



HAL
open science

Optimisation des performances d'un procédé industriel d'électrofiltration alimenté par hautes puissances pulsées.

S. Souakri

► **To cite this version:**

S. Souakri. Optimisation des performances d'un procédé industriel d'électrofiltration alimenté par hautes puissances pulsées.. Génie des procédés. Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2016. Français. NNT: . tel-02370194

HAL Id: tel-02370194

<https://hal.science/tel-02370194v1>

Submitted on 19 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

UNIVERSITÉ DE PAU ET DES PAYS DE L'ADOUR
École doctorale des sciences exactes et leurs applications

Par
Sonia SOUAKRI

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

Sciences de l'ingénieur

Spécialité : **GENIE ELECTRIQUE**

**Optimisation des performances d'un
procédé industriel d'électrofiltration
alimenté par hautes puissances pulsées.**

Soutenue le 9 décembre 2016

MEMBRES DU JURY

RAPPORTEURS

J.M. BAUCHIRE

Professeur – Université d'Orléans

E. MOREAU

Professeur – Université de Poitiers

EXAMINATEURS

J.P BRASILE

Directeur de la société EFFITECH

M. MARCHAND

Ingénieur – CEA Marcoule

L. PECASTAING

Professeur – Université de Pau

DIRECTEUR

T. REESS

Maître de Conférences (HDR) - Université de Pau



À mes parents Safia DEY et Ammar SOUAKRI.

Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier **Dieu**, le Clément, le Miséricordieux, d'être toujours à mes côtés, de m'aider à réaliser mes rêves, de me guider et de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail.

Ma gratitude et mes sincères remerciements vont vers mon directeur de thèse Monsieur **Thierry REESS**, pour m'avoir accordé sa confiance et soutenue pour que je réalise cette thèse. Qu'il trouve ici ma reconnaissance pour ses conseils avisés, les discussions et les échanges que nous avons eus, pour son investissement dans la correction de ce manuscrit et surtout pour le savoir-faire et les connaissances qu'il a sus me faire partager. Sa disponibilité, son attention et ses encouragements durant ces trois années ont permis l'aboutissement de ces travaux de recherche. Pour ma part ce fut un grand honneur de l'avoir à mes côtés et je garderai en mémoire le souvenir d'une collaboration fructueuse.

Merci infiniment à **Antoine SILVESTRE DE FERRON** pour tous ses conseils qui ont débuté bien avant cette thèse. Quatre ans à travailler ensemble ça commence à compter. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour son encadrement et son soutien durant cette thèse, pour les nombreuses heures passées à démonter et remonter "le pilote", pour le savoir qu'il m'a transmis et apporté en mécanique et génie électrique, pour ses corrections et pour avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions durant cette thèse. Je ne saurai oublier ta réponse culte à ma question "Antoine, dis-moi...?" "Moi". Merci sincèrement pour ton investissement et ton implication.

Cette thèse n'aurait jamais pu se faire si je n'avais pas eu l'occasion de travailler au laboratoire SIAME. Je tiens donc à remercier particulièrement le professeur **Laurent PECASTAING** à la fois président du jury et responsable de l'équipe génie électrique, pour m'avoir donné l'opportunité d'intégrer le laboratoire et permis d'obtenir ma première expérience professionnelle en tant qu'ingénieur. Cette première collaboration, que je ne saurai oublier m'a permis de poursuivre dans la recherche et de réaliser cette thèse. Je lui suis reconnaissante de la confiance qu'il m'a accordée et qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude pour ses encouragements, l'aide et les conseils qu'il a sus m'apporter durant ces quatre années de collaboration et pour sa relecture finale.

Je remercie vivement Messieurs **Eric MOREAU**, professeur à l'Université de Poitiers et **Jean-Marc BAUCHIRE**, professeur à l'Université d'Orléans, pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'être rapporteurs de cette thèse et membres du jury. Je leur suis reconnaissante pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture, l'évaluation de mon manuscrit et à la rédaction de leur rapport, mais aussi pour les conseils scientifiques avisés qu'ils m'ont apportés lors de la soutenance.

Mes remerciements s'adressent aussi à **Jean-Pierre BRASILE**, directeur de la société EFFITECH d'avoir accepté d'être examinateur lors de la présentation et pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux de recherche.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur **Mickaël MARCHAND** d'avoir représenté le CEA Marcoule en tant qu'examineur et membre du jury lors de ma présentation. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance pour avoir été un collaborateur hors pair tout le long de ces trois

années de thèse, malgré la distance et de m'avoir permis de répondre au mieux aux exigences du CEA (merci pour les caractérisations et surtout d'avoir trouvé la poussière SIKRON !). Je le remercie également pour son intérêt quant à mon avenir professionnel, pour ses conseils avisés et pour une conférence à la Réunion qui restera mémorable.

Je tiens également à remercier tous les membres du CEA Marcoule qui se sont intéressés à mes travaux et notamment **Florent LEMONT** pour son implication dans la mise en place d'une collaboration pérenne entre le SIAME et le CEA Marcoule, qui a abouti à la réalisation de ce projet et pour m'avoir fait confiance dans l'organisation et le déroulement de cette thèse. Mes remerciements vont également à **Aldo RUSSELO** et **Christophe LAFON** pour leurs conseils et leur bienveillance.

Un très grand merci à **Valérie BERTRAND** de CISTEME, qui malgré la distance a su être présente tout le long de cette thèse, en répondant amicalement à l'ensemble de mes problématiques sur CST Studio. Qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance pour l'attention et le temps qu'elle m'accorde lorsque je la sollicite.

Je remercie **Sylvain PAQUET** de la société EFFITECH que je considère comme un membre à part entière du laboratoire SIAME, pour son investissement et l'aide qu'il m'a apportée face à mes problématiques et les questions que je me posais. Merci de m'avoir aidée tout le long de cette thèse dans la mise en place de certains montages, pour le matériel prêté, qui m'a permis de réaliser la caractérisation électrique des poussières et pour le temps qu'il a su me consacrer.

Ce fut un grand honneur de travailler au laboratoire SIAME, je remercie tous mes collègues : Monsieur **Marc RIVALETTO** en premier lieu pour son accueil chaleureux lors de mon premier jour de travail je ne saurai l'oublier. Son humour et nos longues conversations ont permis de faciliter les moments ardu d'une thèse. Je le remercie d'avoir toujours pris le temps de répondre à mes interrogations dans le domaine du génie électrique et pour les transitions lors de mon oral. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

Merci à tous les autres membres du laboratoire SIAME : **Cécile KOCHER**, **Robert RUSCASSIE** et **Anca PETRE** pour leur amitié et leur soutien, **Christel FERNANDEZ** (pour les pauses thé / café), **Daniel CHAMPIER** (mon nouveau collègue de bureau), **M. PIGNOLET** (pour nos échanges) ; les docteurs : **Camille** et **Charly** et les futurs docteurs : **Florian**, **Tony**, **Ernesto** et **Marc** et **tous les stagiaires** pour tous les bons moments passés ensemble, les discussions enrichissantes que nous avons eues et surtout pour l'aide qu'ils m'ont apportée durant cette thèse. Je ne saurai oublier **Sandrine** la technicienne de surface pour son sourire et sa bonne humeur.

Je remercie les membres de l'IPREM, **Christophe DEMAIL** (pour le matériel prêté), **Hervé MARTINEZ** et **Jean Bernard LEDEUIL** (pour la caractérisation au MEB) et **Eddy LASSEUR** pour la verrerie maintes fois réparée.

La réalisation d'une thèse est certes comme certains ont pu me le dire "un rouleau compresseur qui ne s'arrête jamais", mais il s'agit surtout d'une expérience humaine et l'occasion de nouer de formidables relations.

Je remercie donc mes amis pour m'avoir changé les idées et soutenue durant cette période et surtout pour les supers moments passés ensemble : **Ehsan** (pour être toujours disponible et sa

gentillesse), **Mamour** (pour tes conseils avisés), **Manzoor et Faiza** (pour m'avoir fait découvrir la nourriture Pakistanaise), **Mazhar et Elodie** (pour votre soutien durant ma période de rédaction et nos soirées pizza), **Sabrina** (pour les soirées Kebab), **Claire et Erdem, Christophe et Carla, Soumeya**, pour tous les moments inoubliables passés avec vous à Pau.

Cette thèse a été l'occasion pour moi de rencontrer de nouvelles sœurs, merci les ouchtinettes : **Hind, Gaby, Kamélia et Rebab**.

Je remercie tous les thésards rencontrés au cours de ces trois années de thèses : bien évidemment tous les membres du bureau de l'AMDA (**Nicolas, Zeina, Maxime, Charlotte, Jean-Baptiste, Jean Christophe, Tiphaine**) pour les sorties bowling, laser-quest et bien d'autres qui nous ont permis de sortir de nos laboratoires respectifs et surtout de nous rencontrer. Je ne saurai oublier les doctorants du LMAP et tous le personnels du LUIPPA avec qui j'ai partagé de très bons moments le midi et une superbe victoire de volley.

Merci à mes voisins de l'école des Mines pour leur soutien et surtout mes amis doctorants : **Jane** (MT180s, pour sa joie de vivre et les soirées Disney !), **Amandine** (MT180s, pour ses histoires), **Célia** (pour avoir enduré la dure épreuve de voix et geste avec moi) **Mylène et Alexandre** (pour l'Escape Game dont nous ne sommes jamais sortis et les soirées cinés).

Je tiens à remercier mes amis et ma famille qui se sont investis dans les premières relectures et corrections de ce manuscrit : **Caroline, Elodie, Noui, Marwa, Claire, Fouad**, ou encore dans mes travaux en Anglais : **Lazhar, Frantz, Fouad, Nadia, Ehsan, Faiza et Manzoor**.

Je suis très reconnaissante envers les personnes qui ont participé à l'organisation de mon buffet de soutenance et spécialement les cuisinières : **Fatima, Moufida, Marwa, Wafiya, Wissem, Hadeel** et bien sûr ma sœur **Nora**.

Ce travail de thèse est également l'aboutissement de nombreuses années d'étude. Je tiens donc à remercier **les bonnes sœurs** (les filles de la croix) de la résidence Jean Tiriote de Mérignac et notamment **sœur Geneviève** pour son implication dans le soutien scolaire dont j'ai pu bénéficier durant de nombreuses années. Qu'elle trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance pour le travail mené. Je remercie également les autres sœurs **Louise, Eulalie** et bien d'autres. Je ne saurai oublier les personnes retraitées et bénévoles qui ont su nous accorder de leur temps, leur patience et leur savoir je vous exprime ma sincère gratitude : **Danielle, Collette et Francis, Hélène, Jean, Monique, Georgette** et bien d'autres...Merci infiniment.

Pour finir, je remercie les personnes plus importantes dans ma vie à savoir ma famille à qui je dédie ce travail : **Mes Parents**, mes sœurs **Nadia et Nora** et mes frères **Nourdine, Salim, Fouad, Lazhar, Noui**, sans oublier mes neveux et nièces (**Yannis, Nassila, Leena, Larine et Raïd**). Je tiens à faire une dédicace spéciale à mon cousin **Djemel** et ma cousine **Sarah** partis et qui ne pourront jamais voir la réalisation de ce travail.

Merci à tous les proches et les personnes que j'ai cités et surtout tous ceux que j'ai probablement oubliés pour avoir participé à la réussite de ce jour exceptionnel.

Table des matières

Introduction.....	7
Chapitre 1 - Généralités sur la précipitation électrostatique.....	13
I) La pollution atmosphérique	15
I-1) Les polluants	15
I-1-a) Les particules	16
I-1-b) L'impact des particules.....	18
I-2) Les systèmes de filtration	18
II) Principes physico-chimiques de fonctionnement des ESP.....	23
II-1) Les mécanismes de charge des particules	24
II-1-a) La charge par champ.....	25
II-1-b) La charge par diffusion	27
II-1-c) La charge mixte	27
II-2) Les forces	28
II-3) Migration des particules chargées.....	30
II-4) Ecoulement dans un électrofiltre	31
II-4-a) L'écoulement laminaire	31
II-4-b) L'écoulement turbulent.....	32
II-5) Interaction Electro-hydrodynamique	33
II-6) Les paramètres influençant les ESP et les améliorations possibles	34
II-6-a) Le ré-entraînement.....	34
II-6-b) Les back corona	35
II-6-c) Les améliorations possibles	37
III) La décharge électrique.....	38
III-1) Un peu d'histoire	38
III-2) Mécanismes de création et de pertes des particules chargées.....	39
IV) La décharge couronne	41
IV-1) La décharge positive	42
IV-2) La décharge négative : le régime de Trichel	42
V) Positionnement du travail de thèse	45
V-1) Les procédés du CEA Marcoule.....	45
V-2) Les objectifs	49
VI) Conclusion	50
Chapitre 2 - Matériels et Méthodes	51
I) Le procédé semi-industriel.....	53

I-1)	Le pilote	53
I-2)	Les électrofiltres	55
I-2-a)	Le montage pointe / plan	55
I-2-b)	Le montage Héritrode / cylindre	57
I-2-c)	Le montage Solectrode / cylindre	58
I-3)	L'alimentation de l'électrofiltre	58
II)	Conception de la nouvelle électrode Solectrode	61
II-1)	Dimensionnement sous CST EM Studio	61
II-1-a)	Présentation du logiciel et premières simulations	61
II-1-b)	Distribution des champs pour différentes géométries.....	64
II-1-b-(i)	Comparaison des champs électriques moyens pour $U = -30$ kV	65
II-1-b-(ii)	Comparaison des champs électriques maximaux ($U = -60$ kV)	67
II-1-c)	Influence du tube support et de la longueur de la pointe	68
II-1-c-(i)	Etude du champ électrique moyen	69
II-1-c-(ii)	Etude du champ électrique maximal	70
II-1-d)	Etude de l'écartement entre les pointes	73
II-2)	Validation expérimentale du dimensionnement	75
II-2-a)	La longueur L_p des pointes.....	76
II-2-b)	Influence de la tension sur la distance d_s	78
II-2-c)	Influence du nombre de pointes par couronne	80
II-3)	Bilan sur la conception de la Nouvelle Electrode et premières mesures	80
III)	Les compteurs de particules et l'injecteur	83
III-1)	Les compteurs de particules	83
III-2)	Le système d'injection	86
IV)	Caractérisations physico-chimiques des poussières	87
IV-1)	L'analyse chimique.....	88
IV-2)	Analyse granulométrique	90
IV-3)	L'analyse optique	93
IV-4)	Les propriétés électriques	98
V)	Conclusion	107

Chapitre 3 - Etude descriptive des phénomènes physiques occurrents dans un électrofiltre pointe / plan.....109

I)	Analyses sous tension continue avec les poussières SIKRON	112
I-1)	Evolution des régimes de décharge	112
I-1-a)	Zone 1	114

I-1-b) Zone 2	115
I-1-c) Zone 3	116
I-1-d) Zone 4	119
I-2) Formation du dépôt de poussières.....	120
I-3) Incidence de la valeur de la tension continue sur la phénoménologie	123
II) Analyses sous tension combinée avec la poussière SIKRON	128
III) Etude comparative entre le couple de tension combinée et la tension continue..	131
IV) Etude comparative sous tensions continues avec les poussières SHIVA	139
IV-1) Phénoménologie à -7,5 kV _{DC}	139
IV-2) Influence de la tension	140
V) Bilan	143
 Chapitre 4 - Analyse et optimisation de l'évolution temporelle des rendements de filtration	
.....	147
 I) Remise en fonctionnement de la boucle expérimentale.....	150
I-1) Stabilisation de l'injection.....	150
I-2) Vérifications des compteurs GRIMM.....	152
I-3) Comparaisons entre anciens et nouveaux essais	152
II) Fonctionnement sur un temps court	153
II-1) Expérimentations avec la poussière SIKRON	156
II-1-a) Etude sous tension continue	156
II-1-b) Etude sous tension pulsée seule	158
II-1-c) Etude sous tension combinée.....	159
II-1-c-(i) Comparaison de rendement	159
II-1-c-(ii) Influence du taux d'injection	160
II-1-c-(iii) Influence de la fréquence des impulsions	161
II-2) Influence des poussières sur l'efficacité de l'électrofiltre	162
II-2-a) Sous tension continue	162
II-2-b) Sous tension combinée	163
II-3) Analyses des dépôts de poussières	165
III) Fonctionnement sur un temps long.....	169
III-1) Etude préalable.....	170
III-2) Influence de la granulométrie	173
III-3) Influence de la valeur de la tension continue.....	174
III-4) Tension continue versus tension combinée	175

III-5) Influence de la fréquence de répétition des impulsions	178
III-6) Les dépôts de poussières	180
IV) Bilan	183
<i>Conclusion</i>	<i>187</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>195</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>209</i>

Introduction

La lutte contre la pollution atmosphérique est un enjeu majeur de ce siècle. La prise de conscience de son augmentation constante conduit de plus en plus de pays industrialisés à prendre des mesures afin de réglementer les émissions d'effluents gazeux. Les particules générées par l'activité humaine ont une part majeure dans la pollution de l'air. Leurs origines proviennent essentiellement des industries extractives, métallurgiques et chimiques, des usines d'incinération, des moyens de transport et de l'exploitation des énergies fossiles.

Les particules ayant des effets reconnus néfastes à la fois sur l'environnement et sur la santé, il paraît indispensable d'en limiter l'émission et / ou de développer des systèmes de filtration performants. Parmi ces systèmes, il existe les précipitateurs électrostatiques (ESP), encore appelés électrofiltres, qui présentent de nombreux avantages par rapport à des procédés purement mécaniques.

Dans sa forme la plus simple, un électrofiltre est constitué d'une électrode émissive connectée à une alimentation en tension et d'une électrode de collecte reliée à la masse entre lesquelles circule un gaz contenant des particules électriquement neutre. Le principe de ce procédé est de créer un plasma dans le volume à traiter, puis de charger les particules pour qu'elles dérivent, sous l'action des forces électrostatiques, vers l'électrode de collecte.

L'une des activités du CEA-Marcoule porte sur la gestion des déchets solides issus du nucléaire. Des procédés appelés IRIS et SHIVA sont en cours d'optimisation pour permettre à la fois d'éliminer les fractions organiques des déchets tout en stabilisant et en confinant leurs fractions minérales. Ce type de traitement, qualifié « incinération - vitrification », libère des gaz de combustion qui contiennent des poussières fines traitées par des électrofiltres.

Le CEA-Marcoule collabore ainsi depuis de nombreuses années avec l'équipe « Génie Electrique » du laboratoire SIAME de l'Université de Pau sur la précipitation électrostatique. Les travaux menés en commun ont abouti au développement d'une électrode multi-pointes alimentée par un générateur combinant une composante continue et une composante pulsée. Cette association électrode-alimentation, qui a fait l'objet d'un brevet international [1], est installée sur SHIVA et a contribué à améliorer les performances de filtration des électrofiltres du CEA. Néanmoins, le développement d'un nouveau procédé d'incinération (PIVIC) conduit à redimensionner l'électrofiltre et plus précisément à modifier la géométrie

de l'électrode émissive. Cette nouvelle géométrie devra répondre aux futures conditions d'exploitation du procédé et permettra, en particulier, une bonne maîtrise des écoulements aérauliques des gaz de combustion chargés en poussières potentiellement radioactives.

C'est dans ce cadre que s'inscrit mon travail de thèse qui est financée à la fois par le Conseil Général des Pyrénées Atlantiques (allocation doctorale) et par le CEA Marcoule (collaboration de recherche). L'objectif est multiple. Il s'agit de dimensionner, puis réaliser une nouvelle électrode émissive qui doit répondre aux nouvelles contraintes géométriques imposées, tout en conservant une efficacité optimale de filtration. Pour ce faire, les rendements de filtration seront caractérisés en fonction de différents paramètres liés à l'alimentation, aux propriétés des poussières (granulométrie, résistivité) et au temps de fonctionnement de l'électrofiltre.

Par ailleurs, afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques, une étude particulière sera menée sur un dispositif simplifié de type pointe / plan de façon à mettre en évidence l'influence de la tension appliquée sur l'évolution des régimes de décharges et, en particulier, sur le développement des back corona, décharges localisées sur l'électrode de collecte annonciatrices de la chute des performances de l'électrofiltre. L'analyse portera également sur une poussière faiblement résistive, pour laquelle un régime de back corona ne pourra se développer.

D'un point de vue organisationnel, le manuscrit comporte quatre chapitres. Dans le premier, un état de l'art est proposé sur la pollution atmosphérique et sur la précipitation électrostatique. Les principaux mécanismes physiques opérant dans les électrofiltres et les différents modèles associés sont exposés.

Une présentation des décharges électriques petites distances de type Trichel fait l'objet d'une partie du chapitre qui se terminera par une présentation des différents procédés de traitement de déchets par incinération / vitrification développés au CEA Marcoule.

Le second chapitre porte sur les matériels et les méthodes employés. Le pilote semi-industriel, localisé au laboratoire SIAME et utilisé pour tous les essais, est présenté, ainsi que les conditions opératoires et le dispositif d'injection des poussières.

Une partie du chapitre est dédiée aux moyens de diagnostic électrique (mesures de courant et de tension), optiques (appareil photographique et compteurs de particules) et aux caractéristiques du générateur combiné.

Une analyse physico-chimique des différentes poussières à notre disposition permettra d'identifier celles potentiellement intéressantes pour l'étude en termes de granulométrie, propriétés chimiques et électriques.

Des simulations numériques de la distribution du champ électrique dans l'électrofiltre, complétées par une validation expérimentale par optimisation du courant moyen injecté conduiront au dimensionnement d'une nouvelle électrode émissive multi-pointes, nommée Solectrode.

Le troisième chapitre va s'intéresser à la compréhension des phénomènes de décharges se développant dans un électrofiltre constitué d'une pointe unique et d'un plan. Sous l'influence de divers paramètres (alimentation continue et combinée, résistivité des poussières, temps de fonctionnement), nous analyserons l'évolution des régimes de décharge en fonction du temps. Les interprétations proposées reposeront sur des moyens de diagnostics électriques (caractéristiques courant-tension) et optique (photographies). L'objectif est de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans l'électrofiltration et de mettre en évidence l'intérêt de l'utilisation d'une alimentation combinée.

L'optimisation des performances du pilote semi-industriel équipé de la nouvelle géométrie d'électrode fait l'objet du dernier chapitre. Les mesures de rendement de filtration seront analysées en fonction de différents paramètres : la granulométrie, le type de poussières, le taux de particules injectées, les conditions d'alimentation et le temps de fonctionnement. Il s'agira de déterminer les points de fonctionnement optimaux sur des temps courts de filtration, puis d'étudier l'évolution des rendements sur des durées de filtration compatibles avec l'application industrielle envisagée.

*Chapitre 1 - Généralités sur la
précipitation électrostatique*

I) La pollution atmosphérique

I-1) Les polluants

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

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

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

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

Pour sa survie, l'être humain a dû développer des outils de communication simple (qualificatifs, chiffres) pour évaluer et décrire l'état global de la qualité de l'air dans une zone géographique donnée (arrêté du ministère de l'écologie et du développement durable du 22 juillet 2004).

En France, il existe deux types d'indice qui sont calculés pour une journée et pour une zone géographique :

- l'indice ATMO qui est obligatoirement calculé dans des agglomérations de plus de 100 000 habitants,
- l'indice IQA qui peut être calculé dans des agglomérations ou des zones géographiques de moins de 100 000 habitants.

Ces indices sont le résultat de la surveillance de quatre polluants atmosphérique majeurs :

- les particules fines (origine : industrielle, transport, chauffage),

- le dioxyde de soufre (origine : industrielle),
- le dioxyde d'azote (origine : combustion, chauffage, transport),
- l'ozone (origine : pollution secondaire, solvants, hydrocarbures).

C'est la valeur la plus élevée de ces quatre sous-indices qui va fixer l'indice dans la zone considérée. Celui-ci est souvent représenté par une "girafe" nommée ATMO, dont la physionomie et la couleur varient selon la valeur (Figure 1) [2].

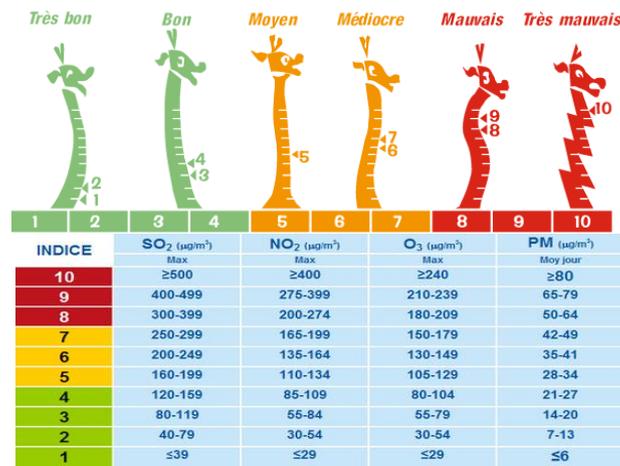


Figure 1 : Indice ATMO et polluants atmosphériques intervenant dans le calcul

Cet indice ATMO est propre à la France, mais il en existe d'autres, tels que l'indice européen CITEAIR, le National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) aux USA, l'Air Quality Health Index (AQHI) pour le Canada [3], ou encore l'Air Pollution Index (API) en Malaisie, etc...

I-1-a) Les particules

Le terme de particules est employé pour définir les aérosols qui sont créés par la dispersion dans un milieu gazeux (ex : air) de solides (ex : poussières) et de liquides de natures minérales ou organiques. Dans cette catégorie, il existe donc les poussières, les fumées, les suies, les brumes, les brouillards... Leurs origines sont diverses (Figure 2). Elles peuvent être dues à des phénomènes naturels comme les éruptions volcaniques, les feux de forêts, le pollen, les érosions éoliennes ou d'origines anthropiques comme les combustions,

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

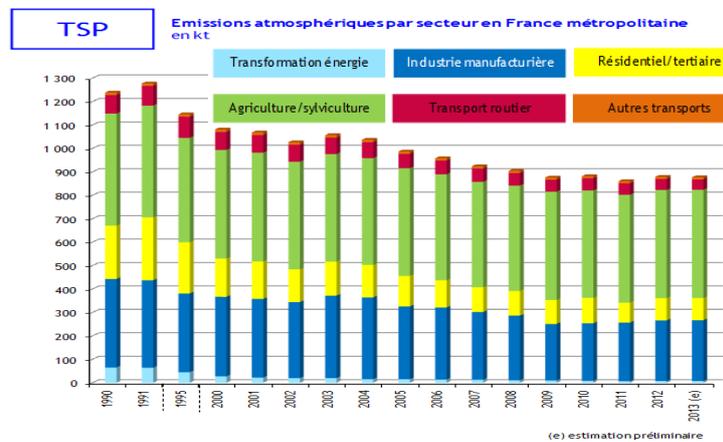


Figure 2 : Origine des particules en suspension [4]

De manière générale, le terme « aérosol » est employé pour désigner des particules en suspension dans un gaz dont la taille (diamètre aérodynamique) est inférieure à 100 μm . En effet, elles sont assimilables à des particules sphériques et sont classifiables en deux grandes familles, selon leur impact sur la santé humaine : les particules non respirables de diamètre aérodynamique de 10 à 100 μm et les particules respirables de diamètre aérodynamique inférieur à 10 μm . Parmi les particules inférieures à 10 μm , trois catégories existent (Figure 3) :

- les particules grossières de 10 μm à 2,5 μm dites PM_{10} ,
- les particules fines de diamètre inférieur à 2,5 μm dites $\text{PM}_{2,5}$,
- les particules ultrafines de diamètre inférieur à 0,1 μm dites $\text{PM}_{0,1}$.

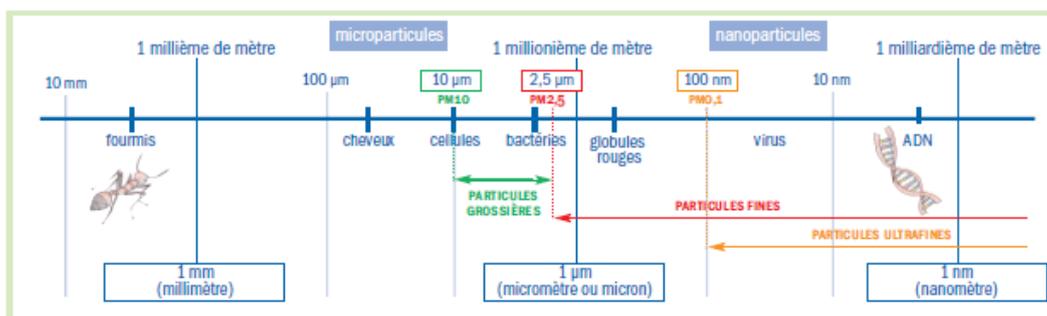


Figure 3 : Echelle des aérosols [2]

I-1-b) L'impact des particules

Les particules ont des effets connus à la fois sur l'environnement et sur la santé. D'un point de vue environnemental, elles peuvent, par déposition, entraîner la dégradation de matériaux ou contrarier la photosynthèse de certaines plantes. De plus, il est aisément observable, dans les grandes agglomérations, que les particules en suspension ont tendance à réduire la visibilité et qu'elles ont des conséquences sur le climat en absorbant ou en diffusant la lumière.

En plus des conséquences environnementales, les particules ont un impact sur la santé, notamment en se déposant dans l'appareil respiratoire [3]. Celles de plus de 10 μm vont se déposer par impaction sur le nez et la gorge, mais ne pourront atteindre les voies respiratoires inférieures. Par contre, les PM_{10} vont être inhalées par l'organisme et pénétrer selon leur taille plus ou moins profondément dans l'appareil respiratoire [5]. Pour les particules inférieures à 5 μm , le phénomène de sédimentation va intervenir et ces particules vont se déposer dans les alvéoles et la trachée. Cependant, la sédimentation n'influe pas sur les particules de moins de 0,5 μm de diamètre. Les $\text{PM}_{2,5}$ pénètrent profondément dans les poumons jusque dans la région trachéo-bronchique, dans les alvéoles et peuvent aussi passer dans le sang.

Cette intrusion de corps étrangers dans l'organisme peut entraîner des inflammations, des problèmes respiratoires [6] et cardiaques ou occasionner l'entrée d'éléments cancérigènes. Pour prévenir ces conséquences, les normes antipollution deviennent de plus en plus restrictives. De ce fait, les industriels doivent développer des procédés de filtration de plus en plus performants.

I-2) Les systèmes de filtration

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

- les filtres humides, qui regroupent les laveurs venturis, les épurateurs centrifuges, les électrofiltres humides...

- les filtres secs, comme par exemple les filtres céramiques, les filtres à haute efficacité (HEPA) ou encore les précipitateurs électrostatiques secs, objet de cette thèse [7]–[9].

Historiquement, vers 600 av. J.C., le savant Thalès découvrit que l’ambre jaune (dont le nom grec est elektron) possède la propriété d’attirer les corps légers une fois frottée. En 1600, W. Gilbert met en évidence que d’autres matériaux (verre, résine) possèdent également cette capacité d’attraction. Ce phénomène sera nommé électricité statique. C. A. Coulomb définit en 1785 les premières lois d’interaction électrostatique.

Utilisant ces avancées scientifiques, O. Lodge élabore, en 1883, le concept de précipitateur électrostatique (ESP, pour ElectroStatic Precipitator), encore appelé électrofiltre. Il réalise ainsi les premières expériences de collecte de particules. Cependant, les connaissances scientifiques dans le domaine des hautes tensions étaient insuffisantes et ont conduit à des échecs. Il faudra attendre 1907 et l’avènement des hautes tensions pour que F. G. Cottrell développe un collecteur de brumes acides. Le succès de cet électrofiltre a conduit à son expansion et à son utilisation jusqu’à nos jours, dans des domaines très variés et pour des sources de pollution diverses.

Au cours de ces siècles, divers précipitateurs électrostatiques ont été développés. Il s’agit d’appareils constitués d’une électrode émissive alimentée en tension et d’une électrode collectrice connectée à la masse. Ces électrofiltres peuvent présenter différentes géométries, dont les plus classiques sont de type : plan / plan, fil / plan ou encore fil / cylindre (Figure 4 - Figure 5). Ils peuvent être qualifiés selon :

- le mode d’ionisation / collecte : d’électrofiltre à un ou deux étages (Figure 5),
- le mode de nettoyage : d’électrofiltre sec ou humide (Figure 6).

