison est moins importante

On observe aussi l'existence d'un croisement des courbes de déclin. Au bout d'une même période de mesure la déclinaison de l'échantillon le plus chargé -20kV est plus grande que celle de -16kV et -12kV.

III.7.2. Influence de la polarité

Un diélectrique, chargé en surface, présente un potentiel surfacique local. Au cours du temps, cette valeur du potentiel décroît et ce fait représente nettement l'aptitude du matériau à évacuer, par plusieurs mécanismes cette charge déposée. Le champ appliqué par les charges déposées en surface crée un phénomène de polarisation dipolaire, par l'orientation des dipôles déjà existant ou une polarisation interfaciale par la migration des charges vers les interfaces. Ceci provoque l'apparition d'une charge en surface, de signe opposé par phénomène d'influence totale. La charge déposée en surface peut être neutralisée par les

porteurs libres provenant de l'atmosphère environnante le matériau, ou aussi traverser l'interface et pénétrer dans le volume pour engendrer un phénomène d'injection. Ce dernier mécanisme dépend fortement du champ électrique appliqué.

Dans la Figure III. 11, on constate que Le déclin de charge augmente en fonction du temps et garde la même allure quel que soit la tension appliquée. Il est plus rapide pour une tension de 16 kV et 20 kV par rapport à 12 kV malgré que la charge initiale de 20 kV soit supérieure.

III.8. Conclusion

L'observation répétée de phénomènes anormaux se traduisant par des remontées de potentiel dans nos essais nous a paru intéressante à reporter, même si nous ne sommes pas en mesure aujourd'hui d'en donner une explication inattaquable. Elle n'est pas attribuable à des artefacts, ni à des erreurs dans le mode opératoire. Elle est probablement liée à la combinaison spécifique de notre dispositif de charge et du matériau étudié (cet effet n'étant pas observé sur d'autres matériaux). L'hypothèse la plus probable que nous envisageons est aujourd'hui la présence de mécanismes physicochimiques permettant d'expliquer une migration de la charge (en volume ou en surface) contre le champ appliqué, ou des effets piézoélectriques dans le matériau. Un travail plus systématique est à entreprendre.

Conception et réalisation d'un nouveau filtre hybride

IV.1. Introduction

Le filtre HYBRIDE est un dispositif de contrôle de la pollution de l'air qui permettrait aux entreprises industrielles et de production de cimenterie possédant des sources fixes de respecter les normes d'émission d'air proposées pour les particules fines.

Contrairement à d'autres dispositifs de contrôle des particules, le filtre HYBRIDE intègre efficacement les technologies de précipitation électrostatique et de filtrage des tissus pour fournir un système compact et rentable. Cette technologie est facilement adaptée pour de nouvelles installations ainsi que des améliorations des ESP existants.

Dans ce chapitre nous allons faire une description détaillée de l'ensemble du dispositif expérimental réalisé. Ensuite, nous présenterons la constitution de la nouvelle technologie hybride (les électro-manches), ainsi que le principe de fonctionnement de ce dispositif.

IV.2. Définitions du filtre hybride

Le filtre hybride combine les avantages de la séparation électrostatique avec ceux de la séparation filtrante. C'est une solution idéale pour transformer un électro filtre existant en filtre hybride.

La plus grande partie des poussières est extraite dans le champ électro-filtre sur les plaques collectrices de dépôts.

Les poussières restantes qui n'ont pas été extraites dans le champ électrique sont ionisées et agglomérées pour former des particules plus grosses.

Cette poussière ionisée se retrouve ensuite fixée sur l'extérieur des manches. Cette poussière forme un gâteau poreux. Ce gâteau produit une perte de pression faible en comparaison avec un filtre à manche traditionnel.

Les fumées épurées introduites dans le filtre hybride sont réparties au moyen des écrans de répartition installés dans le pavillon d'entrée. A l'intérieur de celui-ci sont canalisées dans les ruelles parallèles que constituent les rangées formées par les plaques de dépôts. Le système d'émission est placé au centre de chaque ruelle [97].

IV .3. Technologie des filtres hybrides

Il existe (03) trois principales références mondiales des filtres hybrides :

IV.3.1. Collecteur de particules hybride compact (COHPAC)

Ce système est la combinaison d'un ESP avec un filtre à manches. Il a été développé et breveté par l'EPRI (Electric Power Research Institute, USA) en 1991. Il est commercialisé depuis par Hamon Research-Cottrell.

1. Réalisations :

Quatre installations ont été réalisées aux Etats-Unis, pour traiter des fumées de centrales thermiques au charbon.

2. Principe :

Des filtres à manches sont installés à l'aval d'un ESP (neuf ou existant). Les filtres à manche fonctionnent à vitesse de filtration plus élevée que les valeurs habituelles grâce au fait qu'une partie des particules est captée directement par l'ESP. Les vitesses de filtration annoncées par le constructeur sont de l'ordre de 4 à 5 m/mn, au lieu de 1.2m/mn, vitesse de filtration courante.

Les manches sont installées dans un caisson séparé (COHPAC I) ou intégré en lieu et place du dernier étage électrostatique (COHPAC II). Le décolmatage est de type « off-line ». Des travaux sont en cours pour tester ce système avec des injections de réactifs, pour capter des polluants gazeux.

Les résultats publiés sur les sites industriels équipés font état de 96 à 98% des cendres captées par l'ESP (99.9% au total).

3. Avantage :

- Compacité grâce aux vitesses de filtration élevées.
- Possibilité d'injecter des réactifs.
- Coût plus faible.

4. Inconvénients :

Des problèmes de perçages de manches sont rencontrés sur une des installations industrielles fonctionnant à 4.7m/mn (média PPS Ryton). Des travaux sont en cours à l'EPRI pour tester d'autres médias (polymères, céramiques, etc....) [98].

IV.3.2. Collecteur de particules hybride avancé (AHPC)

Cette technologie a été développée récemment par l'Université de North Dakota (UND), Energy and Environmental Research Center (EERC) et suscite un intérêt particulier de la part du DOE (US Department of Energy). Elle a fait l'objet d'un brevet déposé par l'EERC. Des droits exclusifs pour exploiter et licencier la technologie sont détenus par W.L.Gore & Associates (Gore), et des droits d'exploitation ont été achetés par ELEX (Suisse) pour certains marchés (cimenteries et production d'énergie) (Figure IV. 1) [99].



Figure IV. 1 : Photographie du Collecteur de particules hybride avancé (AHPC)

L'AHPC utilise des manches en « GORE NO-STAT » (membrane antistatique supportée par un non tissé antistatique). Des électrodes rigides sont placées à l'amont des manches, dans le même caisson, pour charger les particules qui sont ensuite captées à 90% par les plaques perforées situées entre les électrodes et les manches (Figure IV. 1). Le reste est capté par les manches. Le décolmatage des manches est assuré par un système « pulse jet ». Le décolmatage des plaques perforées est assuré par effet mécanique (marteaux) [100].

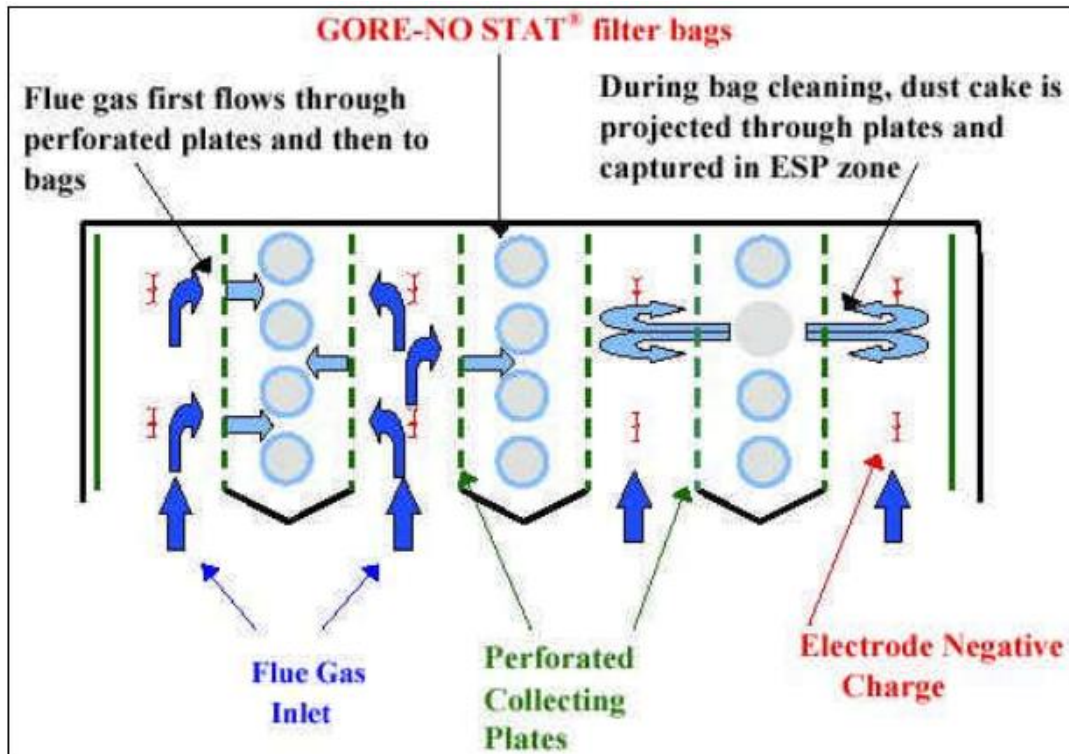


Figure IV. 2 : Principe fonctionnement de l'AHPC

1) Réalisation :

- Pilote Big Stone Power Plant
- Débit de gaz 15 000 Nm³/h
- 4 rangées de 8 manches
- Testé de juillet 1999 à septembre 2001
- Nouvelle installation échelle 1 Big Stone Power Plant financée par le DOE (démarrage octobre 2002)
- Cimenterie en Italie (démarrage sept 2002)
- Transformation d'un ancien filtre électrostatique de cimenterie (ISALBA, Almeria, Espagne).

2) Avantage :

- Vitesse de filtration 3.5 m/mn au lieu de 1.2 m/mn
- Encombrement divisé par 3
- Le constructeur annonce une perte de charge réduite en raison du gâteau plus fin, qui compenserait l'augmentation de vitesse.

3) Limitations :

- Peu de recul sur la tenue des manches
- Les performances publiées sont données en termes d'efficacité (99.99%)

sur une taille de particules non communiquée.

IV.3.3. Collecteur à plusieurs étages (MSCTM)

Cette technologie a été développée récemment par la société Allied Environmental Technologies, Inc (ALENTEC, Californie) et a fait l'objet d'un brevet en 2001 (USPat n°6 524 369).

Il s'agit d'un système comparable à l'AHPC, dans lequel des manches sont implantées entre les plaques de charge électrostatique.

La figure IV.3 illustre le système. La charge électrostatique est assurée par les plaques ondulées. Les plaques de collecte (tôles plates) et les manches sont reliés à la masse et récupèrent les particules [101].

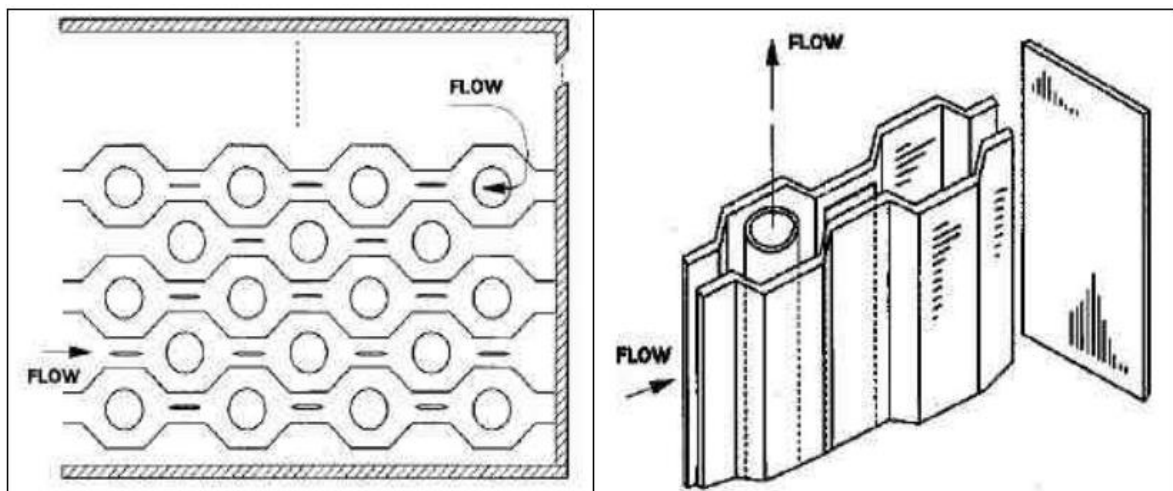


Figure IV.3 : Principe de fonctionnement de MSCTM

IV.4. Description du nouveau dispositif expérimental réalisé :

Le nouveau filtre hybride réalisé au laboratoire « Applications of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility » (APELEC) de l'université de Sidi-Bel-Abbès, combine les avantages de la séparation électrostatique avec ceux de la séparation mécanique (media filtrant). C'est une solution idéale pour transformer un électrofiltre ou un filtre à manches déjà existant en un filtre hybride (Figure IV.4).



Figure IV.4 : Photographie du dispositif expérimental réalisé

IV.4.1.Description :

C'est un dispositif de dépollution de l'air entouré fait de verre de glace par carcasse métallique, contient trois chambres la première chambre a un fil avec une alimentation alternative et a une entrée à l'aspirateur, et a entée d'air comprimé, la deuxième chambre a une l'électro-manche et fil contact avec les capteurs, et a une entée d'air-particule, la troisième chambre a une place de particules représenté les trois chambres avec les dimensions de ce filtre (Figure IV.5):

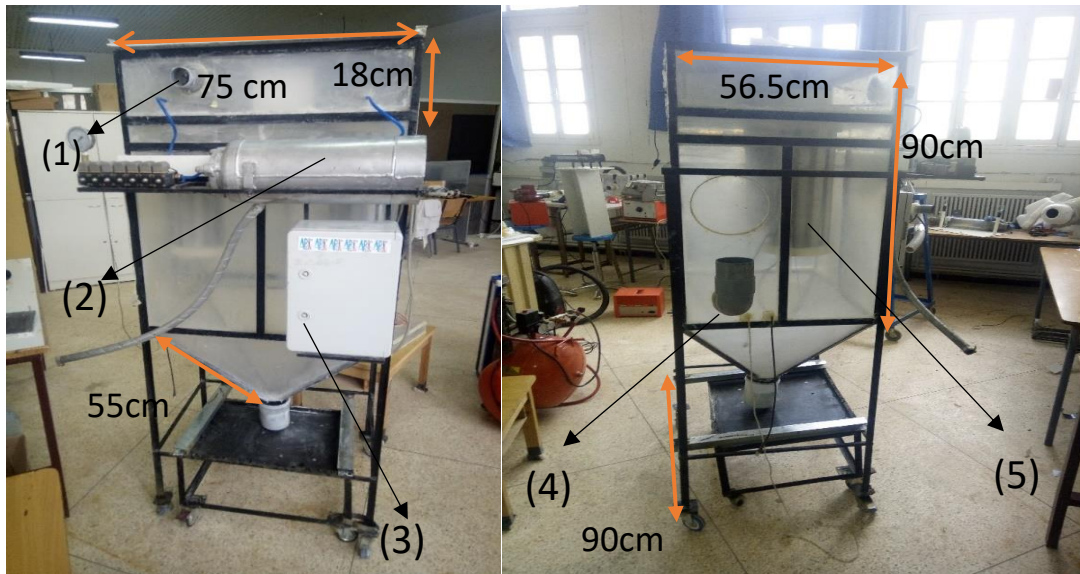


Figure IV.5 : Photographie du dispositif filtre hybride

- (1) Entrée à l'aspirateur
- (2) Reservoir auxiliaires d'air comprimé
- (3) Armoire électrique
- (4) Entée suspension air-particule
- (5) Electro-manche

IV.4.2. Sources d'alimentations

Le filtre hybride réalisé est alimenté par deux sources de tension, une de haute tension et l'autre de basse tension (Figure IV.6) :

- Alimentation continue : est une source de haute tension continue (SPELLMAN SL30Ü, 0-4 0 kV, 7,5mA] qui va alimenter les électro-manches.
- Alimentation alternative : est une source de basse tension alternative de type (PSY-40K-2, 0-450V) pour assurer l'alimentation de l'aspirateur d'air.

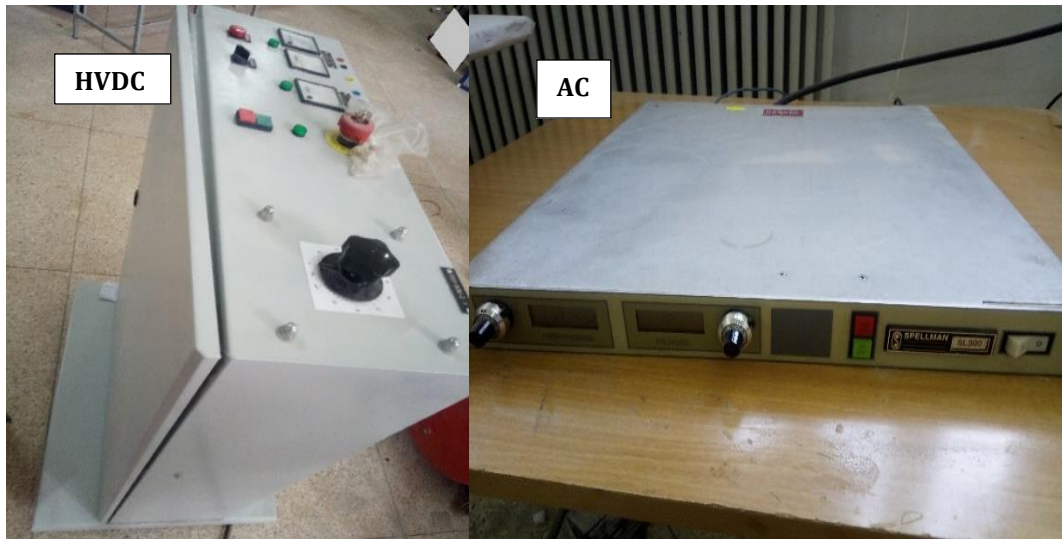


Figure IV.6 : Différentes sources utilisées

IV.4.3. L'électro-manche

La particularité du nouveau filtre hybride réalisé réside dans l'organe de filtration, appelé électro-manche. Le schéma de (Figure IV.7) présente un schéma descriptif de sa composition (Figure VI.8). Il comporte deux squelettes métalliques, une qui sert à fixer le manche en lui empêchant de se comprimer sous l'effet de l'aspiration, l'autre va servir comme électrode de masse pour avoir une décharge électrique. La tige corona est suspendue au centre des deux squelettes pour assurer une décharge uniforme. La (Figure IV.8) montre une photographie de notre électro-manche réalisé.