Les électrofiltres sont dits à un étage lorsque l’ionisation et la collecte des particules se réalisent dans la même zone, et à deux étages lorsque la zone d’ionisation est suivie par une zone de collecte sans décharge. Il est à noter que les électrofiltres à un étage sont souvent utilisés dans le domaine industriel, alors que ceux à deux étages sont plutôt pour des applications à échelles plus réduites.

Dans un électrofiltre humide, la récupération des poussières collectées se fait en faisant couler un liquide de manière continue ou périodique sur les électrodes. Cela permet

d'éliminer les polluants gazeux en évitant la formation de décharges électriques particulièrement pénalisantes dans le fonctionnement de l'ESP, appelées « back corona » [10]. Nous reparlerons largement par la suite de ce type de décharges. L'inconvénient d'un électrofiltre humide est la génération d'un déchet secondaire (liquide contaminé) à traiter, mais aussi une température limite d'utilisation de 90°C, pour éviter une vaporisation rapide de l'eau.

En revanche, les électrofiltres secs sont nettoyés en faisant tomber les poussières collectées par des vibrations (corne de brume, ultrason) ou encore par percussions et frappages répétés de l'électrode collectrice.

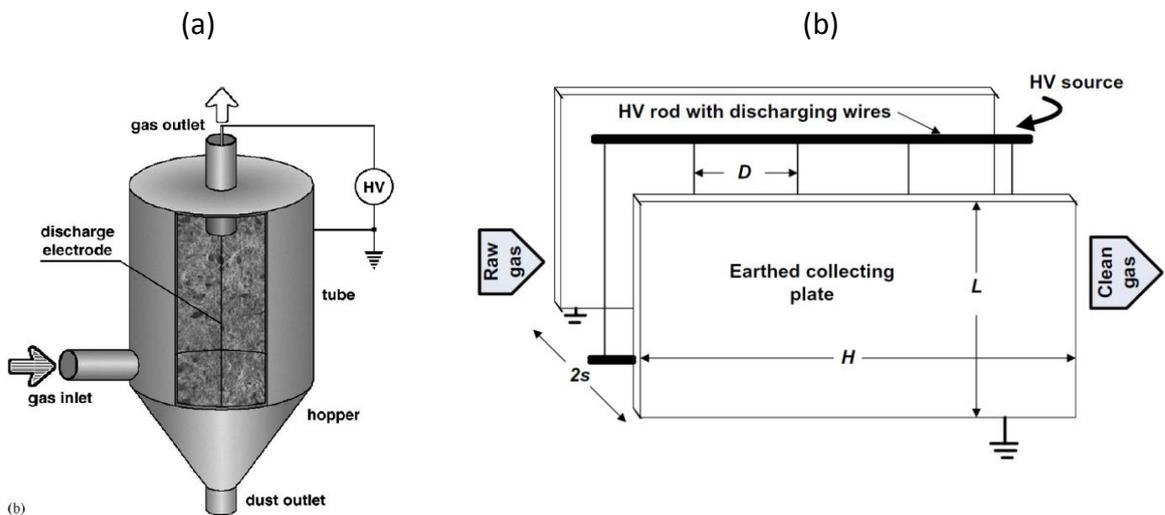


Figure 4 : Electrofiltres classiques à un étage : (a) fil / cylindre [11] et (b) fil / plan [12]

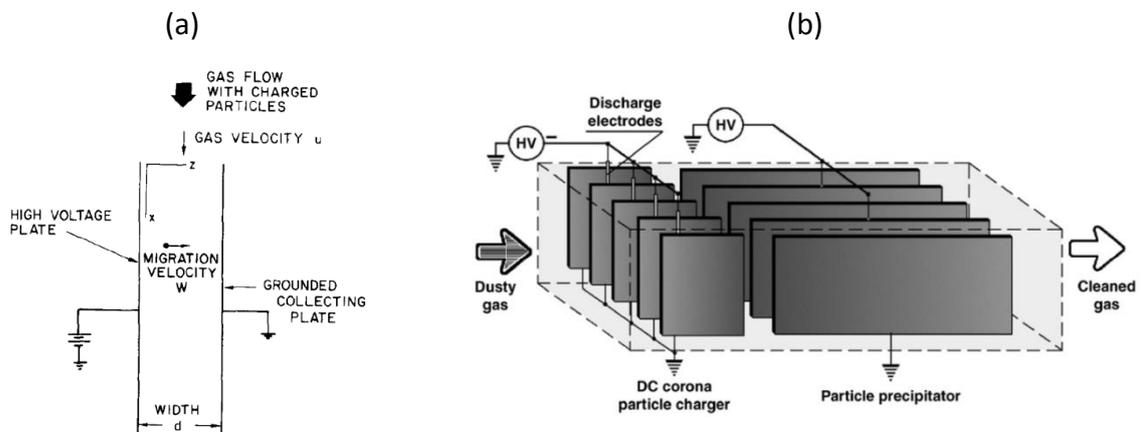


Figure 5 : Electrofiltre de type plan / plan : (a) à un étage [13] et (b) à deux étages [11]

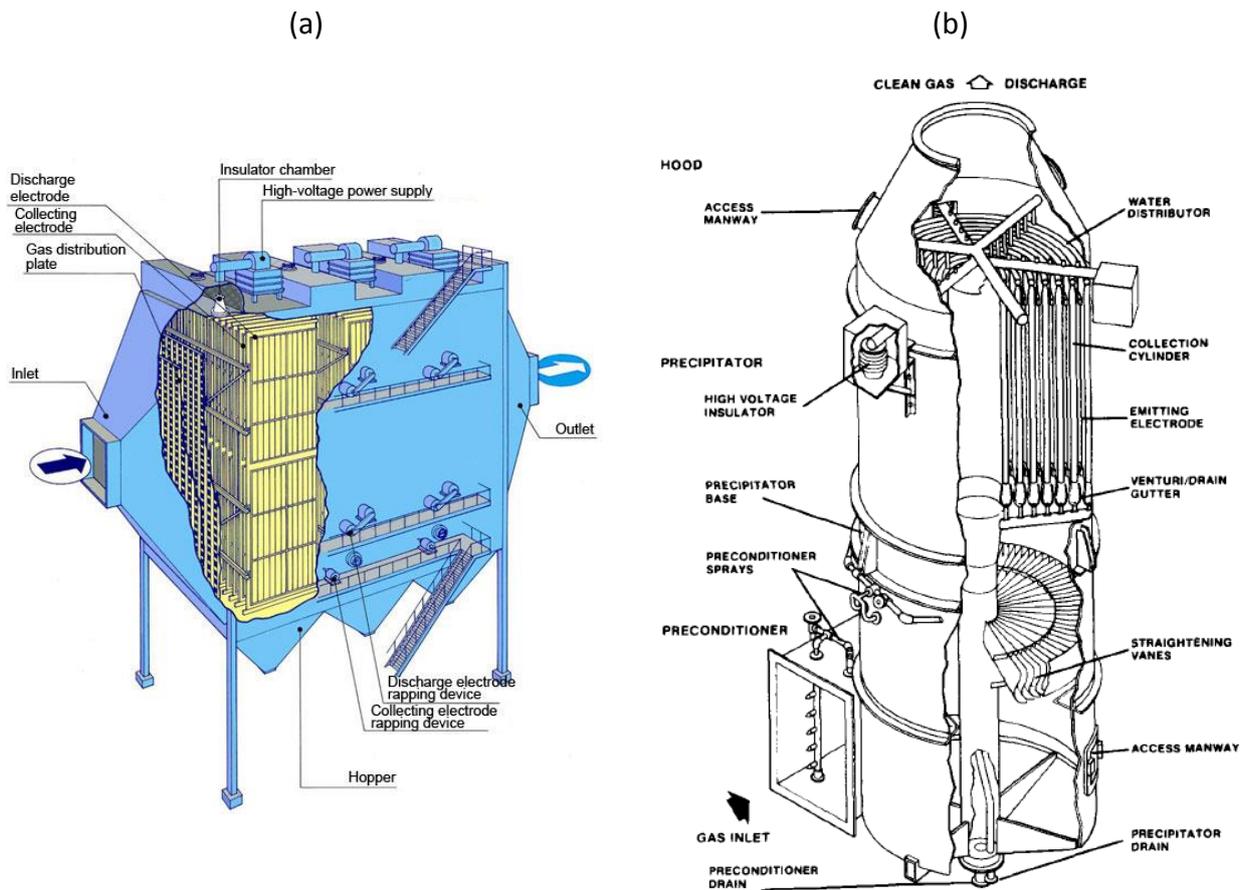


Figure 6 : Electrofiltres : (a) sec [14] et (b) humide [15]

Les recherches réalisées dans le domaine de la filtration électrostatique ont abouti au développement de géométries de plus en plus complexes. Certains chercheurs [16]–[18] travaillent, par exemple, sur des électrofiltres dits par décharges à barrière diélectrique (DBD) [19]–[23]. Cela consiste à interposer un matériau diélectrique entre les deux électrodes, afin de limiter la formation d’arcs électriques néfastes au fonctionnement (Figure 7-a).

Dans la même idée, des travaux portent sur des électrofiltres recouverts d’une surface super-hydrophobe [24] ou encore de carbone [25], qui permettent d’améliorer leurs performances.

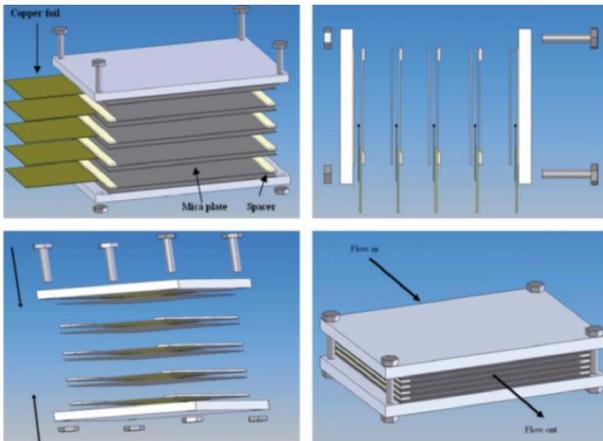
D’autres études consistent à utiliser des ondes acoustiques couplées au champ électrique afin d’optimiser l’élimination des particules fines. Ce procédé n’influence pas la caractéristique courant / tension des décharges électriques mises en jeu, mais va modifier la trajectoire des particules en favorisant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

[26], [27] (Figure 7-d). Certains chercheurs ont opté pour l'ajout d'un champ magnétique qui favorise la collecte des particules submicroniques [28] (Figure 7-c).

Dans un souci constant d'améliorer les précipitateurs électrostatiques, des études ont également porté sur la géométrie des électrodes. Par exemple, il est envisageable de modifier l'espacement entre les plans [29], d'ajouter des pointes sur l'électrode émissive [30], ou de modifier le nombre de pointes (Figure 7-b) [31].

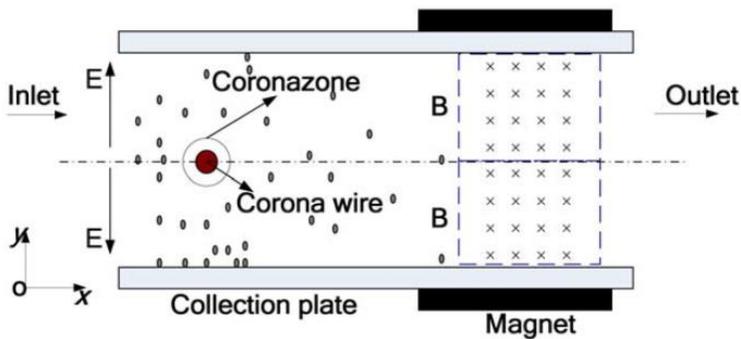
(a)

ESP avec des DBD [17]



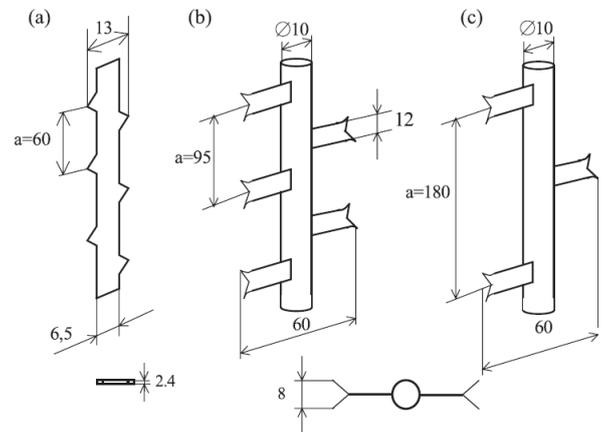
(c)

Champ magnétique couplé à l'électrofiltre [28]



(b)

Electrode émissive [31]



(d)

Ondes acoustiques ajoutées à l'ESP [26].

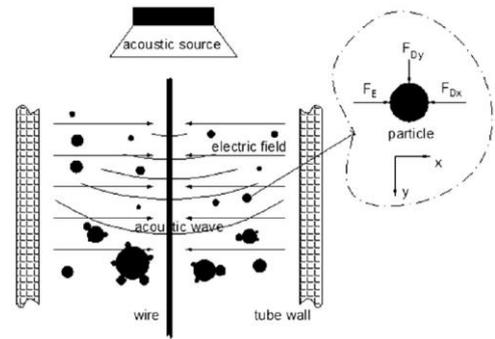


Figure 7 : Différentes géométries d'électrofiltres améliorées

II) Principes physico-chimiques de fonctionnement des ESP

Le principe de base du fonctionnement d'un électrofiltre est relativement aisé à comprendre. Il consiste à charger des particules de poussières, initialement neutres, présentes dans un effluent gazeux, puis à les récupérer par collecte pour, in fine, libérer un gaz purifié. Derrière cette explication simplifiée, se cachent de nombreux phénomènes physico-chimiques.

Tout d'abord, l'électrode émissive, connectée à une alimentation en tension, génère un champ électrique suffisamment élevé pour initier une décharge électrique dans l'intervalle inter-électrodes [32]. La géométrie favorisant la formation d'un nombre important de charges et limitant le passage à l'arc sera privilégiée, ce qui explique l'utilisation de décharges électriques de polarité négative.

Les charges créées dans le gaz vont ainsi être transférées aux particules de poussières en suspension [33], [34]. Sous l'effet des forces électrostatiques, les particules chargées de même polarité que l'électrode émissive vont dériver vers l'électrode de collecte reliée à la masse. Dans le cas idéal, le gaz dépourvu de poussières sort « dépollué ». Les poussières amassées sur l'électrode collectrice sont récupérées en frappant (filtre sec) ou en faisant couler un liquide (filtre humide).

Selon K. R. Parker [35], le transport et la dérive de ces particules sont gouvernés par de nombreux phénomènes physico-chimiques interconnectés (Figure 8). Hormis l'influence des particules, tous ces paramètres et leurs interactions physico-chimiques dépendent de la géométrie de l'électrofiltre.

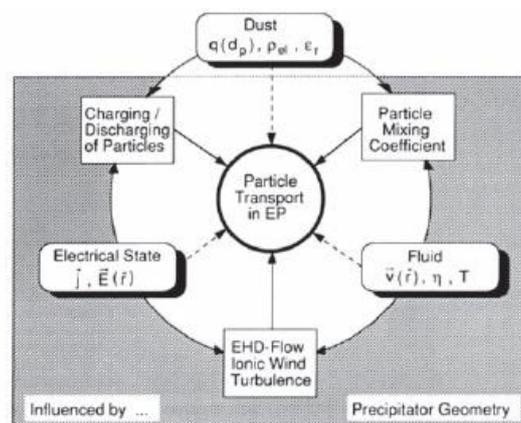


Figure 8 : Paramètres influençant le fonctionnement des électrofiltres [35]

II-1) Les mécanismes de charge des particules

Il existe différents mécanismes intervenant dans la charge des particules. Une particule peut se charger naturellement par attachement des ions (positifs et négatifs) créés par les rayonnements ionisants se trouvant tout autour de nous, que ce soient des rayonnements cosmiques naturels ou ceux créés par l'homme. Elles peuvent aussi se charger par triboélectrisation, phénomène électrostatique consistant en un transfert de charges par contact entre deux particules possédant des structures électroniques différentes. Ce phénomène dépend de l'affinité ou électronégativité des matériaux (série triboélectrique), de leur nature et des surfaces en contact [36]. Ce mécanisme permet à une particule de se charger positivement et à l'autre négativement.

Dans le fonctionnement d'un précipitateur électrostatique, ces deux mécanismes de charges sont secondaires. Un autre est utilisé ; il s'agit de la charge des particules à partir d'une charge d'espace ionique d'origine électrique [10], [33]–[35], [37]. Ce processus fait intervenir trois phénomènes à savoir : la charge par champ, la charge par diffusion, et la charge mixte (combinaison de la charge par diffusion et par champ). Il consiste en l'interaction des particules avec les ions générés dans l'espace inter-électrodes par une décharge électrique. Il va donc dépendre de l'intensité du champ électrique et de la densité d'ions créée.

Les mécanismes de charge des particules en suspension dans l'air et les effets de saturation ont fait l'objet de nombreuses études qui ont abouti à l'établissement d'expressions théoriques valables pour le cas simplifié de particules sphériques. D'autres hypothèses non-invalidantes sont également utilisées, à savoir que toutes les particules de la même taille vont avoir le même degré de charge et que les particules sont suffisamment éloignées les unes des autres pour que leurs interactions soient négligées. Cependant, dans la réalité, les particules ne se chargent pas de manière uniforme dans un ESP [38]. Certaines vont adsorber plus de charges que d'autres. Ainsi, considérer que les particules ont le même degré de charge est une hypothèse qui surestime le fonctionnement de l'ESP.

II-1-a) La charge par champ

Il s'agit du mécanisme prépondérant dans un ESP qui se produit par attachement ionique grâce au champ électrique extérieur. Ce mécanisme concerne, selon White [10], les particules dont le diamètre est supérieur à $0,5 \mu\text{m}$, bien que certains auteurs proposent une limite à $1 \mu\text{m}$ [35], [39].

Lorsque la particule se charge dans l'électrofiltre, le champ électrique créé va engendrer une distorsion locale du champ électrique externe (Figure 9). Il en résulte une concentration des lignes de champ au voisinage de la particule et une augmentation du champ électrique sur sa surface. La distorsion du champ électrique dépend de la nature de la particule et plus précisément de sa résistivité et de sa permittivité relative [10]. Les lignes en tiret, visibles sur la Figure 9, illustrent la limite de champ passant à travers la particule. Tout ion circulant dans les limites imposées par les lignes de champ va entrer en collision avec la particule et lui transférer sa charge. Chaque nouvel ion adhérent à la particule va modifier localement le champ électrique, générant ainsi un champ de répulsion qui va croître avec le nombre d'ions captés. Ce processus se reproduit tant que la force radiale de répulsion créée par les charges cumulées sur la particule ne dépasse pas la force électrostatique causée par le champ électrique extérieur [40].

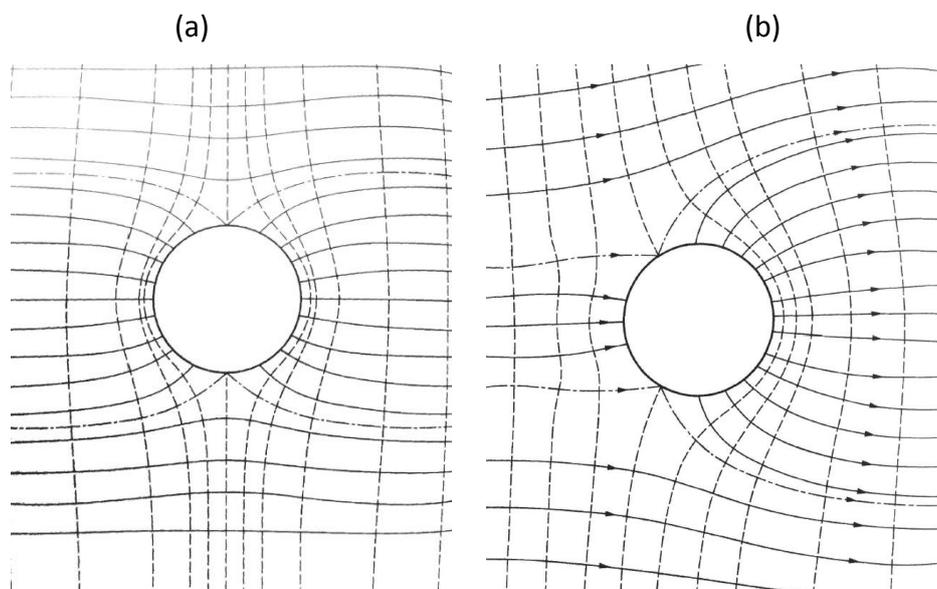


Figure 9 : Répartition de lignes équipotentiels dans un champ électrique uniforme (a) pour une particule sphérique conductrice et (b) pour une particule sphérique conductrice partiellement chargée [10]

Lorsque la particule aura acquis la quantité de charges maximale notée q_s et appelée charge de saturation, le champ généré va s'opposer à l'adhésion de nouveaux ions et les lignes de champ vont contourner la particule [10], [41].

Notons que la quantité de charges adsorbée par une particule en suspension dans l'air dépend de la taille de la particule [10], [42], de sa charge initiale, de la durée d'interaction et de la densité de charges d'espaces.

L'équation de Pauthenier (1.1), reprise et reformulée dans de nombreux ouvrages, donne la charge par champ $q(t)$ d'une particule sphérique [10], [31], [33], [37], [39]–[41], [43], [44].

$$q(t) = q_s \cdot \frac{t}{t + \tau} \quad (1.1)$$

$$q_s = \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{3 \cdot \epsilon_r}{\epsilon_r + 2} \cdot d_p^2 \cdot E$$

Pour une particule conductrice ($\epsilon_r \rightarrow \infty$) (1.2)

$$\text{donc } q_s = 3 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E$$

$$\tau = 4 \cdot \frac{\epsilon_0}{\rho_i \cdot \mu_i} = 4 \cdot \frac{\epsilon_0}{e \cdot n_i \cdot \mu_i} = 4 \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot E}{J} \quad (1.3)$$

Avec : q : la charge de la particule (C), q_s : la charge de saturation (C), t : temps de charge (s), τ : constante de temps de charge par champ (s), ϵ_0 : la permittivité du vide ($\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m), ϵ_r : la permittivité relative, d_p : le diamètre de la particule (m), E : champ électrique (V/m), J : la densité de courant (A/m^2), ρ_i : la densité de charges (C/m^3), μ_i : mobilité des ions ($m^2/V.s$), e : charge électronique ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C) ; n_i : la concentration des ions dans l'espace (m^{-3}).

II-1-b) La charge par diffusion

La charge par diffusion est liée aux collisions entre les particules et les ions de l'air animés d'un mouvement Brownien due à l'agitation thermique. Ce processus est indépendant du champ électrique. L'agitation thermique va permettre aux ions d'acquérir une énergie suffisante pour vaincre la force de répulsion de Coulomb, leur permettant ainsi d'atteindre la particule et d'être captés [40]. Plus la répulsion va augmenter, en raison de la charge accumulée sur la particule, plus la probabilité qu'un ion soit capté par la particule va diminuer. Ce mécanisme de charge est prépondérant pour les petites particules. Selon White [10], ce processus est valable pour des particules de diamètre inférieur à 0,2 μm et de 0,1 μm selon Parker [35].

White [10] a défini une équation (1.4) qui a été largement reprise [34], [37], [41], [43]. Elle détermine le nombre total de charges accumulées sur une particule, à un instant t , après un chargement par diffusion, en supposant que tous les ions frappant une particule sont capturés.

$$q(t) = q^* \ln\left(1 + \frac{t}{\tau^*}\right) \quad (1.4)$$

$$q^* = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot d_p \cdot k_B \cdot T}{e} \quad (1.5)$$

$$\tau^* = \frac{8 \cdot \varepsilon_0 \cdot k_B \cdot T}{d_p \cdot C_i \cdot n_i \cdot e^2} \quad (1.6)$$

Avec : q^* : la constante de charge par diffusion (C), τ^* : constante de temps de charge par diffusion (s), k_B : la constante de Boltzmann (J/K), T : la température (K), C_i : la moyenne quadratique de la vitesse des ions (m/s).

II-1-c) La charge mixte

Dans le processus de charge mixte, les deux mécanismes de charge interviennent simultanément pour les particules de taille intermédiaire comprise entre 0,2 μm et 1 μm

[10]. Sudrajad [41] propose d'utiliser la méthode développée par Cochet [45] qui a posé comme hypothèse que, si le temps est infini, la charge collectée est la même pour toutes les particules de taille identique.

$$q = \left\{ \left(1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + 2 \cdot \frac{\lambda}{d_p}} \right) \cdot \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \cdot \pi \epsilon_0 \cdot d_p^2 \cdot E \quad (1.7)$$

Avec : λ : le libre parcours moyen des molécules d'air (m).

Un autre modèle numérique a été introduit par Lawless [46] qui a modifié les travaux préexistants afin d'aboutir à des relations simplifiées prenant en compte ces deux modes de charge [33], [37].

D'autres modèles de charge existent également dans la littérature. Certains utilisent le nombre de Knudsen, $K_n = \frac{\lambda}{r_p}$, avec r_p : le rayon de la particule (m), qui permet de définir différents régimes d'écoulement en termes de continuité : régime de molécule libre ($K_n \gg 10$), régime de transition ($0,1 \leq K_n \leq 10$), régime continu ($K_n \leq 0,1$) [47]. Selon le régime, divers processus de charge par champ et par diffusion existent [33].

II-2) Les forces

Les particules en suspension dans le gaz sont soumises à différentes forces, qui vont permettre la migration ou la cohésion des poussières. Les forces principales agissant sur une particule sont représentées sur la Figure 10 et notifiées dans le Tableau 1. C'est la force électrostatique de Coulomb qui est responsable de la migration des particules chargées vers l'électrode de collecte [10], [31].

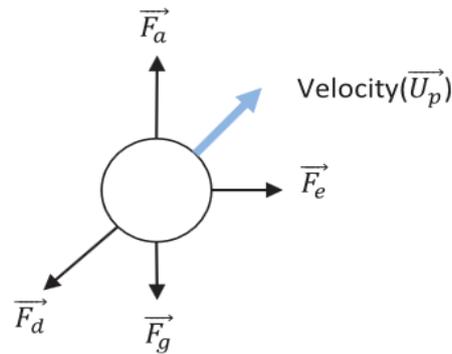


Figure 10 : Forces agissant sur une particule [44]

Tableau 1 : Forces agissant sur une particule [10], [37], [44], [48]

La force électrostatique	$\vec{F}_e = q_s \vec{E}$	(1.8)
La force d'Archimède	$\vec{F}_a = -\rho_g \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r_p^3}{3} \cdot \vec{g}$	(1.9)
La force de pesanteur	$\vec{F}_g = -m_p \cdot \vec{g}$	(1.10)
La force de trainée	$\vec{F}_d = -3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p \cdot \vec{w}$	(1.11)
	$\vec{F}_d = -3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p \cdot \left(\frac{1}{Cu}\right) \cdot \vec{w}$ (si $Re \ll 1$ et $d_p < 20 \mu\text{m}$)	(1.12)
	Facteur de Cunningham : $Cu = 1 + 1,246 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} \cdot \exp(-0,87 \cdot \frac{d_p}{2 \cdot \lambda})$ si $Re \ll 1$ et $d_p < 20 \mu\text{m}$ Coefficient de trainée : $C_w = \frac{24}{Re}$ Nombre de Reynolds : $Re = \frac{d_p \cdot \vec{w}}{v_g}$	(1.13)

Avec : \vec{w} : la vitesse de la particule (m/s), η_g : viscosité dynamique du gaz (Pa/s), v_g : viscosité cinématique du gaz (m^2/s), ρ_g : masse volumique du gaz (kg/m^3), \vec{g} : accélération (m/s^2), m_p : masse de la particule (g).

II-3) Migration des particules chargées

Les mouvements des particules à l'intérieur d'un précipitateur électrostatique sont définis par l'équilibre des forces (1.8), mais seules les forces de trainée et électrostatique sont prises en compte, les autres étant négligeables [48]. Une particule en suspension dans un gaz, dont l'écoulement laminaire est de vitesse \vec{U}_g , est animée d'une vitesse \vec{w} .

$$\vec{F}_e + \vec{F}_d = m_p \cdot \frac{d\vec{w}}{dt} \Rightarrow q_s \cdot E - \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p \cdot w}{Cu} = m_p \cdot \frac{d\vec{w}}{dt} \quad (1.14)$$

En considérant comme condition initiale $w(t=0) = 0$, la solution de l'équation ci-dessus donne la vitesse effective de migration $w(t)$ au cours du temps (1.9) [33], [35].

$$w(t) = w_{th} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) \right] \quad (1.15)$$

avec w_{th} la vitesse théorique de migration

$$w_{th} = \frac{q_s \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p} \cdot Cu \quad (1.16)$$

et τ_p le temps de relaxation de la particule

$$\tau_p = \frac{m_p \cdot Cu}{3 \cdot \pi \cdot \eta_g \cdot d_p} = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot Cu}{18 \cdot \eta_g} \quad (1.17)$$

Le temps de relaxation de la particule définit son comportement transitoire, jusqu'à ce qu'elle atteigne la vitesse théorique. Cette vitesse de migration des particules dépend de nombreux paramètres tels que :

- les caractéristiques des poussières (composition chimique, résistivité, taille, densité),
- les caractéristiques du gaz (composition, pression, température),
- la géométrie de l'ESP : dimensions de l'électrode émissive, forme de l'électrode de collecte, etc... [49].

Notons que cette vitesse peut être réduite de 20 % à 30 % par rapport aux conditions normales, sous l'effet des back corona [50].

Ce paramètre est tout aussi important que la charge des particules dans le fonctionnement d'un ESP [51]. Si cette vitesse est faible, le transport des particules vers l'électrode de collecte va diminuer et donc l'efficacité de filtration sera moindre.

II-4) Écoulement dans un électrofiltre

L'écoulement des gaz peut également influencer les performances globales du précipitateur électrostatique [10]. Les écoulements peuvent être laminaires ou turbulents et sont respectivement régis par une loi algébrique et une loi de probabilité exponentielle.

II-4-a) L'écoulement laminaire

Un écoulement est dit laminaire lorsqu'il se fait de manière parallèle. Dans un ESP, l'écoulement est donc laminaire lorsque les particules suivent une trajectoire déterminée uniquement par le flux gazeux et le champ électrique [10], [34], [35].

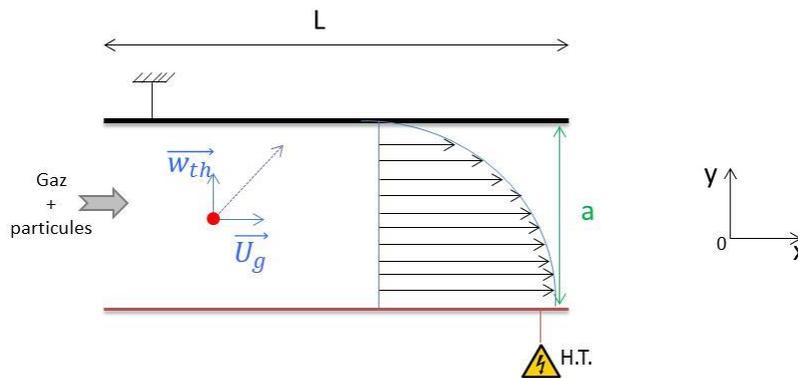


Figure 11 : Ecoulement laminaire [35]

Dans un électrofiltre, une particule chargée va parcourir une distance $L = \overline{U}_g \cdot \frac{a}{w_{th}}$ durant un temps $t = \frac{a}{w_{th}}$ dans l'effluent gazeux avant d'être collectée (a : la distance séparant la particule de l'électrode de collecte et \overline{U}_g : la vitesse moyenne du gaz). Le taux d'efficacité η est défini par [35] (1.12).

$$\eta = \frac{w_{th} \cdot L}{U_g \cdot a} \quad (1.18)$$

Les écoulements laminaires se produisent pour un nombre de Reynolds faible et il est admis que les particules en suspension ont toutes la même charge électrique. Cependant, ce type d'écoulement concerne peu d'ESP, en raison des géométries de plus en plus complexes.