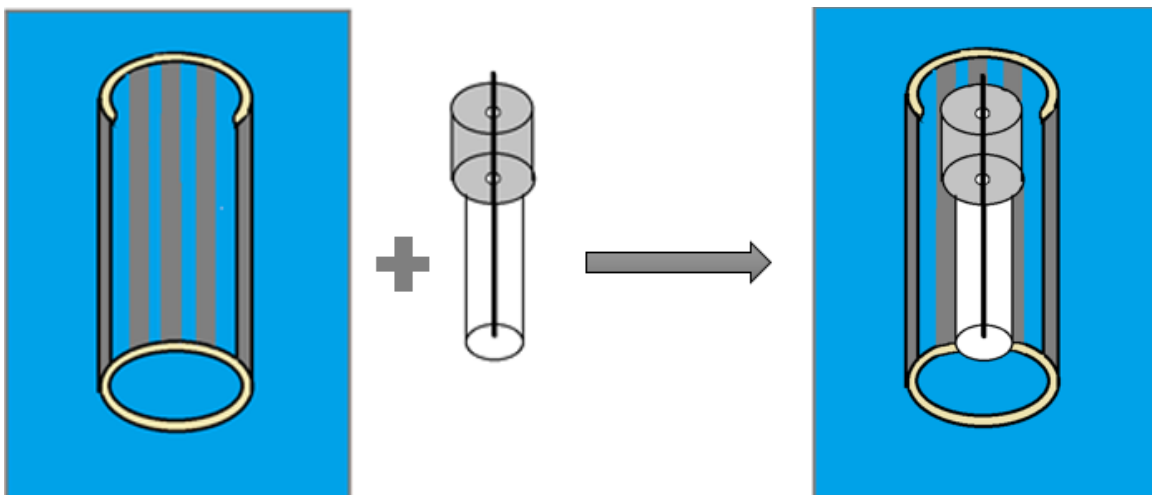


Figure IV. 7 : Schéma descriptif de l'électro-manche

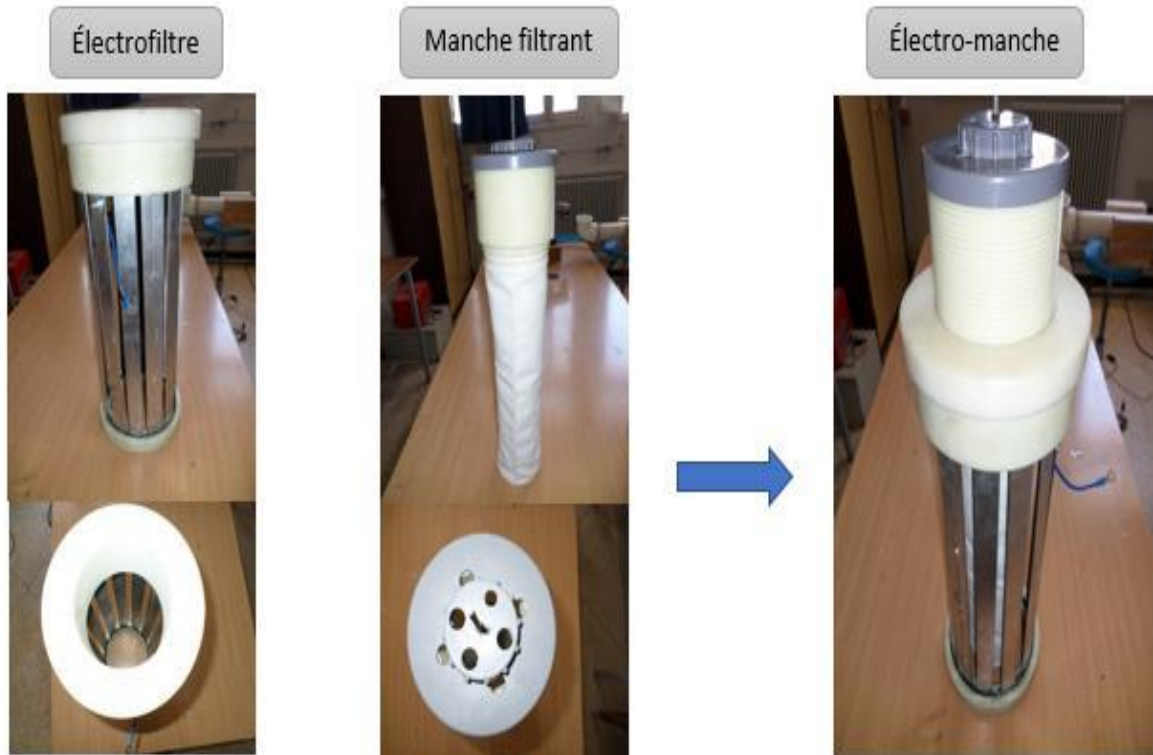


Figure IV.8 : Photographie du l'électro-manche

IV.4.4. Système d'admission de la poussière

La poussière est introduite à l'intérieur du filtre hybride par aspiration. Un tapis roulant transporteur permet de déverser de façon continue les particules de ciment blanc (Figure IV.9)

- **Aspirateur** : Qui permet de d'aspiration de poussière existante dans le dispositif
- **Tapis roulant** : Une bonde métallique transporteuse liée à la terre entraînée par un moteur a courant continue alimenté par un tension négligeable le tapis roulant assure le déplacement des particules vers le dispositif.



Figure IV.9 : Système d'injection d'air pollué

IV.4.5. Système de nettoyage pneumatique

Dans un dispositif à air pulsé, une impulsion d'air sous moyenne pression est délivrée à l'intérieur du manche. Le jet d'air sous pression, qui s'étend et se propage à l'intérieur de l'électro-manche, génère une onde de pression et une onde de déformation qui vont permettre au gâteau de poussières collecté de se décrocher. Le système de nettoyage est composé d'un compresseur relié à un réservoir d'air auxiliaire afin de maintenir la pression constante et égale à 06 Bars (Figure IV.10). Un bloc d'électrovannes est solidaire au réservoir auxiliaire d'air, qui permet l'injection par pulses répétées un air comprimé de forte intensité, pour assurer un bon nettoyage des électro-manches. Les séquences d'injection de l'air comprimé sont assurées par une automate programmable (Figure IV.11). Le cycle ou la séquence est programmé soit manuellement ou automatique selon l'état de l'électro-manche (saturé en poussière ou partiellement)

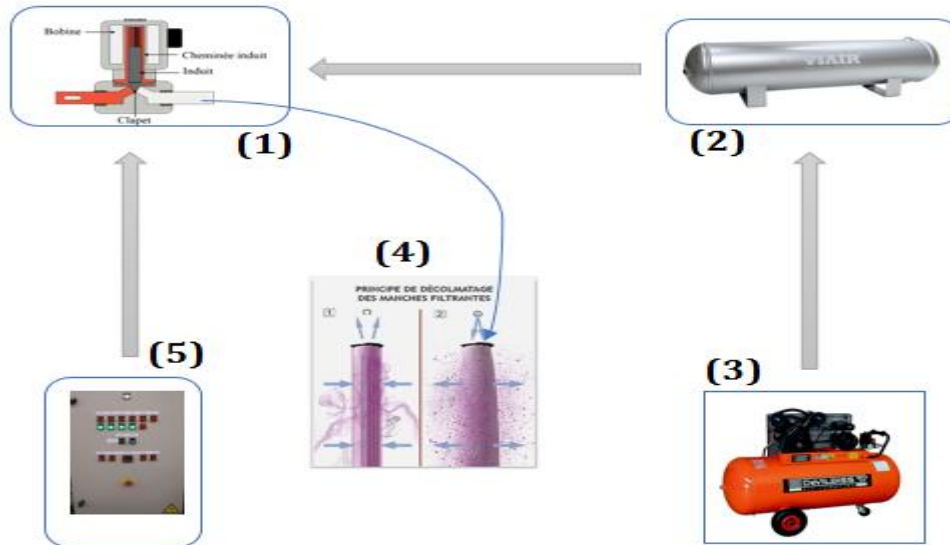


Figure IV.10 : Schéma du système de nettoyage pneumatique

- (1) Electrovanne ;
- (2) Reservoir auxiliaires d'air comprimé ;
- (3) Compresseur ;
- (4) Electro-manches;
- (5) Armoire électrique.

- **Armoire électrique** : L'armoire électrique est le dispositif où sont regroupés les différents systèmes participant à la commande du filtre hybride.



Figure IV.11 : Schéma descriptif de l'armoire électrique

- (1) Disjoncteur ;
- (2) Porte-fusible ;
- (3) Automate programmable industriel [API, LOGO Siemens 230RC] ;
- (4) Transformateur ;
- (5) Pont de diode ;
- (6) Relais de protection ;
- (7) Electrovannes.

IV.4.6. Appareillages de mesure

1. Interface d'acquisition Pasco 550

C'est un dispositif de mesure (électromètre Pasco, PS-2132), doté d'une carte d'acquisition de données (charge, potentiel), permet de transmettre par Bluetooth toutes les informations nécessaires vers un ou plusieurs ordinateurs en même temps (Figure IV.12).



Figure IV.12 : Photographie du Pasco 550

2. Capacimètre

Est un instrument de mesure qui permet de connaître la capacité des condensateurs. L'unité de la capacité est le farad (Figure IV.13).



Figure IV.13 : Photographie du capacimètre

IV.5. Principe de fonctionnement du filtre hybride

Le prototype de filtration d'air réalisé peut fonctionner sans interruption est de façon automatique. La plus grande partie des poussières est extraite par précipitation électrostatique tandis que les poussières restantes, non éliminées par effet de champ électrique, s'accumule pour former des particules plus grosses. Cette poussière mal ionisée se retrouve ensuite fixée à l'extérieure des manches filtrants. Elle forme ainsi un gâteau poreux qui ne produit qu'une faible perte de pression en comparaisent avec un simple filtre à manches. La récupération de la poussière filtrée s'effectue par voie pneumatique (Figure IV.14). Des pulses d'air sont injectées dans les électro-manches par des électrovannes. Dans notre cas seulement deux électrovannes sont fonctionnelles dont leur nombre dépend du nombre des manches filtrants [103].

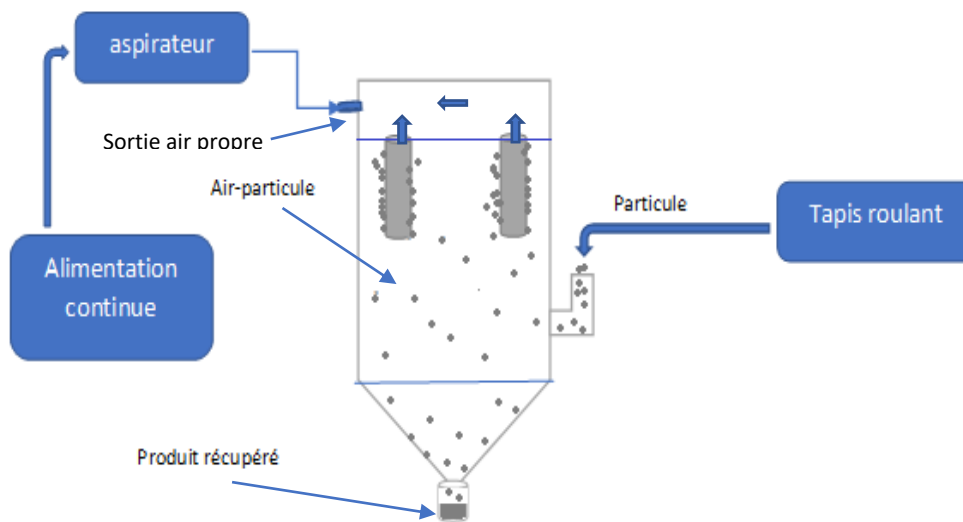


Figure IV.14 : schéma descriptive global du procédé de filtration hybride.

IV.6. Essai de filtration par filtre hybride

Après la mise en marche automatique du filtre hybride (Figure IV.15), (réglage des séquences du jet d'air, niveau de tension, réglage du débit d'aspiration) on procède à l'injection d'une quantité de ciment blanc de 400 g.

Le détachement des particules de ciment, qui se fait soit par gravité, ou par jet d'air, permet d'effectuée une mesure instantanée de la charge, une fois recueillie dans une cage de Faraday reliée à une interface d'acquisition de données.

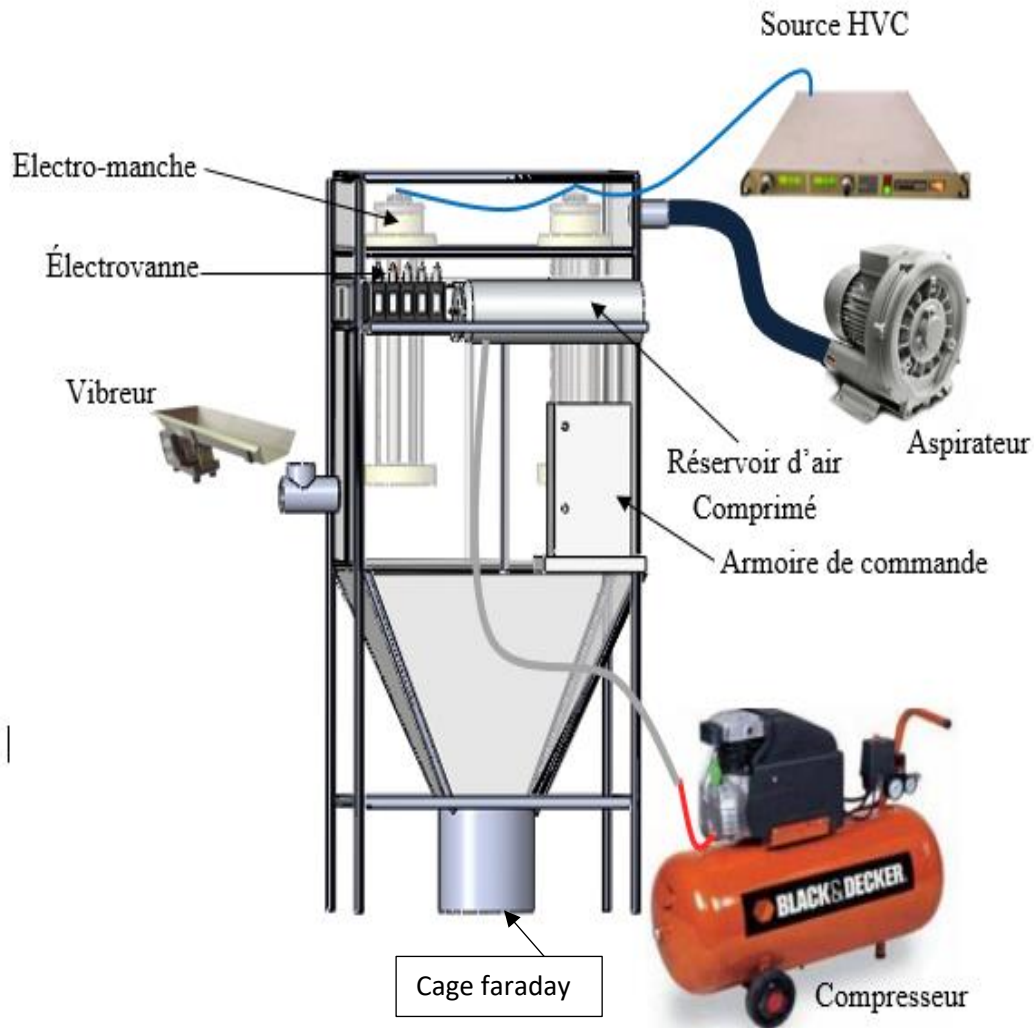


Figure IV.15 : Banc expérimental de filtration hybride réalisé.

Lorsque notre dispositif de filtration passe en un filtre hybride, et au fur et à mesure que la tension augmente, le pourcentage de la masse non filtrée diminue. Cela peut être expliqué d'une part, par l'augmentation de l'efficacité de filtration des manches due à la charge acquise par décharge couronne, et d'autre part, à la captation par les forces électriques additionnelles.

L'évolution temporelle de la charge en fonction de la tension semble à premier coup d'œil illogique (Figure IV.16). C'est tout à fait normal puisque la charge mesurée doit être plus élevée pour une tension de 24 kV par exemple, par rapport à une tension de 12 kV.

Normalement il y'a une raison derrière ce résultat. L'augmentation de la tension fait intervenir la partie électrique du filtre hybride. Dans ce cas, une grande quantité de particules de ciment est collectée au niveau de l'électrode externe (électrode de masse),

et elle reste collée sur la surface, ce qui empêche l'enregistrement de la charge acquise en fonction du temps.

Autre chose, on constate que pour une tension égale à zéro, l'évolution de la charge ne suit pas une variation constante. Plusieurs cassures sont enregistrées (ΔQ), qui sont dues, d'une part, à la collecte des particules par gravité en plus de l'effet aérodynamique de l'air à l'intérieur de la chambre de filtration, et d'autre part à l'effet des pulses d'air générées par les électrovannes. A chaque pulse la masse collectée est grande ce qui fait augmenté la charge mesurée.

Si on passe maintenant à une tension de 30 kV, on va constater la même chose, mais avec une amplitude plus grande de ΔQ .

Le ΔQ_{30} est plus grand que le ΔQ_0 , cette différence est due à la charge supplémentaire acquise par les particules sous l'effet de la décharge, en plus de celle acquise par effet triboélectrique.