II-4-b) L'écoulement turbulent

Lorsque le gaz qui s'écoule à travers le filtre est soumis à des perturbations, des mouvements de convections et à des tourbillons, l'écoulement est alors qualifié de turbulent. Ce type d'écoulement est le plus présent dans les ESP. En plus des forces électriques, s'exercent, sur les particules, des forces de convection qui modifient leur charge et leur collecte. L'écoulement sera dit turbulent pour un nombre de Reynolds élevé.

A partir des travaux d'Anderson, indiquant qu'à la sortie d'un précipitateur électrostatique il y a une décroissance exponentielle du nombre de particules en fonction de la longueur, Deutsch [52] a établi une relation entre l'efficacité de filtration et les dimensions du filtre. Développé en 1922, puis largement étudié et critiqué durant de nombreuses années [13], [53], [54], ce modèle fut l'un des premiers exploité sur le transport convectif de particules. Il distingue deux zones dans l'ESP :

- le cœur, où la densité des particules est uniforme pour chaque section transversale et l'écoulement de masse est turbulent avec une vitesse moyenne \overline{U}_g ,
- les couches limites (bords de l'électrode de collecte) d'épaisseur δ où l'écoulement des gaz est considéré comme laminaire et les forces de Coulomb efficaces.

Considérer que la densité particulaire est uniforme signifie que la diffusion turbulente est infiniment grande dans le cœur du précipitateur. Par conséquent, la collecte des particules ne se produira que si elle entre dans la couche limite δ où l'écoulement est laminaire [10], [33], [48].

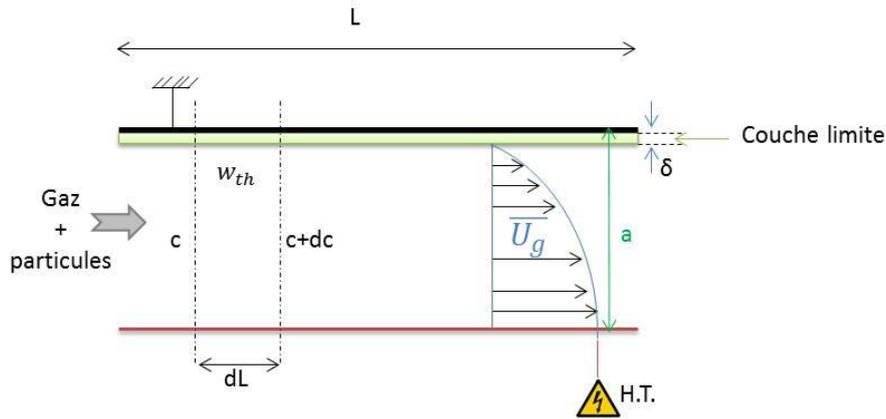


Figure 12 : Ecoulement turbulent - Modèle de Deutsch [35]

L'équation de Deutsch-Anderson (1.13) est obtenue par intégration sur toute la longueur L du filtre à partir d'un bilan de matière, avec S la surface de la coupe transversale du collecteur et D_g le débit volumique du gaz [35]. Notons que ce modèle ne prend pas en considération les phénomènes susceptibles de diminuer l'efficacité de filtration η_T .

$$\eta_T = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th}L}{aU_g}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{w_{th}S}{D_g}\right) \quad (1.19)$$

Notons également que ces modèles d'efficacité sont des solutions analytiques de l'équation de diffusion. Le modèle laminaire correspond, par exemple, au cas où la diffusion turbulente D_t est nulle et le modèle de Deutsch au cas où la diffusion turbulente est infinie.

Il existe d'autres modèles utilisant l'équation de diffusion des particules, tels que celui de Leonard et al. [13] qui est plus précis que celui de Deutsch. Ce modèle correspond au cas où la diffusion turbulente est une valeur finie comprise entre : $0 < D_t < \infty$ [48] [34].

II-5) Interaction Electro-hydrodynamique

La précipitation électrostatique implique l'interaction entre un champ électrique et un flux gazeux neutre. Cette interaction est appelée électro-hydrodynamique et est définie par un nombre adimensionnel N_{EHD} (1.14) égal au rapport des forces électriques sur les forces visqueuses [31], [55].

$$N_{EHD} = \frac{J \cdot D}{\mu_i \cdot \rho_g \cdot U_g^2} \quad (1.20)$$

Avec : D : la distance entre les électrodes de collecte (m). L'énergie de la charge électrique des ions qui se déplacent dans le champ électrique est $\frac{J \cdot D}{\mu_i}$ et $\rho_g \cdot U_g^2$ est l'énergie cinétique du flux gazeux neutre.

Il est possible d'avoir, pour une même efficacité de filtration, une valeur différente du facteur N_{EHD} ; cela dépend du design de l'électrode émissive ou encore du type de poussières. Le nombre N_{EHD} ne suffit donc pas pour décrire les phénomènes occurrents dans l'espace inter-électrodes, mais est un paramètre intéressant. Selon la valeur de N_{EHD} [31], il est possible de définir si l'efficacité de précipitation est favorisée par la décharge électrique ($N_{EHD} > 1$), ou si c'est la turbulence du flux gazeux qui est le facteur contribuant ($N_{EHD} < 1$).

La présence d'un vent ionique affecte également l'efficacité de filtration en accroissant les phénomènes de turbulence et donc de diffusion [13], [56], [57]. Afin de caractériser les phénomènes EHD, il est possible d'utiliser diverses méthodes lasers (Laser Doppler [58], [59]) ou encore la méthode de caractérisation par vélocimétrie laser (PIV) [60]. De nombreux auteurs travaillent sur ce sujet, notamment par des études expérimentales et théoriques, afin de mieux comprendre les turbulences induites [61]–[64].

II-6) Les paramètres influençant les ESP et les améliorations possibles

II-6-a) Le ré-entraînement

Les propriétés physico-chimiques des poussières traitées sont d'une importance capitale. En effet, l'efficacité de filtration d'un ESP va dépendre de la résistivité des poussières traitées [10], [35]. Pour une résistivité comprise entre $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ et $3 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, l'ESP sera considéré comme étant dans des conditions optimales de fonctionnement. En revanche, une faible résistivité (inférieure à $10^2 \Omega \cdot \text{cm}$) va occasionner une décharge rapide des particules collectées et donc une baisse des forces d'adhésion à la surface de l'électrode de collecte. Ainsi, les poussières vont être ré-entraînées plus facilement, puis dériver de

nouveau dans le système occasionnant une chute de l'efficacité de filtration. Un ré-entraînement de particules collectées peut se produire par :

- l'effet de récurage de la poussière amassée sur l'électrode de collecte par l'effluent gazeux,
- le balayage de poussières suite à de mauvaises conditions d'écoulement du gaz,
- la décharge des particules récupérées sur l'électrode de collecte, qui ne sont donc plus soumises aux forces électrostatiques permettant leur adhésion.

Les particules larges et granuleuses sont plus vulnérables à ce phénomène que les particules fines [10]. Le ré-entraînement dépend de la vitesse du flux gazeux, de la cohésion des particules, du type d'écoulement, des forces électrostatiques, de la densité de courant ou encore des phénomènes de contre émission [35], [55], [65].

II-6-b) Les back corona

Si la résistivité est élevée, le phénomène de contre émission appelé back corona se développe et occasionne une chute du rendement [39], [66], [67]. Le terme de « back corona discharge » a été utilisé par H. J. White [10] pour décrire « une décharge locale à partir d'une électrode normalement passive, dans un système de décharge couronne, lorsque l'électrode est couverte d'une fine couche de poussières faiblement conductrices ».

Si les conditions d'initiation d'une décharge électrique sont réunies, il y aura alors une détérioration locale de la couche de diélectrique, qui se traduit par la formation de petits cratères, à partir desquels des décharges (back corona) ont lieu et des contre-ions sont alors émis. Ces ions vont neutraliser les particules chargées et donc diminuer l'efficacité du filtre [68], [69].

La rupture diélectrique de la couche de dépôt correspond au point de déclenchement des back corona. White a défini une résistivité limite d'apparition des back corona (1.15) couramment utilisée (de l'ordre de $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$), en considérant que :

- la majorité des poussières et des fumées sont de faibles diélectriques et ont, dans des conditions normales, une tension de claquage de l'ordre de 10 kV/cm à 20 kV/cm voire moins,

- en travaillant en laboratoire, la densité de courant maximale pouvant être obtenue dans un système de décharge couronne (détaillé par la suite) est de $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Ainsi :

$$\rho = \frac{10^4}{3 * 10^{-5}} = 3 * 10^8 \Omega.cm \quad (1.21)$$

Pour les précipitateurs de grande échelle, la densité de courant des effets couronne est faible. Elle est de l'ordre de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Par conséquent, les back corona n'apparaissent que pour des résistivités supérieures à $10^{10} \Omega.cm$.

L'apparition et la formation de back corona est un paramètre difficile à contrôler, dépendant de la tension et du courant de décharge et qui affecte considérablement l'efficacité des électrofiltres [39], [68]–[74].

La Figure 13 présente deux photographies typique de back corona sous polarité négative dans une géométrie pointe / plan (Figure 13-a) [39] et géométrie cylindrique (Figure 13-b) [75].

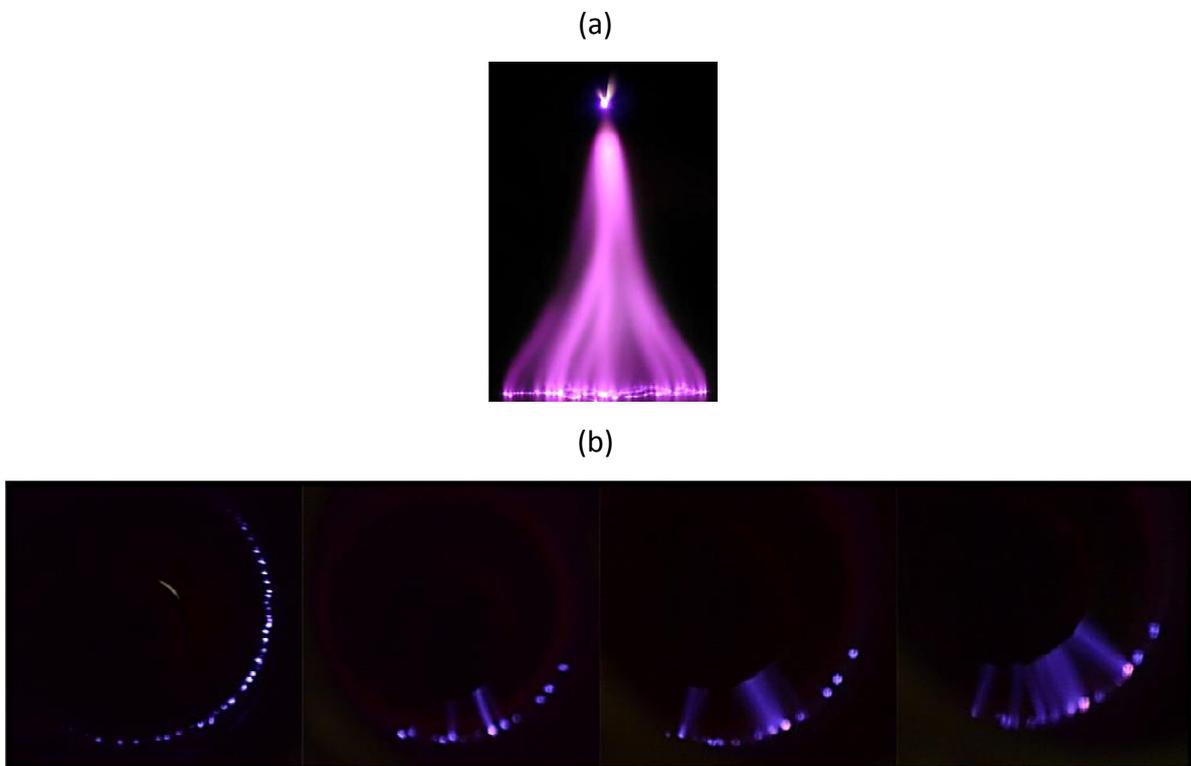


Figure 13 : Photographies de back corona

II-6-c) Les améliorations possibles

L'amélioration des performances d'un ESP peut consister à favoriser l'agglomération entre les particules en accroissant les forces de cohésion et d'adhésion qui sont assurées par différentes forces (mécaniques, électromagnétiques, gravité). L'agglomération est un procédé dans lequel des particules submicroniques vont se regrouper pour en former une plus grosse qui sera plus facilement récupérable. Plusieurs techniques d'agglomération existent comme celles utilisant des traitements chimiques. Il est aussi possible de favoriser l'adhésion à l'aide de procédés de type électrique [76]–[80] ou encore par ultrasons [26] qui vont amplifier l'agitation des particules (agitation acoustique ou par champ électrique). L'agitation permet d'augmenter les impacts et donc l'agglomération des particules.

Accroître la migration des particules vers l'électrode de collecte est également une méthode pour augmenter le rendement, qui peut se faire en renforçant le champ électrique ou en modifiant la largeur du passage ou la vitesse du gaz [81].

Les courants de décharges peuvent aussi être affectés par de nombreux paramètres tels que l'humidité relative de l'air [82], les matériaux de l'électrode ou encore les caractéristiques surfaciques [83]. Des études proposent, par exemple, pour y remédier, de conditionner le gaz en ajoutant des additifs comme du SO₃ qui est oxydant et qui absorbe l'humidité. D'autres travaux proposent de modifier la géométrie des électrodes [29]–[31], [47], [84] ou encore les matériaux utilisés.

Afin de limiter le dépôt de charges et donc la formation d'arcs électriques néfastes au fonctionnement de l'électrofiltre, des chercheurs placent des isolants sur l'électrode de collecte (DBD) afin de favoriser la répartition des micro-décharges à la surface de l'électrode de collecte [17], [18], [85].

Bien évidemment, en plus de toutes ces modifications, les paramètres électriques et la température sont à prendre en considération. L'amélioration d'un ESP peut se faire également en travaillant sur la tenue thermique et électrique des composants de l'ESP qui sont soumis à des conditions extrêmes : poussières, température, électricité (utilisation de matériaux céramiques et composites par exemple).

Nous venons de voir que de multiples paramètres, intervenant dans le fonctionnement d'un précipitateur électrostatique, peuvent influencer sur son efficacité. Il est encore possible de favoriser le processus de charge des particules en utilisant de fortes puissances pulsées

afin de promouvoir l'ionisation et la charge [30], [86]–[88], ou bien d'utiliser des réacteurs multi-étages qui vont allonger le temps de résidence des particules et augmenter la probabilité de charge et de collecte des petites particules [89].

Ces nombreux phénomènes physico-chimiques intervenant dans un ESP sont donc liés les uns aux autres et vont affecter son fonctionnement.

III) La décharge électrique

III-1) Un peu d'histoire

Les recherches scientifiques sur les décharges électriques ont débuté au XVIII^{ème} siècle avec l'étude d'étincelles obtenues par des générateurs électrostatiques. En 1803, V. V. Petrov a produit le premier arc électrique, qui fut ensuite étudié par H. Davy. Puis, entre 1831 et 1835, c'est M. Faraday qui découvre et étudie les décharges luminescentes à l'aide de tubes sous tension contenant des gaz sous pression.

A la fin du XIX^{ème} siècle et début XX^{ème} siècle, W. Crookes et Thomson font des progrès notoires dans le domaine de la physique atomique. Ils mettent en évidence l'importance des électrons dans la décharge électrique.

En 1900, Townsend, qui est un élève de Thomson, réalise la première modélisation d'une décharge luminescente en champ uniforme. La théorie de Townsend constitue le mécanisme de base de toute décharge électrique et décrit le principe de l'avalanche électronique.

Langmuir et Tonks ont utilisé, en 1923, le terme d'origine grec « plasma » signifiant « former ». Un plasma est un gaz ionisé qui résulte de la création de charges dans le gaz. Un courant va donc circuler d'une électrode à l'autre, créant un canal plus ou moins conducteur dans le milieu isolant (gaz), appelé décharge électrique. La décharge dépend de nombreux paramètres liés notamment :

- aux électrodes : dimensions, forme, matériaux, distance inter-électrodes [90],
- au gaz : pression, composition, température, humidité,
- au potentiel: polarité, valeur, forme (continu, pulsé, alternatif).

III-2) Mécanismes de création et de pertes des particules chargées

Le comportement du gaz sous l'effet du champ électrique est lié à la production de porteurs de charge dans le volume et au niveau de l'électrode. Le développement de la décharge électrique va s'accompagner de la création et du mouvement de charges.

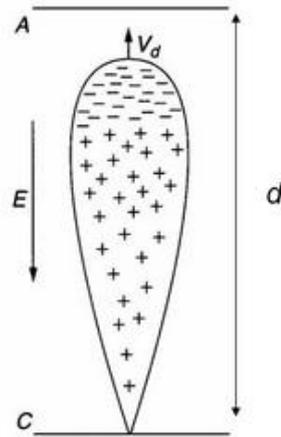
La présence du rayonnement cosmique, de la radioactivité naturelle et des effets photoélectriques sont des sources externes naturelles qui apportent de l'énergie au système pour permettre la création d'électrons germes susceptibles d'initier l'ionisation du gaz.

Si un champ électrique est appliqué, les électrons, dont la mobilité est largement supérieure à celle des ions, vont acquérir une vitesse d'ensemble et donc de l'énergie. Le gaz va être le siège de collisions entre les particules neutres du gaz et les électrons.

Lorsque les électrons ont acquis suffisamment d'énergie dans le champ électrique, les collisions deviennent ionisantes, créant par conséquent de nouveaux électrons. Cette multiplication électronique en cascade par collisions ionisantes successives est le principe de l'avalanche électronique de Townsend. L'avalanche électronique de Townsend est le processus d'ionisation du gaz à la base de toute décharge électrique. Il y a un accroissement exponentiel de la densité de charges électroniques.

Il est possible de quantifier à l'aide des coefficients de Townsend α et γ le nombre de charges créées. L'électron, en parcourant la distance « d », va créer $\exp^{\alpha d}$ électrons et $(\exp^{\alpha d} - 1)$ ions positifs. Les ions créés dans l'avalanche peuvent, avec une énergie suffisante, arracher à la cathode : $\gamma(\exp^{\alpha d} - 1)$ électrons. Le coefficient d'ionisation α définit le nombre d'électrons créés par ionisation par un électron sur une distance de 1 cm et le second coefficient γ définit le nombre d'électrons secondaires émis par le bombardement ionique sur la cathode.

Cependant la théorie de Townsend n'est valable que pour des valeurs du produit pression-distance ($P \cdot d$) inférieur à $8 \cdot 10^{-2}$ bar.mm, il s'agit alors de décharges dites basse pression.



Critère de Townsend :
condition d'auto entretien

$$\gamma (\exp^{\alpha d} - 1) = 1$$

Figure 14 : Multiplication électronique en cascade [91]

Lorsque le produit pression-distance augmente ($P \cdot d > 8 \cdot 10^{-2}$ bar.mm), les ions accumulés dans l'espace inter-électrodes par l'avalanche électronique créent un champ de charge d'espace (E_c) non négligeable devant le champ électrique appliqué (E_a). Un nouveau mécanisme de charge basé sur celui de Townsend appelé « mécanisme de streamer » a donc été proposé. Celui-ci montre, qu'à la tête de l'avalanche, un champ local combinant le champ appliqué et le champ de charge d'espace va initier des phénomènes d'ionisation qui vont conduire au développement d'avalanches secondaires. Ces nouvelles charges d'espace permettent aux phénomènes de se reproduire et, en raison de cette forte multiplication, l'avalanche se transforme en streamer. Le streamer se propage grâce aux inhomogénéités du champ et la vitesse de propagation des streamers positifs et négatifs est élevée ($\approx 10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ à la pression atmosphérique). Nous obtenons une onde d'ionisation qui se propage sous l'effet de son propre champ de charge d'espace. C'est cette onde d'ionisation qui est appelée streamer.

En plus des mécanismes d'émission cathodique, il existe différents types de processus collisionnels responsables de la propagation des streamers dans l'air à la pression atmosphérique [92] :

- le processus d'ionisation,

$$N_2 + e^- \rightarrow N_2^+ + 2 e^-$$

$$O_2 + e^- \rightarrow O_2^+ + 2 e^-$$
- le processus d'attachement,

$$O_2 + e^- \rightarrow O^- + O \text{ (attachement à deux corps)}$$

$$O_2 + e^- + M \rightarrow O_2^- + M \text{ (attachement à trois corps) } M \equiv N_2 \text{ ou } M \equiv O_2$$
- le processus de recombinaison,

$$N_4^+ + e^- \rightarrow N_2 + N_2$$
- le processus de détachement.

$$O_2^- + O_2 \rightarrow 2 O_2 + e^-$$

$$O_2^- + N_2 \rightarrow 2 O_2 + N_2 + e^-.$$

Lorsque le streamer négatif atteint l'anode et le positif la cathode, il se produit un claquage de l'espace inter-électrodes.

IV) La décharge couronne

La décharge couronne est une décharge non-homogène en milieu gazeux, à pression atmosphérique et en champ non-uniforme. Cette décharge se produit pour un champ électrique élevé, mais non-disruptif et se caractérise par une gaine lumineuse qui a donné lieu à l'expression d'effet couronne. Elle se développe, en général, depuis une électrode ayant un faible rayon de courbure. Les géométries les plus courantes sont : pointe / plan, fil / cylindre, fil / plan, sphère / plan, etc... L'espace inter-électrodes est divisible en deux zones [87] :

- une zone active d'ionisation où les charges sont créées et le champ électrique est élevé,
- une zone d'attachement et de recombinaison des électrons dans laquelle les charges dérivent dans un champ électrique plus faible que dans la zone active.

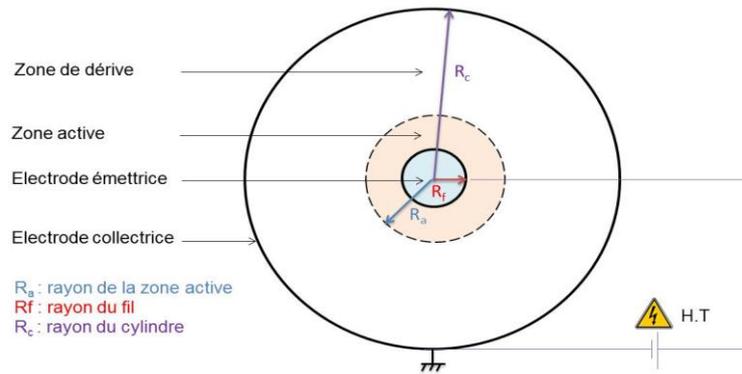


Figure 15 : Représentation schématique de la décharge couronne (géométrie fil / cylindre)

IV-1) La décharge positive

Sous polarité positive, les avalanches électroniques se forment dans la zone active et se développent vers la cathode. Les électrons se déplacent ainsi vers un champ électrique croissant. Au-delà du rayon critique, il ne reste qu'un nuage d'ions positifs. Expérimentalement, la valeur du champ de propagation d'un streamer positif dans l'air est évaluée à 5 kV/cm [93].

Il est connu que, pour une même distance inter-électrodes, la tension de claquage est plus élevée sous tension négative que sous tension positive. Par ailleurs, la quantité de charges créée sous polarité négative est supérieure à celle obtenue sous polarité positive. De ce fait, nous allons travailler, dans cette étude, sous tension négative.

IV-2) La décharge négative : le régime de Trichel

Considérons un intervalle d'air situé entre une pointe portée à la haute tension négative et un plan relié à la terre. Si le potentiel appliqué est suffisant, les électrons disponibles au voisinage de la cathode, où le champ est maximum, ionisent le gaz en progressant dans un champ décroissant. Il apparaît donc une charge d'espace positive au voisinage de la pointe (zone cathodique). Lorsque les électrons atteignent une région où la valeur du champ électrique n'est plus suffisante, ils s'attachent créant, ainsi, une zone de charge d'espace négative qui va renforcer le champ local en aval de cette position. Si de nouveaux électrons germes sont disponibles dans cette zone où le champ a été renforcé, des avalanches secondaires vont se développer et conduire à la formation d'un streamer négatif

[94]. Ce premier streamer négatif, appelé parfois « grand streamer » est émis à partir de l'extrémité de la pointe où il laisse donc des espèces chargées positivement qui vont permettre l'établissement du régime de Trichel.

Après un temps incompressible, la répartition des espèces chargées donne naissance à trois zones caractéristiques du régime de Trichel qui suit donc l'apparition de ce premier streamer :

- une zone cathodique très étroite (ions positifs), où le champ est élevé et qui joue le rôle de générateur d'électrons (émission puis multiplication significative),
- une colonne positive (neutre) dans laquelle le champ est faible et qui se comporte comme une zone tampon vis-à-vis du mouvement des charges. Du point de vue électrotechnique, nous pouvons l'assimiler à une résistance de limitation de courant du fait de la présence d'espèces chargées des deux polarités.
- une charge d'espace négative qui renforce le champ en aval de la décharge et d'où peuvent être émis des streamers si les conditions de champ sont satisfaisantes.

Du fait du mouvement permanent des charges (les positives migrent vers la pointe et les négatives s'en éloignent), les importances relatives de ces zones, et notamment celles des valeurs des champs électriques qui y sont associées, varient en fonction du temps, donnant un aspect périodique à la phénoménologie. Des basculements de champ, dus à l'alternance de phases de génération et d'absorption de charges, sont à l'origine d'impulsions de courant. Celles-ci sont décelables expérimentalement. Ces dernières se superposent à un courant continu lié au mouvement permanent des ions dans la zone cathodique, dans la colonne positive et en tête du streamer.

Les caractéristiques de cette superposition évoluent avec l'amplitude de la tension appliquée : plus la tension appliquée est élevée et plus le nombre de charges transportées par le régime continu croît.

Dans le même temps, le volume de la sphère représentative du phénomène de Trichel grandit avec la tension appliquée à la pointe. De ce fait, le rayon de la pointe, qui était à l'origine du renforcement de champ (effet de pointe), est progressivement masqué par la création de cette sphère d'où peuvent partir les nouveaux streamers.

L'accroissement de son volume entraîne donc une augmentation du rayon de cette électrode fictive qui est une des causes de la baisse de l'amplitude des impulsions de Trichel

puis de leur disparition. Cette diminution d'amplitude va de pair avec une augmentation de la fréquence de répétition des impulsions.

Si nous intensifions encore le niveau de la tension appliquée, une couronne est émise depuis la sphère et se propage dans l'intervalle. Du fait du rayon relativement important de la sphère, la valeur de la tension appliquée nécessaire pour initier la couronne est suffisamment élevée pour que le champ moyen provoque la propagation de celle-ci sur toute la longueur de l'intervalle : il y a, alors, passage à l'arc.

Les différentes évolutions décrites ici sont observables et quantifiables soit indépendamment les unes des autres, en réalisant des mesures de courant instantané, soit par une mesure de courant moyen. Nous retiendrons de cette description que le régime de Trichel est, entre autre, un excellent générateur d'ions négatifs créés au voisinage de l'électrode haute tension.

Un exemple d'enregistrements de courants de Trichel impulsif et continu est présenté sur la Figure 16.

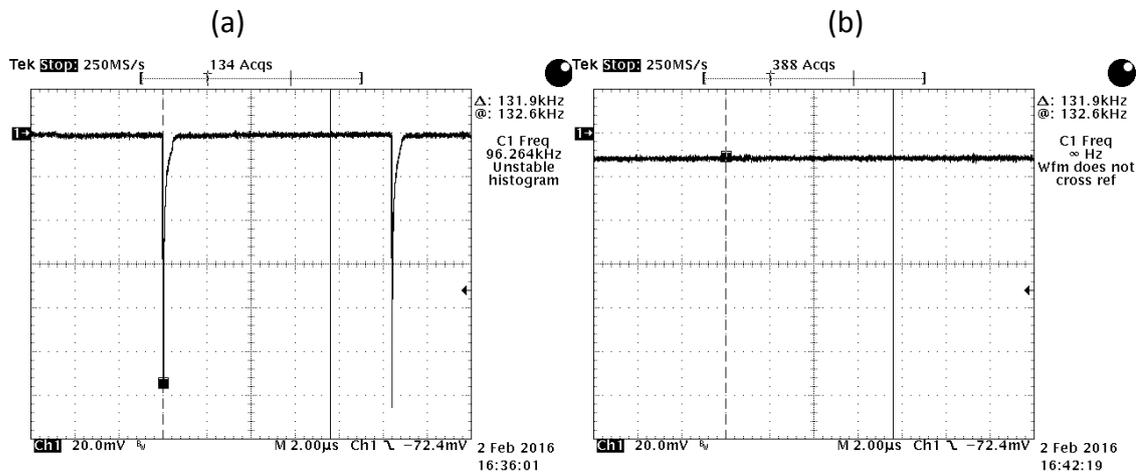


Figure 16 : Passage du (a) régime de Trichel impulsif au (b) régime de Trichel continu

Une photographie caractéristique d'un régime de Trichel est présentée sur la Figure 17.

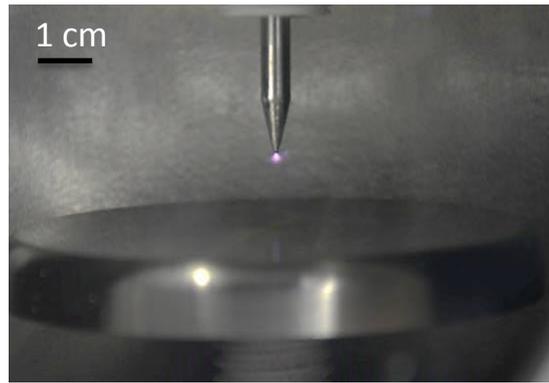


Figure 17 : Boule de Trichel

V) Positionnement du travail de thèse

V-1) Les procédés du CEA Marcoule

Le pôle « procédés thermiques » du CEA Marcoule travaille sur le traitement de déchets radioactifs [95], [96] et s'occupe à la fois :

- de ces besoins internes comme, par exemple, le traitement de déchets solides par le procédé d'incinération IRIS, ou bien le traitement d'effluents liquides par des procédés d'incinération plasma,
- de demandes externes, telles que le traitement de déchets solides par les procédés d'incinération-vitrification SHIVA et d'incinération-vitrification-fusion PIVIC pour AREVA.

L'incinérateur IRIS (Figure 18) « Installation de Recherche en Incinération des Solides » a été développé pour traiter les déchets chlorés issus des boîtes à gants de l'industrie nucléaire. Il comporte deux étapes principales : une pyrolyse à 550°C qui permet l'élimination des gaz corrosifs et une calcination à 900°C enrichie en oxygène pour permettre la combustion [97].

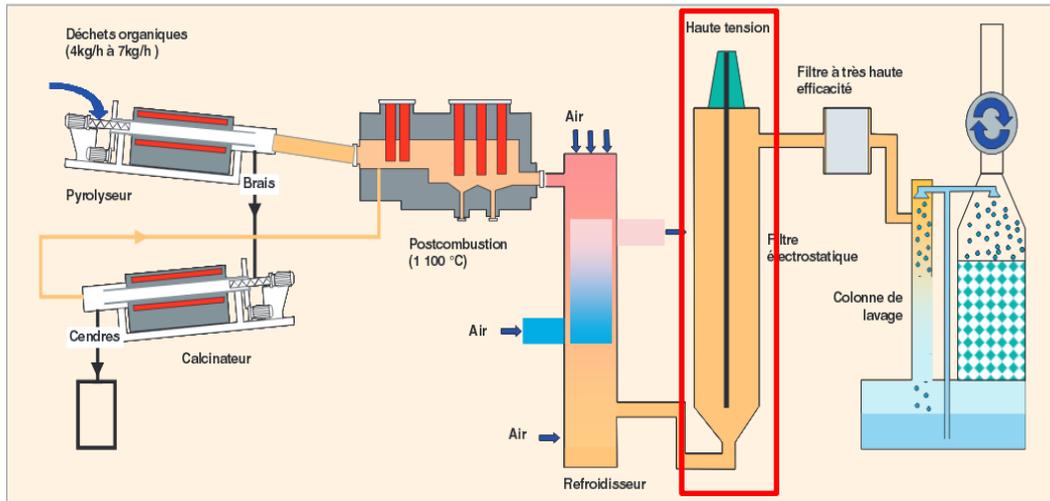


Figure 18 : Procédé IRIS [95]

Le procédé SHIVA (Figure 19) « Système Hybride d'Incinération et de Vitrification Avancé » est destiné au traitement de déchets de faibles à moyennes activités, mais de longue durée de vie (déchets B). Ce procédé concentre, dans un même réacteur :

- l'incinération et la réduction de volume des déchets grâce à la combustion par torche plasma d'oxygène,
- la postcombustion des gaz issus de la dégradation de ces déchets,
- la vitrification des cendres à l'aide d'un bain de verre maintenu en fusion dans un creuset froid à induction placé sous les torches.