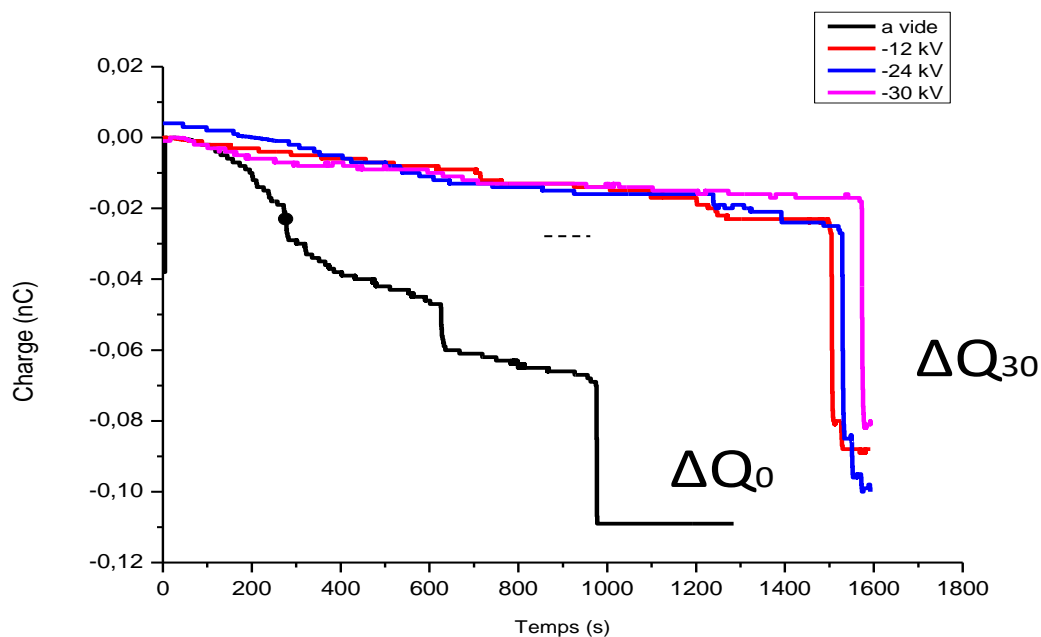


Figure IV.16 : Influence de la tension sur l'amplitude de la charge enregistrée.

Dans la figure IV.17 on peut voir clairement l'influence de la tension sur le filtre hybride ou on constate que plus la tension augmente plus la masse collectée au niveau des manches est élevée.

Le déclin de charge augmente en fonction du temps (Figure IV.16), il est plus rapide pour une tension de 16 kV et 20 kV par rapport à 12 kV malgré que la charge initiale de 20 kV est supérieure .

D'après les essais on constate que le fonctionnement du filtre hybride est meilleur par rapport au filtre à manche (sans tension). Plus on augmente la tension plus les particules se chargent ce qui facilite leur captation au niveau du manche. Les mesures de masse sont en cascade avec l'augmentation de la tension .

Compte tenu de ce qui précède le filtre hybride présente un bon choix par rapport au filtre à manche .

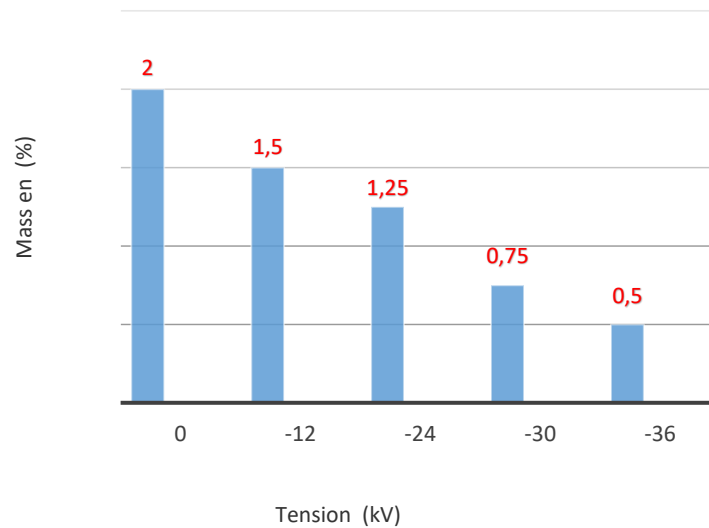


Figure IV.17 : La masse non filtrée en (%) au niveau du filtre

IV.7. Nouvelles techniques de monitoring du filtre hybride

IV.7.1. Introduction

Les filtres à manches sont largement utilisés pour la captation des particules de poussière provenant des flux gazeux. De nombreuses études ont été menées pour déterminer les performances d'un filtre à manches en utilisant plusieurs bancs d'essais pilotes [102]. Dans ces essais, les performances ont été surtout étudiées en fonction de la vitesse de filtration, la nature du media filtrant, la concentration d'entrée des particules et la perte de charge [103].

La perte de charge, appelée aussi différence de pression (ΔP) entre le gaz propre et le gaz pollué du dépoussiéreur est l'une des variables les plus importantes qui doivent être prises en compte dans la conception d'un filtre à manches [104]. La chute de pression dans un dépoussiéreur est provoquée par la résistance au flux d'air lorsqu'il traverse le manche filtrant ainsi que son gâteau. Ce paramètre est important car une perte de charge plus importante signifie un coût énergétique plus élevé [105]. L'énergie sera généralement consommée par les ventilateurs qui sont utilisés pour aspirer le flux d'air à travers le filtre à manches.

La différence de pression est généralement mesurée par une jauge de mesure de pression (manomètre). Cependant, avec le temps, les lignes de détection de pression peuvent s'obstruer de poussière ou même endommagées par l'humidité ou la corrosion [106-107], et la jauge peut devenir illisible. Par conséquent, il est nécessaire de prévoir un nettoyage des prises de pression pour éviter une défaillance prématurée de l'instrument due au colmatage [108-109].

Dans cette étude, une nouvelle méthode sera proposée pour la surveillance du filtre à manche. Cette technique permet de détecter la présence du gâteau de poussière sur chaque manche filtrant. En effet, l'impact des particules sur le manche provoque une charge électrique mesurable par un électromètre sensible.

IV.7 .2. Chargement en ligne du manche filtrant

IV.7 .2. 1. Banc d'essai

Le banc d'essai est composé d'un dispositif d'alimentation de poussière, d'un ventilateur, et d'un système de nettoyage pneumatique du filtre (Figure IV.15). Le filtre hybride a une section carrée et conçu pour pouvoir contenir deux rangées de manches filtrantes avec deux manches par rangée. Dans cette étude un seul manche en polyester de forme cylindrique ayant un diamètre de 100 mm et une longueur de 500 mm a été utilisé comme échantillon durant tous les essais de filtration.

Un tube de soufflage ayant un trou de 10 mm a été placé au-dessus de chaque manche pour le décolmatage du manche filtrant. Une impulsion d'air comprimé est injectée dans le manche de façon cyclique chaque minute. La durée de chaque impulsion est de 0,1 seconde.

Le filtre hybride réalisé comporte aussi un système de chargement en ligne du tissu par un générateur haute tension de polarité négative (Figure IV.18). Ce système peut facilement basculer en une cage de Faraday afin de mesurer la charge acquise par le tissu suite à son exposition à une décharge couronne (Figure IV.19). Le chargement est effectué de façon intermittente puisque la manche se comporte comme une barrière diélectrique.

Le cylindre (C2) de l'électro-manche a été utilisé comme l'une des électrodes qui forment une cage de Faraday avec une carcasse extérieure reliée à la terre [110]. Ce système permet la mesure en ligne de la charge électrique par un électromètre (Pasco-2132) via une interface universelle 550 connectée à un ordinateur.

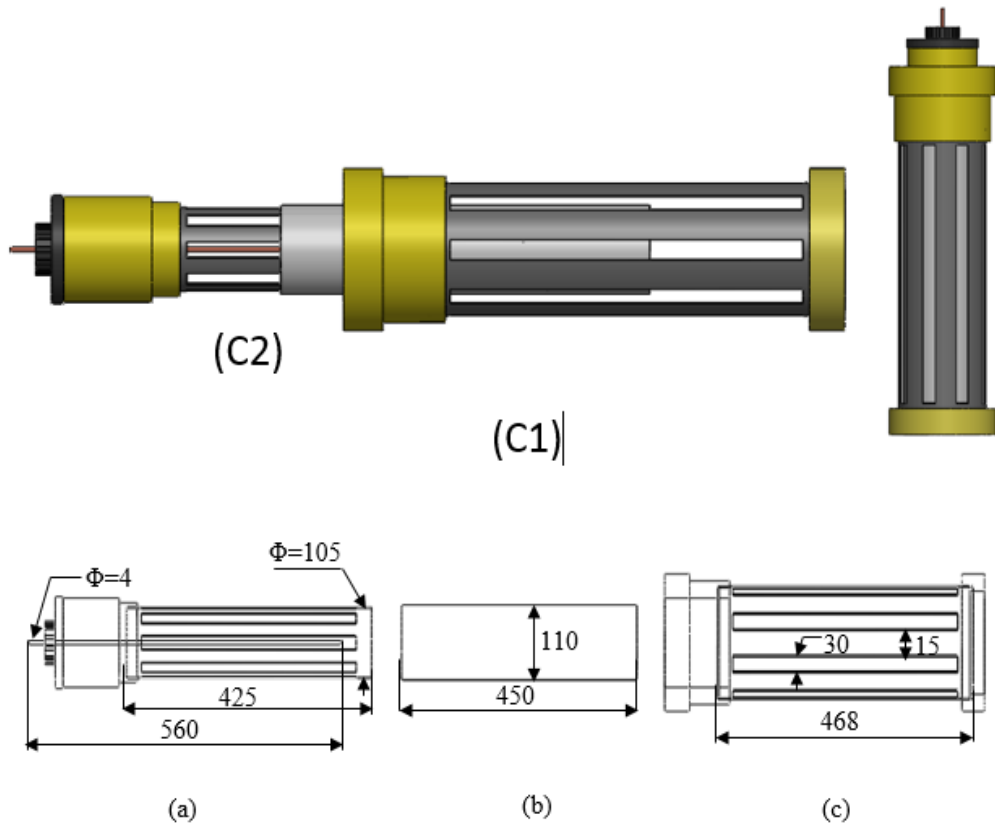


Figure IV.18 : composition du filtre hybride

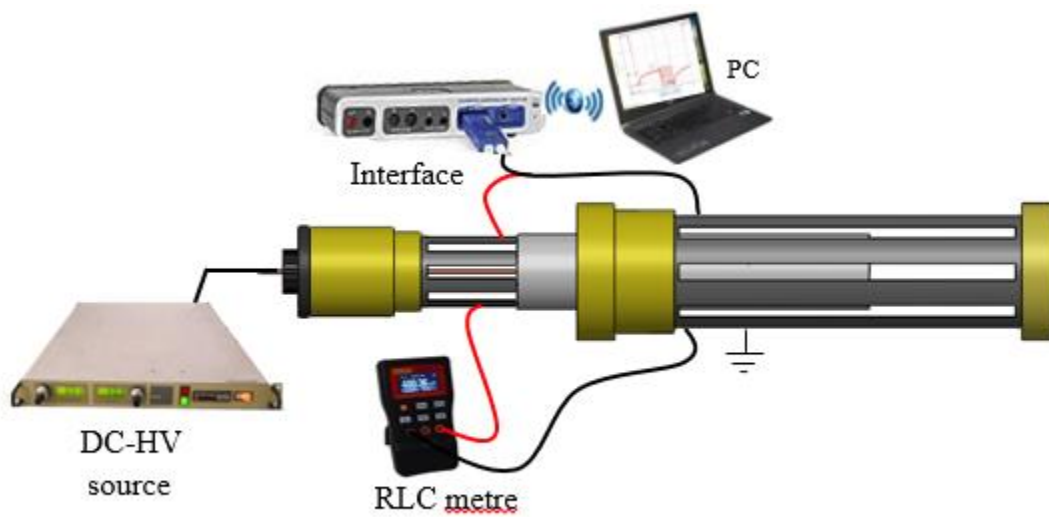


Figure IV.19 : Système de mesure de la charge acquise par le media filtrant

IV.7.2.2. Procédure expérimentale

Dans cette expérience, des tests de chargement du tissu par décharge électrique ont été effectués pour différentes tensions appliquées en polarité négative. Le temps de neutralisation a été estimé et mesuré par un électromètre sensible pour chaque niveau de tension.

Deuxièmement, les effets de la concentration de particules d'entrée sur la charge électrique ont été examinés sous un débit d'air constant. Dans ce cas, la concentration à l'entrée variait de 1 à 6 g/s. Toutes les expériences ont été réalisées dans des mêmes conditions de température (20-25 ° C) et d'humidité relative (40-60%).

Le temps d'exposition du tissu sous décharge électrique est un paramètre variable, il varie entre 3 et 9 s. Ce temps est effectué par intermittence pour permettre au système de mesure de charge de prélever des échantillons de mesure. Le système de surveillance du filtre hybride est directement connecté à l'électro-manche (Figure IV.19).

IV.7.3. Résultats et discussion

IV.7.3.1. Influence de la tension sur la charge acquise par le filtre à manches

Dans cette section, nous allons essayer d'observer l'effet de la densité de charge déposée sur l'échantillon sur l'évolution du déclin de potentiel de surface (DPS). Les mesures illustrées par la figure IV.20, montrent l'évolution temporaire du DPS pour différentes valeurs de tension appliquée et un temps fixe (3 s) d'exposition du tissu sous décharge électrique.

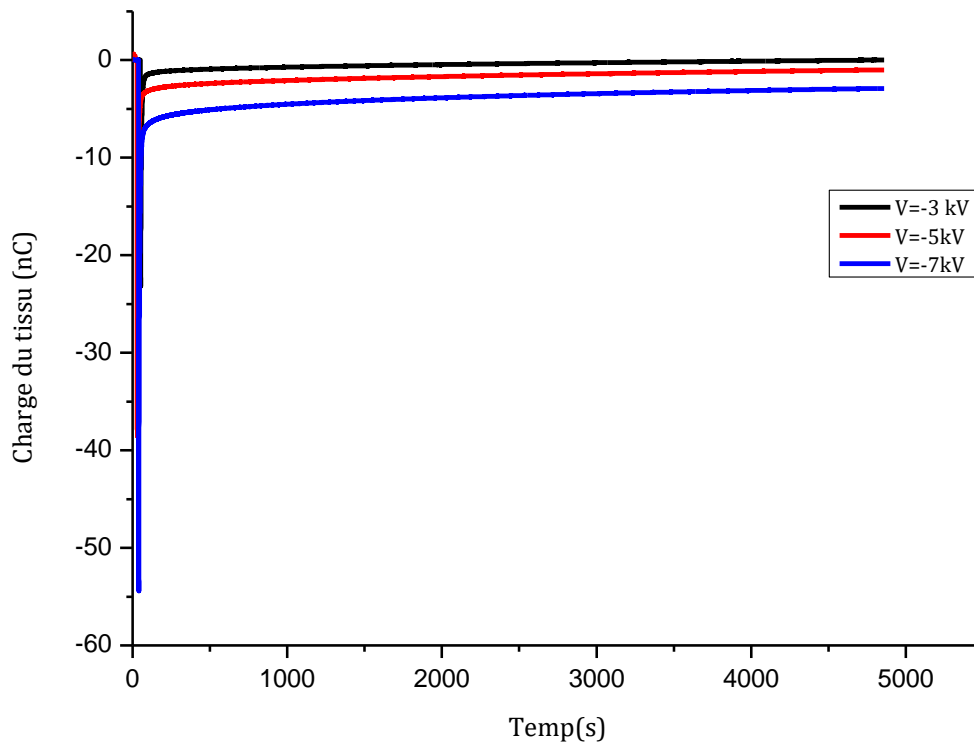


Figure IV. 20 : Variation de l'image de la charge électrique en fonction de la tension appliquée.

La figure IV.21 montre la variation du maximum de la charge électrique enregistré sur une période de 3 s. La valeur maximale correspond bien évidemment à une tension de 7 kV. D'après la courbe de tendance, on constate bien que la charge suit une variation linéaire. Cette charge doit atteindre une valeur limite qui correspond à la charge de saturation du tissu.

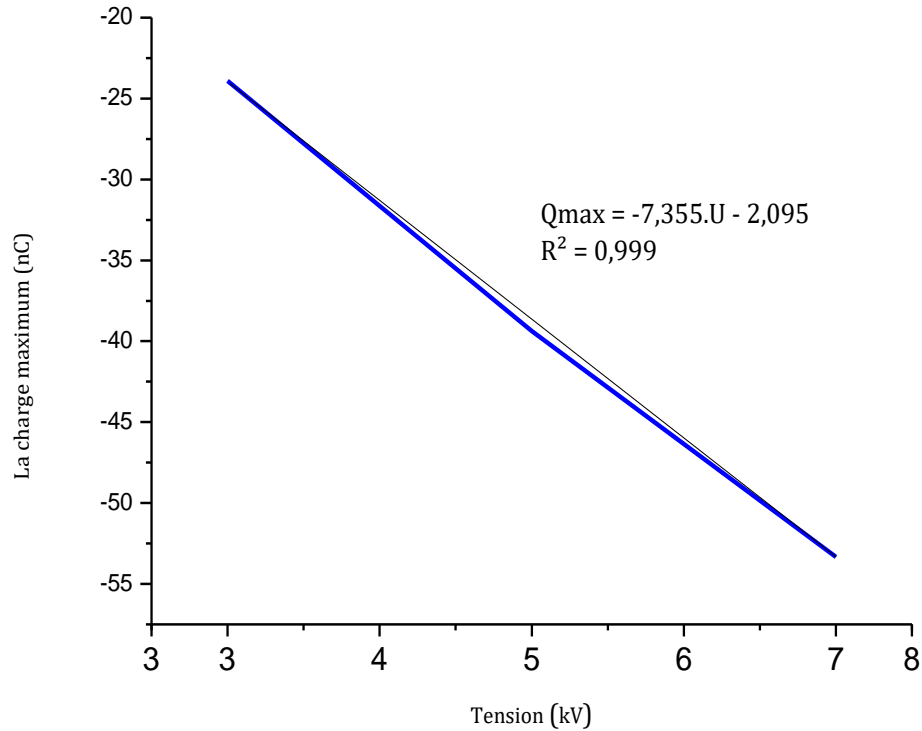


Figure IV.21 : Variation de la charge maximum acquise en fonction de la tension appliquée.

La détermination du temps de neutralisation du tissu est un paramètre important afin de déterminer le cycle de charge correspondant au démarrage intermittent de la source haute tension. Cette opération augmente les performances de la capture du filtre en cours de fonctionnement. Dans ce travail nous limiterons notre étude seulement sur l'effet des particules de ciment sur le tissu. La charge enregistrée dans ce cas est uniquement due à l'impact de la poudre sur la surface extérieure du manche filtrant (Figure IV .22).