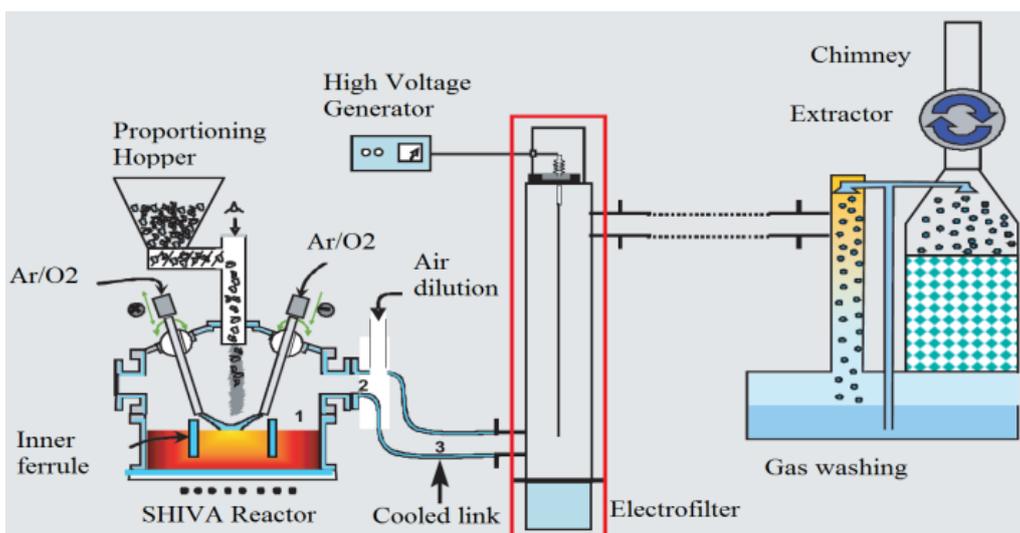


Figure 19 : Procédé SHIVA [95]

Le procédé PIVIC (Procédé d'Incinération Vitrification In Can) est un procédé dont le développement est en cours et qui doit s'achever en 2020. Il s'agit d'un procédé de traitement par étapes pour le traitement d'un mélange de déchets contaminés d'origines organiques, métalliques et minérales. La première phase consiste en l'incinération par plasma d'oxygène de la partie organique dans un réacteur métallique refroidi, puis en la vitrification des cendres et la fusion des métaux par induction dans un creuset servant de conteneur de stockage final.

Ces procédés de traitement de déchets solides [95], [96] vont libérer des gaz de combustion pouvant contenir des particules fines. Dans le cadre du développement des procédés thermiques dédiés au traitement des matières radioactives, le CEA utilise différentes étapes d'épuration dont l'un des systèmes est un précipitateur électrostatique, objet de cette recherche. La filtration électrostatique est utilisée comme moyen de préfiltration afin d'éviter les colmatages intempestifs des filtres de très haute efficacité (THE) qui garantissent un rejet nul de particules dans l'atmosphère.

Le CEA a opté pour l'utilisation d'un électrofiltre en sortie de procédé car il présente de nombreux avantages en adéquations avec leur cahier des charges :

- une grande efficacité de filtration,
- une faible consommation énergétique,
- un débit et des températures de fonctionnement élevés,
- l'absence de pièces d'usure ou fragiles pouvant affecter les performances de l'ESP,
- une facilité d'utilisation,
- une longue durée de vie,
- une faible perte de charges.

Dans ce cadre, le CEA Marcoule travaille depuis de nombreuses années en collaboration avec le laboratoire SIAME de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour à l'amélioration de ce procédé. Des travaux de recherches furent ainsi menés par A. Silvestre de Ferron [98] et S. Gaychet [92].

Les recherches de S. Gaychet ont porté sur la modélisation de décharges utilisées en précipitation électrostatique et ont contribué à améliorer les connaissances.

Les travaux expérimentaux d'A. Silvestre de Ferron ont porté essentiellement sur le traitement des poussières en sortie du procédé IRIS. Il a été montré que l'association d'une électrode multi-pointes alimentée par un générateur combinant une composante continue et une composante pulsée permet d'améliorer grandement les performances de filtration en comparaison de celles obtenues par un électrofiltre de type fil-cylindre (Figure 20) alimenté sous tension continue [30], [98]. Une électrode multi-pointes, appelée Héritrode [1], ainsi qu'un générateur hybride avaient ainsi été spécifiquement développés et sont actuellement installés sur SHIVA.

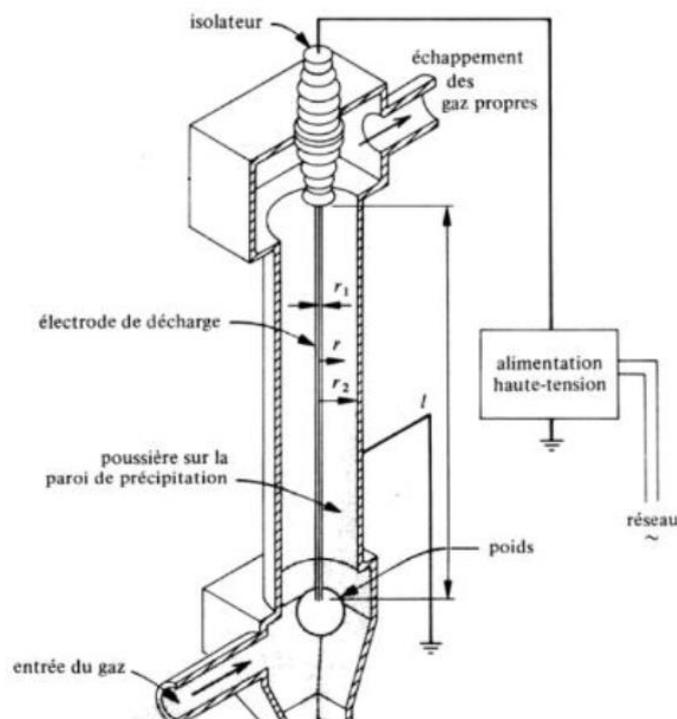


Figure 20 : Electrofiltre en configuration fil / cylindre

Néanmoins, certaines études restaient à compléter :

- l'impact de la granulométrie des poussières,
- l'impact des propriétés électriques des poussières,
- l'influence de l'alimentation sur l'évolution temporelle du rendement,
- l'analyse détaillée pour différentes alimentations des phénomènes occurrents dans un système pointe / plan.

Ainsi, l'étude menée dans le cadre de ma thèse s'inscrit dans la continuité directe des travaux réalisés par A. Silvestre de Ferron [98] et vise d'une part à compléter les problèmes non-abordés et d'autre part à répondre à de nouvelles problématiques.

V-2) Les objectifs

Le développement du nouveau procédé d'incinération PIVIC du CEA conduit à redimensionner l'électrofiltre et plus précisément à modifier la géométrie de l'électrode émissive. Cette nouvelle géométrie devra répondre aux futures conditions d'exploitation du procédé et permettra, en particulier, une bonne maîtrise des écoulements aérauliques des gaz de combustion chargés en poussières potentiellement radioactives.

La géométrie de l'Héritrode actuellement utilisée sur IRIS et SHIVA ne répond pas à ces nouvelles contraintes. De plus, toutes modifications dimensionnelles des électrodes entraînent une réadaptation des caractéristiques électriques de l'alimentation du procédé.

L'objectif de cette thèse est donc multiple :

- Il s'agira de dimensionner, puis réaliser la nouvelle électrode émissive (cf. chapitre 2) qui devra répondre aux nouvelles contraintes géométriques imposées tout en conservant les mêmes efficacités de filtration que l'ancien dispositif.
- Une étude particulière sera menée afin de mieux comprendre les phénomènes physiques occurrents dans un électrofiltre (cf. chapitre 3). En particulier, je montrerai comment la tension appliquée influence l'évolution des régimes de décharges qui aboutissent à la formation de back corona.
- Le but final est bien évidemment de caractériser l'efficacité de l'électrofiltre équipé de cette nouvelle électrode. Il s'agira de déterminer les nouveaux points de fonctionnement du générateur combiné qui, associé à cette nouvelle électrode, permettront d'obtenir les meilleurs rendements. Les essais porteront ainsi sur l'optimisation du rendement instantané de filtration, mais aussi sur l'optimisation des performances en termes de durée de fonctionnement (cf. chapitre 4). L'impact des caractéristiques physico-chimiques des poussières sur l'efficacité du procédé sera également analysé.

VI) Conclusion

L'état de l'art mené a permis de définir la précipitation électrostatique, de comprendre le fonctionnement de ce procédé et de mieux appréhender et visualiser les phénomènes physico-chimiques mis en jeu et leur influence sur l'efficacité de filtration. Grâce aux connaissances sur les décharges couronnes de type Trichel, nous comprenons l'importance de la géométrie de l'électrode émissive et du type d'alimentation utilisé dans l'électrofiltration. Ainsi, ce chapitre sert de base théorique afin d'atteindre les objectifs fixés pour ce travail de recherche.

Le chapitre suivant va porter sur le matériel et la méthodologie employés durant ces travaux. Le dimensionnement de la nouvelle électrode y sera présenté.

Chapitre 2 - *Matériels et Méthodes*

L'électrofiltration est un procédé d'échelle macroscopique gouverné par des phénomènes microscopiques d'une importance capitale. Il est donc nécessaire dans le cadre de l'amélioration du procédé d'avoir un matériel et une méthodologie clairement identifiés.

Ce chapitre a pour objectif de présenter le matériel et les dispositifs expérimentaux utilisés pour mener à bien cette recherche, mais aussi d'exposer les différentes techniques et méthodes employées.

La première partie va porter sur une présentation du procédé semi-industriel à savoir : le pilote de laboratoire, les électrofiltres utilisés et l'alimentation du procédé. Dans la seconde partie, la méthodologie et les résultats qui ont servi à la conception de la nouvelle électrode, nommée Solectrode, objet principal de l'étude, sont présentés. Pour finir, la troisième partie va porter sur les poussières employées dans l'étude et sur les caractérisations physico-chimiques réalisées.

I) Le procédé semi-industriel

I-1) Le pilote

Le pilote (Figure 21), localisé au laboratoire SIAME de l'Université de Pau, est un modèle à échelle réduite du procédé industriel installé en sortie des incinérateurs SHIVA et IRIS du CEA Marcoule. Il a été développé pour permettre de tester différentes géométries d'électrofiltre associées à divers paramètres d'écoulement d'air. La température et le débit de gaz peuvent ainsi varier respectivement de 40°C à 160°C et de 60 m³/h à 240 m³/h. L'objectif est de travailler dans des conditions expérimentales proches de celles présentes en sortie des procédés industriels.

Le pilote est constitué de quatre parties : un boîtier de commande, un électrofiltre et deux portions positionnées en amont et en aval de l'ESP.

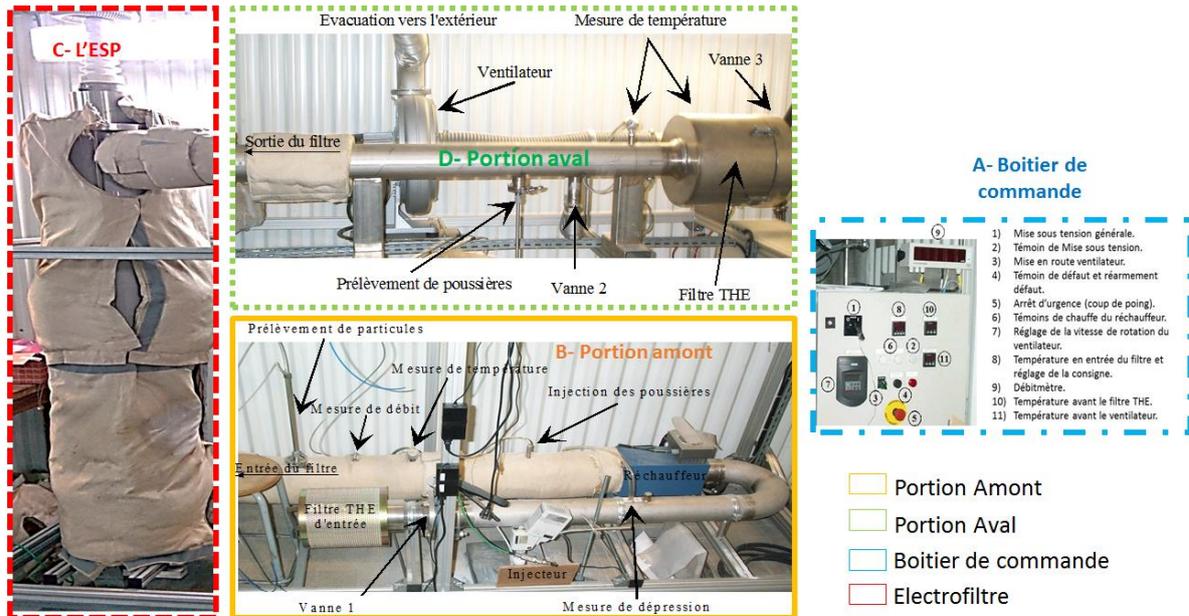


Figure 21 : Le pilote du laboratoire SIAME de Pau

Le boitier de commande permet de mettre en route le pilote, de régler la température de l'effluent gazeux ou encore la fréquence de rotation du ventilateur (de 40 Hz à 60 Hz) pour réguler le débit d'air.

La portion amont, située au pied du filtre, comprend :

- une vanne d'admission d'air de type papillon qui permet de régler l'ouverture principale d'admission d'air,
- un filtre très haute efficacité (THE) qui filtre les poussières contenues dans l'air injecté à l'intérieur de la boucle,
- un réchauffeur pour réguler la température de l'effluent gazeux,
- plusieurs sondes de mesures reliées pour certaines au boitier de commande qui permettent de réguler la température, le débit, la dépression,
- Le dispositif d'injection de poussières et une canne de prélèvements qui seront, tous les deux, présentés par la suite.

La partie électrofiltre a été conçue de manière à être modulable. Les différentes possibilités de géométrie sont exposées dans la section suivante. Le précipitateur électrostatique est entouré d'une couverture en laine de roche qui maintient la température de consigne homogène et constante tout le long du filtre. Ce dispositif évite les variations de

températures susceptibles de perturber le régime de décharges ou les caractéristiques d'écoulement.

La portion aval, située en partie haute du pilote, comprend :

- un ventilateur aspirant,
- une vanne de refroidissement,
- des sondes de mesures similaires à celles de la portion amont,
- un filtre THE pour récupérer les poussières non collectées.

Des travaux antérieurs [98] ont permis de fixer les conditions opératoires se rapprochant le mieux des propriétés de l'effluents gazeux en sortie des procédés IRIS et SHIVA. Nous conserverons ainsi, dans cette thèse, ces mêmes points de fonctionnement : un débit du gaz porteur fixé à $120\text{m}^3/\text{h}$, une température de 130°C et un taux de particules injectées de l'ordre de 2.10^6 à 4.10^6 particules/litre.

I-2) Les électrofiltres

Trois montages différents d'électrofiltres sont utilisés, à savoir un dispositif pointe / plan et deux géométries constituées d'une électrode multi-pointes associée à un cylindre collecteur. Ces deux dernières configurations seront appelées Héritrode / cylindre et Solectrode / cylindre. Le montage pointe / plan sera utilisé dans le chapitre 3, afin d'étudier le développement des régimes de décharges dans un électrofiltre simplifié. Les deux montages cylindriques seront utilisés dans le chapitre 4 pour optimiser les rendements de filtration du dispositif semi-industriel.

I-2-a) Le montage pointe / plan

Ce dispositif expérimental est constitué d'une unique pointe de longueur 2 cm (site émissif) et d'un plan circulaire de diamètre 9 cm (électrode de collecte), distant de 1 cm (Figure 22). Ces deux éléments sont placés perpendiculairement à l'écoulement dans un cylindre de diamètre 100 mm. La pointe est alimentée par différentes sources de tension et

le plan est connecté à la masse à travers un ampèremètre qui permet de quantifier le courant moyen injecté dans le système (Figure 23). Le choix de cette géométrie et, en particulier, d'une distance inter-électrodes faible, s'explique par le désir d'amplifier et d'accélérer les événements se produisant au sein de cet électrofiltre et ainsi réduire le temps de développement des régimes de décharges électriques successifs.

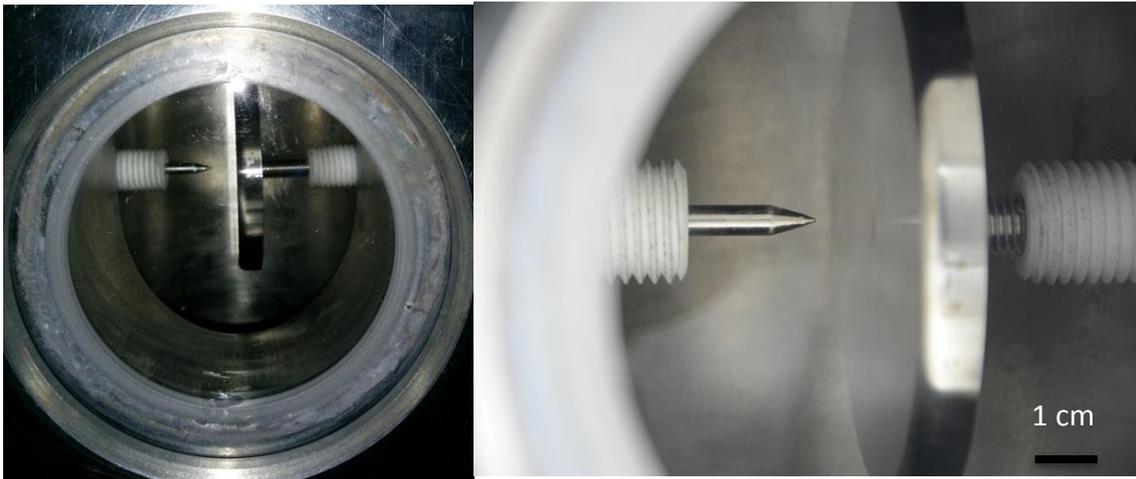


Figure 22 : Le dispositif expérimental pointe / plan

Le tube de diamètre 100 mm, faisant office de conduit d'écoulement, est équipé d'un hublot en verre, placé dans l'axe du système pointe / plan, à travers lequel il est possible d'observer le développement de la décharge (Figure 23).

Un appareil photo Nikon D7100 est positionné face au hublot de manière à photographier le développement de la décharge à la pointe, tout en ayant un angle suffisant pour voir les phénomènes dans l'intervalle inter-électrodes et sur le plan (Figure 23). En raison de l'obscurité nécessaire à l'observation des phénomènes électriques peu lumineux, des réglages particuliers ont dû être adaptés à ces prises de vue :

- une ouverture focale de 5,6,
- une sensibilité du CCD de ISO 400,
- un temps d'ouverture de 20 secondes qui permet d'intégrer la lumière émise sur un temps relativement long.

Ces réglages ont été conservés pour toute l'étude de manière à pouvoir comparer les clichés obtenus, soit à différents instants, soit aux mêmes instants mais pour des conditions d'alimentation différentes.

Notons que l'avantage de ce dispositif est bien évidemment de pouvoir observer et d'isoler les phénomènes occurrents sur un site unique mais également de pouvoir facilement nettoyer la pointe et le plan. Les différents essais seront donc menés à partir d'une électrode de collecte propre. Il n'en sera pas forcément de même pour les autres configurations.

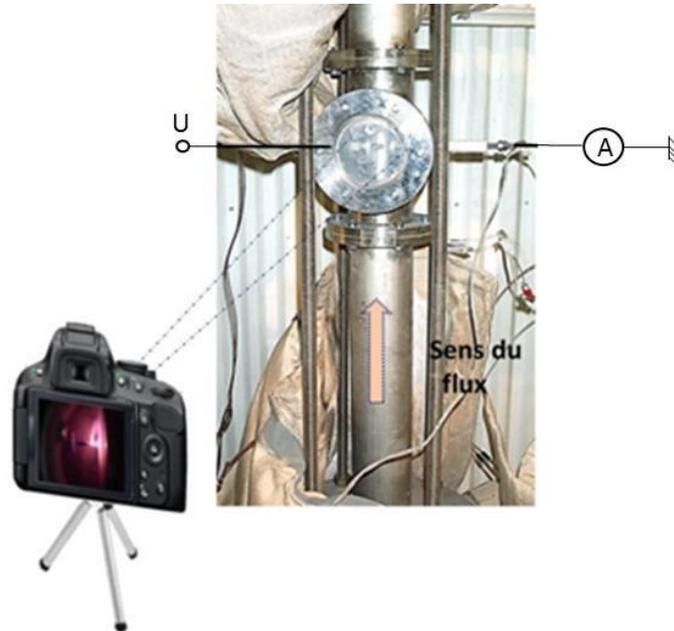


Figure 23 : Diagnostics électriques et optique associés aux essais pointe / plan

I-2-b) Le montage Héritrode / cylindre

Le montage Héritrode / cylindre utilisé correspond à la géométrie de l'électrofiltre installée en sortie de procédé SHIVA. Il s'agit d'un électrofiltre équipé d'une électrode émissive de type multi-pointes développée lors de travaux antérieurs [98] et d'une électrode collectrice cylindrique.

La hauteur et le diamètre du cylindre de collecte sont respectivement de 1500 mm et 300 mm. L'Héritrode, de longueur 1300 mm, est une électrode émissive multi-pointes constituée de 246 pointes fines, de longueur $L_p = 21$ mm, réparties par étages sur un tube support de diamètre 25 mm (Figure 24). Chaque étage, distant de 20 mm de l'étage suivant, comporte quatre pointes disposées à 90° l'une de l'autre. Un décalage de 45° entre étage forme une géométrie hélicoïdale de l'ensemble. La distance inter-électrodes pour ce montage est de 116,5 mm.



Figure 24 : Photographie de l'électrode Héritrode

Le dimensionnement de la géométrie de cette électrode a fait l'objet d'une étude expérimentale détaillée [98]. La simulation de la distribution spatiale du champ électrique dans cette géométrie sera présentée dans le paragraphe II de ce chapitre.

I-2-c) Le montage Solectrode / cylindre

Le dimensionnement du troisième montage, appelé Solectrode / cylindre est l'un des objectifs de cette l'étude. En effet, l'Héritrode ne disposant pas d'un diamètre suffisamment grand, le CEA a souhaité redimensionner une nouvelle géométrie d'électrode multi-pointes qui réponde à un certains nombres d'exigences :

- un diamètre du tube support de pointes de $\varnothing = 100$ mm,
- y associer le même diamètre de cylindre de collecte que celui utilisé pour le montage Héritrode / cylindre,
- optimiser les paramètres géométriques afin d'obtenir des rendements de filtration aussi performants que ceux obtenus avec l'Héritrode.

La méthodologie adoptée et le dimensionnement de cette nouvelle électrode feront l'objet du paragraphe II) de ce chapitre.

I-3) L'alimentation de l'électrofiltre

Le montage électrique de l'alimentation HT utilisée pour alimenter l'électrofiltre est présenté Figure 25. Il s'agit du même dispositif que celui développé dans le cadre de la thèse de A. Silvestre de Ferron [98]. Il permet d'alimenter l'ESP sous différents niveaux de tension

continue, impulsionnelle ou combinée. La tension combinée correspond à la superposition d'une tension impulsionnelle et d'un fond continu.

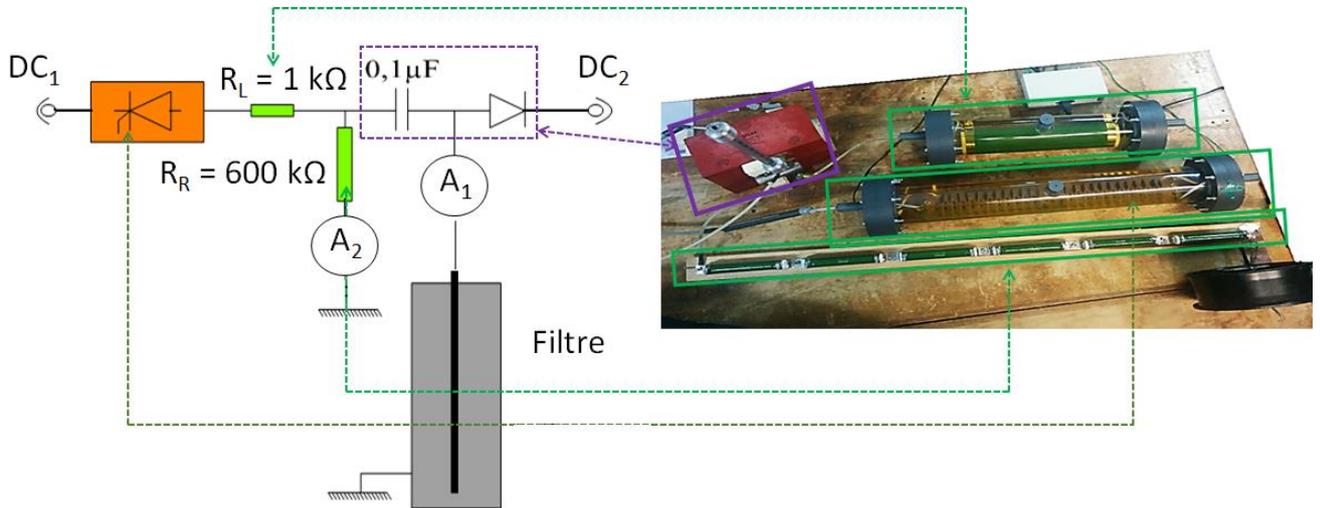


Figure 25 : Montage électrique

Ce montage comporte :

- deux alimentations HT de polarité négative. La première, notée DC_1 (TECHNIX 50 kV – 100 mA), permet de contrôler l'amplitude des impulsions de tension et la seconde, notée DC_2 (SPELLMAN 100 kV – 12 mA), règle le niveau de tension continue,
- un commutateur HT constitué de 24 thyristors (CS20-22moF1 – 2,2 kV) associés en série et disposés dans un bain d'huile afin d'améliorer l'isolation électrique de l'ensemble et d'assurer le refroidissement des composants,
- un circuit de déclenchement des thyristors [99] qui n'est pas représenté sur la Figure 25,
- une résistance de limitation du courant notée R_L de 1 kΩ. Elle est également disposée dans un bain d'huile et assure la protection du commutateur en cas de court-circuit,
- une résistance de 600kΩ, notée R_R , qui référence la sortie du commutateur. Elle est dimensionnée de manière à ce que les thyristors travaillent toujours à « faible courant » [99],

- un condensateur de couplage de $0,1 \mu\text{F}$ qui isole le commutateur de l'alimentation DC_2 ,
- une diode HT qui protège l'alimentation DC_2 des impulsions de tensions.

Ce montage permet ainsi d'alimenter le filtre :

- sous tension continue, notée V_{DC} , réglable jusqu'à 100 kV (alimentation $\text{DC}_1 = 0$),
- sous tension purement impulsionnelle, notée V_p , ajustable jusqu'à 50 kV crête avec une fréquence de répétition maximale de 1 kHz (alimentation $\text{DC}_2 = 0$),
- sous tension combinée, de manière à superposer les deux composantes tout en pouvant ajuster le niveau de la tension continue V_{DC} , le niveau de la tension impulsionnelle V_p et la fréquence de répétition (Figure 26).

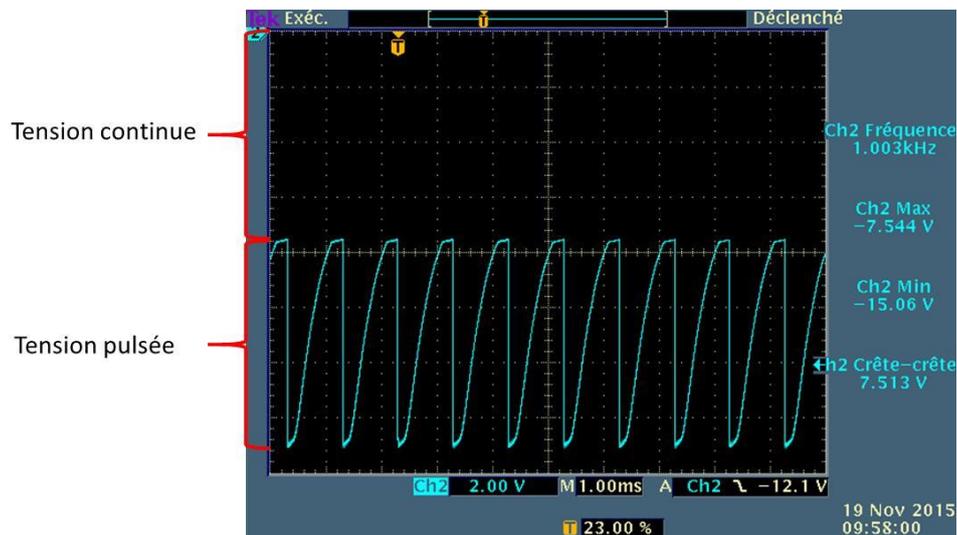


Figure 26 : Oscillogramme d'une tension combinée à $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ / $-7,5 \text{ kV}_p$ avec $f = 1 \text{ kHz}$

L'évolution du courant moyen injecté dans l'électrofiltration est mesurée à l'aide d'un ampèremètre (A_1) placé à l'entrée du filtre (Figure 25). L'ampèremètre A_2 permet de contrôler le courant qui s'écoule dans la résistance de référencement de $600 \text{ k}\Omega$.

II) Conception de la nouvelle électrode Solectrode

La conception de la nouvelle électrode Solectrode s'est effectuée en deux étapes. La première a consisté en une optimisation de la géométrie par des simulations du champ électrique à l'aide du logiciel CST EM Studio. Dans un second temps, nous nous sommes attachés à valider expérimentalement la géométrie par des mesures de courant afin d'optimiser le courant moyen injecté dans l'ESP.

II-1) Dimensionnement sous CST EM Studio

II-1-a) Présentation du logiciel et premières simulations

CST Studio Suite est une plateforme de simulation pour les problèmes de champ électromagnétique et les applications connexes. Ce logiciel comprend différents modules comme, par exemple, CST EM Studio, CST Microwave Studio, CST Design Studio, etc... (Figure 27).

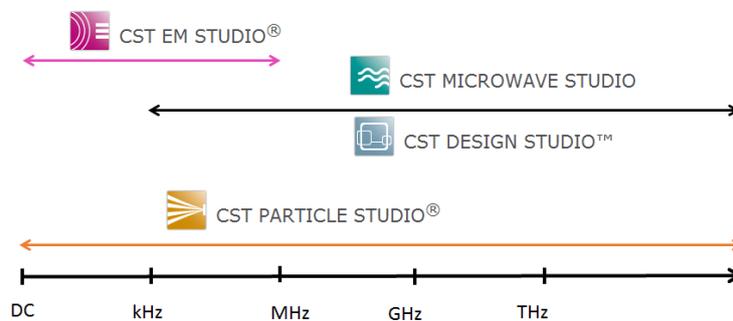


Figure 27 : Domaine d'application de certains modules CST Studio [100]

Pour le dimensionnement de l'électrode, le module CST EM Studio a été utilisé. Il s'agit d'un outil de simulation 3D en statique et à faibles fréquences, qui intègre différents solveurs tels que : le champ électrostatique, le champ magnétostatique, le courant stationnaire ou encore le domaine des faibles fréquences. Nous avons utilisé le solveur en champ électrostatique qui permet une étude en statique et quasi-statique, très pratique pour la modélisation des appareils haute tension ou des condensateurs.

Généralement, la méthode des éléments finis « FEM » est employée pour résoudre des problèmes en électromagnétisme avec une grande précision en réalisant un découpage de l'espace en mailles. Ce module utilise une méthode de calcul proche de la FDTD « Finite Difference Time Domain » qui est la technique d'intégration finie « FIT » (Figure 28). Développée par T. Weiland en 1977 [101], [102], cette méthode allie rapidité et efficacité. Elle consiste à transformer les quatre équations de Maxwell en une matrice équivalente utilisable pour résoudre spatialement des problèmes de champ : statique, temporel ou fréquentiel par « FFT ».

Ce logiciel [103] propose dans un espace borné différents types de maillage, comme « l'hexahedral » adapté pour des géométries simples et qui permet de réduire le temps de calcul ou encore « le tetrahedral » pour le maillage de géométries plus complexes. Notons que CST offre la possibilité de raffiner localement le maillage aux endroits désirés.

Pour améliorer la précision du maillage hexahedral sans affecter les performances, CST utilise l'approximation « Perfect Boundary Approximation » (PBA) [104]. Cette approximation permet, tout en conservant les vitesses associées à un maillage en escalier, de modéliser avec précision des structures courbées sans recourir à une densification du maillage (Figure 28).

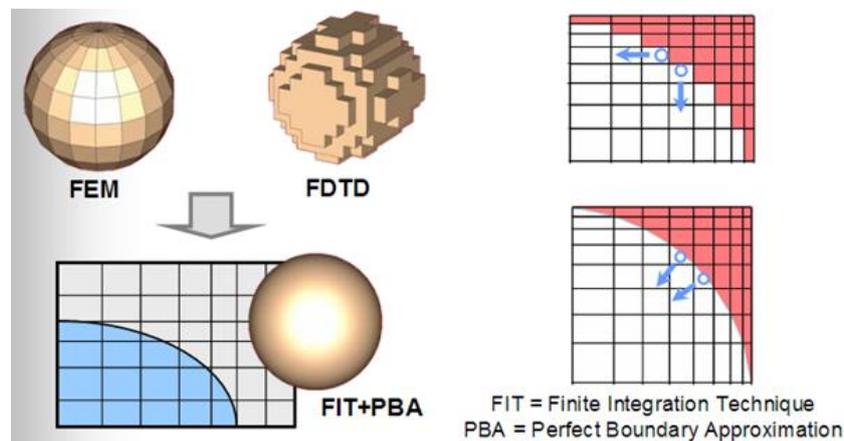


Figure 28 : Méthode de simulation sous CST [100]

Afin d'optimiser la modélisation, il est possible d'utiliser des plans de symétrie qui vont réduire le domaine de simulation et permettre d'optimiser le maillage et le temps de résolution.

Après calcul, différents types de représentation du potentiel et du champ sont proposés dans ce logiciel. Nous utiliserons la vue « isoline » qui est une illustration par plusieurs lignes de même valeur et la vue « contour » qui représente en plan les zones d'équipotentiel.

Au cours de cette étude, mes premiers travaux ont consisté à dessiner et modéliser l'Héritrode sous CST. L'étude a été menée en condition statique, en utilisant le maillage tetrahedral (Figure 29-a) qui est le plus adapté à la géométrie étudiée. Ce maillage a été affiné plusieurs fois, jusqu'à obtenir une convergence des résultats. Les simulations ont permis de visualiser et de quantifier le champ électrique et de mettre en évidence les zones où le champ est élevé au voisinage des pointes (Figure 29-b).

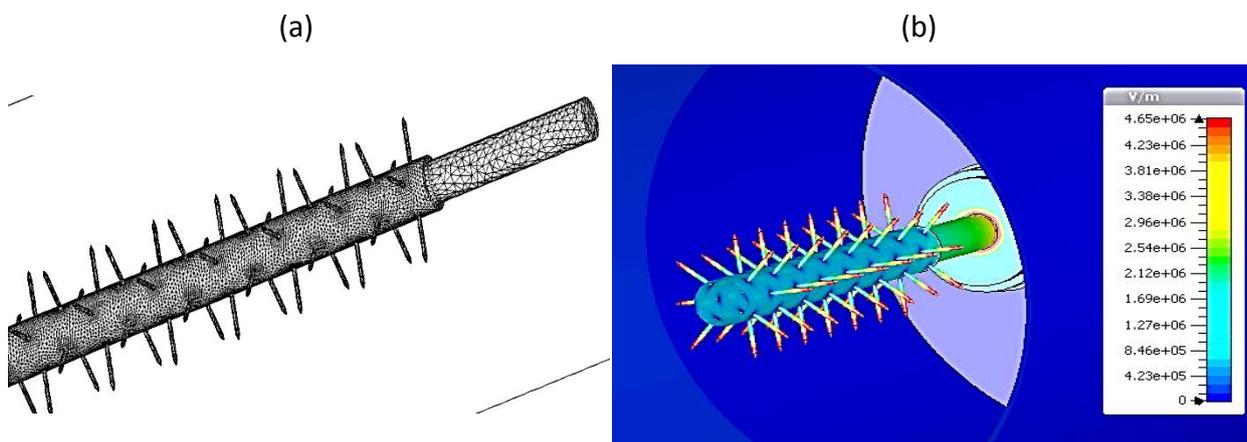


Figure 29 : (a) Maillage tetrahedral utilisé lors de la simulation de l'Héritrode et (b) Répartition du champ électrique dans la configuration Héritrode / cylindre

Les pointes modélisées se caractérisent par un rayon de 1,18 mm et un rayon de courbure de 0,2 mm (Figure 30). Ces paramètres correspondent approximativement aux dimensions réelles des pointes de l'Héritrode. Ils resteront constants pour toutes les simulations. Seule la longueur L_p des pointes pourra varier dans le dimensionnement de la nouvelle électrode.

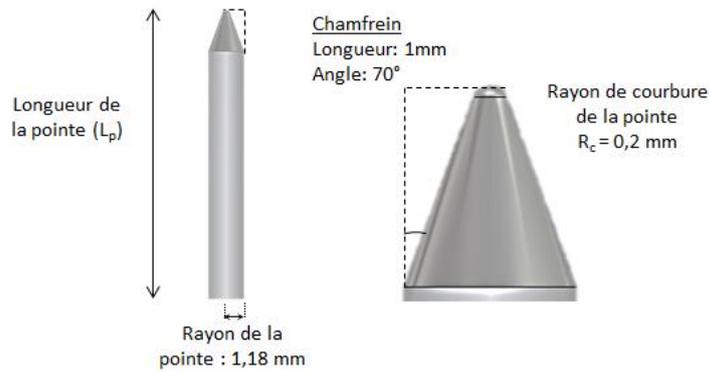


Figure 30 : Configuration géométrique d'une pointe

II-1-b) Distribution des champs pour différentes géométries

Les résultats obtenus avec l'Héritrode ont montré que des rendements de filtration de 100 % étaient atteints avec une tension combinée $-30 \text{ kV}_{\text{DC}} / --30 \text{ kV}_p$ à une fréquence de 1 kHz [98].

Comme l'analyse sous CST est de type électrostatique, les simulations seront toutes réalisées en condition statique, c'est-à-dire en appliquant une tension de -30 kV et de -60 kV sur l'électrode considérée. L'objectif est de simuler la distribution du champ électrique pour les deux extremums de la tension combinée : le fond continu (-30 kV) et la tension crête de l'impulsion (-60 kV). Il s'agit ainsi d'analyser et de comparer, en fonction des géométries, le champ électrique moyen responsable de la dérive des particules (composante continue) et le champ électrique maximal responsable de l'ionisation du gaz (composante pulsée additionnée à la composante continue). Les différentes simulations présentées auront systématiquement fait l'objet d'une étude de convergence des valeurs du champ électrique en fonction du raffinement du maillage tetrahedral.

Dans un premier temps, nous comparons la distribution du champ électrique pour différentes géométries d'électrodes émissives associées au cylindre de collecte de diamètre 300 mm. Il s'agit en l'occurrence de :

- un simple fil de diamètre 1 mm,
- un tube support de diamètre $\varnothing = 100 \text{ mm}$, nommé « tube », totalement dépourvu de pointe,

- une géométrie appelée « Nouvelle Electrode » sur laquelle des pointes seront disposées sur le tube support de diamètre $\varnothing = 100$ mm. Dans un premier temps, la Nouvelle Electrode reprend la même répartition de pointes que celle utilisée sur l'Héritrode,
- l'Héritrode.

II-1-b-(i) Comparaison des champs électriques moyens pour U = -30 kV

Les résultats de simulation obtenus pour les différents profils d'électrodes émissives sont présentés sur la Figure 31.

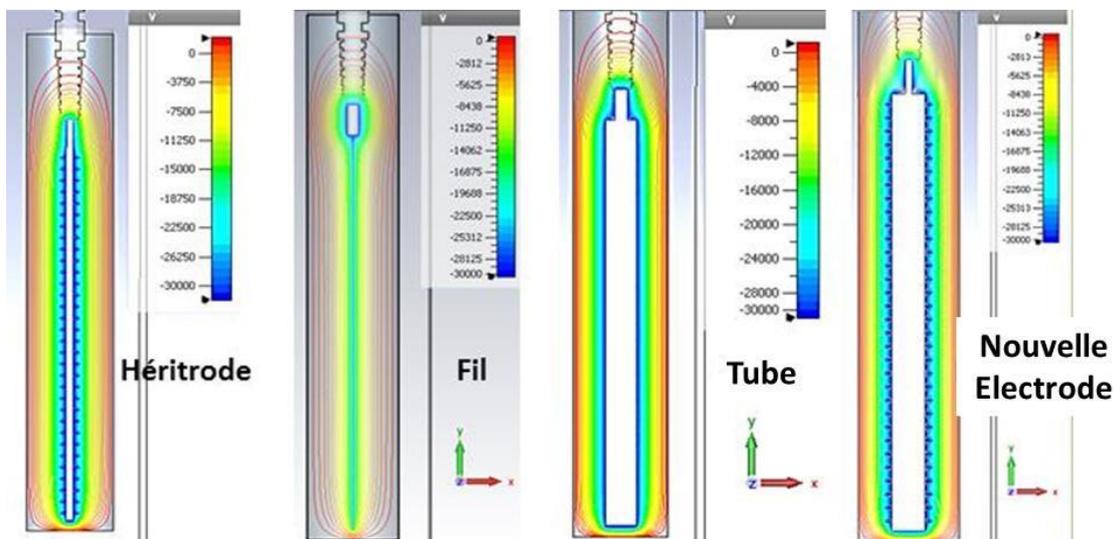


Figure 31 : Vue « isoline » de la répartition du potentiel sur différentes géométries pour U = -30 kV

Afin de comparer, entre les différentes configurations géométriques, les valeurs du champ électrique dans l'intervalle inter-électrodes, nous allons définir un champ moyen équivalent qui permet de s'affranchir des forts gradients de champ (2.1).

$$E_m = \frac{E_{90\%}^* + E_{min}}{2} \quad (2.1)$$

avec :

E_{min} : valeur minimale du champ électrique.

$E_{90\%}^*$: Valeur du champ électrique obtenu à 90 % de la distance inter-électrodes.

Un exemple de détermination de la valeur du champ électrique moyen E_m est présenté sur la Figure 32. Pour cet exemple, la distance inter-électrodes est égale à 8 cm. L'abscisse $x = 0$ correspond à la position du cylindre et donc à l'abscisse pour laquelle le champ est minimal. La valeur maximale du champ est obtenue sur la pointe ($x = 8$ cm). Le champ $E_{90\%}^*$ représente donc la valeur du champ pour l'abscisse $x = 7,2$ cm (90 % de 8 cm).

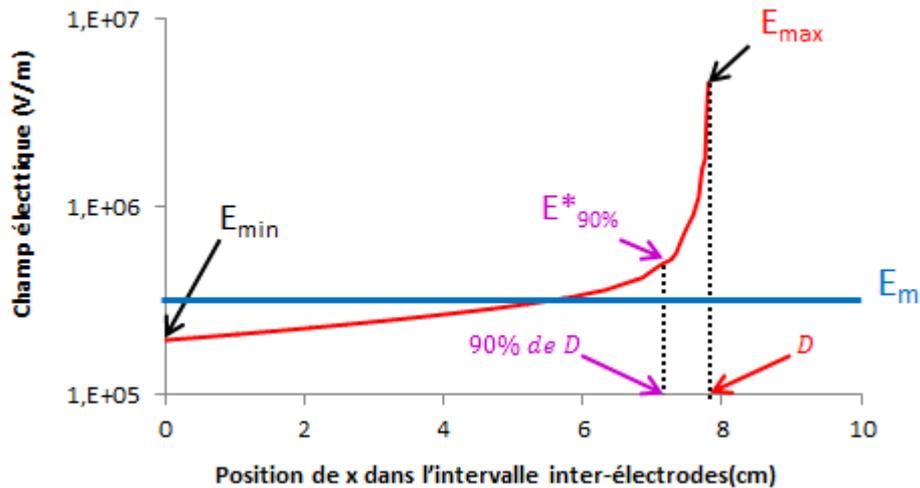


Figure 32 : Exemple de détermination du champ électrique moyen pour une distance inter-électrodes $D = 8$ cm

Ainsi, les valeurs du champ électrique moyen obtenues pour chaque configuration sont :

- $E_m = 2,1$ kV/cm pour le fil,
- $E_m = 2,3$ kV/cm pour l'Héritrode,
- $E_m = 3,17$ kV/cm pour le tube seul,
- $E_m = 3,31$ kV/cm pour la Nouvelle Electrode.

Il est clair, qu'à potentiel appliqué constant, l'augmentation du diamètre de l'électrode émissive (comparaisons entre le fil et le tube ou entre l'Héritrode et la Nouvelle Electrode) ou l'ajout des pointes (comparaison entre le tube et la Nouvelle Electrode) réduit la distance inter-électrodes et conduit à augmenter le champ moyen dans l'intervalle.

II-1-b-(ii) Comparaison des champs électriques maximaux (U = -60 kV)

La tension combinée permet, à chaque impulsion, de générer un champ électrique intense, mais de courte durée, de manière à optimiser l'ionisation du gaz et éviter le passage à l'arc.

Pour déterminer les valeurs de ces champs maximaux, notés E_{max} , une tension de -60 kV est appliquée sur les différentes configurations d'électrodes émissives (Figure 33).

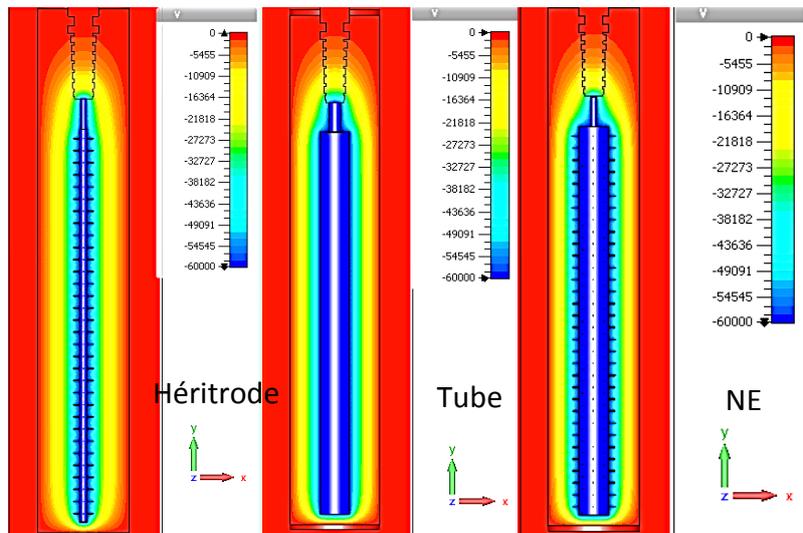


Figure 33 : Vue « contour » de la répartition du potentiel sur l'Héritrode, le tube et la Nouvelle Electrode (U = -60 kV)

L'étude de l'évolution spatiale du champ électrique en fonction de la distance inter-électrodes pour les configurations : Héritrode, tube et Nouvelle Electrode indique une différence importante de la valeur maximale du champ électrique (Tableau 2). Elle révèle naturellement le renforcement induit par l'effet de pointe et confirme que leur ajout favorisera l'ionisation du gaz.

Tableau 2 : Valeurs du champ électrique maximal pour chaque configuration

Electrode émissive	E max (kV/cm)
Héritrode	400
Tube	10
Nouvelle Electrode	320

De plus, en comparant les résultats de l'Héritrode et de la Nouvelle Electrode, nous observons que le champ électrique maximal de cette dernière est plus faible. Cette diminution peut s'expliquer par :

- l'augmentation du diamètre du tube support qui tend à homogénéiser la distribution du champ,
- la répartition des pointes qui a été optimisée pour l'Héritrode mais pas pour la Nouvelle Electrode. En effet, le champ sur une pointe est peut-être atténué par la présence de pointes voisines trop proches.

Nous allons, maintenant, mettre en évidence ces deux phénomènes.

II-1-c) Influence du tube support et de la longueur de la pointe

Le diamètre du tube support devant être modifié, il est important de connaître son influence sur la répartition du champ électrique. Pour cela, une pointe unique est positionnée sur le tube support ($\varnothing = 25$ mm) de l'Héritrode (Figure 34). La longueur de cette pointe est constante et correspond à celle de l'Héritrode (21 mm). Cette configuration est comparée avec la Nouvelle Electrode qui est maintenant constituée d'une pointe unique, de longueur variable L_p , disposée sur le tube support de diamètre $\varnothing = 100$ mm (Figure 35).

Cette analyse est réalisée de façon à déterminer les valeurs des champs moyens E_m et maximaux E_{max} en fonction de la longueur de la pointe.

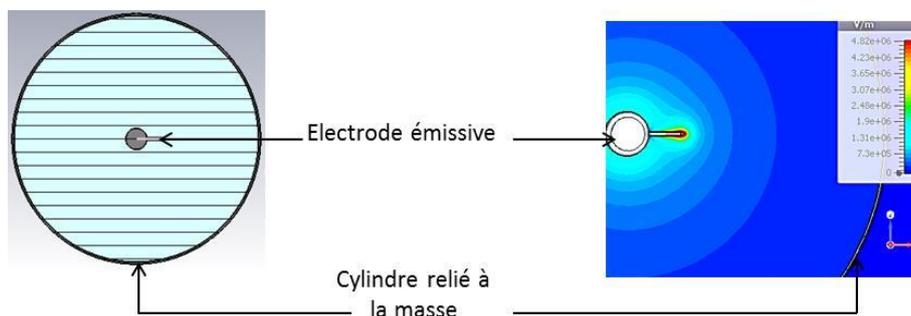


Figure 34 : Configuration du tube de l'Héritrode associée à une pointe

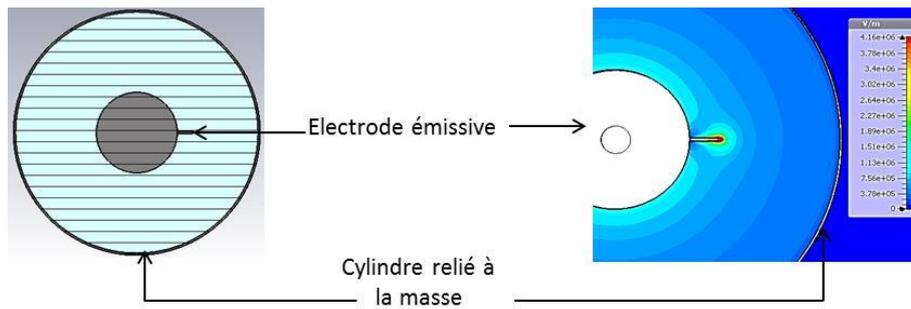


Figure 35 : Nouvelle Electrode constituée d'une pointe de longueur L_p

II-1-c-(i) Etude du champ électrique moyen

L'évolution du champ moyen en fonction la longueur de la pointe est présentée sur la Figure 36. Le diamètre du tube étant plus élevé sur la Nouvelle Electrode, il est logique d'obtenir un champ moyen plus important qu'avec l'Héritrode. D'autre part, il apparaît clairement que, sur la Nouvelle Electrode, plus la longueur de la pointe est grande, plus le champ E_m augmente.

Ce champ moyen est responsable de la propagation des streamers dans l'intervalle. S'il est supérieur au champ de maintien des streamers négatifs, il se produira un claquage de l'intervalle. Pour notre application, il est important d'optimiser la dérive des particules mais d'éviter le développement d'arcs électriques. Dans l'air, sous conditions atmosphériques, c'est-à-dire pour une densité d'atomes de $2,53 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, le champ moyen de propagation des streamers négatifs est de l'ordre de 18 kV/cm. Un calcul de ce champ de propagation, à la pression atmosphérique, mais pour une température de 130°C, aboutit à la valeur de 14 kV/cm. Par sécurité, et en tenant compte du fait que la présence des particules de poussières modifient cette valeur, il a été décidé, pour la conception de la Solectrode, de fixer une valeur limite de 10 kV/cm, afin d'éviter tout claquage dans l'espace inter-électrodes.

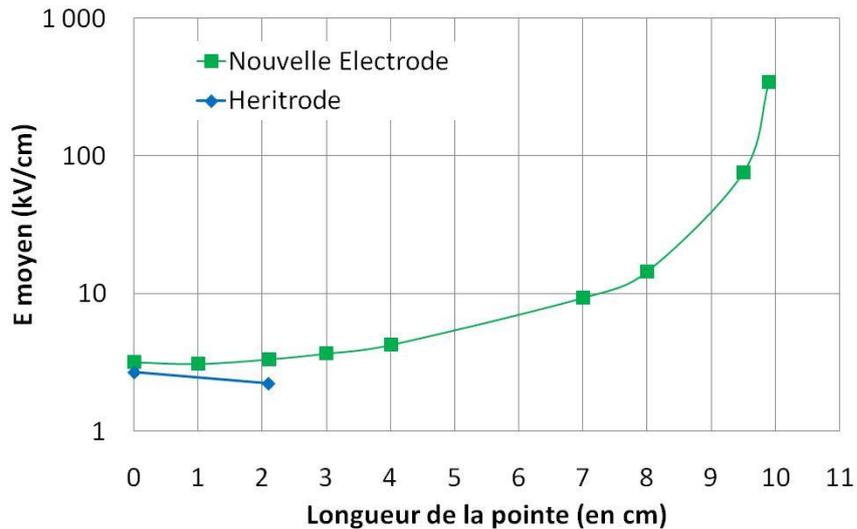


Figure 36 : Champ moyen en fonction de la longueur L_p de la pointe ($U = -30$ kV)

Les résultats de la Figure 36 montrent ainsi que :

- l'Héritrode n'excède jamais la limite fixée en termes de champ moyen, ce qui est confirmé par le fait que la tension de claquage sur la boucle de filtration est de l'ordre de -75 kV_{DC},
- avec le nouveau tube support, il faut une longueur de pointe inférieure à 7 cm.

II-1-c-(ii) Etude du champ électrique maximal

La Figure 37 illustre l'évolution du champ maximal en fonction de la longueur de la pointe pour les deux géométries étudiées. L'objectif est de déterminer la longueur de pointe pour la Nouvelle Electrode permettant d'égaliser le champ maximal sur une pointe obtenu avec l'Héritrode qui sert de référence.

Tout d'abord, une première analyse des résultats montre que le tube support a une influence sur la valeur du champ électrique maximal. En effet, pour une longueur de pointe inférieure à 3 cm, la valeur du champ maximal sur la pointe de l'Héritrode est supérieure à celle obtenue sur la pointe de la Nouvelle Electrode. Pour une longueur comprise entre 3 et 6 cm, les champs sont équivalents. A partir de 7 cm, le champ maximal le plus important est obtenu avec la Nouvelle Electrode, mais nous savons que cette valeur est critique vis-à-vis du champ moyen.

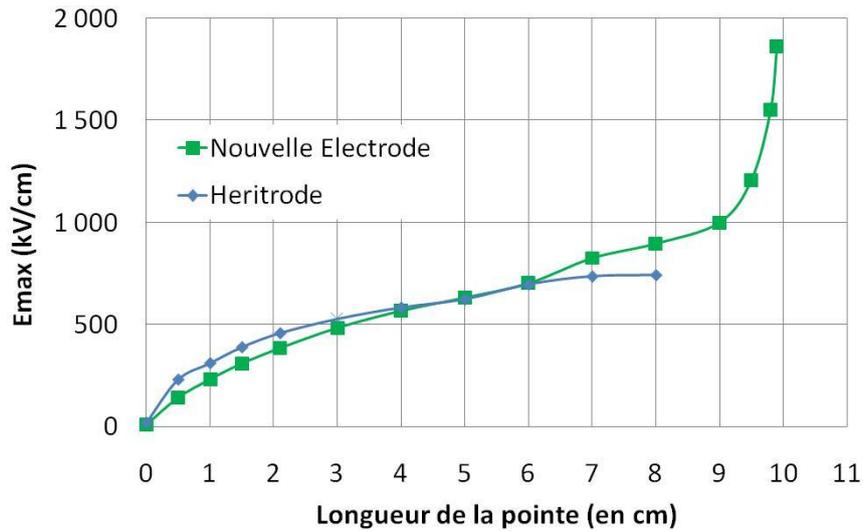


Figure 37 : Champ maximal en fonction de la longueur L_p de la pointe ($U = -60$ kV)

Afin de déterminer quelle longueur de pointe choisir, une analyse du volume libre est réalisée. Ce volume libre est le nom donné à l'espace disponible entre l'électrode de collecte et l'extrémité de l'électrode émissive. Pour simplifier, l'électrode émissive est assimilée à un cylindre de diamètre égal à la longueur de la pointe additionnée au diamètre du tube support.

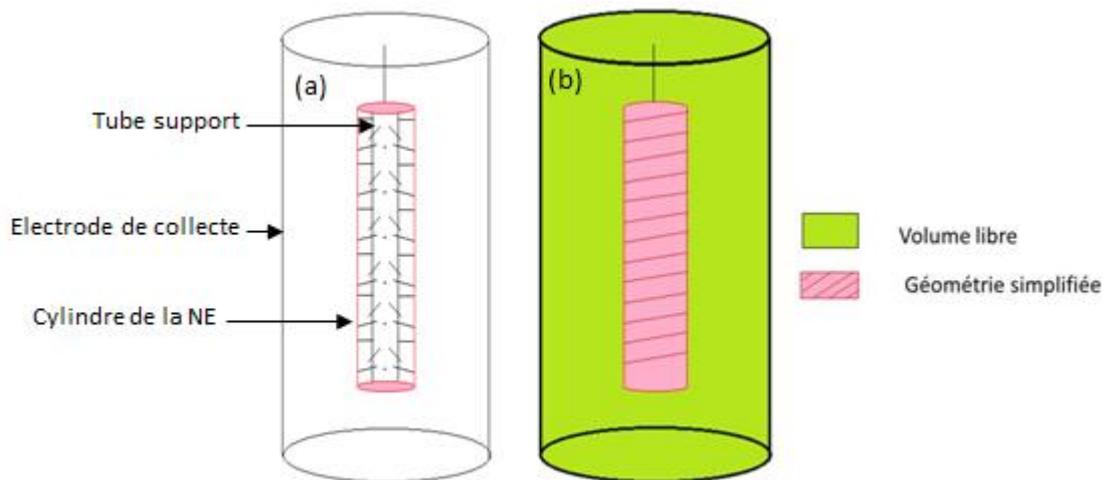


Figure 38 : (a) ESP électrode émissive / cylindre et (b) Simplification de la géométrie

Un volume libre de 100 % correspond uniquement au tube support sans pointe. L'ajout de pointes réduit le volume libre et la diminution engendrée peut être évaluée de la façon suivante (2.2).

$$FV (\%) = \frac{(V_{\text{électrode de collecte}} - V_{\text{géométrie simplifiée}})}{FV_{\text{tube support}}} * 100 \quad (2.2)$$

Dans cette formule, $V_{\text{électrode de collecte}}$ représente le volume total de l'électrofiltre, $V_{\text{géométrie simplifiée}}$ est le volume de la géométrie représenté en rose sur la figure ci-dessus et $FV_{\text{tube support}}$ est le volume libre lors de l'utilisation de tube de diamètre 100 mm seul.

Pour des longueurs de pointe de 5 et 6 cm, le volume libre est respectivement de 60 % et 50 % (Figure 39). Pour notre application, il est préférable d'opter pour la configuration offrant le plus de volume libre de manière à limiter les pertes de charges et minimiser les perturbations des écoulements. Par ailleurs, l'augmentation du champ électrique pour 5 cm et 6 cm n'est pas suffisamment significative par rapport à celui obtenu pour les longueurs de 3 et 4 cm pour accepter une perte de 20 % de volume de filtration (Figure 39). Par conséquent, une longueur de pointe comprise entre 3 cm et 4 cm semble être le choix le plus approprié. Pour privilégier les écoulements par rapport aux champs maximaux qui pourront être ajustés par la tension appliquée, il a été décidé de fixer la longueur de pointe à $L_p = 3$ cm.

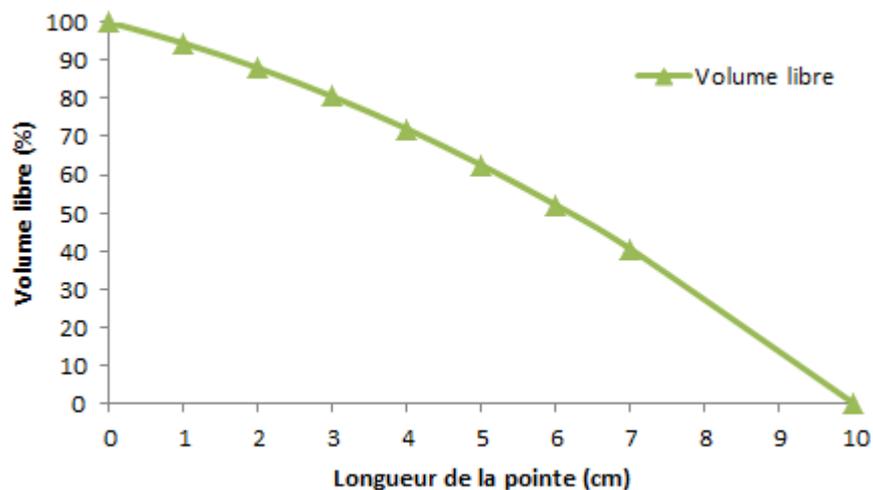


Figure 39 : Pourcentage de volume de gaz filtrable (volume libre) en fonction de la longueur des pointes

II-1-d) Etude de l'écartement entre les pointes

L'écartement entre des pointes contiguës peut influencer la valeur du champ électrique. Nous étudions donc, pour trois pointes disposées sur le tube support de la Nouvelle Electrode, l'influence de la distance « d » entre pointes sur la valeur du champ électrique relevée sur la pointe centrale (Figure 40). L'objectif est de faire varier la distance « d » et ainsi déterminer à partir de quelle distance il n'y plus d'interaction entre les pointes. Bien que la longueur optimale d'une pointe ait été déterminée dans l'étude précédente, les simulations sont réalisées pour trois valeurs de L_p : 1 cm, 2,1 cm (dimension des pointes de l'Héritrode) et bien évidemment 3 cm.

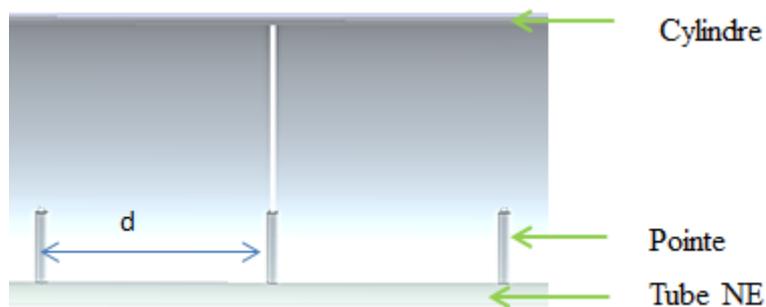


Figure 40 : Simulation de trois pointes alignées sur le tube support

Sur cette plage d'étude, l'analyse du champ électrique moyen, en fonction de la distance entre les pointes, montre que « d » n'a pas d'incidence sur la valeur du champ moyen. Par contre, la dépendance de la distance inter-pointes sur la valeur du champ maximal est mise en évidence sur la Figure 41. Plus « d » augmente, plus la valeur du champ électrique maximal croît, jusqu'à atteindre, à partir d'un certain espacement, noté « d_s », une valeur constante. Cette valeur dépend de la longueur de la pointe. Cette valeur de saturation du champ tend vers celle obtenue pour une pointe unique.