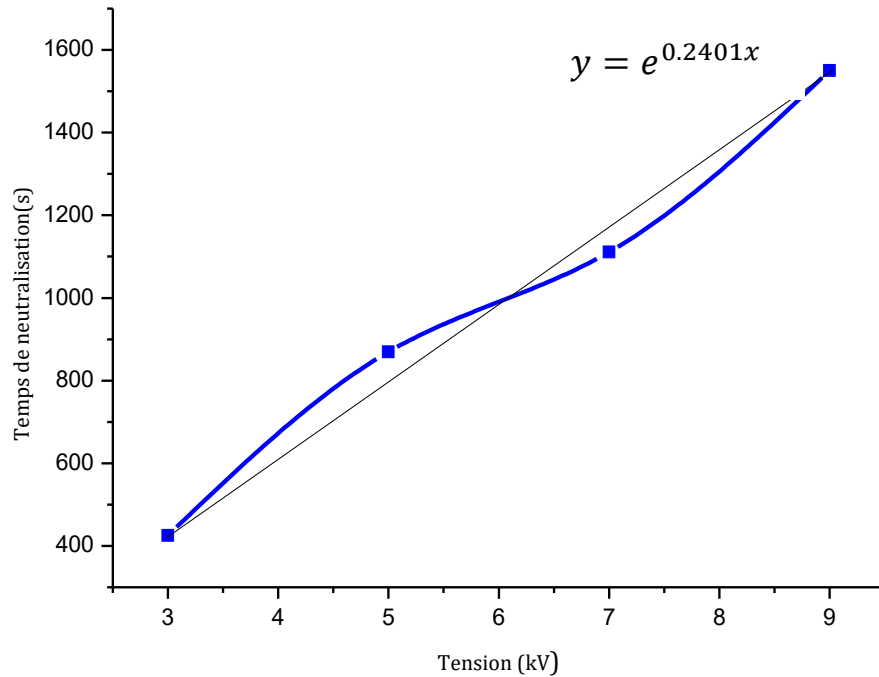


Figure IV.22 : Variation du temps de neutralisation du tissu en fonction de la tension appliquée.

IV.7.3.2. Influence du flux d'air

La vitesse faciale / débit d'air et le filtre à manches chargé peuvent affecter de manière significative la performance de filtration totale des filtres hybrides car ils influencent sur la contribution de la diffusion, l'interception et les mécanismes électrostatiques. À faible vitesse, la diffusion et les forces électrostatiques contribuent de manière significative à l'efficacité de capture en raison d'un temps de séjour plus élevé. Avec une vitesse frontale croissante, le mécanisme d'interception domine tandis que l'effet de diffusion contribue beaucoup moins à la performance de collecte du filtre. Ainsi, on s'attend à ce que l'efficacité de filtration diminue considérablement à une vitesse frontale plus élevée. La (Figure IV 23) montre l'influence du débit d'air de 1g/s bar pour différentes valeurs de tension.

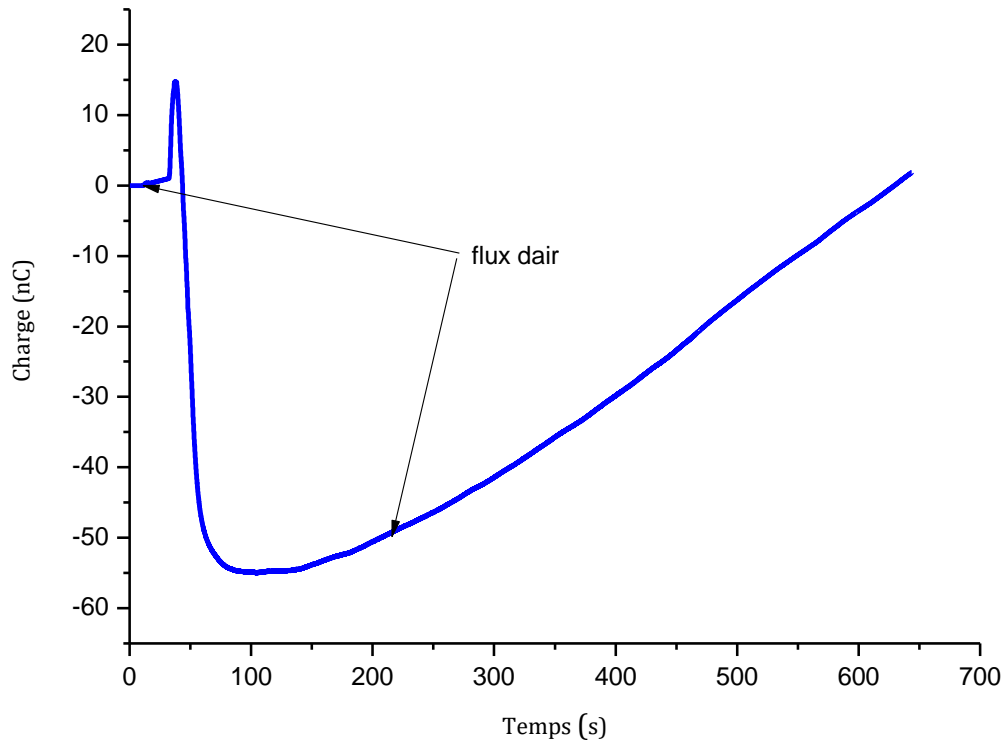


Figure IV.23 Influence du flux d'air pour U = 5 kV.

IV.7.4. Monitoring du filtre hybride

IV.7.4.1. Mesure de charge électrique

Les particules de ciment blanc provenant d'une cimenterie ont été utilisées comme poussière d'essai. La taille moyenne de ces particules est de 40 μm et leur densité est d'environ 2900 kg / m^3 . Deux expériences ont été menées. Tout d'abord, la charge électrique acquise par le tissu a été mesurée sans présence de particules de ciment et avec débit d'air, après les deux ensembles.

Pendant l'intervalle de temps entre 0 et 1600 s (Figure IV.24), la charge positive enregistrée est uniquement due à l'impact du flux d'air avec le tissu. Au-delà de ce temps et à partir du moment de l'injection de la poudre, un changement de signe instantané du positif au négatif a été observé. Le signe de charge est de nouveau positif lorsque le flux de poudre est arrêté.

La figure IV.25 montre aussi l'évolution du décolmatage du manche à l'aide d'un système à jet d'air. Le cycle de colmatage a été programmé toutes les minutes. Chaque impulsion crée une perte de charge (ΔQ) au niveau du manche, équivalente à une chute de pression (ΔP), ce qui assure un fonctionnement continu avec une plus grande efficacité. D'après la variation de la charge obtenue, il est possible de quantifier le nombre d'impulsions de jets d'air, à partir du nombre de pertes de charge enregistré (2 dans notre cas).

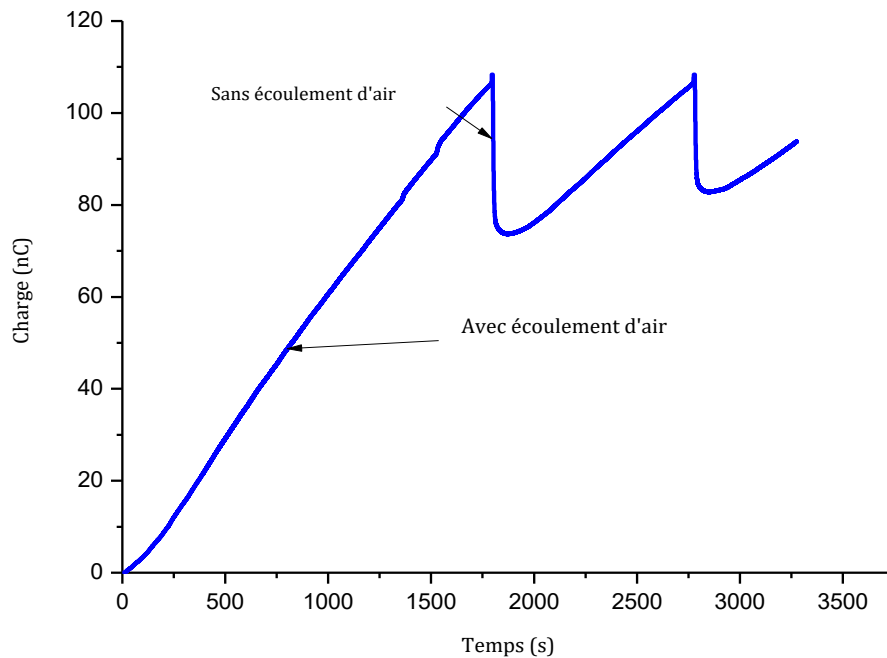


Figure IV.24 : Monitoring et mesure de pertes de charge (ΔQ) d'un filtre à manches. Cas de 2 cycles de colmatage/décolmatage.

IV.7.4.2. Mesure capacitive

L'objectif de cette partie est d'étudier la faisabilité et la mise en œuvre d'une nouvelle technique de monitoring de notre filtre hybride. Elle est basée sur la mesure de la capacité électrique de l'électro-manche (Figure IV.25). Cette capacité est constituée d'une cage interne (C_1) ou mannequin, dont le rôle est de conserver la forme du manche, malgré la dépression due à l'aspiration de l'air pollué. La cage externe (C_2), qui représente la deuxième électrode du condensateur, a également un rôle électrique, une fois relié à la terre, elle assure la production d'une décharge électrique (effet corona), à partir de la tige corona.

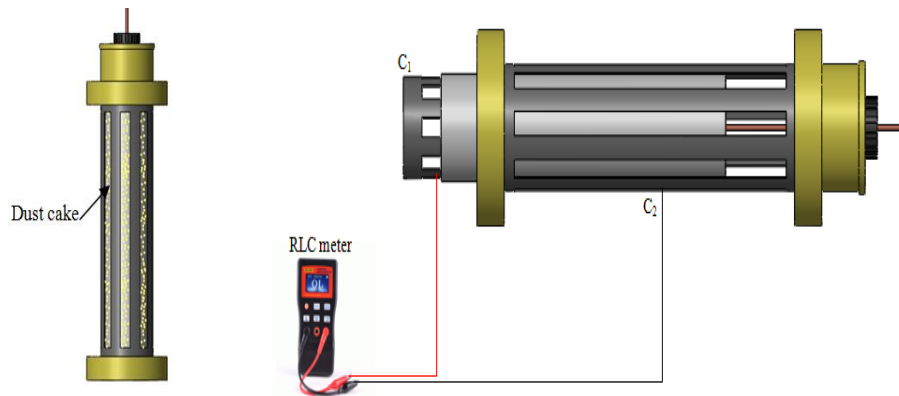


Figure IV.25 : Contrôle du dépôt du gâteau de poussière par mesure capacitive.

La variation de la capacité en fonction du temps de fonctionnement du filtre pour un débit massique constant (3,6 kg/h) est représentée par la figure IV.26. Cette capacitance est mesurée par un RLC mètre (capacimètre) très sensible (0,001 pF-100,00 mF) qui permet des mesures de capacité, résistance ou inductance jusqu'à une fréquence de 500 kHz, pour des valeurs infiniment petites.

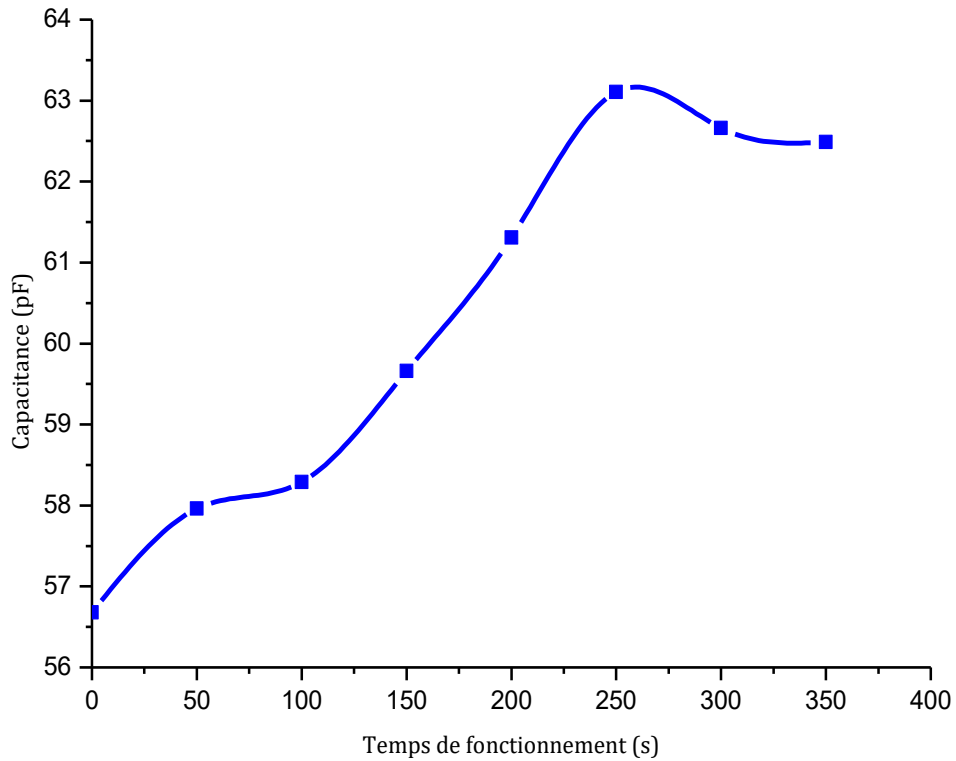


Figure IV.26 : Variation de la capacité en fonction du temps de fonctionnement

A partir des mesures effectuées, on peut voir que la capacité varie presque linéairement avec le temps de fonctionnement du filtre. Elle vaut 56,68 pF avant l'injection de la poudre. Cette valeur est due à la présence du tissu, car sans lui, elle est égale à 55,3 pF. Ceci est cohérent avec la relation suivante :

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{e} = \varepsilon_r \cdot C_0 \quad \text{IV.1}$$

Avec :

=

ε_r : Permittivité relative du milieu (Tissu+gâteau) ;

ε_0 : Permittivité du vide ;

S : Surface du média filtrant égale à 1460 cm² ;

e : Distance inter-électrodes égale à 350 mm ;

C_0 : Capacitance à vide (sans tissu) égale à 55,3 pF.

Le changement de la valeur de capacité est principalement dû à la variation de la permittivité du milieu inter-électrode. Plus le filtre à manches recueille les particules de ciment, et plus la capacité mesurée devient importante. Lorsque la valeur de la capacité stagne autour d'une valeur donnée, cela correspond à la saturation du manche.

Selon la figure IV.26, la saturation est atteinte autour d'un temps de fonctionnement égal à 250 s, ce qui correspond à une masse de 250 g.

IV.8 Conclusion

Le diagnostic du filtre hybride a été très fructueux, puisqu'après avoir effectué les interventions proposées, à savoir le bouchage d'une rangée de manches, l'augmentation de la fréquence de secouage des manches et de battage des électrodes, on n'a plus eu de problème d'émission de poussière depuis près de deux mois déjà. Mais l'état de la tôle qui se trouve en face du sens d'accès de l'air sale a été très affecté par les turbulences qui ont lieu à cet endroit du caisson d'air sale, et donc le changement de l'emplacement de la gaine de sortie d'air propre doit impérativement être effectué dans un avenir proche, de peur de se retrouver avec le caisson percé, ce qui causera pas mal de problème au niveau du calorifugeage ainsi que des fuites dans des endroits difficiles à colmater. Un autre problème que l'on a noté également, c'est l'absence d'historique spécifique aux filtres de dépoussiérage, cet historique doit impérativement exister pour pouvoir adopter un comportement spécifique vis-à-vis de chaque filtre et pouvoir entreprendre des interventions spéciales et non classique visant à remédier de façon plus efficace aux problèmes rencontrés selon leurs natures et leurs redondances, et aussi pour pouvoir calculer les fiabilités, les temps d'arrêts ainsi que l'indice de disponibilités de ces filtres.

On général Cette étude expérimentale a étudié la faisabilité de monitoring d'un filtre à manches à jet d'air pulsé lors de la filtration de particules de ciment par mesure de charge électrique. L'évolution de la perte de charge et l'efficacité ont été mesurées sur 6 cycles successifs de colmatage/décolmatage. Les résultats ont confirmé que le filtre à manche recueille des particules. Cette confirmation a également été obtenue par des mesures de capacité.

Paramètres influents sur l'efficacité de collecte des médias filtrants

V.1. Introduction

Dans ce chapitre on va faire une étude expérimentale du filtre à manche d'une configuration modifiée (BHF) pour améliorer l'efficacité de la collecte du filtre médium. La plupart des filtres à manches utilisent des sacs filtrants cylindriques tissés ou non tissés comme média filtrant. Les particules sont capturées sur le filtre et le gaz propre s'échappe. Une configuration modifiée du BHF est proposée, et la configuration proposée a été testée expérimentalement. Le filtre a été chargé électriquement par décharge corona pour améliorer l'efficacité de la collecte. Les résultats réalisent qu'une fois le filtre chargé, l'efficacité de la collecte augmente en fonction de plusieurs facteurs, tels que le décolmatage pneumatique, la tension appliquée, le débit de gaz et le diamètre des particules

V.2. Evolution de l'efficacité avec le colmatage

L'efficacité de filtration d'un medium filtrant fibreux est fonction des efficacités unitaires de collecte correspondant à chacun des mécanismes de capture suivants :

- Diffusion Brownienne ($d_p < 0,1 \mu\text{m}$) ;
- Interception ($d_p > 0,1 \mu\text{m}$) ;
- Impaction inertielle ($d_p > 1 \mu\text{m}$) ;
- Sédimentation ($d_p > 10 \mu\text{m}$) ;
- Effet électrostatique (toutes tailles de particules).

Ces différents mécanismes de capture des particules entrent en compétition lors de la filtration. Leurs importances respectives varient en fonction de la taille et de la masse volumique des particules, de la vitesse de filtration, des propriétés du gaz vecteur et des caractéristiques physiques du medium filtrant. L'efficacité de filtration à l'état neuf d'un medium fibreux utilisé en filtration des poussières présente un minimum pour des diamètres de particules généralement compris entre 0,1 et 0,5 μm . Ce domaine correspond à des particules trop grosses pour que l'effet de diffusion soit efficace et trop petites pour que les mécanismes d'interception et d'impaction jouent un rôle important. Ce minimum représente une caractéristique essentielle des filtres à fibres classiquement employés en dépolluage industriel.

L'efficacité initiale des media non-tissés à moyenne efficacité est faible ($E < 30 \%$). Seuls, ils ne suffiraient pas à assurer une efficacité suffisante pour répondre aux exigences

normatives. Cependant, il se produit une augmentation de l'efficacité de filtration au cours du colmatage. Cette évolution de l'efficacité est à rapprocher de celle de la perte de charge. On observe tout d'abord une croissance lente de l'efficacité pendant la phase de colmatage en profondeur. En effet, les particules collectées par le medium constituent autant de nouveaux collecteurs et améliorent progressivement les mécanismes de capture. Puis, pendant la zone de transition, lorsque le gâteau de particules apparaît en surface du medium une augmentation plus rapide de l'efficacité de filtration est observée. Dès lors que la compacité du filtre a suffisamment augmenté et que le dépôt de particules en surface se construit, l'efficacité atteint des valeurs proches de 100%. Rapidement, on constate que le medium fibreux ne joue plus qu'un rôle de support pour le gâteau de filtration, devenu le principal collecteur de particules et contrôlant majoritairement l'efficacité de collecte.

Le fonctionnement des dépoussiéreurs à media filtrants repose sur un effet d'auto-filtration des particules, c'est-à-dire que la filtration de la poussière s'effectue par elle-même sur un support qui est le filtre. Le détachement du gâteau lors du décolmatage doit donc être suffisamment important pour faire baisser la perte de charge mais il ne doit pas être total afin de préserver les bénéfices apportés par la présence de cette couche de particules [111].

V.3. Efficacité de collecte des medias fibreux chargés par décharge couronne

L'étude de l'efficacité de collecte par des medias filtrants chargés par décharge couronne est un thème tout à fait nouveau sur le site, car les études antérieures concernent la précipitation électrostatique par décharge à barrière diélectrique. Des études sur l'amélioration de la qualité de l'air par filtration électrostatique ont été effectuées, mais pas avec le même principe que celui qu'on a mené durant la thèse [112]. En effet, à la place de la charge des particules (contexte de la précipitation électrostatique), nous avons chargé les fibres du media pour améliorer l'action des forces mécaniques qui agissent sur la capture des particules polluées qui se trouvent dans un écoulement d'air. Dans ce nouveau contexte, il a fallu :

- Créer un nouveau système pour la charge des medias filtrants par décharge couronne avec une configuration (fil-cylindre + plan de masse) ;
- Concevoir un banc expérimental pour la mesure de la concentration de particules du filtre ;

V.4. Analyse expérimentale d'un filtre à manches chargé par décharge couronne

V.4.1. Introduction

La pollution de l'air contient de la fumée ou d'autres gaz nocifs véhiculant des substances qui pourraient avoir un effet toxique. On estime que 7 millions de personnes meurent chaque année de maladies liées à la pollution atmosphérique. Quelque 4,3 millions de décès liés à la pollution de l'air sont attribuables à la pollution de l'air domestique et 3,7 millions de décès sont dus à la pollution de l'air extérieur, notamment les accidents vasculaires cérébraux et les maladies cardiaques, les maladies respiratoires et les cancers [113]. Les effets des déchets industriels et ménagers contribuent au changement climatique, l'une des plus grandes préoccupations du monde moderne [114-115-116].

En général, plus les particules à collecter sont fines, plus le coût d'un système de séparation approprié sera élevé. Les poussières en suspension dans l'air qui peuvent être rencontrées dans des situations industrielles ont généralement une taille inférieure à environ 10 μm . Des particules de cette taille peuvent être absorbées dans le corps par ingestion, absorption cutanée ou inhalation. Le premier est rarement un problème grave et, bien que les maladies de la peau ne soient pas rares, c'est l'inhalation qui présente le plus grand risque pour les travailleurs dans un environnement poussiéreux [117-119].

Dans les systèmes de transport pneumatique manipulant des matériaux fins ou poussiéreux, la méthode de filtration qui est devenue presque universellement adoptée est les filtres en tissus de type sac. Ces filtres sont communément appelés filtres à manches. La plupart des filtres à manches utilisent de longs sacs (ou tubes) cylindriques en tissu tissé ou feutré comme média filtrant. Les filtres en tissu tirent parti du fait que les particules sont plus grosses que les molécules de gaz. Par conséquent, lorsque le gaz sale passe à travers un filtre, les particules sont capturées par le filtre et le gaz propre s'échappe. Les sacs filtrants en tissu sont généralement des tubes ronds, faits de tissu ou de tissu non tissé [120-127].

Le gaz ou l'air chargé de poussière pénètre dans les filtres à manches a travers les trémies par aspiration ensuite il est dirigé dans le compartiment qui comporte les manches filtrante. Les particules de poussière lourdes tombent à l'entrée du filtre à

manches, tandis que les particules de poussière légères et le gaz sont transportés vers le haut vers les sacs. Le gaz est aspiré à travers les sacs à l'intérieur ou à l'extérieur selon la méthode de nettoyage, et la poussière s'accumule sur le média filtrant, ce qui augmente la résistance du flux de gaz. Par conséquent, le filtre doit être nettoyé périodiquement lorsqu'une chute de pression suffisante se produit [128-129].

Pendant le nettoyage, la poussière accumulée sur les sacs est retirée de la surface du tissu et déposée dans la trémie pour une élimination ultérieure. Selon le type ou la construction du filtre à manches, le nettoyage peut être effectué lorsque le filtre à manches est en ligne (filtrage) ou hors ligne (de manière isolée) [130-131].

Pendant le fonctionnement du filtre, le dépôt de particules à la surface du média filtrant n'est pas uniforme en raison des forces aérodynamiques complexes à l'intérieur du filtre à manches (BHF). Ce dépôt non uniforme provoque une variation non homogène de la pression interne du BHF. Le but de cette étude était d'assurer un dépôt de particules relativement uniforme en favorisant la fixation des particules de poussière [132]. Par conséquent, le media filtrant a été chargé électriquement par décharge corona en utilisant un fil fixé le long de l'axe du sac cylindrique et connecté à une alimentation haute tension continue de polarité négative [133-135].

V.4.2. Matériel et méthodes

La figure V.1 montre la configuration expérimentale utilisée dans cette étude. Un filtre à manche de laboratoire BHF a été développé pour étudier l'efficacité de la collecte de particules des médias filtrants. Le dispositif développé est constitué d'une enceinte en plexiglas étanche à l'air (PTFE) à l'intérieur de laquelle est fixé un filtre à manche de forme cylindrique. Les particules **utilisées** sont introduites dans le filtre BHF par un vibro-transporteur avec un débit de 3g / s, et un ventilateur aspirant pour assuré la circulation de l'air.

Comme le montre la figure V.1 dans un BHF à jet pulsé, le manche filtrant est supporté par une cage métallique (squelette), qui est fixée à la plaque tubulaire au sommet du boîtier. La cage métallique empêche l'affaissement du media filtrant. L'air chargé de poussière entre par le bas du boîtier et s'écoule de l'extérieur vers l'intérieur du sac. L'air passe à travers le sac (manche filtrante), tandis que les solides sont retenus sur la surface extérieure du manche.

Le tableau V.1 résume les détails techniques du media filtrant utilisé.

Matériel	Polyester
Epaisseur	12 mm
Marque	TTL France
Modèle	TVE 750 T101
Couleur	Blanc
Diamètre	100 mm
Forme	Ronde
Température	150 ° C

Tableau V.1 Fiche techniques du media filtrant utilisé

Un signal de l'automate programmable actionne l'ouverture de l'électrovanne normalement fermée. L'ouverture de l'électrovanne libère la pression d'air dans le tube, ce qui provoque le nettoyage du filtre à manches.

Dans la configuration expérimentale utilisée dans cette étude, le filtre à manche a été modifié en utilisant une deuxième cage métallique externe comme électrode de masse, tandis que la cage métallique interne a été isolée électriquement (Figure V.2). La distance entre le filtre et la cage extérieure était de 25 mm.

La manche de média filtrant est enroulée sur un squelette cylindrique en acier reliée à la terre, à l'intérieur duquel et fixé suivant l'axe central un fil métallique fin de 0,2 mm de diamètre relié à une source de haute tension continue négative (Spellman, 40 kV, 10 mA). Ce fil fixé sur des pièces isolantes en Téflon (PTFE) qui permet de charger électriquement par effet couronne le média filtrant.

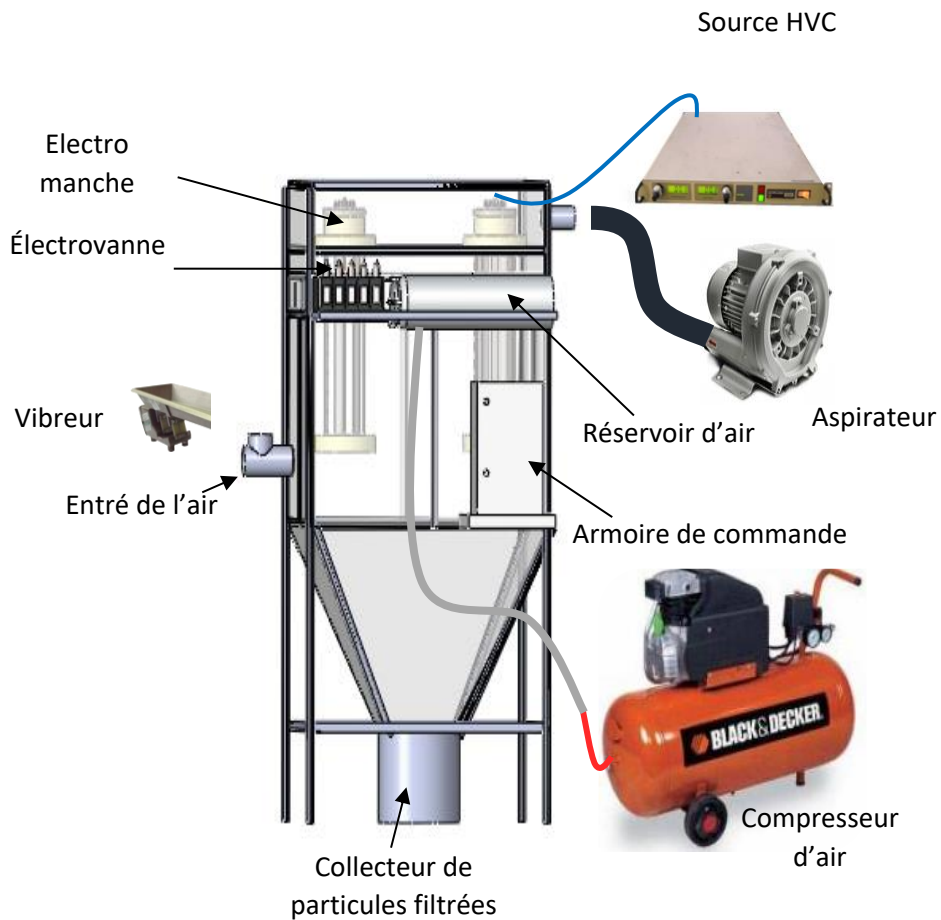


Figure V.1 : Configuration expérimentale

Le système d'électrodes constitué des deux cages métalliques représentait un condensateur, qui a été utilisé pour démontrer la faisabilité de la surveillance du BHF pendant son fonctionnement en mesurant la capacité électrique lors de la collecte des particules. De plus, Le système de mesure de la charge électrique est constitué d'une interface A/N (Pasco, 550 Universal) relié d'une part à des capteurs de charge électrique et d'autre part à un PC pour la visualisation de l'évolution de la charge mesurée. Par ailleurs, la surveillance de l'évolution de captation des particules est assurée par la mesure de la capacité comme montré à la (Figure V.2).

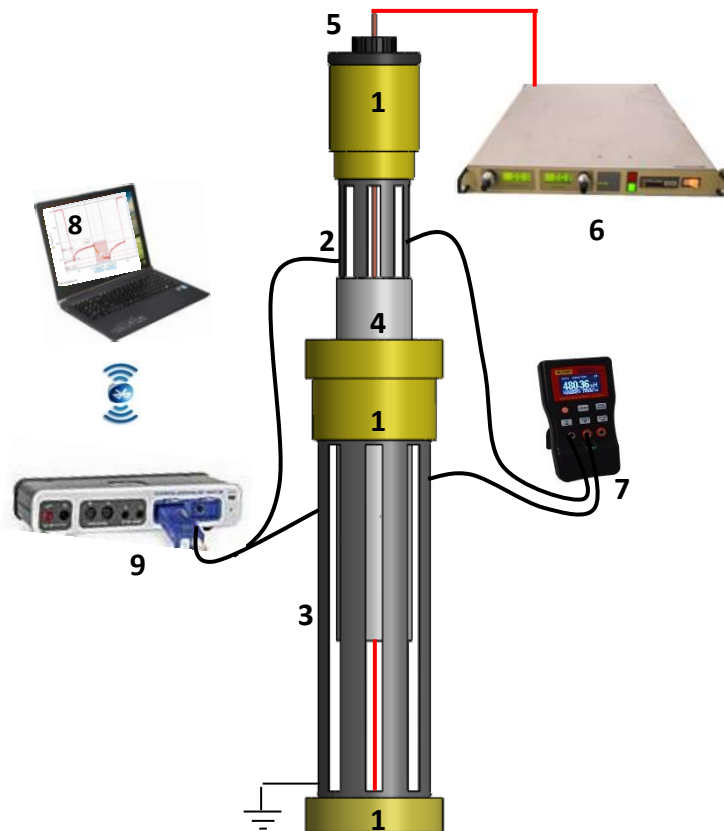


Figure V.2 : Schéma du filtre modifié avec mesure en ligne de la charge électrique et de la capacité

1. Pièces isolantes en Téflon PTFE,
2. Cage métallique intérieure,
3. Cage métallique extérieure,
4. Filtre moyen,
1. Electrode de charge Couronne,
5. Alimentation haute tension,
6. Compteur RLC,
7. PC,
8. interface A/N (Pasco, 550 Universal).

L'efficacité de la collecte de particules a été étudiée en analysant les facteurs suivants :

- Tension appliquée V (kV)
- Masse injectée des particules m (g)
- Taille granulométrique des particules d (μm)

Les expériences ont été menées à l'aide de particules de ciment de la cimenterie nationale (Zahana, Algérie). La taille des particules variait de 50 à 350 μm . Un tamis vibrant a été utilisé pour séparer les particules en fonction de leur taille afin d'analyser l'efficacité de collecte pour différentes tailles de particules.

Le résultat de la collecte a été estimé à l'aide de la relation suivante :

$$\eta = \frac{M_c}{M_t} * 100 \quad \text{V.1}$$

M_c : Masse collectée sur le filtre a manche

M_t : Masse totale introduite dans le BHF

Les expériences ont été réalisées dans des conditions stables de température (30 ° - 33 °) et d'humidité (55% -65%).

V.4.3. Résultats et discussion

Dans les expériences réalisées, le media filtrant a été alimenté par décharge couronne pendant une certaine durée, puis l'alimentation HV a été coupée. La (figure V.3) montre la variation de la charge électrique (Q) acquise par le media filtrant avec le temps d'exposition à la décharge couronne. Comme prévu, la variation était presque linéaire jusqu'à 6 s ensuite elle atteint un état de saturation. A une durée de charge (Δt) de 2 s, la charge avait une valeur de 40 nC. La valeur de charge a ensuite augmenté à plus de 50 nC à $\Delta t = 8$ s. La valeur de charge a augmenté jusqu'à une valeur de saturation d'environ 53 nC proximité de 8 s de 8 s. Par conséquent, nous avons opté pour une durée de charge couronne (Δt) de 8 s pour toutes les expériences menées dans cette étude.

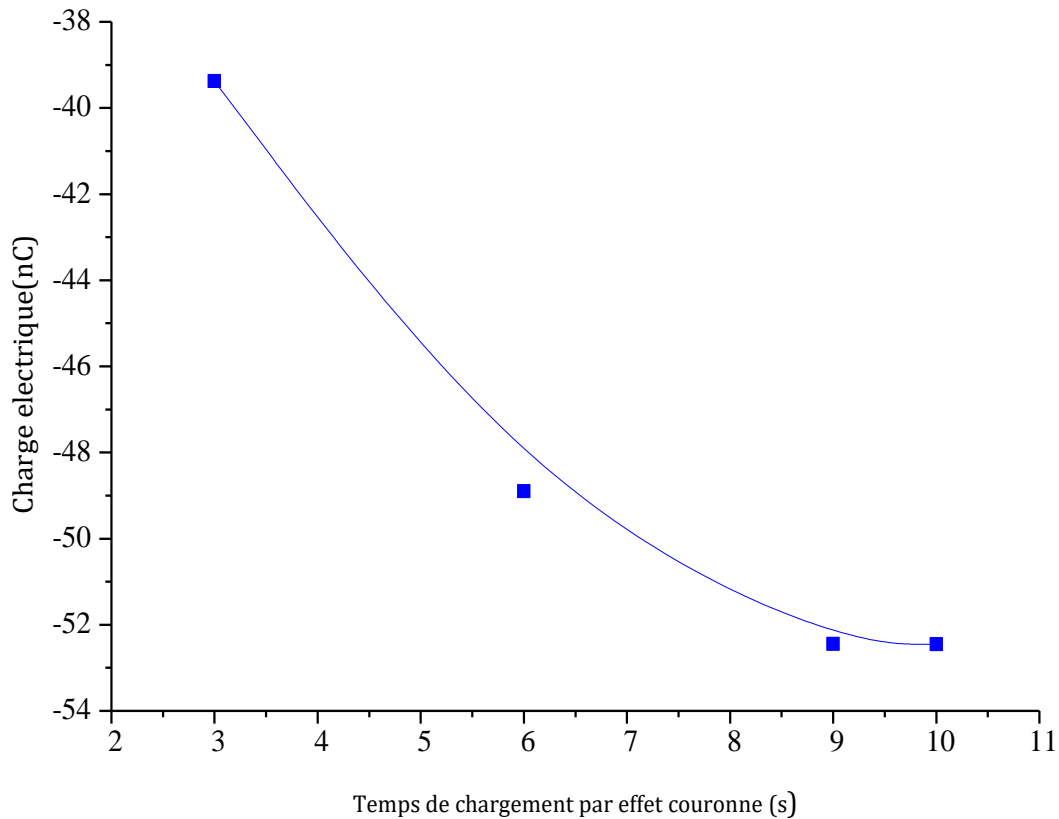


Figure V.3 : Evolution de la charge électrique du media filtrant avec le temps de décharge couronne ($V = 5$ kV)

V.4.3. 1. Influence du diamètre des particules

La figure V.4 montre la variation de l'efficacité de collecte (η) du media filtrant avec le diamètre des particules. Les performances du filtre dépendaient fortement de la taille des particules. L'efficacité de collecte a diminué de manière significative avec une augmentation de la taille des granules. Ce résultat a été obtenu car de gros granules rentrent en collision avec la paroi du média filtrant et tombent dans le collecteur sous l'action de la gravité. En revanche, de petits granules ($<150 \mu\text{m}$) restent fixés à la surface du filtre à cause de la force d'adhésion de Van der Waals. Nous avons également observé l'influence du niveau de décharge couronne sur l'efficacité de la collecte. Un niveau de décharge couronne élevé a favorisé l'adhésion des particules. La charge accumulée sur le media filtrant a induit une charge de polarisation sur les particules, ce qui a provoqué la force électrique de l'image.