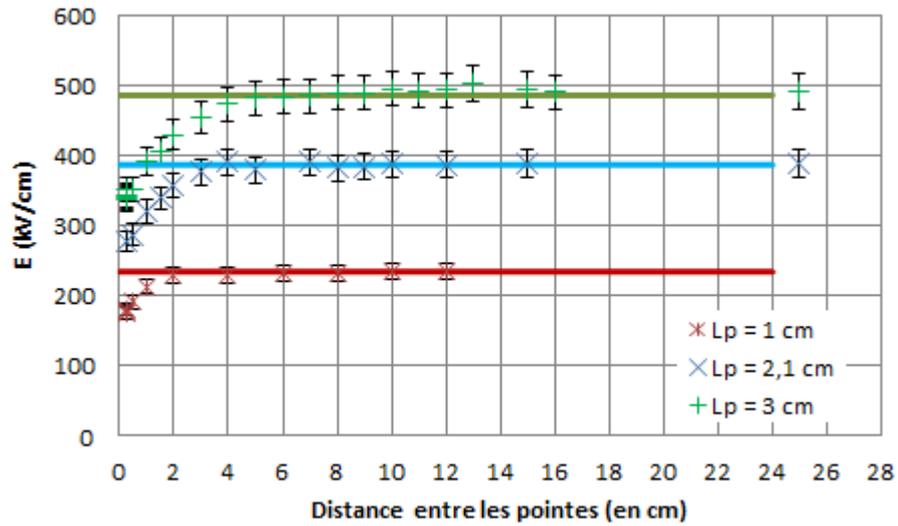


Figure 41 : Valeur du champ électrique maximal pour trois longueurs de pointe ($U = -60$ kV)

Ce résultat s'explique par le fait qu'à partir de la distance « d_s », les pointes sont suffisamment éloignées les unes des autres pour ne plus subir d'influence entre elles. Il n'y a donc plus d'effet de recouvrement des lignes de champ, comme schématisé sur la Figure 42.

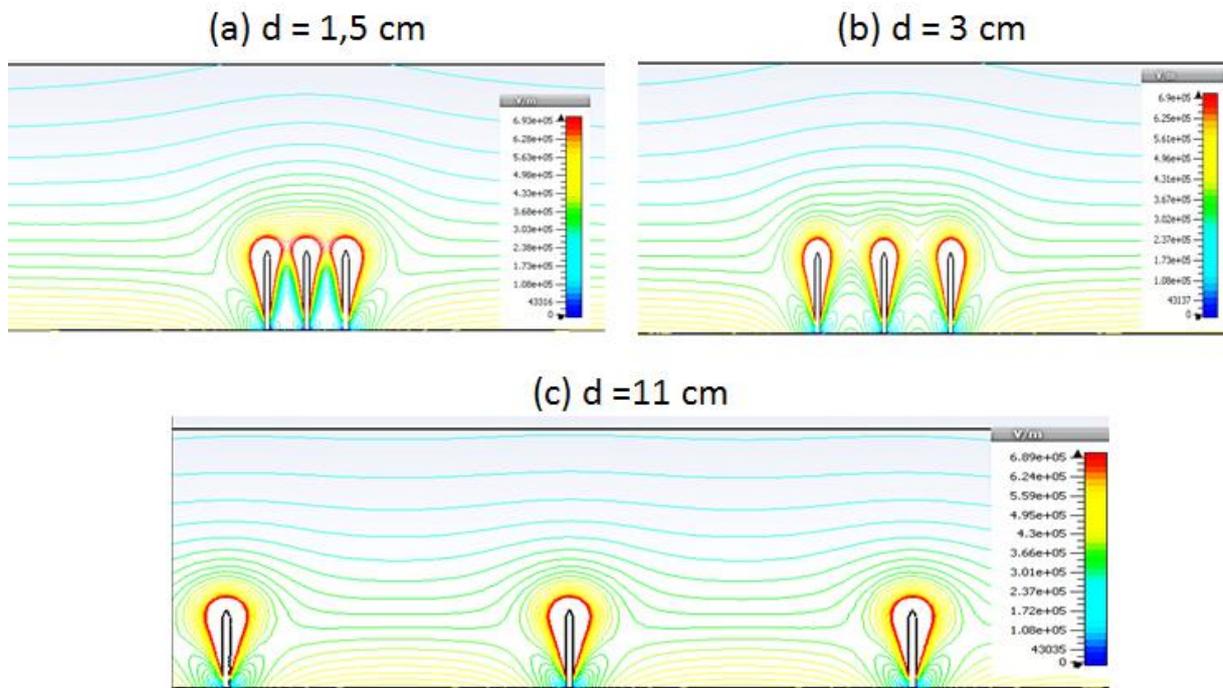


Figure 42 : Distribution des lignes de champ en fonction de la distance d ($L_p = 3$ cm).

Les valeurs de « d_s », déterminées à partir des résultats de la Figure 41, sont reportées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Distance de saturation pour différentes longueurs de pointes (U = -60 kV)

Longueur de la pointe (cm)	Valeur de la distance de saturation d_s (cm)
1	2
2,1	4
3	8

Ainsi, cette étude, menée à l'aide du logiciel CST Studio, nous a permis de simuler la distribution du champ électrique dans un électrofiltre afin d'optimiser la répartition et la longueur des pointes sur le nouveau tube support. Deux critères ont été retenus. Le premier concerne l'optimisation du champ moyen dans l'intervalle inter-électrodes qui favorise la dérive des poussières sans excéder la valeur du champ moyen de propagation du streamer négatif. Le second concerne l'optimisation du champ maximal sur une pointe qui est responsable de l'ionisation du gaz.

Les résultats obtenus permettent un premier dimensionnement de la Nouvelle Electrode :

- une longueur de pointe de 3 cm,
- un espacement entre pointe de 8 cm.

Ce pré-dimensionnement va être complété par une étude expérimentale.

II-2) Validation expérimentale du dimensionnement

Une étude expérimentale est menée afin de vérifier la validité des résultats obtenus par modélisation. La discussion ne porte plus sur le champ électrique mais sur le courant moyen injecté dans le filtre.

L'étude est réalisée en deux temps :

- une validation à une dimension, correspondant à la répartition longitudinale des pointes, pour laquelle le tube support de la Nouvelle Electrode sera placé parallèlement à un plan situé à la même distance que celle rencontrée dans le pilote. Il s'agira d'optimiser le courant moyen vis-à-vis de la longueur L_p des pointes et de leur distance d .

- une validation à deux dimensions, correspondant à la répartition radiale des pointes sur la Nouvelle Electrode qui sera positionnée dans le cylindre de collecte du pilote.

II-2-a) La longueur L_p des pointes

Un tronçon d'électrode de diamètre $\varnothing = 100$ mm (dimension du tube support de la Nouvelle Electrode) supportant trois pointes alignées est placé parallèlement à un plan relié à la masse. Ce dernier joue le rôle d'électrode de collecte (Figure 43).

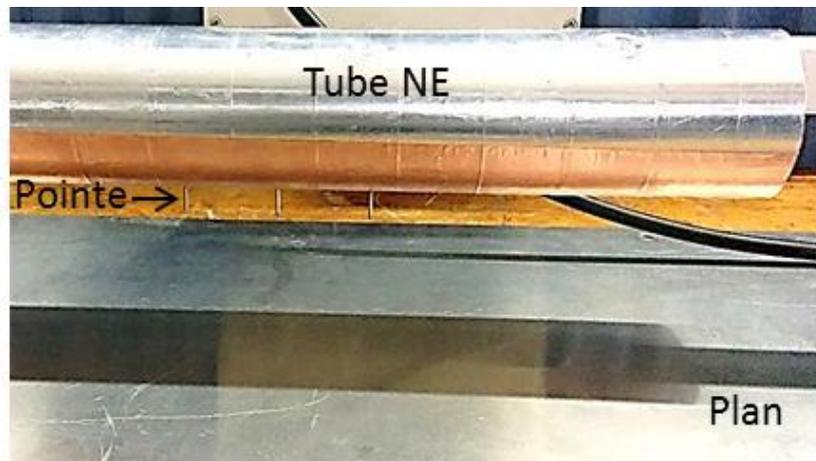


Figure 43 : Montage expérimental tube support + pointes / plan

L'étude dimensionnelle longitudinale de la Nouvelle Electrode est réalisée en appliquant une tension continue de -30 kV. La Figure 44 représente l'évolution, en valeur absolue, du courant moyen parcourant le circuit en fonction de la distance d entre pointes. Sur le graphique, sont représentés les résultats obtenus pour :

- trois longueurs L_p de pointes: 2, 3 et 4 cm,
- une pointe seule dont la valeur du courant est multipliée par trois pour correspondre au cas idéal de trois pointes isolées et totalement indépendantes.

Pour ces essais, la dispersion des résultats est relativement importante d'un jour à l'autre pour plusieurs raisons :

- la précision dimensionnelle du dispositif expérimental (rayon de courbure des pointes, distance entre le tube support et le plan, distance entre pointes),
- la précision de mesures de l'ampèremètre,
- l'influence des conditions atmosphériques du jour (pression, température, hygrométrie) qui modifient les seuils d'initiation et la caractéristique courant / tension des décharges électriques.

Les résultats présentés sont donc des valeurs moyennes pour lesquelles sont associées des barres d'incertitudes fixées à 10 %, ce qui est représentatif des écarts de résultats obtenus. Les bandes tracées représentent cette incertitude dans le cas d'une pointe unique dont la valeur du courant est multipliée par trois.

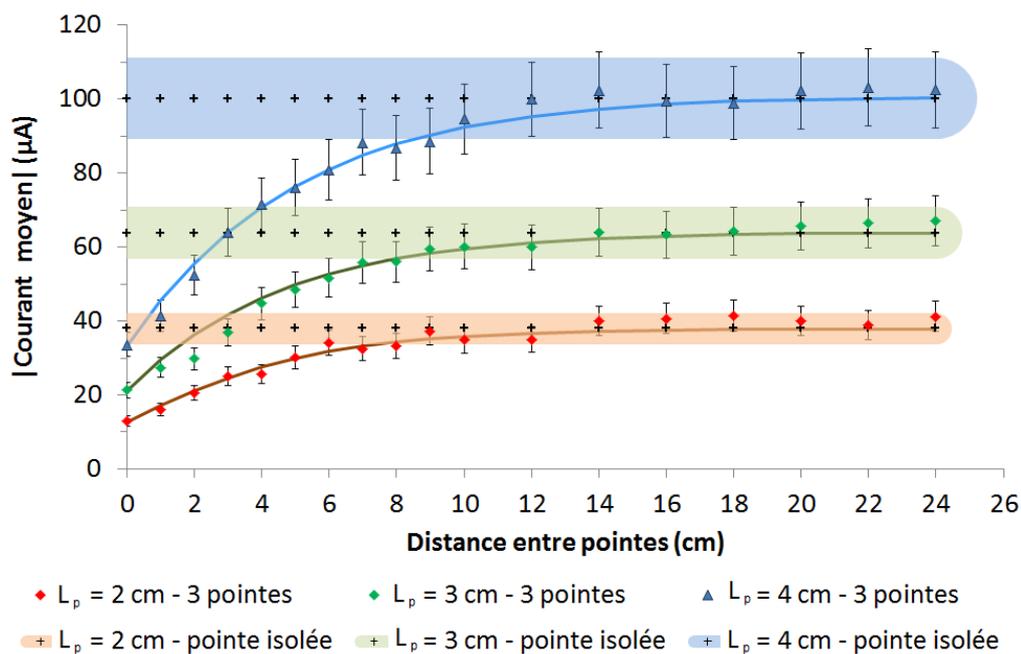


Figure 44 : Courant moyen injecté en fonction de l'écart entre les pointes

L'évolution du courant (Figure 44) est similaire à celle du champ électrique présentée sur la Figure 41 : plus la distance entre les pointes augmente, plus le courant croît jusqu'à saturer. Cette saturation du courant obtenue avec trois pointes alignées correspond bien à la valeur de trois pointes indépendantes.

Notons également que, plus la longueur de la pointe est grande, plus le courant est important et plus la distance minimale pour atteindre la saturation en courant croît. Atteindre la saturation en courant signifie que la quantité de charges injectée dans l'électrofiltre est optimale. Pour concevoir la Nouvelle Electrode, cette distance minimale d'espacement a été déterminée en prenant le premier point d'intersection entre la courbe de tendance de « trois pointes alignées » et la barre d'erreur de l'asymptote « d'une pointe isolée » (Figure 44). Ces résultats sont regroupés dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Valeur expérimentale de l'espacement minimal « d_s » nécessaire entre pointes (U = -30 kV)

Longueur de la pointe (cm)	Distance minimale d_s (cm)
2	7,2
3	8
4	8,5

Nous retrouvons le résultat déjà mis en évidence par les simulations de champs : pour une longueur de pointe de 3 cm, la distance minimale entre pointes est de 8 cm.

II-2-b) Influence de la tension sur la distance d_s

Afin de finaliser le dimensionnement de la Nouvelle Electrode, une étude complémentaire sur l'influence de la tension a été menée pour déterminer quelle longueur de pointe et quel espacement choisir entre les deux configurations suivantes :

- une longueur de pointe de 3 cm avec une distance « d_s » d'environ 8 cm,
- ou
- une longueur de pointe de 4 cm avec une distance « d_s » d'environ 9 cm.

Pour une tension de -30 kV, -35 kV et -40 kV, la distance de saturation est relevée pour chaque longueur de pointe. Les résultats sont retranscrits sur la courbe (Figure 45).

Le courant moyen est équivalent pour une longueur de pointe de 3 cm à -35 kV et une longueur de pointe de 4 cm à -30 kV. En somme, il suffit d'augmenter la tension appliquée pour compenser la différence géométrique (longueur des pointes) (Figure 45).

Pour une longueur de pointe donnée, la tension va influencer sur le courant moyen libéré, mais aussi sur la distance de saturation d_s qui croît avec la longueur de la pointe et la tension appliquée.

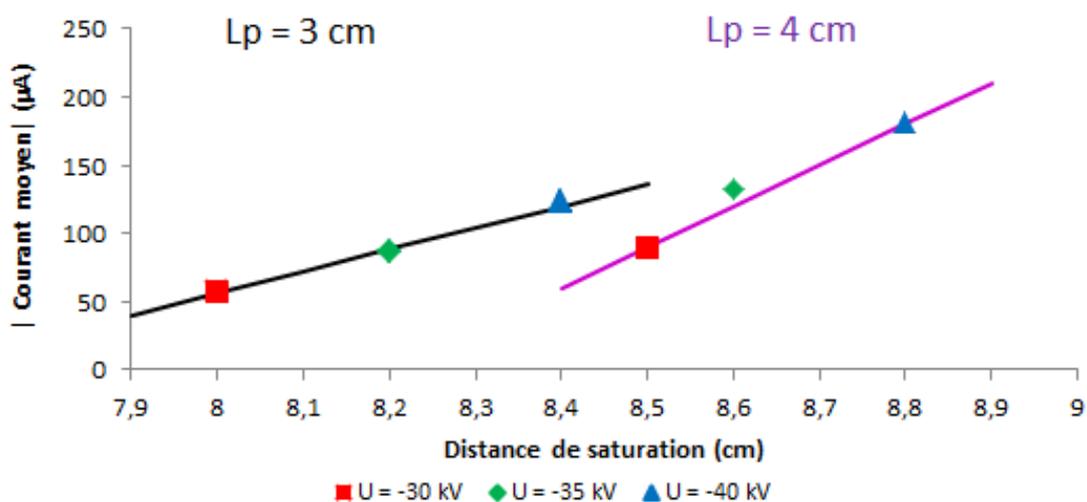


Figure 45 : Influence de la tension sur la distance de saturation " d_s "

L'utilisation d'une longueur de pointe plus petite va augmenter le volume de gaz filtré et, comme la distance requise entre les pointes est plus faible, cela va permettre de positionner un plus grand nombre de sites émissifs.

Pour résumer, la différence entre ces deux configurations se caractérise par un champ électrique et un courant moyen libéré plus élevés pour une pointe de longueur 4 cm que pour celle de 3 cm. Néanmoins, l'écart n'est pas significatif et peut être compensé en augmentant la tension appliquée et le nombre de pointes sur la Nouvelle Electrode. En revanche, une analyse du volume filtrable (Figure 39) souligne un écart de 10 % entre une longueur de 3 cm et de 4 cm. Il a donc été décidé de fixer la longueur des pointes à 3 cm.

II-2-c) Influence du nombre de pointes par couronne

Pour le dimensionnement radial des pointes ($L_p = 3$ cm), nous faisons maintenant varier leur nombre par couronne dans la configuration Nouvelle Electrode / cylindre. Une analyse des résultats obtenus pour trois niveaux de tension (Figure 46) indique que la croissance du courant moyen évolue dans un premier temps linéairement. A partir d'un certain nombre de pointes, il se produit un effet de saturation identique à celui obtenu dans le dimensionnement longitudinal.

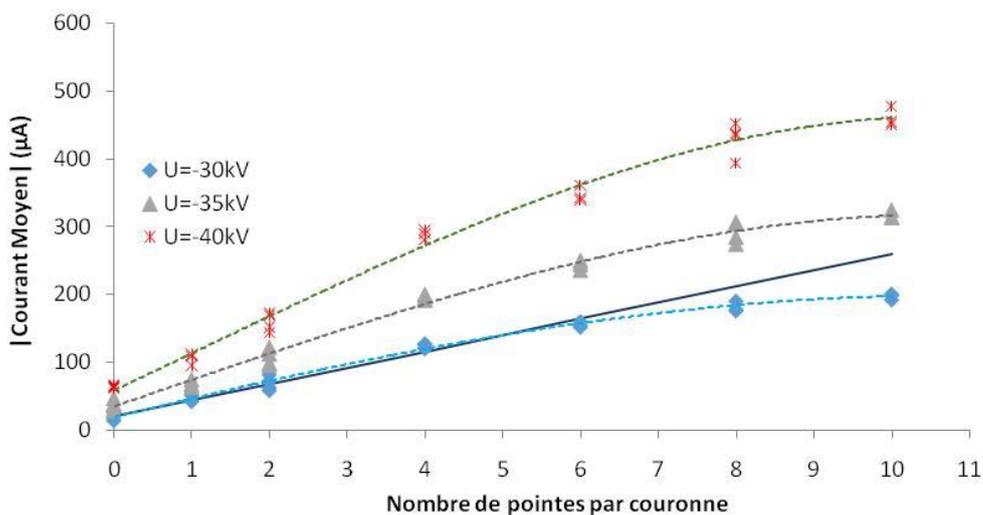


Figure 46 : Evolution du courant en fonction du nombre de pointes par couronne

Notons que cette analyse recoupe celle obtenue précédemment (Figure 44) : la configuration de 6 pointes par couronne représente un écart suffisant entre pointes et conserve la distance de 8 cm requise pour une longueur de pointe de 3 cm.

II-3) Bilan sur la conception de la Nouvelle Electrode et premières mesures

En recoupant les résultats issus de la modélisation et de l'expérience, il a été possible de définir les paramètres géométriques de la Nouvelle Electrode. Les différences entre simulations et expériences peuvent s'expliquer par les incertitudes expérimentales, mais

aussi par le fait qu'en simulation, les pointes sont parfaitement identiques entre elles, alors qu'expérimentalement des écarts sont possibles, en particulier sur les rayons de courbures.

Pour conclure sur la partie conception et optimisation de la nouvelle électrode, les données géométriques adoptées pour la réalisation de la Nouvelle Electrode, que nous nommerons par la suite Solectrode, sont :

- un tube support de diamètre 100 mm,
- une longueur de pointe de 30 mm,
- une distance entre pointes de 80 mm qui a deux conséquences :
 - o chaque couronne comporte six pointes,
 - o les couronnes étant décalées de 30 °, la distance entre les couronnes contiguës est de 70 mm.

Ainsi pour le montage Solectrode / cylindre, la distance inter-électrodes est égale à 70 mm. Un prototype de Solectrode (Figure 47) a été conçu au laboratoire. Les pointes sont réalisées à l'aide de rivets (alliage aluminium / acier) coupés et fixés sur un tube support en aluminium de diamètre 100 mm et de longueur 1300 mm. Au total, la Solectrode comporte 120 sites émissifs alors que l'Héritrode en possède 246.

Des bouchons sont positionnés aux extrémités du tube :

- pour fixer l'électrode sur la traversée HT,
- pour refermer l'électrode et éviter l'introduction de poussières à l'intérieur.

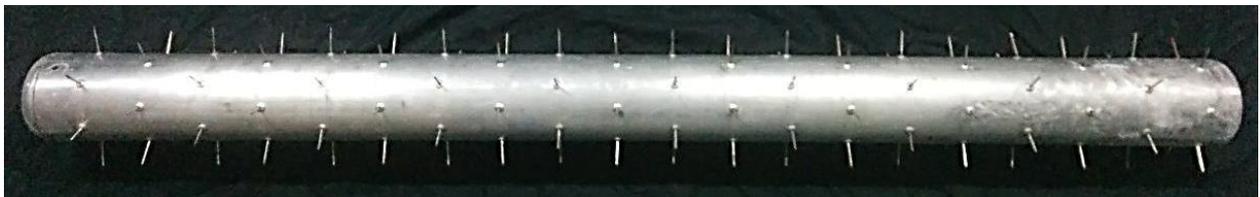


Figure 47 : Photographie de la Solectrode

La Figure 48 présente les mesures du courant moyen injecté en fonction de la tension continue appliquée pour :

- la Solectrode,
- les résultats d'une couronne de six pointes multipliés par 20 pour extrapoler aux 120 pointes.

Ces deux évolutions sont similaires jusqu'à 30 kV. Cela signifie que la Solectrode réalisée respecte bien les conclusions de l'optimisation jusqu'à ce niveau de tension. Au-delà, un écart est observable entre les deux courbes probablement dû aux effets de la tension sur le dimensionnement. Quoiqu'il en soit, les niveaux de tensions utilisés avec la Solectrode seront inférieurs à 30 kV.

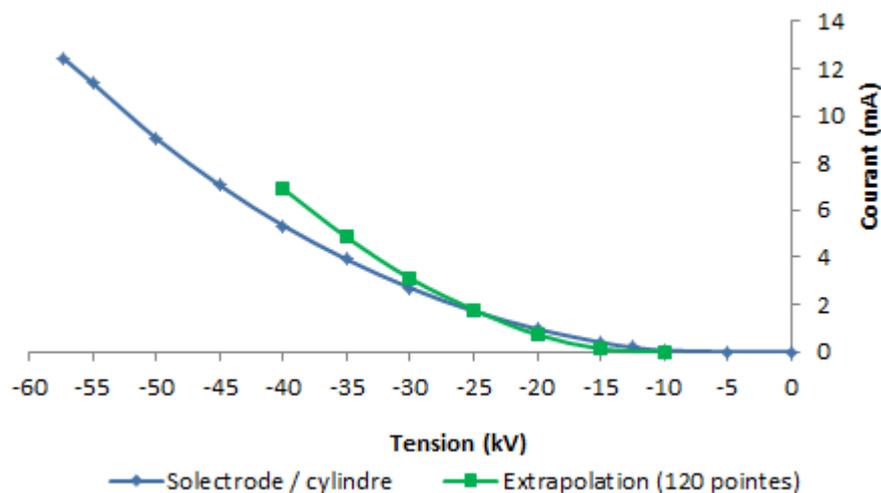


Figure 48 : Comparaison des résultats d'optimisation de la Solectrode

Une dernière étude courant / tension a été effectuée sur le pilote (avec et sans flux d'air) et sans injection de poussières (Figure 49). Cette courbe servira de témoin pour vérifier le niveau d'encrassement de la boucle.

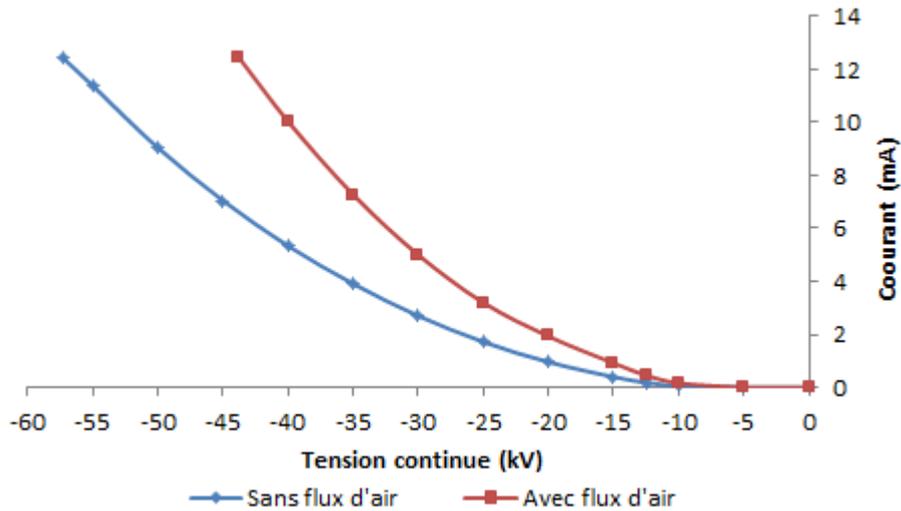


Figure 49 : Etude courant / tension dans la configuration Solectrode / cylindre

- III) Les compteurs de particules et l'injecteur
- III-1) Les compteurs de particules

La quantité de particules de poussières contenue dans le gaz est évaluée en utilisant des compteurs de particules. Lors des travaux antérieurs [30], [98], le CEA et le laboratoire SIAME utilisaient un unique compteur optique de la société GRIMM technologie Inc de type 1.108 (gamme de mesure sur 15 classes de $0,3 \mu\text{m}$ à $20 \mu\text{m}$). Ce compteur était positionné alternativement en amont et en aval du filtre électrostatique. Par conséquent, il n'était pas possible de quantifier simultanément les nombres de particules entrantes et sortantes. Le rendement moyen de filtration était donc estimé par des mesures successives amont / aval.

Pour pallier à ce problème, nous disposons maintenant de deux compteurs GRIMM de type 1.109 (Figure 50), ce qui présente un double avantage. D'une part, les GRIMM 1.109 sont plus performants que les 1.108 puisqu'ils possèdent une plage de détection plus étendue et plus précise (gamme de mesure sur 31 classes de $0,25 \mu\text{m}$ à $32 \mu\text{m}$). D'autre part, nous pouvons mesurer en continu le taux d'injection de poussières (particules entrantes dans le filtre) ainsi que le taux de particules sortantes.



Figure 50 : Compteur GRIMM 1.109

Les prélèvements s’effectuent à l’aide de deux sondes (Figure 51) disposée chacune au centre de l’écoulement pour que la concentration et la répartition granulométrique des particules analysées soient représentatives de l’effluent gazeux. Il s’agit de prélèvement dit iso-cinétique dont la vitesse dépend du diamètre de la buse. La canne de mesure est constituée d’un circuit de mesure et d’un circuit de rejet d’air pour le fonctionnement de la pompe, tous deux reliés au compteur (Figure 51). Le débit de prélèvement de l’appareil est réglé à 1,2 litre/minute et les résultats sont affichés toutes les 6 secondes.



Figure 51 : Cannes de prélèvement

Les compteurs GRIMM utilisent la méthode de granulométrie laser. Cette technique mesure la distribution en taille des particules par diffraction lumineuse. Une diode laser émet de la lumière dans une cellule close, à une certaine longueur d’onde connue. L’échantillon analysé en traversant le faisceau lumineux va entraîner, par la présence des particules, une variation angulaire de l’intensité de lumière diffusée. À chaque taille de particules correspond un angle de déviation du faisceau lumineux, ainsi les grosses particules diffuseront la lumière avec un angle plus faible et de manière plus intense que pour les

petites. La diffraction de la lumière est ensuite analysée à l'aide d'une diode CCD sur un angle de 60° à 120° (Figure 52). Les impulsions générées sont comptabilisées et classifiées selon la taille de la particule. Un comptage en nombre ou en masse par granulométrie peut ainsi être enregistré. Lors des essais menés, seul le mode de prélèvement en nombre a été utilisé. Cette méthode se prête mieux aux études temporelles réalisées. Elle permet une étude plus rapide et un traitement simplifié des données enregistrées.

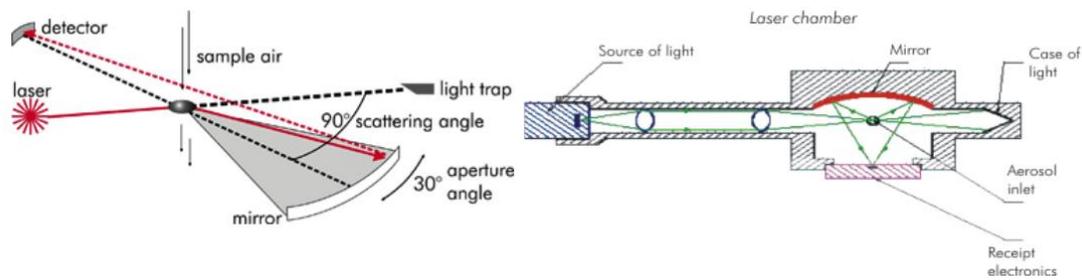


Figure 52 : Principe de fonctionnement d'un compteur GRIMM [105]

La technique de diffraction laser repose sur la théorie Fraunhofer qui suppose que les particules :

- sont sphériques, non poreuses et opaques,
- ont une taille supérieure à la longueur d'onde,
- sont suffisamment distantes les unes des autres,
- diffractent la lumière avec une même efficacité quelle que soit leur taille,
- sont animées d'un mouvement Brownien.

Cette théorie est complétée par celle de Mie (valable pour les PM_{10}) qui suppose de connaître les propriétés de l'échantillon et du dispersant étudié à savoir l'indice de réfraction.

Ainsi, cette méthode de mesure granulométrique par comptage est relativement précise, mais elle présente néanmoins une incertitude estimée par le constructeur à 3 % sur tous les canaux. De plus, pour une précision optimale, l'échelle de mesure du GRIMM est donnée de 0 à $2 \cdot 10^6$ particules/litre. Dans les faits, il fonctionne jusqu'à un taux d'injection de l'ordre de 10^7 particules/litre et sature au-delà.

Les mesures sont réalisées en continu et enregistrées toutes les 6 secondes lors d'un fonctionnement de quelques minutes. Les données recueillies sont ensuite analysées et

traitées. Les quantités de particules entrantes $n_{\text{entrée}}$ et sortantes n_{sortie} du filtre sont moyennées. Le rendement de filtration est évalué de la façon suivante (2.3).

$$\rho = \frac{\langle n_{\text{entrée}} \rangle - \langle n_{\text{sortie}} \rangle}{\langle n_{\text{entrée}} \rangle} * 100 \quad (2.3)$$

Pour un fonctionnement de la boucle sur des temps supérieurs à une heure, les mesures sont enregistrées toutes les minutes. Le rendement $\rho(t)$ est calculé toutes les minutes, mais à partir de la quantité totale de particules entrantes $n_{\text{entrée}}(t)$ et sortantes $n_{\text{sortie}}(t)$ par minute. Nous obtenons donc une évolution temporelle du rendement définie par (2.4).

$$\rho(t) = \frac{n_{\text{entrée}}(t) - n_{\text{sortie}}(t)}{n_{\text{entrée}}(t)} * 100 \quad (2.4)$$

III-2) Le système d'injection

Pour contrôler l'injection des poussières dans le pilote, le système d'injection a été amélioré par rapport au précédent. Il est constitué d'un ballon tri-col fermé contenant les poussières à injecter qui sont balayées par un flux d'air asséché. L'injection des poussières est contrôlée par le débit d'air réglable à l'aide d'une vanne micrométrique et par l'agitation magnétique de barreaux aimantés utilisés pour avoir un brassage continu des poussières et détruire d'éventuels agrégats formés (Figure 53).