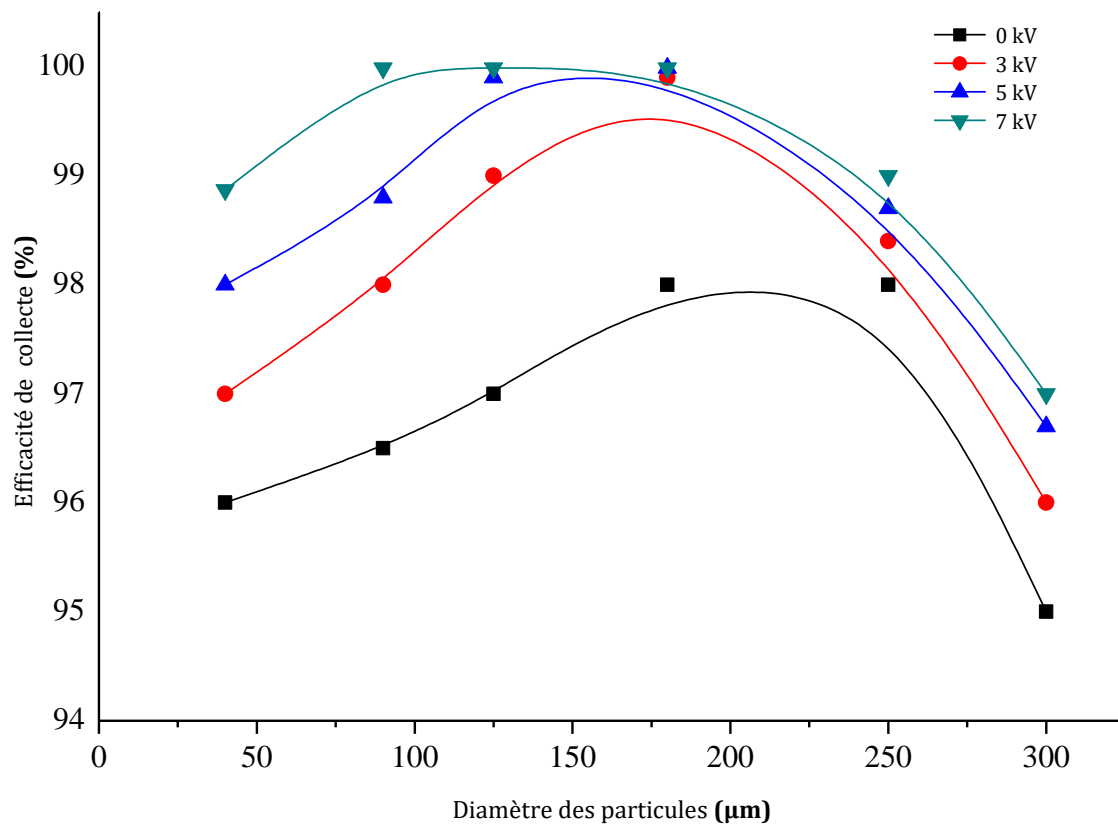


Figure V.4 : Variation de l'efficacité de collecte media filtrant en fonction du diamètre des particules pour différentes valeurs de la tension appliquée

V.4.3. 2. Influence de la masse injectée sur l'efficacité de collecte du filtre

La figure V.5 montre la variation de l'efficacité de collecte avec la masse totale (M_t) introduite dans le BHF lors de l'utilisation de particules de ciment avec une taille granulométrique moyenne de $100 \mu\text{m}$. Les performances du filtre ont diminué presque linéairement avec M_t , quelle que soit la valeur de la tension appliquée. De plus, l'efficacité de collecte maximale a été obtenue à une tension appliquée (V) de 7 kV. A cette tension, un dépôt de particules relativement uniforme a été observé sur le media filtrant, ce qui a conduit à une distribution de pression homogène à l'intérieur du BHF.

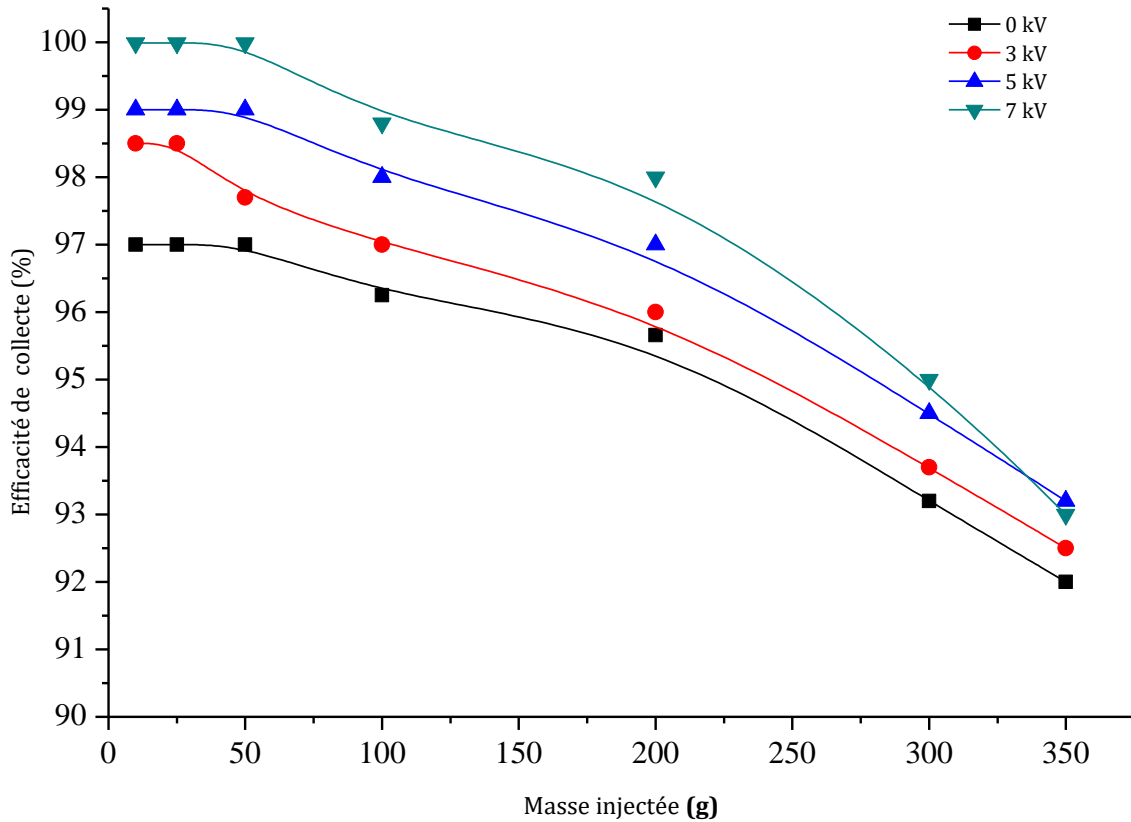


Figure V.5 : Variation de l'efficacité de collecte avec la masse totale introduite pour différentes valeurs de la tension appliquée

V.4.3. 3. Détermination du temps de neutralisation du filtre

La figure V.6 montre les résultats tracés pour l'évolution vers la neutralisation totale de la charge électrique acquise par décharge couronne pendant une durée de charge de 8 s. Les résultats obtenus indiquent que la neutralisation totale a été réalisée après 1600 s.

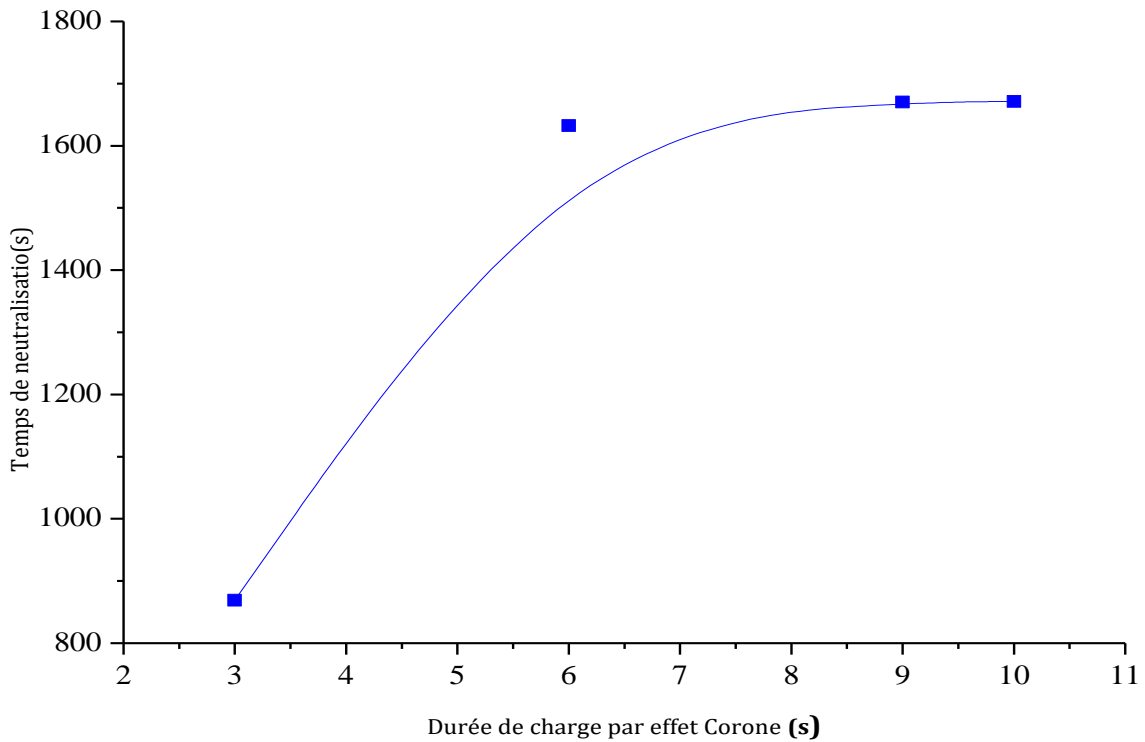


Figure V.6 : Evolution du temps de décroissance vers la neutralisation totale du media filtrant avec la durée de décharge couronne ($V = 5 \text{ kV}$)

V.4.3. 4.Effet de la charge sur le temps de fonctionnement

La figure V.7 montre que, la charge électrique dépendait de la valeur de la tension appliquée. On remarque aussi l'évolution de la charge électrique avec le temps de fonctionnement du BHF après une durée de charge couronne de 8 s. Les résultats tracés indiquent que plus la valeur de la tension appliquée n'est élevée, plus le temps nécessaire pour atteindre la neutralisation totale est long. Ainsi, pour une tension de charge couronne de 5 ou 7 kV, la charge a été maintenue à 5 nC pendant $t = 800 \text{ s}$. En revanche, la charge est réduite à 1 nC à $t = 800 \text{ s}$ pour une tension appliquée de 3 kV. Par conséquent, l'application d'une tension maximale est recommandée pour obtenir un niveau de charge élevé et ainsi éviter des opérations de charge successives à cause d'une décharge couronne.

Les résultats tracés indiquent que le media filtrant est resté suffisamment chargé avec une charge de 5 nC après 800 s. Par conséquent, une charge successive avec une durée de charge corona de 8 s à des intervalles de «repos» de 13 min est recommandée

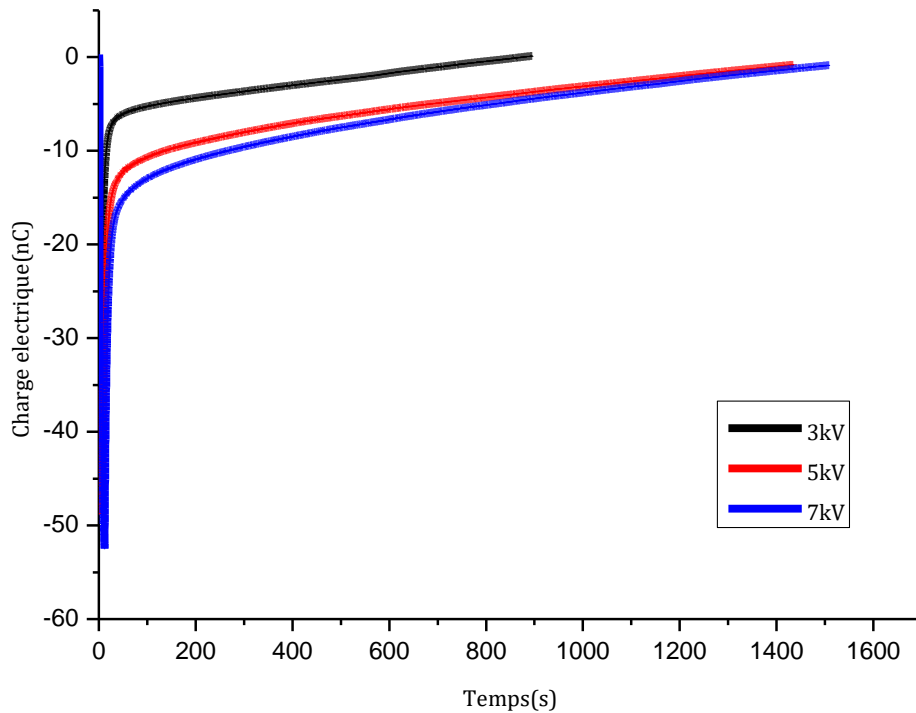


Figure V.7 : Variation de la charge électrique avec le temps de fonctionnement

($\Delta t = 8$ s)

V.4.3. 5.Nouvelle méthode pour la surveillance du filtre

La variation de la capacité du système comprenant deux cages métalliques avec la masse totale introduite a été mesurée lors du fonctionnement du BHF. La figure V.8 montre les résultats obtenus. L'augmentation de la capacité était presque linéaire jusqu'à 250 g car la capacité dépendait de la quantité de particules collectées par le media filtrant. Cette dépendance linéaire était également due à la relation de proportionnalité qui existe entre la charge électrique (Q) des particules et la capacité C .

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{V.2}$$

Où V est la tension entre les deux électrodes.

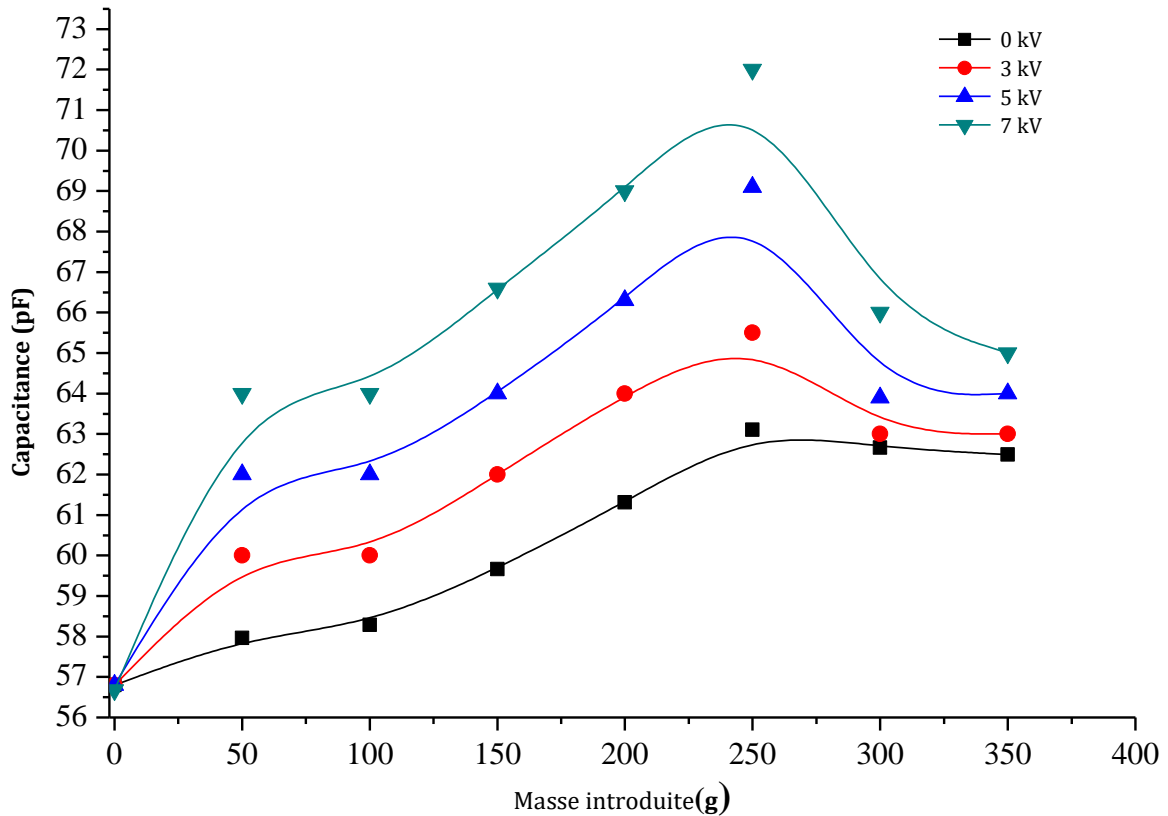


Figure V.8 : Variation de la capacité du système avec la masse introduite

La variation de la capacité peut être utilisée pour surveiller le BHF. Par exemple, le fonctionnement du BHF peut être suivi par une mesure en ligne de la capacité. Ainsi, lorsque la capacité indique que le media filtrant est complètement recouvert de particules, un signal de l'automate programmable actionne l'ouverture des électrovannes. L'ouverture de l'électrovanne libère la pression d'air dans le tube, ce qui provoque le nettoyage du filtre à manches. De plus, la mesure de la capacité peut être utile pour détecter tout media filtrant défectueux. Un test avec un filtre troué intentionnellement a suggéré que la mesure de capacité indiquait avec précision que le filtre en question avait effectivement un problème et devait être remplacé.

La surveillance BHF peut également être effectuée en mesurant la charge électrique lors de la libération de la pression d'air dans le filtre à fluide pour nettoyer le filtre à manches. La figure V.9 montre un schéma typique tracé avec le logiciel Pasco pour représenter l'évolution de la charge électrique lors du fonctionnement du BHF, avec des opérations de nettoyage successives par jet d'air sous pression. Premièrement, la charge électrique a augmenté jusqu'à 22 nC et diminue brusquement suite à l'opération de

nettoyage effectuée à 2000 s. Dans le mode d'arrêt de 0 à 2000 s, c'est-à-dire sans flux de particules et sans charge couronne, le flux d'air créé une charge triboélectrique positive sur le media filtrant. Au temps $t = 2000$ s, lorsque le mode de fonctionnement avec charge couronne et flux de particules a été lancé, la charge électrique est devenue négative en raison de la collecte de particules. Après le premier jet d'impulsion d'air, les particules se sont détachées et la charge a augmenté vers une valeur positive jusqu'au prochain jet d'impulsion d'air. Ce processus s'est poursuivi pour les jets à air pulsé suivants.

Des opérations de nettoyage successives ont été enregistrées après une courte durée de fonctionnement. Une telle surveillance qui indique l'évolution de la charge peut être facilement utilisée pour détecter tout filtre moyen défectueux. Un test avec un filtre troué intentionnellement a été réalisé avec une masse totale introduite de 450 g. Ce test suggérait que la mesure de la capacité indiquait avec précision que le filtre en question avait un problème et devait être remplacé.

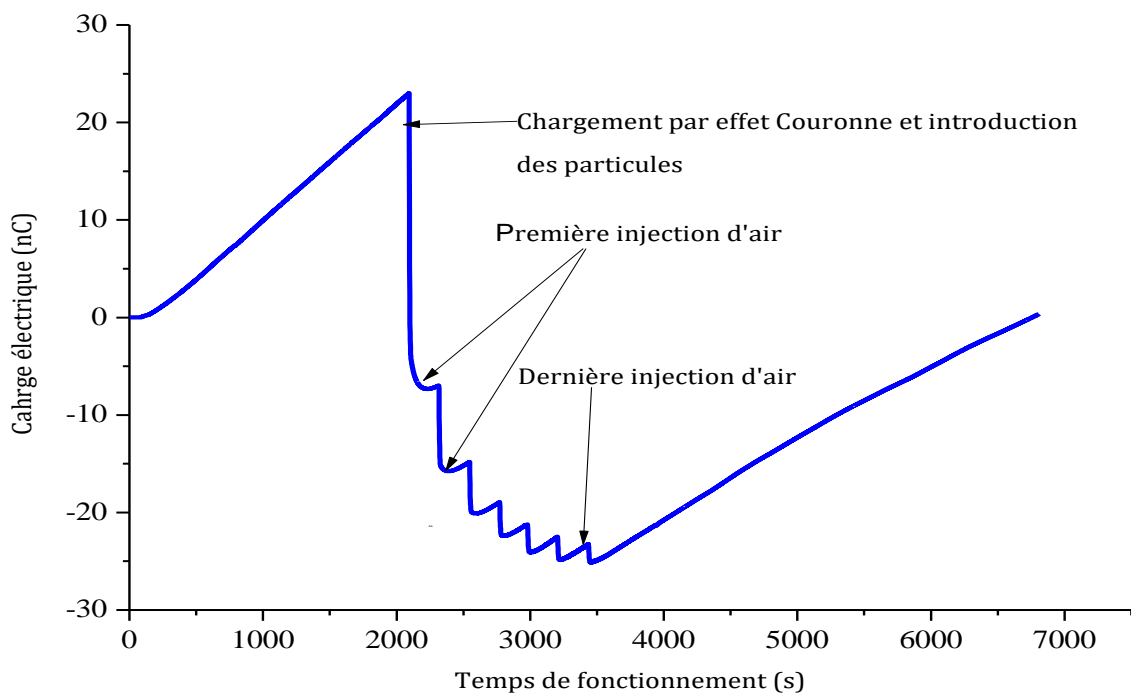


Figure V.9 : Évolution de la charge du filtre à manches (Q) pendant le fonctionnement du BHF ($V = 3$ kV)

Conclusion

Une nouvelle configuration BHF est proposée cette configuration proposée a été analysée expérimentalement. La caractéristique principale de la configuration modifiée est la charge par effet couronne du media filtrant en utilisant un fil fin connecté à une

alimentation haute tension CC le long de l'axe du media filtrant. Les résultats de l'étude indiquent que la charge couronne améliore l'efficacité de collecte des particules du media filtrant. De plus, la mesure en ligne de la capacité et de la charge électrique peut être utile pour surveiller le BHF.

Conclusion générale

La caractérisation de l'état de charge des matériaux diélectriques peut être réalisée avec plusieurs techniques (thermique, acoustique, électroacoustique). Parmi ces techniques, la mesure du déclin de potentiel électrique de surface s'est imposée par sa simplicité et son caractère non intrusif (mesure sans contact).

L'observation répétée de phénomènes anormaux se traduisant par des remontées de potentiel dans nos essais nous a paru intéressante à reporter, même si nous ne sommes pas en mesure aujourd'hui d'en donner une explication inattaquable. Elle n'est pas attribuable à des artefacts, ni à des erreurs dans le mode opératoire. Elle est probablement liée à la combinaison spécifique de notre dispositif de charge et du matériau étudié (cet effet n'étant pas observé sur d'autres matériaux). L'hypothèse la plus probable que nous envisageons est aujourd'hui la présence de mécanismes physicochimiques permettant d'expliquer une migration de la charge (en volume ou en surface) contre le champ appliqué, ou des effets piézoélectriques dans le matériau

Le diagnostic du filtre hybride a été très fructueux, puisqu'après avoir effectué les interventions proposées, à savoir le bouchage d'une rangée de manches, l'augmentation de la fréquence de secouage des manches et de battage des électrodes, on n'a plus eu de problème d'émission de poussière depuis près de deux mois déjà. Mais l'état de la tôle qui se trouve en face du sens d'accès de l'air sale a été très affecté par les turbulences qui ont lieu à cet endroit du caisson d'air sale, et donc le changement de l'emplacement de la gaine de sortie d'air propre doit impérativement être effectué dans un avenir proche, de peur de se retrouver avec le caisson percé, ce qui causera pas mal de problème au niveau du calorifugeage ainsi que des fuites dans des endroits difficiles à colmater. Un autre problème que l'on a noté également, c'est l'absence d'historique spécifique aux filtres de dépolluissage, cet historique doit impérativement exister pour pouvoir adopter un comportement spécifique vis-à-vis de chaque filtre et pouvoir entreprendre des interventions spéciales et non classique visant à remédier de façon plus efficace aux

problèmes rencontrés selon leurs natures et leurs redondances, et aussi pour pouvoir calculer les fiabilités, les temps d'arrêts ainsi que l'indice de disponibilités de ces filtres.

On général Cette étude expérimentale a étudié la faisabilité de monitoring d'un filtre à manches à jet d'air pulsé lors de la filtration de particules de ciment par mesure de charge électrique. L'évolution de la perte de charge et l'efficacité ont été mesurées sur 6 cycles successifs de colmatage/décolmatage. Les résultats ont confirmé que le filtre à manche recueille des particules. Cette confirmation a également été obtenue par des mesures de capacité.

Une nouvelle configuration BHF est proposée cette configuration proposée a été analysée expérimentalement. La caractéristique principale de la configuration modifiée est la charge par effet couronne du media filtrant en utilisant un fil fin connecté à une alimentation haute tension CC le long de l'axe du media filtrant. Les résultats de l'étude indiquent que la charge couronne améliore l'efficacité de collecte des particules du media filtrant. De plus, la mesure en ligne de la capacité et de la charge électrique peut être utile pour surveiller le BHF.

Comme perspectives : la conception d'un système qui offre la possibilité de générer des historiques et qui offre la possibilité de limité des défaillances et des pannes que subissent l'ensemble de filtre hybride existants.

Bibliographie

- [1] R. Delmas, M. Gérard, V.H. Peuch, " Physique et chimie de l'atmosphère", Edition Belin, Paris, 2005.
- [2] S. V. Hering, And S. K. Friedlander," Origins of aerosol sulfur size distributions in the Los Angeles basin, Atmospheric Environment", 16, 2647-2656, 1982.
- [3] C. S. Tang, L. T Chang, H. C. Lee, C. C. Chan, "Effects of personal particulate matter on peak expiratory flow rate of asthmatic children", Sci. Tot. Environ. , Vol. 382, pp. 43-51, 2007.
- [4] B. Dramane "précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge à barrière diélectrique - étude électrique, granulométrique et aérodynamique", thèse doctorat, l'université de Poitiers, 9 décembre 2009.
- [5] R. Boichot, " Filtration des particules issues des moteurs diesel par matrices fibreuses plongées dans un champ électrique", Thèse doctorat, Université De Savoie, 2005.
- [6] B. Benamar, "La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : étude expérimentale et numérique", Thèse doctorat, Université, Henri Poincaré, Nancy, 13 Novembre 2008.
- [7] H. Dahbi And F. Miloua " Etude et réalisation expérimentale d'un filtre électrostatique des polluants gazeux Revue des Energies Renouvelables", ICESD'11 Adrar 17 – 23, 2011.
- [8] A. Villot, Y. F. J. Gonthier, E. Gonze et A. Bernis, " Numerical Model of Current-Voltage Curve for the Wire-Cylinder Electrostatic Precipitators in Negative Voltage in the Presence of Nonpolar Gases", IEEE Transactions on Plasma Science, 38, pp 2031 – 2040, 2010.
- [9] B. Siret, " Dépoussiérage et dévésiculage", Techniques de l'Ingénieur, J 3580, 2001.
- [10] N. Plaks, " Improving Collection of Toxic Fine Partiel es in ESPs" , Proceedings of the 6th International Conference on Electrostatic Precipitation, pp 021-026, 1996.
- [11] F. Koliatene, " Contribution A L'étude De L'existence Des Décharges Dans Les Systèmes De L'avionique", Thèse doctorat, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, 5 Janvier 2009.
- [12] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, " Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator" , Journal of Electrostatic, 70 pp. 20-24. 2012.
- [13] R. Gouri, " Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre a barrière diélectrique en configuration fil-tube carre. application aux particules submicroniques", Thèse doctorat, Université de POITIERS, 2012.
- [14] S. H. Kim And K. W. Lee, "Experimental study of electrostatic precipitator performance and comparison with existing theoretical prediction models", Journal of Electrostatics, 48, pp 3-25. 1999.
- [15] N.F. Nielsen, P. S. Larsen and C. Lofstrom, "Secondary flows and turbulence for staggered and non staggered electrode emitters", Proceedings of the 1 Oth International Conference on Electrostatic Precipitation, paper 2A3. 2006.
- [16] J. H. Davidson et P. J. McKinney, "Electrohydrodynamic precipitator flow with a barbed plate discharge electrode", Aerosol Science and Technology, 12, pp 319-334. 1990.
- [17] J. H. Goo and J. W. Lee, "Monte-Carlo simulation of turbulent deposition of charged particles in a plate-plate electrostatic precipitator", Aerosol Science and Technology, 25, pp 31- 45. 1996.
- [18] W. J. Franck, "Aspects of ESP upgrading", Proceedings of the 6th International Conference on Electrostatic Precipitation, pp 203-208. 1996.
- [19] W. J. Franck and Walther & Cie, "Electrostatic dust separator", German Patent, DE3628452A1. 1986.
- [20] H. J. White, "Industrial electrostatic precipitation", Wesley Publishing Company, Inc. 1963.
- [21] G.Leonard,M.Mitchner,"An experimental study of electrohydrodynamic flow in electrostatic precipitators ",Journal of fluid mechanics 127, pp. 123–140. 1983.

- [22] H. PANG, "Dépoussiérage électrostatique pour les particules submicronique en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète mars) ", Thèse doctorat, Université, JOSEPH FOURIER 18 Décembre 2006.
- [23] J.S. Chang, A.J. Kelly, and J.M. Crowley, "Handbook of Electrostatic Processes", Marcel Dekker, pp.11-25, 1995.
- [24] L. M. Dumitran, "collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique ", Thèse doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2001.
- [25] S. Chekoun "Piégeage des grains de poussière dans les gaines d'un plasma de décharge", Thèse Magister en physique. Université des sciences et de la technologie de Bab Elzouar Alger, 2010.
- [26] L. K. Wang, N. C. Perira, Y. T. Hung, " Air pollution control engineering ", Handbook of environmental engineering volume 1, Humane press.
- [27] Informations techniques vannes de décomptage pour installations de dépoussiérage, [Www.Asconumatics.Eu](http://www.asconumatics.eu) .
- [28] T. C. Savage, R. C. Carlozzi, O. Petzoldt, " Design and testing of antistatic filters for industrial air filtration", Powder & Bulk Solids Conference and Exhibition, Rosemont, Illinois, USA, 10 mai 2001.
- [29] X. Simon, " Etude du décomptage pneumatique des dépoussiéreurs à manches », Thèse doctorat, Institut National De Lorraine, Le 28 Novembre 2005.
- [30] C. Kanaoka, S. Hiragi, W. Tanthapanichakoon, "Stochastic simulation of the agglomerative deposition process of aerosol particles on an electret fiber ", Powder Technology, Vol.118,Pp.97-106 , 2001.
- [31] A. C. Hoffmann, L. E. Stein, "Gas Cyclones And Swirl Tubes", Springer 2nd Edition (2002, 2008).
- [32] B. O. Andersen, N.F. Nielsen and J.H. Walther " Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters Powder Technology" 291 284–298 , 2016.
- [33] H. C. Lu, and C. J. Tsai, " Influence of design and operation parameters on bag-cleaning performance of pulsejet baghouse ", Journal of environmental engineering, New York, 125, 6, pp. 583 – 591, 1999.
- [34] " Les non-tissés se font performants, de pair avec les textiles" [https://fr.fashionnetwork.com › news › les-non-tisses-se-font-performants-](https://fr.fashionnetwork.com/news/les-non-tisses-se-font-performants-).
- [35] E. Ayad, " Développement de fibre fines multicomposantes pour la filtration de l'air ", Thèse doctorat, Université de lille, 13 décembre 2016.
- [36] M. Irwin, M. Hutten, " Handbook of nonwoven filter media", oxford, uk: elsevier ltd., 2007.
- [37] E. Jankowska, " Filtration properties of nonwovens witold gador ", International journal of occupational safety and ergonomics, vol. 5, no. 3, 361-379. 1999.
- [38] N. Hasolli,Y.O.Park, "Expérimental Study on Filtration of Flat Sheet Multiple Layer Depth Filter for Intake Air Filtration ",journal of Aerosol and Technology , vol. 47 issu12.
- [39] A. Wilson, "Development of the nonwovens industry", Handbook of nonwovens, pp. 1-15, 2007.
- [40] H. J. Lee et N. Cassill, "Analysis of world nonwovens market", Journal of Textile and Apparel Technology and Management, vol. 5, issu13, 2006.
- [41] G. Rutledge, "Processes and applications of electrostatics fiber formation ", Journal of Physics: Conference Series, Vols. 142, 12026, 2008.
- [42] K. Bensaid, " Développement d'un non-tissé structurel à base de fibres naturelles", Mémoire de la maîtrise en génie mécanique, Ecole de technologie supérieure université du Québec, 24 novembre 2016.
- [43] T. Belaid, " Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface", Thèse doctorat. Université de Potiers. Faculté des sciences fondamentales et appliquées, décembre 2011.
- [44] P. C. Gervais, "Etude expérimentale et numérique du colmatage de filtres plissés", Thèse doctorat, Université de Lorraine, 19 février 2013.
- [45] R. Mehdi, "Analyse et modélisation de l'écoulement et du colmatage d'un filtre à air plissé ", Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

- [46] J. Payen, " Etude et développement de structures fibreuses non tissées dédiées à la filtration de particules fines dans l'air, valenciennes ", Thèse doctorat, Université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2009.
- [47] J. Payen, P. Vroman, M. Lewandowski, A. Perwuelz, S. Calle-Chazel and D. Thom, " Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens ", Textile research journal 82(19) 1948-1959, 2012.
- [48] R. Gougeon, " Filtration des aérosols liquides par les filtres à fibres en régimes d'interception et d'inertie", Thèse doctorat, Université Paris xii. 1994.
- [49] T. Frising, D. Thomas, P. Contal, D. Bémer, D. Leclerc, " Influence of filter fibre size distribution on filter efficiency calculations ", Institution of chemical engineers, vol. 81, part a. October 2003.
- [50] T. Frising, " Etude de la filtration des aérosols liquides et de mélanges d'aérosols liquides et solides", Thèses doctorat, Polytechnique de Lorraine, 22 octobre 2004.
- [51] F. haghghat, A. Bahloul, J. Lara, R. Mostofi, A. Mahdavi, " Développement d'une procédure de mesure de l'efficacité des filtres d'appareils de protection respiratoire n95 contre les nanoparticules", Etudes et recherches rapport r-776, Université Concordia Québec, Juillet 2012.
- [52] T. Geryes, " Etude expérimentale et numérique de la dégradation de la mesure nucléaire d'aérosols radioactifs prélevés avec des filtres de surveillance", Thèse doctorat, Université Paris-est, 22 septembre 2009.
- [53] E. Dessauw, " Etude et développement de structures fibreuses non-tissées résistantes à la pénétration bactérienne", Thèse doctorat, Université Paris-est, 16 avril 2019.
- [54] A. Forthomme, " Caractérisation du comportement des aérosols microbiens dans les réseaux de ventilation d'espaces occupés ", Thèse doctorat, Université Nantes Angers le mans, 18 décembre 2012.
- [55] L. F. Gonzalez, " Influence de la gestion des centrales de traitement d'air des réseaux de ventilation de bâtiments sur le développement d'aérosols microbiens", Thèse doctorat, Université Nantes Angers le mans, 28/03/2014.
- [56] T. Durand, " Stratégies analytiques pour la caractérisation physico-chimique des particules ultrafines métalliques. applications aux aérosols ultrafins générés lors de procédés thermiques (fonderie, projection thermique", Thèse doctorat, Université de Pau et des pays de l'Adour, 30 avril 2014.
- [57] C. Brochot, " Filtration des nanoparticules application aux appareils de protection respiratoire", Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 2012.
- [58] A. Joubert, " Performances des filtres plissés à très haute efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air" Thèses doctorat, polytechnique de Lorraine, 13 novembre 2009.
- [59] S. Bourrous, " Etude du colmatage des filtres the plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion", Thèses doctorat, Université de Lorraine, 8 décembre 2014.
- [60] F. Gripari, " Caractérisation et filtration des aérosols nanostructures : application aux fumées de projection thermique des métaux. alimentation et nutrition", Thèse doctorat, Université de Lorraine, 2012.
- [61] K. Benmachou, " Etude et modélisation du colmatage d'un filtre plisse", Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 1 mars 2005.
- [62] S. Rungiah. " Etude et développement de nouveaux medias fibreux à fibres ultrafines : application à la filtration de l'air", Thèse doctorat, Génie des procédés, Université de Lorraine, 13 déc. 2017.
- [63] D. Marty-Dessus & L. Berquez, "Space charge cartography by FLIMM: a threedimensional approach", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 35, , p. 3249,2002.
- [64] L. Berquez, A. Salazar-Velazquez, D. Marty-Dessus, " Mesures de charge d'espace par FLIMM: Derniers développements", 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Saint-Nazaire, 2016.
- [65] M. Horenstein, "The Contribution of Surface Potential to Diverse Problems in Electrostatics", Journal of Physics : Conference Series, Vols. 646, 12001, 2015.