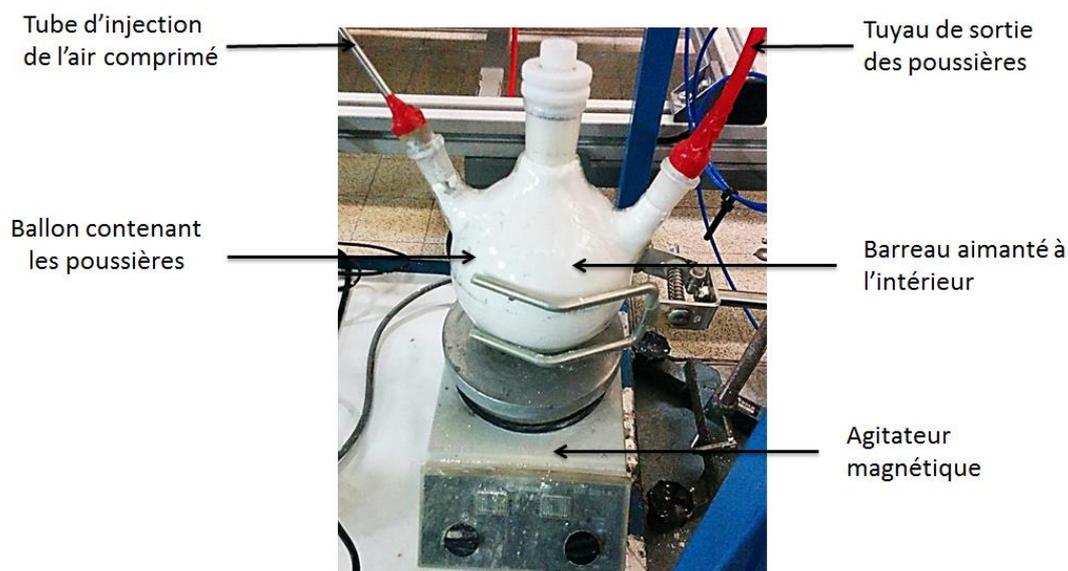


Figure 53 : Dispositif expérimental d'injection des poussières

L'air enrichi en poussières ressort du ballon et est relié au point d'injection de la boucle du pilote. La quantité de poussières entrante est évaluée à l'aide de la sonde placée dans la boucle et qui est reliée à un compteur GRIMM. Rappelons que le taux d'injection doit être compris entre 2.10^6 et 4.10^6 particules/litre.

L'injection des poussières dépend de nombreux paramètres tels que le débit d'air entrant dans le ballon, l'agitation des poussières, la quantité de poussières contenues dans le ballon ou encore leur nature. Une certaine quantité de poussières est introduite en début d'expérience dans le ballon. Plus l'expérience dure dans le temps, plus la quantité de poussières diminue, ce qui nécessite des réajustements des paramètres d'injection. De ce fait, il n'est pas possible de définir une configuration donnée (débit d'air injecté dans le ballon, taux d'agitation) permettant d'obtenir une injection parfaite. Un contrôle et un réajustement sont donc indispensables en continu pour maintenir une injection stable et régulière.

IV) Caractérisations physico-chimiques des poussières

Au cours de mes travaux, sept types de poussières différentes ont été fournis par le CEA. Trois d'entre eux sont issues des procédés IRIS et SHIVA. Leur dénomination sera : IRIS, V5 et SHIVA.

Quatre sont d'origines commerciales et correspondent essentiellement à des adjuvants pour béton : ARGICAL, CALCITEC, DOLOMITE et SIKRON.

Les poussières « procédés » proviennent de l'incinération de solutions de matériaux non-radioactifs, dont les propriétés sont proches des matériaux réels radioactifs produits par l'industrie nucléaire. Ces poussières sont collectées en sortie du procédé qui peut présenter différents paramètres de fonctionnement. La quantité disponible étant limitée, l'étude de l'efficacité de filtration sera réalisée pour ces différentes poussières « procédés », mais également sur des poussières modèles, disponibles sans limite de quantité, de manière à pouvoir mener des études plus systématiques.

Différentes caractérisations sont réalisées afin de connaître les propriétés physico-chimiques des poussières « procédés », mais aussi pour choisir, parmi les poussières commerciales, celle qui servira de poussière modèle.

IV-1) L'analyse chimique

Les résultats des analyses chimiques, rassemblés dans le Tableau 5 et le Tableau 6, proviennent des fiches produits des fabricants pour les poussières commerciales et d'analyses chimiques réalisées par la société SOCOR pour les poussières « procédés ». Un complément d'informations sur les méthodes utilisées pour l'analyse des éléments chimiques présents dans les échantillons, est fourni en Annexe B, ainsi que les fiches produits.

En sortie des procédés IRIS et SHIVA, les gaz traités contiennent des polluants acides condensables HCl et SO₂, ce qui explique l'avantage de travailler à de hautes températures. Ces rejets, que nous retrouvons dans les PM_{2,5}, sont présents dans les trois poussières collectées (présence de Soufre et de Chlore). Des métaux sont également présents : Zn, Ca et, pour IRIS et SHIVA, des éléments cristallogènes sont observés : Carbone, Silicium. La poussière IRIS contient du chlore et du calcium pouvant former du chlorure de calcium qui est un sel absorbant l'humidité et favorisant l'agglomération des petites particules avec des agrégats de plus grandes tailles. Concernant le phosphate, il peut avoir précipité à la surface du carbonate de calcium ou être inclus dans ses matrices ou dans la silice.

Concernant les poussières commerciales :

- ARGICAL est composé essentiellement de Silice ($T_f = 1600^\circ\text{C}$) et d'Alumine ($T_f = 2072^\circ\text{C}$) qui sont des composés stables chimiquement et dont la température de fusion est élevée.
- CALCITEC contient en majorité du carbonate de calcium ($T_f = 825^\circ\text{C}$) qui est le composé majoritaire des calcaires.
- SIKRON est essentiellement de la poussière de Silice.
- DOLOMITE est une poussière utilisée par la société INTERTEK pour étalonner les GRIMM. Il s'agit d'une espèce minérale, de formule $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, formée de carbonate de calcium et de magnésium avec des traces résiduelles d'autres éléments.

Tableau 5 : Analyses chimiques des poussières commerciales

ARGICAL 1200 S		CALCITEC 2002 M		DOLOMITE 400		SIKRON E600	
SiO₂	55 %	SiO₂	0,16 %	SiO₂	0,01 %	SiO₂	99,2 %
Fe₂O₃	1,8 %	Fe₂O₃	0,03 %	Fe₂O₃	0,008 %	Fe₂O₃	330 ppm
TiO₂	1,5 %			TiO₂	0,01 %	TiO₂	220 ppm
Al₂O₃	39 %	Al₂O₃	0,05 %	Al₂O₃	0,02 %	Al₂O₃	7520 ppm
		CaCO₃	98,86 %	CaCO₃	54,7 %		
		H₂O	0,1 %	MgCO₃	45,2 %		
K₂O + Na₂O	1 %	S	0,03 %	K₂O	0,01 %	K₂O	60 ppm
CaO + MgO	0,6 %	MgO	0,21 %	MgO	21,6 %		
				CaO	30,7 %	CaO	110 ppm

Tableau 6 : Analyses chimiques des poussières « procédés »

IRIS		V5		SHIVA
C	0,2 %	C	1,6 %	Composition > 95 % de SiO ₂
Cl	16113 ppm	Cl	64985 ppm	
Zn	22125 ppm	Zn	394572 ppm	
P	22740 ppm	P	158343 ppm	
Si	88286 ppm	H	0,34 %	
Ca	60099 ppm	N	< 0,1 %	
		S	6081 ppm	
		O	0,5 %	

Avec : 1 ppm = partie par million (1 mg/kg)

Ces analyses permettent de vérifier que les sept poussières étudiées sont chimiquement différentes les unes des autres et qu'elles peuvent toutes potentiellement être utilisables pour notre étude.

IV-2) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet d'évaluer la taille des particules afin de vérifier si elles se situent bien dans la gamme de détection des compteurs GRIMM.

L'analyse est réalisée à l'aide d'un granulomètre laser de type MALVERN-MASTERSIZER S. Le protocole expérimental est le même pour toutes les poussières. Un échantillon est prélevé, il est préalablement écrasé (sans broyage) avec un pilon dans un mortier pour casser les agglomérats de poussières qui se sont formés dans le flacon (essentiellement en surface) et qui sont susceptibles de fausser la mesure. L'échantillon est ensuite dilué dans de l'éthanol qui donne des résultats plus précis que dans de l'eau. L'échantillon subit une première analyse au granulomètre, puis est passé aux ultrasons afin de déterminer la répartition réelle en taille de l'échantillon. L'utilisation d'ultrasons permet de disperser au mieux les particules dans le milieu et ainsi de détruire d'éventuels agglomérats de poussières. Les courbes obtenues sont comparées. Lorsqu'il n'y a plus d'évolution avec ou sans présence d'ultrasons et que la valeur du résiduel obtenu est

inférieure à 1, elles sont considérées comme reproductibles et représentatives de l'échantillon analysé (Figure 54).

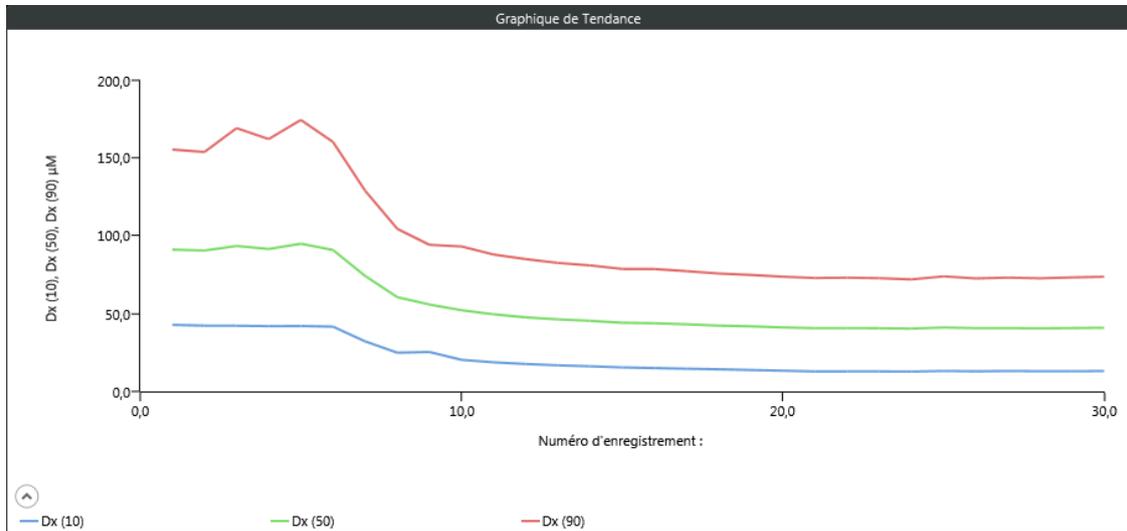


Figure 54 : Protocole expérimental d'analyse granulométrique pour la poussière SHIVA

Les tracés granulométriques pour chaque poussière figurent en Annexe C. La comparaison de l'ensemble des poussières est donnée sur la Figure 55. La zone rosée représente la plage de détection des compteurs GRIMM.

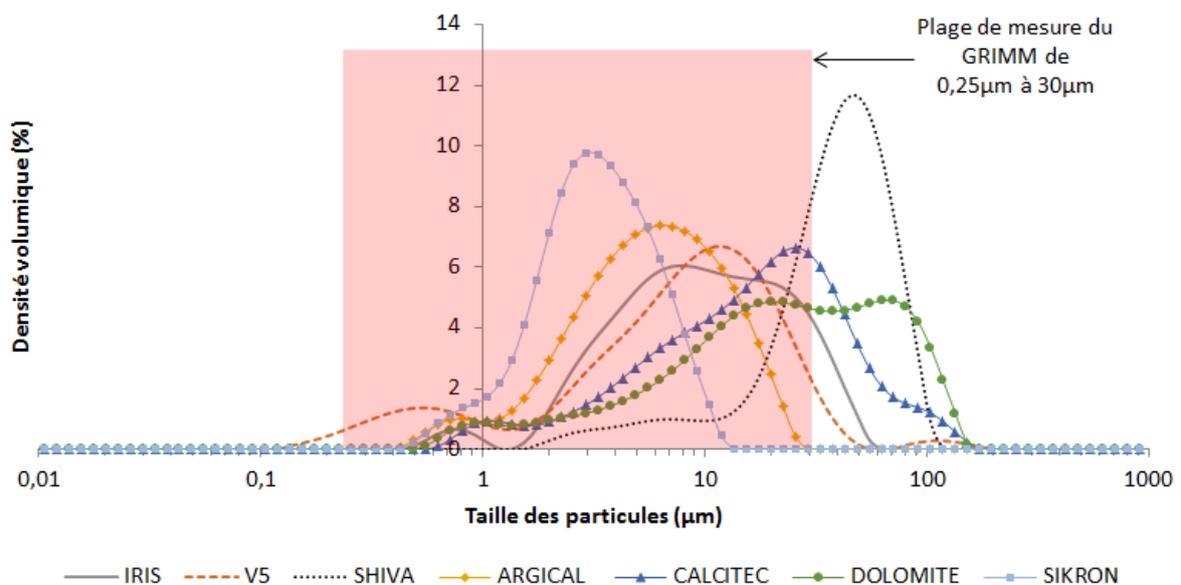


Figure 55 : Comparaison de la granulométrie des poussières

Les poussières IRIS et V5 ont des granulométries très proches et de types polydispersés. La poussière IRIS présente une courbe tri-modale, avec un pic de densité à $0,7 \mu\text{m}$, pour une taille de particules allant de $0,5 \mu\text{m}$ à $1,2 \mu\text{m}$. Le second et le troisième pics sont respectivement à $8 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$ avec une classe de particules de $1,5 \mu\text{m}$ à $63 \mu\text{m}$.

La poussière V5 possède une forme bimodale : mode 1 à $0,55 \mu\text{m}$ et mode 2 à $12 \mu\text{m}$ pour une plage de taille de $0,12 \mu\text{m}$ à $55 \mu\text{m}$. Ces deux poussières « procédés » se situent en majorité dans la gamme de détection des compteurs GRIMM.

La poussière SHIVA, bien que plutôt homogène, se caractérise par une courbe unimodale centrée sur $50 \mu\text{m}$ (taille comprise entre $1,5 \mu\text{m}$ et $120 \mu\text{m}$), mais au-delà de la limite supérieure de détection des GRIMM.

Ainsi, d'après ces résultats granulométriques et les critères de mécanismes de charge présentés précédemment, il est attendu que pour IRIS et V5 les deux mécanismes de charge (par champ et par diffusion) interviennent, alors que pour la poussière SHIVA, la charge par champ devrait être majoritaire.

Parmi les poussières commerciales, nous souhaitons conserver une poussière modèle dont la répartition en taille se situe parfaitement dans la gamme de détection des GRIMM. Les poussières DOLOMITE et CALCITEC ne répondent pas à ces exigences. En revanche, ARGICAL et SIKRON se positionnent parfaitement dans cette plage. Pour arrêter la sélection, plusieurs paramètres sont à considérer comme la composition chimique, la granulométrie ou les quantités disponibles. L'étude de l'analyse chimique a montré que la poussière SIKRON (majorité de Silice) a une composition plus simple et homogène que la poussière ARGICAL (mélange de Silice et d'Alumine) (Tableau 6). De plus, en comparant la granulométrie de SIKRON et ARGICAL, il apparaît que SIKRON est plus homogène qu'ARGICAL. Utiliser cette poussière permettra de travailler avec des particules plus fines (pic à $3 \mu\text{m}$) et de balayer une plage de tailles [$0,43 \mu\text{m}$; $13,5 \mu\text{m}$] différente des poussières « procédés ». Les deux mécanismes de charge par champ et par diffusion devraient également intervenir avec ces particules. Pour conforter notre choix de sélectionner la SIKRON, il faut noter qu'elle est disponible à volonté, par sac de 50 kg.

IV-3) L'analyse optique

Les quatre poudres retenues (IRIS, V5, SHIVA et SIKRON), présentées Figure 56, sont analysées par microscopie électronique à balayage (MEB). Ces essais ont été réalisés par l'équipe Chimie-Physique de l'IPREM de l'Université de Pau.



Figure 56 : Photographie des poudres utilisées

Cette méthode de caractérisation, basée sur l'interaction électrons-matière, permet de produire des images de haute résolution de la surface des échantillons, d'étudier la morphologie et la structure des différentes poussières, mais aussi de déterminer leurs formes et leurs tailles.

Les poudres « procédés » sont des particules « grossières » polydispersées qui nécessitent l'usage de grossissements différents (x70, x200, x500 et x2000) ainsi qu'une tension d'accélération de 10 kV pour les observer. En revanche, la poussière SIKRON est une poussière fine qui requiert l'utilisation de grossissements plus importants (x2000, x2500, x5000 et x9000) et une tension d'accélération de 20 kV.

Les clichés MEB obtenus avec IRIS sont donnés en Figure 57. Une observation à faible grossissement (Figure 57 - a et b) permet de constater la présence d'agglomérats, la forme irrégulière, polydispersée des poussières ainsi que la non-homogénéité de la poudre. La taille des particules coïncide avec les résultats granulométriques obtenus (Figure 55). IRIS se caractérise par une structure légèrement cristalline en accord avec l'analyse chimique (Figure 57 - d). En revanche, les particules ne sont pas forcément sphériques, hormis les agrégats (Figure 57 - c). Cette observation est importante, car l'analyse des échantillons par les compteurs GRIMM utilise l'hypothèse de particules sphériques.

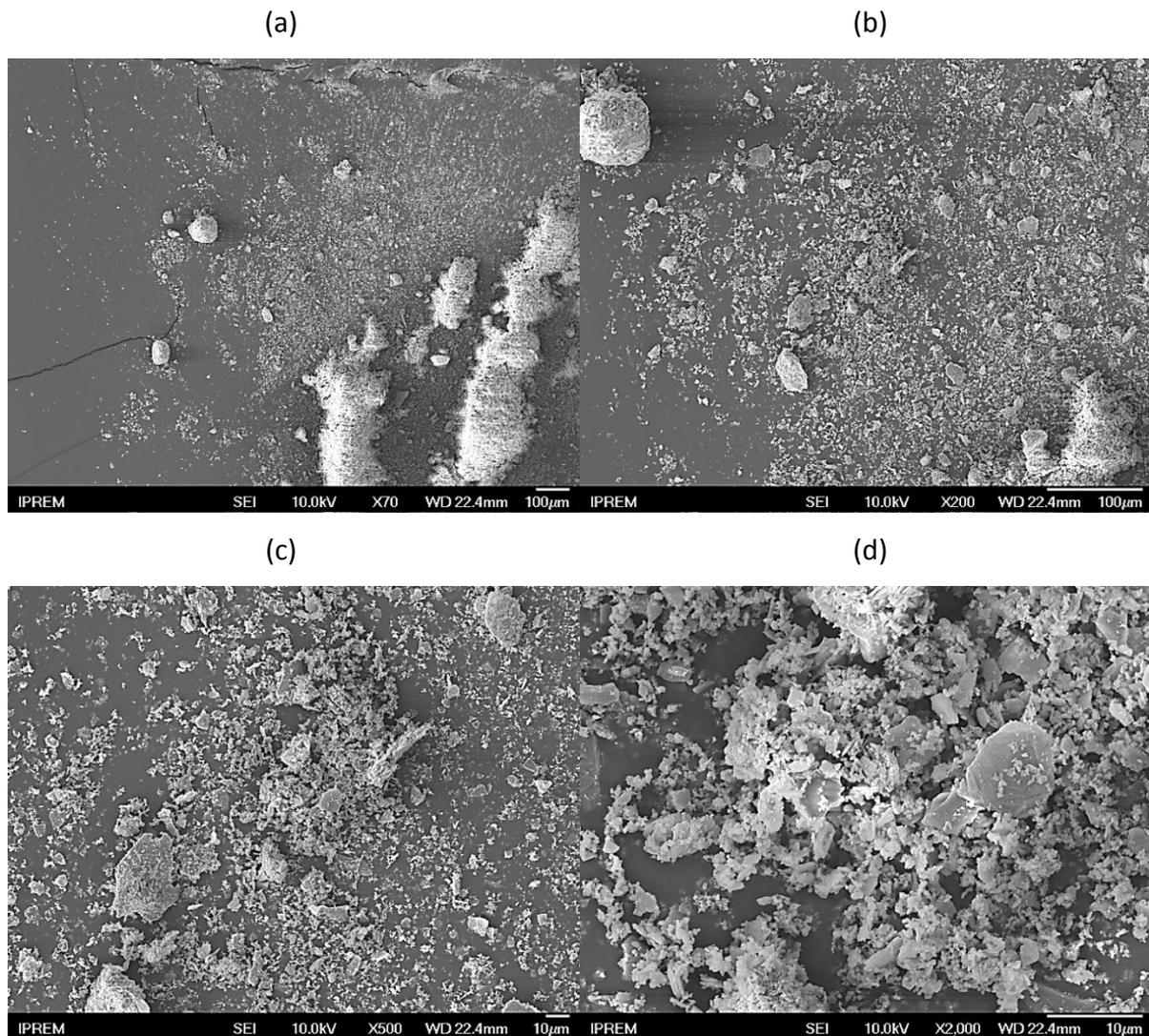


Figure 57 : Analyse MEB de la poussière IRIS

L'analyse optique de la poussière V5 (Figure 58) confirme sa proximité structurelle avec la poussière IRIS. Les particules de V5 sont polydispersées (Figure 58 - a et c), comme IRIS, de forme irrégulière et avec une tendance à s'agglomérer. Ces poussières peuvent donc former des particules plus grosses lors du procédé d'électrofiltration. Ces clichés confirment qu'il s'agit d'une poussière non-homogène et non-cristalline.

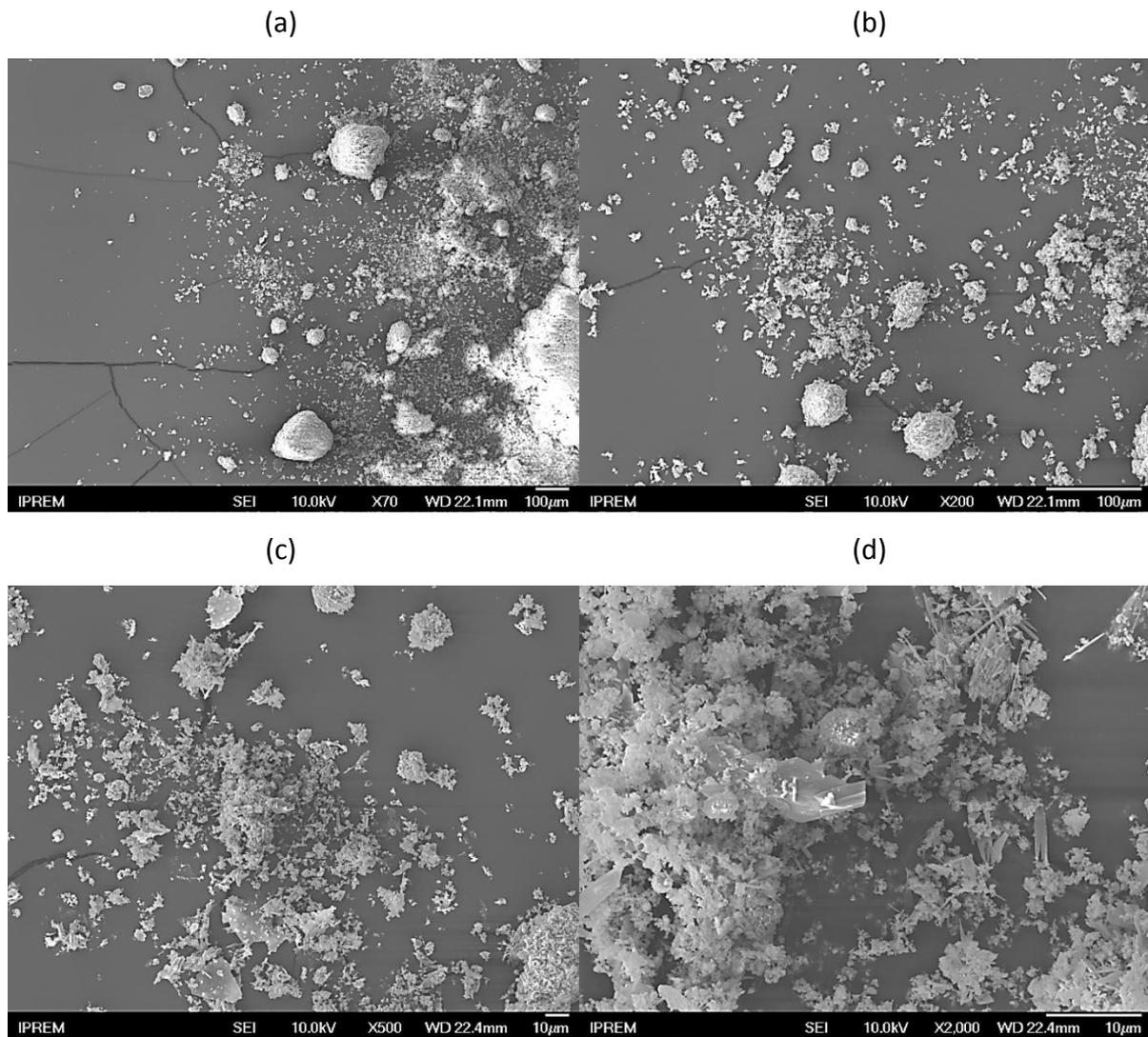


Figure 58 : Analyse MEB de la poussière V5

IRIS et V5 présentent des structures et des morphologies très proches, contrairement à SHIVA qui a une forme globuleuse en amas (Figure 59 – a et b). SHIVA est formée de particules plus ramassées, condensées et de nature plus dense (Figure 59 – c). Cette poudre se caractérise par des agglomérats et des particules de taille plus grande ($> 10 \mu\text{m}$) relativement homogène (Figure 59 – d).

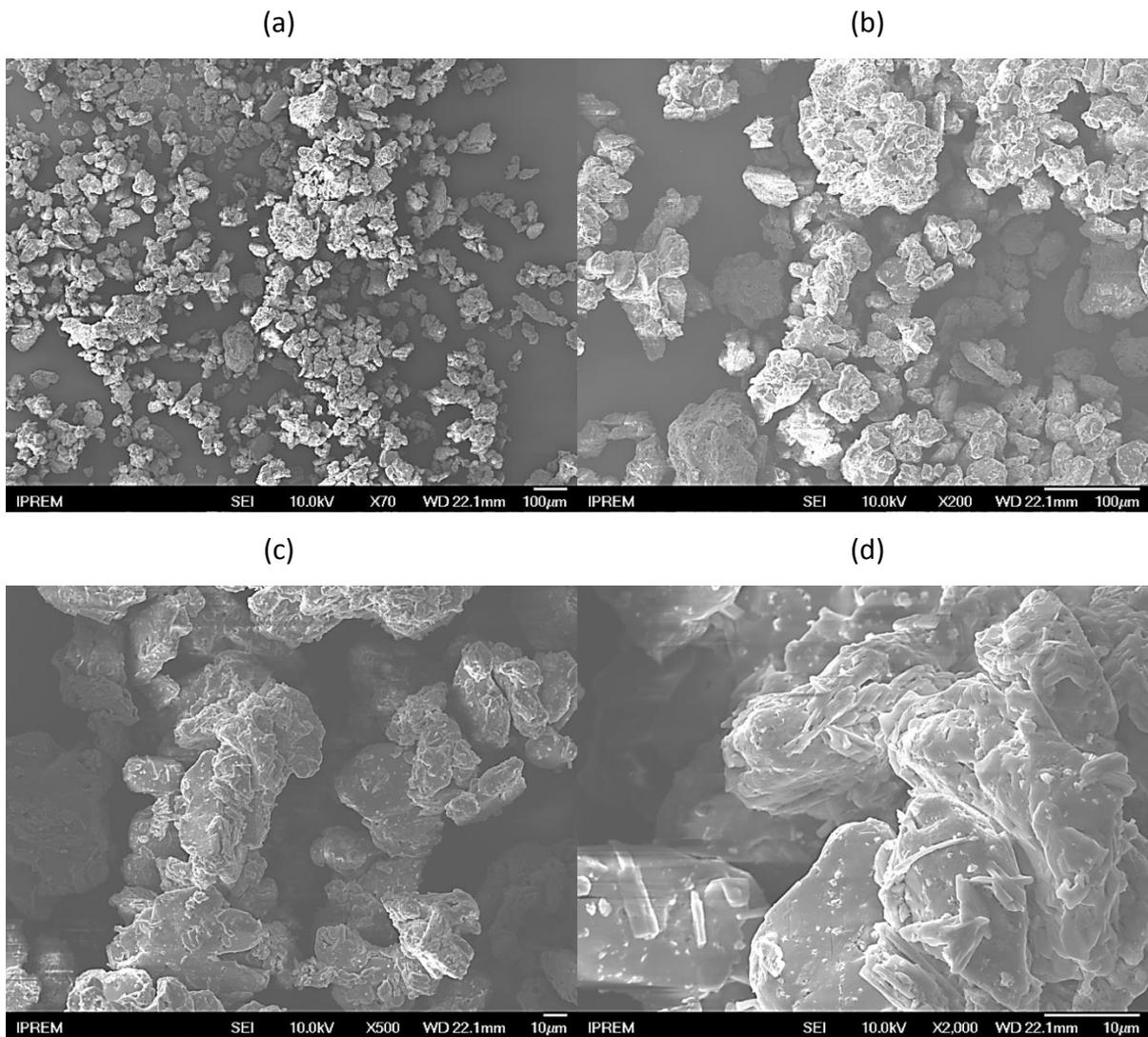


Figure 59 : Analyse MEB de la poussière SHIVA

Comme déjà précisé, SIKRON est une poudre fine qui nécessite l'utilisation de grossissements plus importants afin d'obtenir un aperçu plus global de la répartition de l'échantillon, plus précis de la taille et plus juste de sa forme et de sa structure. Cette poudre possède une taille de particules inférieure à 10 µm, voire inférieure à un micromètre pour certaines (Figure 60 – a et b). Les clichés MEB indiquent la présence de formes répétées et organisées, typique d'une structure cristalline (Figure 60 – b et d). L'échantillon est dense avec des particules non-sphériques, mais de surface lisse (Figure 60 – c et d).