- [66] N. Zouzou, " Etude de la mobilité moléculaire du PEN destin é à la fabrication des condensateurs : influence", Toulouse, 2002.
- [67] L. Boudou, " Influence des paramètres de mise en œuvre sur la morphologie et la conductivité électrique d'un polyéthylène destiné à la fabrication des câbles", Toulouse, 2001.
- [68] R. Kacprzyk and C. Stec, "Measurements of the surface charge density on moving webs", *Journal of Electrostatics*, Vols. 40-41, pp. 455-461, 1997.
- [69] P. Molinié and P. Llovera, "New Methodology for Surface Potential Decay Measurements : Application to Study Charge Injection Dynamics on Polypropylene Films" , *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, no. 6, pp. 1049-1056, 2004.
- [70] A. Mihalcioiu, " Techniques de mesure et instrumentation virtuelle pour l'étude des processus électrostatiques ", Thèse de Doctorat, Université de Potiers, 2005.
- [71] T. Oda, K. Yamashita and R. Ono, "Surface charge behaviour of corona-charged thin polymer films - simultaneous LIPP and TSDC measurement," *Journal of Physics : Conference series*, Vols. 142, 12012, 2008.
- [72] D. Koch, " Caractérisation de surface par cartographie du potentiel : application à la détection de défauts liés à la corrosion ", Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud, 2010.
- [73] G. M. Sessler, "electrets: recent developments", *Journal of electrostatics*, 51-52, 137-145. 2001.
- [74] T. Hammi, " Etude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles ", Thèse doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2005.
- [75] K. Amar, M. Bouzid, " paramètres influent sur le dépôt de charge électrique par effet couronne sur une surface d'un diélectrique", Mémoire de master, Université de bejaïa, 2015.
- [76] "triboélectricité", <https://fr.wikipedia.org/wiki/tribo%a9lectricit%a9>.
- [77] I. Holme, J. E. McIntyre, and Z. J. Shen " Electrostatic charging of textiles the textile institute, 28, 1. 1998.
- [78] Govi, "Quelques expériences sur l'induction électrostatique.", *j. phys. theor. appl.*, vol. 4, pp.264-266, 1875.
- [79] G. Richard, A. R. Salama, K. Medles, C. Lubat, S. Touhami, and L. Dascalescu, " Electrostatic separation of two types of copper wires from electric cable wastes", *proc. electrostatics joint conference*, , west lafayette, usa. (submitted to *iee trans ind appl.*). 13-17 june 2016.
- [80] j.a. giacometti, s. fedosov, and m.m. costa, "corona charging of polymers: recent advances on constant current charging." *brazilian journal of physics*, vol. 29, pp. 269- 279, 1999.
- [81] J. H. Dessauer and H. E. Clark, " Xerography and related processes." London, u.k.: focal press, 1965.
- [82] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and A. Neamtu. " Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes." *part. sci. & technol.*, vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [83] B. Tabti, R. Mekideche, M. Plopeanu, I. Dumitran and L. Dascalescu, "Corona charging and charge decay characteristics of non-woven filter media." *IEEE trans. ind. appl.*, vol. 46, pp. 634-640, 2010.
- [84] M. Kachi, " Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires", Thèse doctorat, Université de Guelma, 2011.
- [85] T. Zeghloul, L. Dascalescu, K. Rouagdia, A. Fatihou, P. Renoux, D. Souchet, " Sliding conformal contact tribocharging of polystyrene and polyvinyl chloride ", *IEEE transactions on industry applications*, vol. 52, pp. 1808 - 1813, march-april 2016.
- [86] B. Mohamed Choukri, "Contribution à l'Etude des Différentes Topologies et Commandes des Filtrés Actifs Parallèles à Structure Tension : Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande ", Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004.
- [87] A. Gil, L. Romeo, C. Cortés. " Effect Of The Solid Loading On A Pressurized Fluidized Bed Combustors Cyclone With Pneumatic Extraction Of Solids ", *Chemical Engineering Technology*, 25, 407-415. 2002.
- [88] J. Chen, M. Shi, "A universal modèle to calculate cyclone pressure drop", *Powder Technology*, 171, 184-191. 2007.
- [89] I. Chadbane, " Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs ", Mémoire de magistère, université Biskra, 2011.

- [90] K. Tomitatsu, M. Kato, Y. Ueda, and C. Nagata, "Development of advanced electrostatic fabric filter", international Journal of Plasma Environmental Science & Technology, Vol.8, No.1, APRIL 2014.
- [91] S. J. Miller, M. Jones, J. Darrow and R. Gebert, "Field testing of the advanced hybrid particulate collector", Presented at 2000 ACS Symposium, San Francisco, CA, March 26-31, 2000.
- [92] R. Gebert, D. Davis, S.J. Miller, M. Jones, M. Collings, W. Swanson, and H. Krigmont, "Advanced Hybrid Particulate Collector: Concept, Field Results and Commercialization Potential", Presented at Air Quality II Mercury, Trace Elements, and Particulate Matter Conference, McLean, VA, September 19-21, 2000.
- [93] M. D. Hogue, E. R. Mucciolo, C. I. Calle, "Triboelectric, corona, and induction charging of insulators as a function of pressure", Journal of Electrostatics, Vol.65, pp.274-279, 2007.
- [94] M. Saleem, G. Krammer, "Effet de la vitesse de filtration et de la poussière concentration sur la formation du gâteau et le fonctionnement du filtre dans un filtre à manches pulsées à jet d'échelle pilote", J. Hazard. Mater, 144, 677-681, 2007.
- [95] A. Rouini, "Etude de l'influence des barrières dans les intervalles d'air pointe- plan par le calcul numérique du champ à l'aide de la méthode des volumes finis (MVF)" Mémoire de Magister, Université de Amar Thelidji de Laghouat, Septembre 2011.
- [96] A. Abahazem, "Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 01 Décembre 2009.
- [97] K. Hassouni, F. Massines, J. M. Pouvesle, "Plasmas hors-équilibre à des pressions atmosphériques, Plasmas froids : Génération, caractérisation, et technologies", Publications de l'Université de Saint-Étienne, 2004.
- [98] K. Hocine, "Influence de l'effet couronne sur les sur tension dans les lignes et les transformateurs de haute tension", Mémoire de Magister, Université de Mouloud MAMMERI de Tizi-ouzou, 2011.
- [99] Sefelec : « Les tests diélectriques étude des facteurs d'influence sur les essais de rigidité », Parc d'Activités du Mandinet -19, rue des Campanules 77185 -LOGNES - MARNE LA VALLEE, édition 2002.
- [100] S. Bentaleb, "Etude du déclenchement de combustion de mélanges air-propane et air-heptane par décharge mono-impulsionnelle nanoseconde" Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, 06 juillet 2012.
- [101] K. Allegraud, "Décharge à Barrière D'électrique de Surface : Physique et procédé", Physique [physics]. Ecole Polytechnique X, 2008.
- [102] A. Kavouras, G. Krammer, "Détachement de gâteau dérivant par rapport à la charge de la zone de gâteau dans un filtre pulsé par un modèle mécaniste", Powder Technol. 133, 134-146, 2003.
- [103] **A. Ouari**, A. Alibida, F. Miloua, A. Tilmatine, " **Conception et réalisation d'un nouveau système de filtre hybride utilisé dans les usines de ciment** », Progrès récents en sciences de l'environnement des régions euro-méditerranéennes et des environs, 2017.
- [104] C. J. Tsai, M. L. Tsai, H. C. Lu, "Effet de la vitesse de filtration et de la perte de charge de filtration sur la performance de nettoyage de sac d'une maison de sac à jet d'impulsion", Sep. Sci. Technol. 35 (2), 211-226, 2000.
- [105] E. Schmidt, "Investigations expérimentales dans la compression de gâteaux de poussière déposés sur un média filtrant. Filtre", septembre 32, 789-793, 1995.
- [106] K. Morris, RW K. Allen, "L'influence de la poussière et des propriétés du gaz sur l'adhésion de gâteau dans des filtres de tissu", Filtre. Sep. 33, 334-343, 1996
- [107] M. Koch, G. Krammer, "La distribution de la perméabilité (PD) méthode pour la caractérisation des milieux filtrants", AerosolSci. Technol. 42, 433-444, 2008.
- [108] F. Löffler, H. Dietrich, W. Flatt, "DustCollecti on avec des filtres à poches et filtres Envelope", Friedr. Vieweg& Sons, Braunsch hweig / Wiesbaden, Allemagne, 1988.
- [109] A. Ergudenler, W. Tang, CMH Brereton, C.J. Lim, JR Grace, TJ Gen rrich, "Performance des filtres en tissu à haute température dans des conditions de gazéification et de combustion", septembre Puri f. Technol. 11, 1997.

- [110] X. Simon, S. Chazelet, D. Thomas, D. Bemer et R. Regnier, "Filtered air flow distribution in pulse-jet baghouse dust collector during clogging and cleaning cycles", 5th European Meeting on Chemical Industry and Environment, Vienne, pp. 513 – 521, 2006.
- [111] D. Thomas, D. Bemer, S. Calle, R. Regnier Et P. Contal, "Influence of cleaning parameters on pulse-jet filter bags performances", Powder Technology, 172, 2, pp. 67 – 81, 2007.
- [112] R. Boudhan, "Performance of pulse-jet bag filter regarding particle removal for nano-waste incineration conditions", Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2017.
- [113] **A. Ouari**, F. Miloua, H. Labair, A. Tilmatine, "**Experimental analysis of a corona-charged baghouse filter**", International Journal of Environmental Studies, November 2019.
- [114] WHO., 7 million premature deaths annually linked to air pollution. World Health Organization. (<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>), 2004.
- [115] B. Crowther, Michael, "Climate change: the science, impacts and solutions", International Journal of Environmental Studies. 67(2), 268-269. 2010.
- [116] J. Y. Ahn, "Micromap plots to visualize air pollution at national and local level in Korea", International Journal of Environmental Studies. 73(2), 277-285. 2016.
- [117] K. E. Trenberth, "Climate change caused by human activities is happening and it already has major consequences", Journal of Energy & Natural Resources Law. 36(4), 463-481. 2018.
- [118] Y. Zhao, A. J. A. Aarnink, M. C. Jong, and P. W. G. Groot Koerkamp, "Airborne microorganisms from livestock production systems and their relation to dust", Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 44(10), 1071-1128. 2014.
- [119] G. McCarron, "Air pollution and human health hazards: a compilation of air toxins acknowledged by the gas industry in Queensland's Darling Downs", International Journal of Environmental Studies. 75(1), 171-185, 2018.
- [120] B. Maag, Z. Zhou, and L. Thiele, "A survey on sensor calibration in air pollution monitoring deployments", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Internet of Things Journal. 5(6), 4857-4870. 2018.
- [121] S. Nonni, H. Sambudi, L. Myong, and K. Cho, "Capture of ultrafine particles using a film-type electret filter with a unipolar charger", Aerosol and Air Quality Research. 17(2), 626-635. 2017.
- [122] X. Liu, H. Shen, and X. Nie, "Study on the filtration performance of the baghouse filters for ultra-low emission as a function of filter pore size and fiber diameter", International Journal of Environmental Research and Public Health. 16(2), 247-266. 2019.
- [123] Z. Cheng-hang, and Ch. Kanaoka, "Recent advances in dust collection technology and ISO standardization in bag filtration", Journal of Zhejiang University-Science A. 19(1), 21-33. 2018
- [124] V. Ludwig, and H. Stephane, "Effects of size and morphology of TiO₂ and SiO₂ airborne nanoparticles on their filtration through chemical protective clothing", Journal of Theoretical and Applied Nanotechnology. 6(1), 11-20. 2018.
- [125] Y. H. Joe, J. Shim, and H. S. Park, "Evaluation of the can velocity effect on a bag filter", Powder Technology. 321, 454-457. 2017.
- [126] F. Mohsenzadeh, K. Naddafi, A. Nouri, and A. Babbaie, "Optimization of bag filter in a cement factory in order to increase of dust collection Efficiency", Biotechnology 5(2), 130-133. 2016.
- [127] L. Kai, L. Chong, and al., "Core-shell Nanofibrous Materials with High Particulate Matter Removal Efficiencies and Thermally Triggered Flame Retardant Properties", American Chemical Society Central Science. 4(7), 894-898. 2011.
- [128] M. Saleem, G. Krammer, and M. Tahir, "The effect of operating conditions on resistance parameters of filter media and limestone dust cake for uniformly loaded needle felts in a pilot scale test facility at ambient conditions", Powder Technology. 228, 100-107. 2012.
- [129] C. Jinn M. Tsai & H. Lu, "Effect of Filtration Velocity and Filtration Pressure Drop on the Bag-Cleaning Performance of a Pulse-Jet Baghouse", Separation Science and Technology. NSC-87-2211-E-009-005, 2007.
- [130] S. Illies, H. Anlauf, and H. Nirschl, "Avoiding filter cake cracking: Influence of consolidation on desaturation characteristics", Drying Technology. 34(8), 944-952. 2015.

- [131] G. R. Salazar-Banda, R. D. Lucas, J. R. Coury, and M. L. Aguiar, "The Influence of Particulate Matter and Filtration Conditions on the Cleaning of Fabric Filters", *Separation Science and Technology*.48(2), 223–233.2012.
- [132] M. Saleem, G. Krammer, and M. Tahir, R. U. Khan, "Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter", *Powder Technology*. 224, 28–35. 2012.
- [133] T. Laminger, M. Stecher, G. Mauschitz, and W. Höflinger, "Modeling the pressure drop behavior of cleanable dust filters during pressure-controlled operation. ", *Separation Science and Technology*. 52(18), 2788–2794. 2017.
- [134] B. O. Andersen, N. F. Nielsen and J. H. Walther, "Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters", *Powder Technology*.291, 284–298. 2016.
- [135] S. Chen, Q. Wang and D. R. Chen "Effect of pleat shape on reverse pulsed-jet cleaning of filter cartridges" *Powder Technology*.305, 1–11. 2017.

الملخص

في الصناعات الإسمنتية، تمثل مشاكل إزالة الغبار من الكسارات الشغل الشاغل للمسؤولين. في مواجهة هذه الأشكال من تلوث الهواء، تحاول العديد من الشركات في جميع أنحاء البلاد اعتماد سياسة جديدة لحماية البيئة من أجل الحفاظ على تركيز بعض الملوثات دون الحدود المقدرة بأنها خطيرة على النظم البيئية والصحة.

لهذا الغرض، تم تطوير العديد من أنظمة التحكم في التلوث في هذا الاتجاه ، وهي المرشحات الكهروستاتيكية (الرطبة والجافة) ، وأعاصير تجميع الغبار ، وكذلك المرشحات الكيسية. يمكن لنظام آخر يجمع بين تقنيتي ترشيح، يسمى المرشح الهجين، نادرًا ما يتم تركيبه في أعمال الأسمنت ، أن يقدم حلاً فعالاً لإزالة التلوث من النفايات السائلة. سيكون هذا المرشح موضوع دراسة تجريبية مفصلة كجزء من هذه الأطروحة.

يجمع المرشح الهجين بين مزايا الفصل الإلكتروني ومزايا فصل المرشح. إنه حل مثالي لتحويل المرسب الكهروستاتيكي الموجود بالفعل إلى مرشح هجين. تتم إزالة معظم الغبار عن طريق الترسيب الكهروستاتيكي، بينما يتجمع الغبار المتبقي الذي لم تتم إزالته بواسطة تأثير المجال الكهربائي معاً لتشكيل جزيئات أكبر. ثم يتم العثور على هذا الغبار ضعيف التأين متصلًا بالجزء الخارجي من أكمام المرشح. إنها تشكل كعكة مسامية تنتج فقط خسارة ضغط منخفضة مقارنة بالفلتر الكيسي البسيط.

كلمات مفتاحية: مرشح كهرباء، مرشح كيس، التحكم في تلوث الغاز، تفريغ كهربائي

Abstract

In the cement industries, the problems of dust removal from crushers are the major concern of those in charge. Faced with these forms of air pollution, several companies across the country are trying to adopt a new environmental protection policy in order to keep the concentration of certain pollutants below limits estimated to be dangerous for ecosystems and health.

For this, several pollution control systems have been developed in this direction, namely electrostatic filters (wet and dry), dust collector cyclones, as well as bag filters. Another system that combines two filtration techniques, called a hybrid filter, rarely installed in cement works, can present an effective solution for the depollution of gas effluent. This filter will be the subject of a detailed experimental study as part of this thesis.

The hybrid filter combines the advantages of electrostatic separation with those of filter separation. It is an ideal solution to transform an already existing electrostatic precipitator into a hybrid filter. Most of the dust is removed by electrostatic precipitation, while the remaining dust that has not been removed by electric field effect clumps together to form larger particles. This poorly ionized dust is then found attached to the outside of the filter sleeves. It forms a porous cake which produces only a low pressure loss compared to a simple bag filter

Keywords: Electrostatic filter, bag filter, gas pollution control, electric discharge.

Résumé

Dans les industries de ciment les problèmes de dépolluierage des broyeurs présentent le souci majeur des responsables. Face à ces formes de pollution atmosphérique, plusieurs entreprises à travers le territoire national essaye d'adopter une nouvelle politique de protection d'environnement afin de maintenir la concentration de certains polluants en dessous des limites estimées comme étant dangereuses pour les écosystèmes et la santé.

Pour cela, plusieurs systèmes de dépollution ont été développés dans ce sens, à savoir les filtres électrostatiques (humides et secs), les cyclones dépolluierage, ainsi que les filtres à manches. Un autre système qui associe deux techniques de filtration, appelé filtre hybride, rarement installé dans les cimenteries peut présenter une solution efficace pour la dépollution des effluent gazeux. Ce filtre fera l'objet d'une étude expérimentale détaillée dans le cadre de cette thèse.

Le filtre hybride combine les avantages de la séparation électrostatique avec ceux de la séparation filtrante. C'est une solution idéale pour transformer un électrofiltre déjà existant en filtre hybride. La plus grande partie des poussières est extraite par précipitation électrostatique, tandis que les poussières restantes qui n'ont pas été éliminées par effet de champ électrique s'agglomèrent pour former des particules plus grosses. Cette poussière mal ionisée se retrouve ensuite fixée sur l'extérieur des manches filtrantes. Elle forme un gâteau poreux qui ne produit qu'une faible perte de pression en comparaison avec un simple filtre à manche.

Mots-clé : Filtre électrostatique, filtre à manches, dépollution des gaz, décharge électrique