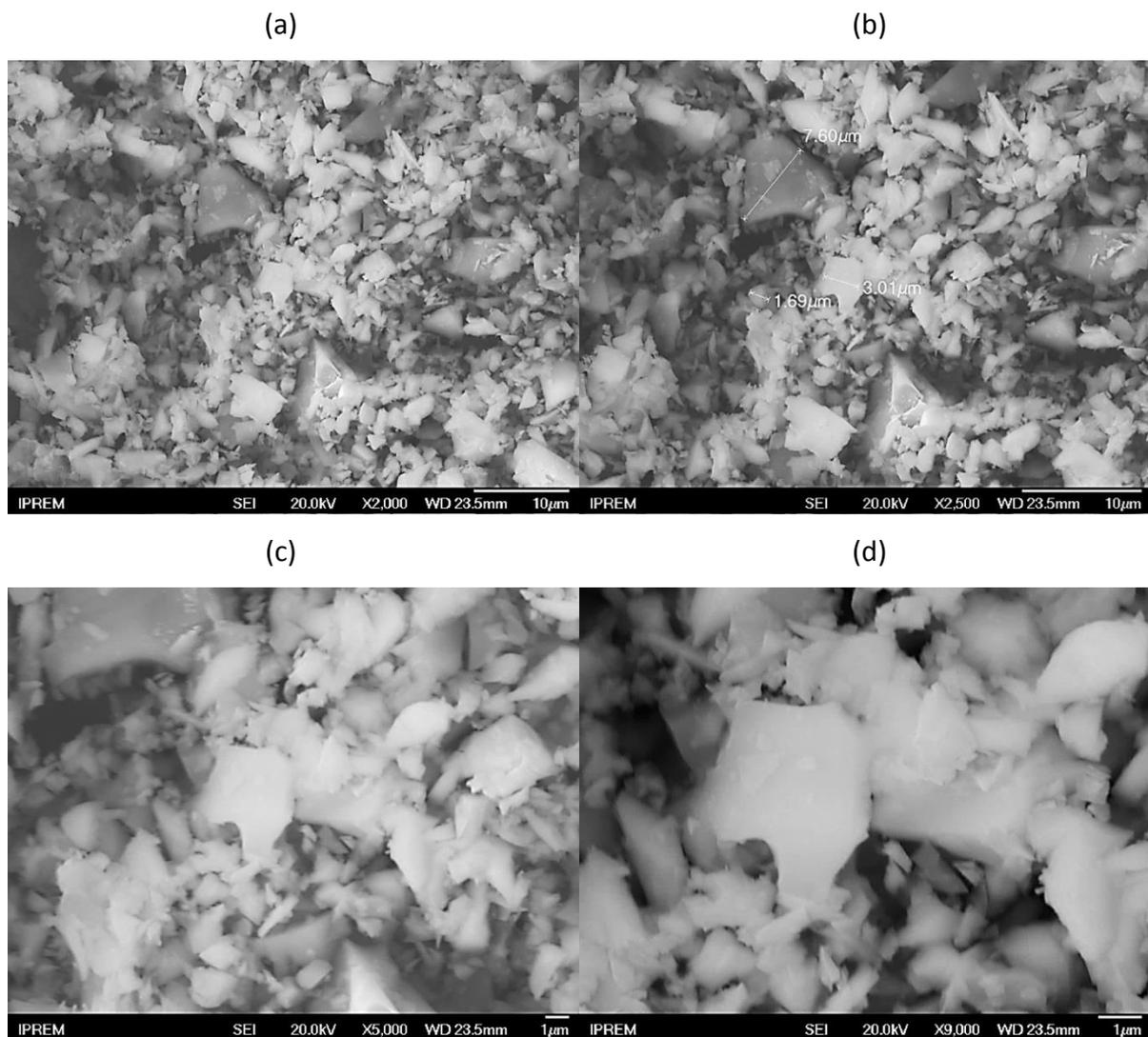


Figure 60 : Analyse MEB de la poussière SIKRON

Ces analyses au microscope électronique des poudres sont en conformité avec l'analyse granulométrique précédente (Figure 55), mais nous remarquons principalement, à la vue des clichés MEB, que les particules ne sont pas sphériques.

De plus, nous concluons que les poussières « procédés » IRIS et V5 sont proches, mais que SHIVA et SIKRON présentent des structures et des morphologies de particules différentes.

IV-4) Les propriétés électriques

Nous allons caractériser les propriétés électriques des différentes poussières à travers deux paramètres, la résistivité et la permittivité relative. En particulier, la résistivité joue un rôle capital dans le fonctionnement d'un précipitateur électrostatique. En effet, les seuils d'initiation des décharges électriques sont modifiés, de sorte que les poussières vont se charger et se décharger plus au moins rapidement. De plus, il y aura, ou pas, formation de back corona (valeur limite de $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ selon White [10]).

Parker [35] a proposé une classification de la résistivité des poussières reprise dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Classification de la résistivité des poussières [35]

Classe ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Résistivité
$10^4 - 10^8$	Conductrice
$10^8 - 10^{10}$	Normale
$10^{10} - 10^{11}$	Modérée
$10^{11} - 10^{13}$	Haute

Dans les mécanismes d'électrofiltration présentés dans le chapitre précédent, la permittivité relative des particules intervient à travers un coefficient correctif pris en compte dans les mécanismes de charge et de transport des particules isolantes. Ce coefficient correctif s'exprime de deux façons selon les équations considérées (2.5) et (2.6).

$$\frac{3 \cdot \varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \quad (2.5)$$

ou

$$1 + 2 \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right) \quad (2.6)$$

Par conséquent, une très forte variation de ϵ_r se traduit par une correction comprise entre 1 et 3. Ce paramètre électrique semble donc bien moins prépondérant dans les différents mécanismes mis en jeu que la résistivité.

Les propriétés électriques ont été déterminées à partir d'échantillons cylindriques de poudre compactée positionnés entre deux électrodes planes. Le schéma de la Figure 61 montre les dimensions des échantillons et l'agencement des électrodes permettant les différentes mesures.

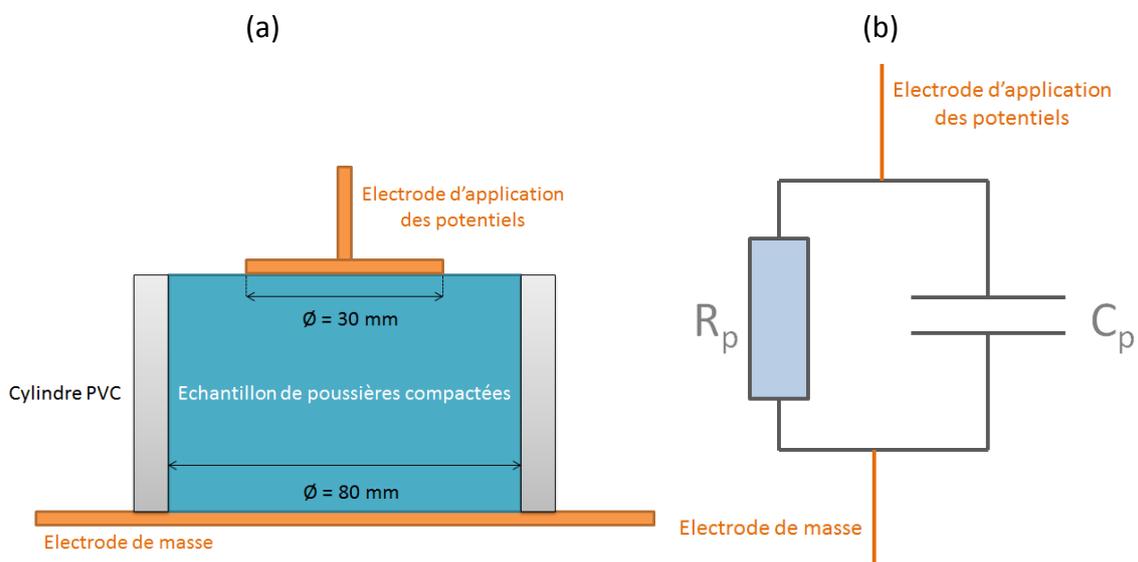


Figure 61 : (a) dimensions des échantillons et (b) Circuit électrique équivalent

Chaque type de poussières est donc compacté dans un cylindre PVC de diamètre intérieur 80 mm posé sur une électrode plane de masse de diamètre supérieur à celui du cylindre. Ce montage permet d'éviter les effets de bords (Figure 61 – a). Une seconde électrode plane est disposée sur la surface de l'échantillon compacté et lissé. Son diamètre inférieur à celui du cylindre (30 mm), assure que le cylindre PVC n'influe pas sur les mesures.

Chaque échantillon testé peut être représenté électriquement par une résistance R_p en parallèle avec un condensateur C_p (Figure 61 - b). Les mesures réalisées permettent de déterminer les valeurs de ces deux paramètres et par conséquent, d'en déduire les valeurs de la résistivité et de la permittivité relative des poussières en fonction de la fréquence, du niveau et de la forme d'onde de la tension appliquée.

Dans un premier temps, nous utilisons un RLC mètre de type HIOKI IM3536 (Figure 62) pour évaluer ces grandeurs à des niveaux de tensions faibles (1 V). Cet appareil délivre les valeurs de R_p et C_p pour différentes fréquences. Les résultats des valeurs de résistivité et permittivité relative sont reportés sur les Figure 63 et Figure 64.

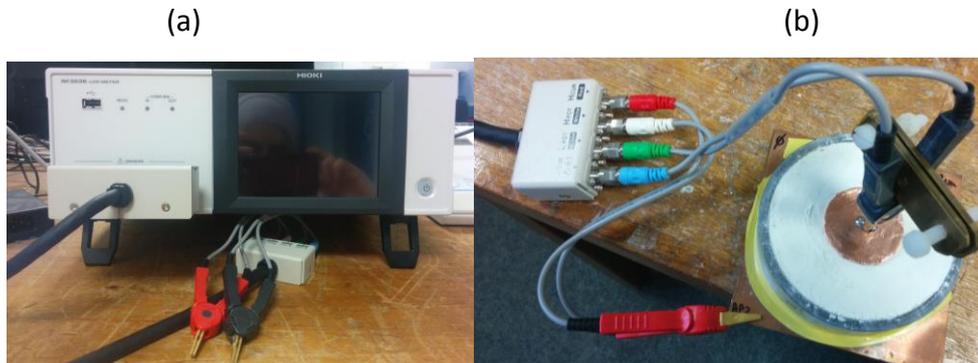


Figure 62 : (a) Montage RLC mètre et (b) Galette de poussières compactées

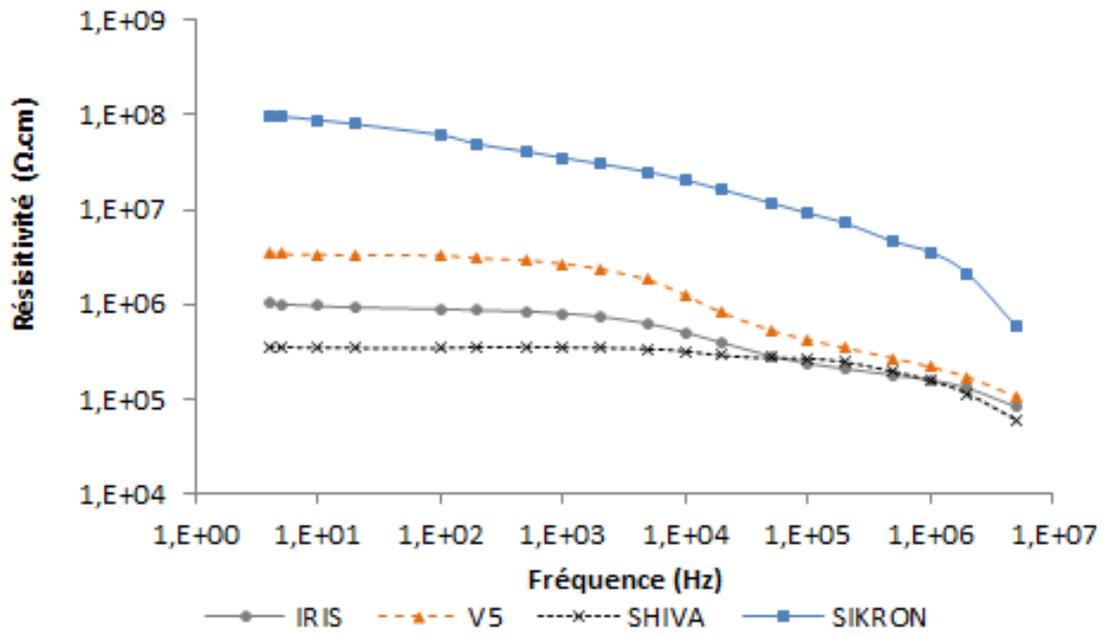


Figure 63 : Résistivité en fonction de la fréquence

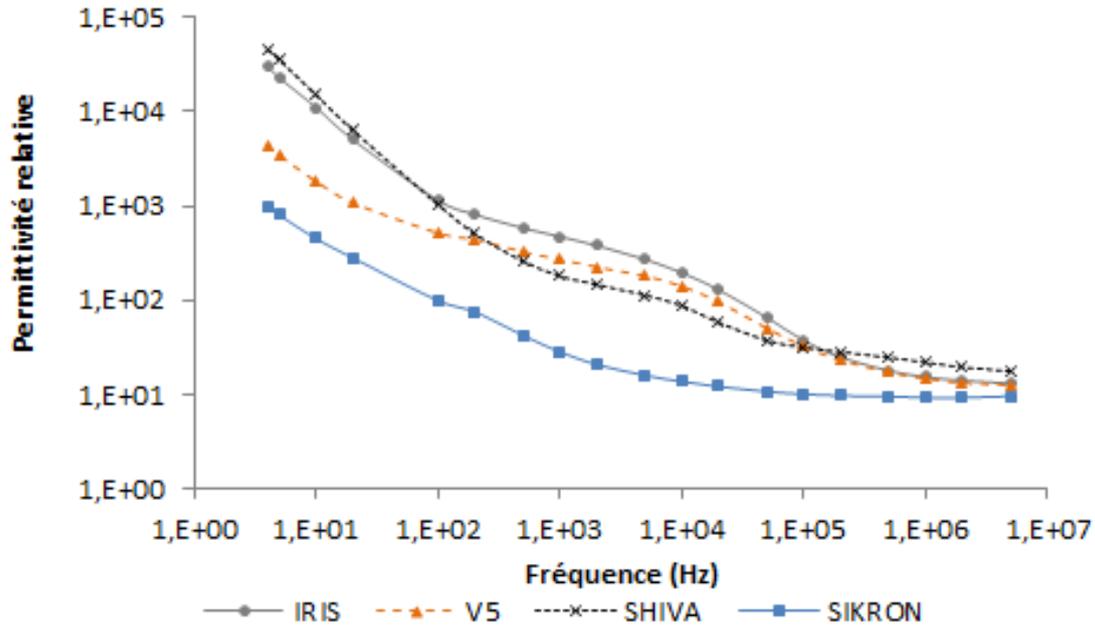


Figure 64 : Permittivité relative en fonction de la fréquence

Globalement, nous observons une diminution des caractéristiques électriques en fonction de la fréquence. Cette tendance est surtout marquée pour la permittivité relative.

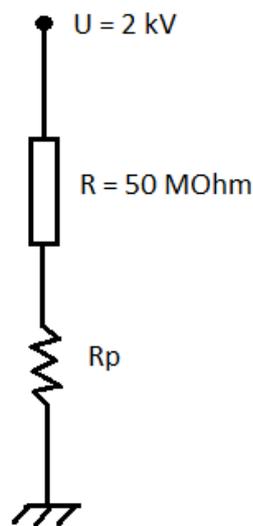
Sur toute la plage de mesures, les trois poussières issues des procédés ont des résistivités plus faibles que la poussière modèle SIKRON. Bien qu'en hautes fréquences (HF), les résistivités de ces trois poussières convergent vers une même valeur, celle présentant la résistivité la plus faible est la poussière SHIVA.

En ce qui concerne la permittivité relative, nous observons également une convergence des résultats en HF, mais c'est cette fois la poussière modèle qui présente la permittivité la plus faible en basses fréquences (BF). D'après les remarques faites sur le coefficient correcteur qui prend en compte la valeur de ϵ_r , il ressort qu'en BF la correction sera la même puisque les valeurs de ϵ_r sont différentes entre les poussières, mais toutes très supérieures à un. En HF, il en sera de même car la permittivité relative converge vers une même valeur pour toutes les poussières. Par conséquent d'un point de vue permittivité relative, toutes ces poussières peuvent être considérées comme identiques.

Une seconde méthode a été employée afin d'évaluer la résistivité et la permittivité à des niveaux de tension beaucoup plus élevés (de l'ordre du kilovolt). Le but de cette seconde

étape est de vérifier les résultats obtenus précédemment, de déterminer la valeur de la résistivité sous tension continue et d'estimer les caractéristiques électriques lorsque les tensions appliquées se rapprochent de celles utilisées dans le procédé. Cette étude « haute tension » est divisée en deux temps : une première partie sous tension continue et une seconde sous tension impulsionnelle.

Les échantillons sont donc, tout d'abord, soumis à une tension continue en suivant le schéma de la Figure 65. Le niveau de tension de sortie de l'alimentation HT est fixé à 2 kV. En statique, les capacités peuvent être supprimées des schémas équivalents ; la permittivité ne peut donc être estimée dans cette première étape. La résistance de 50 M Ω permet de créer un diviseur de tension avec la résistance de l'échantillon de poussières mais aussi de limiter le courant en cas de court-circuit dans l'échantillon. La mesure de la tension aux bornes des disques de poussières permet de remonter à la valeur de la résistance R_p (Tableau 8).



R_p : résistance des poussières



Figure 65 : Schéma et photographie du dispositif expérimental sous tension continue

Tableau 8 : Valeurs des grandeurs mesurées et calculées sous HT continue

Poussières	Résistance R_p mesurée ($M\Omega$)	Résistivité ($\Omega.cm$)
SHIVA	0,66	$7,8.10^5$
IRIS	1,9	$2,2.10^6$
V5	4,3	$1,0.10^7$
SIKRON	75	$1,8.10^8$

Les résultats sont cohérents avec ceux présentés sur la Figure 63. Nous retrouvons que la poussière SIKRON est la plus résistive. Les résistivités des poussières issues des procédés se classent suivant le même ordre que précédemment.

Les échantillons sont maintenant soumis à une onde de tension de 2 kV mise en forme à l'aide d'un commutateur à IGBT (temps de fermeture d'environ quinze nanosecondes) et de deux résistances de 300 k Ω (Figure 66). Grâce à ce montage, les signaux de la Figure 67 sont enregistrés. Ils peuvent être décomposés en trois phases : la phase de charge de C_p , la phase d'équilibrage des potentiels et la phase de décharge des capacités du circuit.



Figure 66 : Schéma et photographie du dispositif expérimental sous tension impulsionnelle

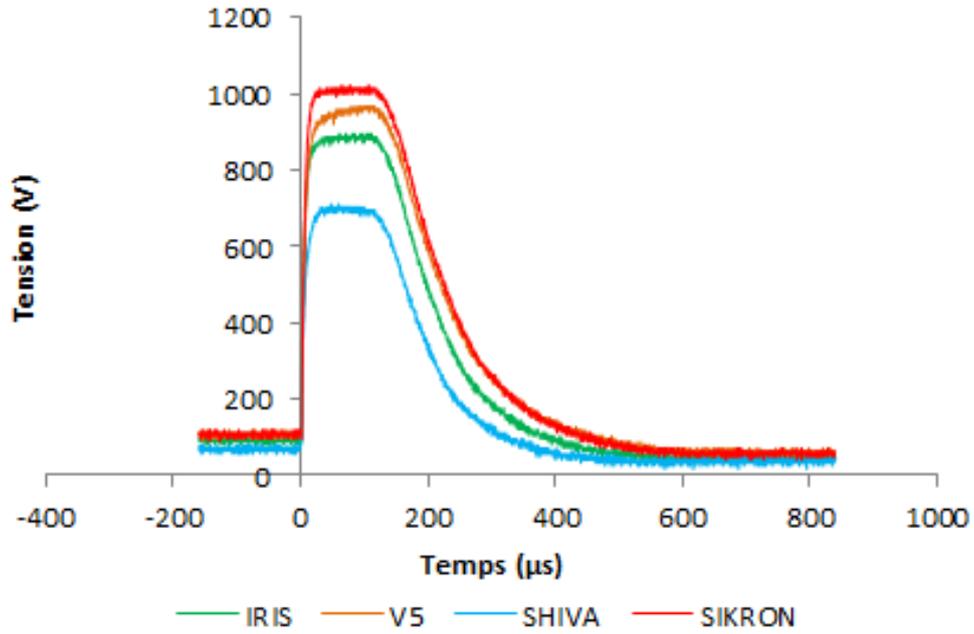


Figure 67 : Enregistrements des impulsions de tension mesurées aux bornes des échantillons de poussières

Une fois la capacité C_p chargée, nous pouvons considérer la phase d'équilibrage des potentiels. Le schéma équivalent du montage devient celui présenté sur la Figure 68. Nous revenons donc à un régime statique. Il est de nouveau possible d'estimer la valeur de la résistance R_p (diviseur résistif), puis d'en déduire la résistivité

Le Tableau 9 présente les résultats des résistances obtenus par cette méthode et les résistivités correspondantes.

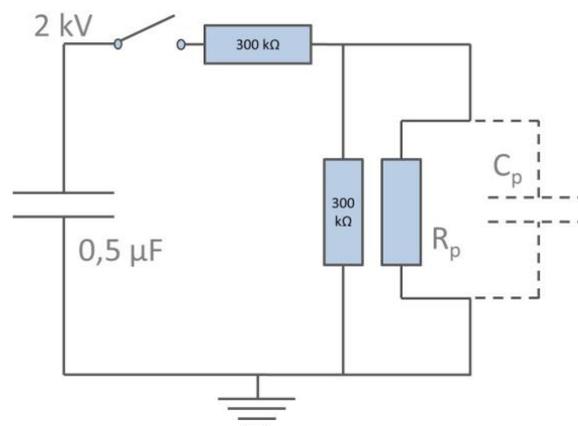


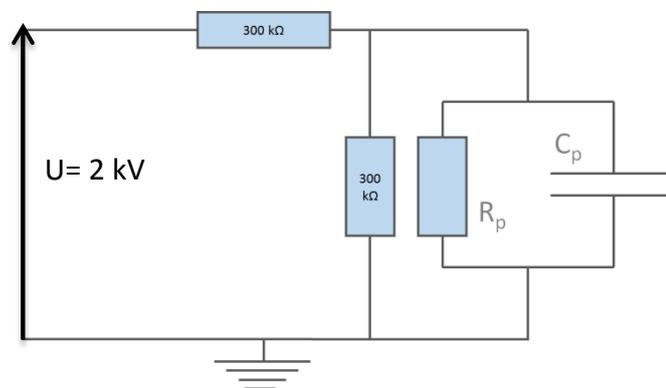
Figure 68 : Montage équivalent dans la phase d'équilibre

Tableau 9 : Valeurs de R_p et de la résistivité

Poussières	Résistance R_p mesurée (M Ω)	Résistivité (Ω .cm)
SHIVA	0,4	$4,7 \cdot 10^5$
IRIS	1,3	$1,5 \cdot 10^6$
V5	4,1	$9,7 \cdot 10^6$
SIKRON	80	$1,9 \cdot 10^8$

Les valeurs trouvées ici sont en accord avec celles calculées lors de l'application de la tension continue. Quelle que soit la méthode, il ressort que seule la poussière SIKRON présente une résistivité supérieure à la valeur limite de $10^8 \Omega$.cm définie par White. Cela signifie-t-il que seule cette poussière permettra de développer des back corona ? Nous pouvons déjà répondre que non puisque les essais antérieurs [98] avaient mis en évidence la présence de back corona avec IRIS. La résistivité de la poussière V5 étant relativement proche de celle d'IRIS, la vérification de l'éventuel développement de back corona sera faite sur SHIVA (chapitre suivant).

En considérant la phase de charge de la capacité C_p , il est possible de déterminer la résistance équivalente du modèle de Thévenin qui va définir la résistance de charge de C_p (Figure 69). Nous pouvons s'estimer la constante de temps τ associée (résistance de Thévenin $\times C_p$) et, par la même, la capacité C_p puis d'en déduire la permittivité relative.

Figure 69 : Application du modèle de Thévenin pendant la phase transitoire de charge de C_p

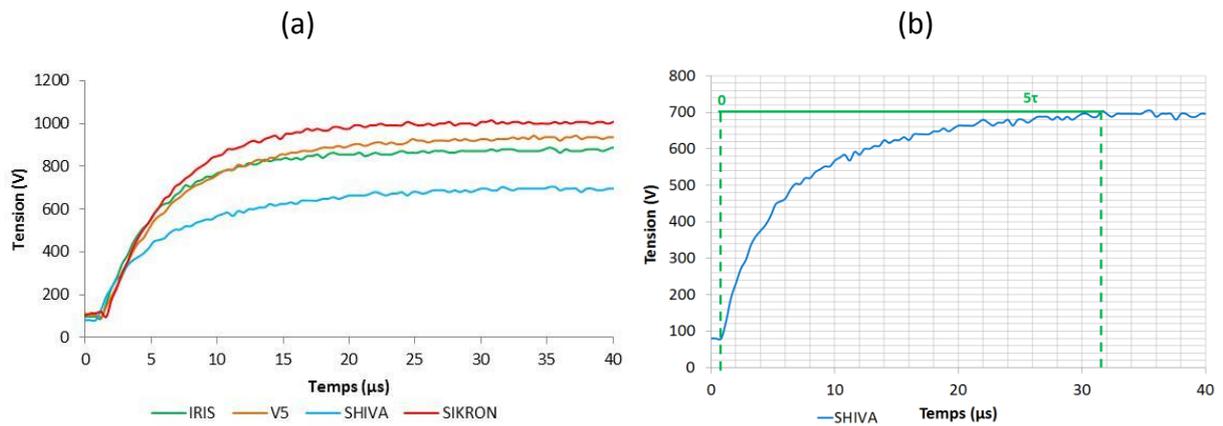


Figure 70 : (a) Charge des capacités de poussières et (b) Méthode de détermination de la constante de charge

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des valeurs mesurées et calculées

Poussières	Tension maximale de charge (V)	Temps de charge - 5τ (μs)	Capacité (pF)	Permittivité relative
IRIS	895	59	85	814
V5	965	78,3	108	514
SHIVA	700	30,6	50	480
SIKRON	998	20,9	28	134

Les temps de charge varient entre 21 μs et 78 μs, soient des fréquences comprises entre 4 kHz et 17 kHz. Les résultats obtenus sont en accord avec ceux déterminés au RLC mètre à faible niveau. Le classement des poussières en fonction de la valeur de ϵ_r suit celui de la Figure 63. Pour ces fréquences, les valeurs de la permittivité relative sont toutes grandes devant un.

En conclusion de cette partie de caractérisation électrique des poussières, nous pouvons dire que les différentes méthodes utilisées pour déterminer la résistivité et la permittivité relative donnent des résultats cohérents. Une conclusion plus détaillée est donnée dans la section suivante.

V) Conclusion

Dans ce chapitre consacré aux matériels et méthodes, nous avons présenté le pilote semi-industriel et défini les conditions opératoires de fonctionnement, à savoir un débit de $120 \text{ m}^3/\text{h}$, une température de 130 °C . Les systèmes d'injection de poussières et de comptage ont été présentés de manière à réguler le taux d'injection à des valeurs comprises entre 2.10^6 et 4.10^6 particules/litre.

Le générateur utilisé pour l'étude, et réalisé au sein du laboratoire, est principalement composé d'un commutateur à thyristors. Ce dispositif permet d'alimenter l'électrofiltre sous tension continue, sous tension pulsée cadencée jusqu'au kilohertz ou bien sous tension combinée. L'influence de ces différents modes d'alimentation d'un ESP sur l'efficacité du procédé fera, entre autres, l'objet des chapitres suivants.

Une modélisation de la distribution des champs électriques dans le pilote a permis, à partir de deux critères relatifs à l'optimisation du champ maximal sur des pointes et à la limitation du champ moyen dans l'intervalle inter-électrodes, de pré-dimensionner une nouvelle électrode émissive conformément aux nouvelles spécifications géométriques imposées par le CEA.

Une étude expérimentale, reposant sur l'optimisation du courant injecté, a confirmé les résultats de modélisation et a abouti à la réalisation de cette nouvelle électrode multi-pointes, dénommée Solectrode.

Quatre poudres fournies par le CEA ont été retenues pour l'étude. Trois d'entre elles sont directement issues des procédés du CEA Marcoule mais disponibles en quantité limitée. La quatrième est une poussière commerciale livrable en quantité non limitée. Les différentes analyses physico-chimiques ont permis de tirer un certain nombre de conclusions.

Concernant la granulométrie et l'analyse MEB :

- IRIS et V5 sont des poussières proches avec une granulométrie polydispersée qui les classe dans les PM_{10} et au-dessus,
- SHIVA est une poussière « procédé » relativement grosse et homogène contenant quelques PM_{10} . Sa granulométrie indique qu'elle se situe, en partie, au-delà de la limite supérieure des GRIMM de $32 \mu\text{m}$,

- SIKRON s'inscrit parfaitement dans la gamme de détection des GRIMM et contient à la fois des poussières grossières (PM_{10}) et fines ($PM_{2,5}$). Sa courbe granulométrique est centrée sur $3\ \mu\text{m}$.

Concernant les propriétés électriques :

- pour l'ensemble des poussières, la permittivité relative décroît en fonction de la fréquence mais converge vers une même valeur en HF. La différence entre les valeurs de permittivité relative est donc uniquement notable en BF. Comme elles sont toutes très largement supérieures à un, il ne sera pas possible de mettre en évidence l'influence de la permittivité relative sur les phénomènes mis en jeu dans l'électrofiltration,
- pour l'ensemble des poussières, la résistivité diminue également quand la fréquence augmente. La poussière SIKRON est la plus résistive. C'est la seule qui présente une résistivité mesurée sous tension continue supérieure à la limite fixée par White relativement à l'apparition de back corona. Des trois poussières issues des procédés, SHIVA est la moins résistive (valeur comprise entre $4,7 \cdot 10^5$ et $7,8 \cdot 10^5\ \Omega \cdot \text{cm}$ suivant la méthode de mesure). Les travaux antérieurs menés au laboratoire avec les poussières IRIS, dont la résistivité est autour de $10^6\ \Omega \cdot \text{cm}$, avaient montré la présence massive de back corona dans notre électrofiltre. Nous nous intéresserons donc essentiellement à la poussière SHIVA dans les chapitres suivants.

*Chapitre 3 - Etude descriptive des
phénomènes physiques occurrents dans
un électrofiltre pointe / plan*

L'analyse et la caractérisation des différents régimes de décharge mis en jeu dans le procédé d'électrofiltration ne sont pas envisageables sur un système complet constitué d'un nombre important de sites émissifs. Il est nécessaire de simplifier au maximum la géométrie des électrodes émissive et de collecte pour étudier l'évolution des régimes de décharges électriques qui se développent au cours du temps de filtration.

Le dispositif expérimental utilisé dans ce chapitre a été présenté dans le paragraphe I-2-a) du chapitre 2. Il est constitué d'une pointe et d'un plan, disposés dans le flux de gaz soumis aux mêmes conditions d'écoulement que celles de l'application industrielle. Ce dispositif présente l'avantage de pouvoir étudier les régimes de décharge au niveau d'un unique site émissif, mais également d'observer l'évolution de la zone de collecte ainsi que l'activité électrique qui s'y développe. Par contre, le nombre trop faible de sites émissifs ne permet pas d'associer aux observations des mesures de rendement de filtration. Les interprétations proposées reposeront donc, uniquement sur des moyens de diagnostics électriques (mesures de courant moyen) et optiques (photographies de la décharge).

Rappelons que les électrodes seront nettoyées après chaque série d'essais. Les mesures de courant présentées sont reproductibles. Les barres d'erreur associée aux différents résultats correspondent aux incertitudes de mesures.

Pour chacune des configurations expérimentales présentées dans ce chapitre, une photographie de la décharge est prise toutes les minutes afin de caractériser les instants associés à des modifications des différents régimes de décharges mis en jeu. Il est toutefois important de noter que la faible luminosité des phénomènes impose de prendre des photographies avec des temps de pose long. Les clichés ne seront donc pas représentatifs de phénomènes instantanés, mais d'une intégration de l'activité lumineuse sur une échelle de temps relativement longue de 20 secondes.

Cette étude vise à compléter les résultats obtenus lors de travaux antérieurs [98] sur ce même dispositif pointe / plan (cf. chapitre 2). Une analyse concernant l'influence du niveau de tension continue appliquée sur l'évolution du courant moyen ainsi que sur la phénoménologie de la décharge sera réalisée. Ensuite, cette évolution sera comparée avec celle obtenue lorsque le dispositif est alimenté par une tension combinée.

Ce chapitre se terminera par une étude phénoménologique sur les poussières SHIVA de faible résistivité.

I) Analyses sous tension continue avec les poussières SIKRONI-1) Evolution des régimes de décharge

L'évolution caractéristique du courant au cours du temps dans un électrofiltre constitué d'une pointe unique et d'un plan a fait l'objet de différentes études [30], [50]. En particulier, A. Silvestre de Ferron [30] a montré que, sous tension continue négative, l'évolution de la décharge et du courant sont liés l'un à l'autre et classifiables en trois zones.

Les travaux présentés ici ont permis d'affiner ces résultats et de mettre en évidence la présence de quatre zones distinctes, caractérisant le déroulement de la décharge. Ces différentes zones sont observables sur les courbes d'évolution temporelle du courant moyen, dont un exemple est présenté sur la Figure 71. À chacune des quatre zones, correspond un régime de décharge bien défini, caractérisé par les photographies de la Figure 72.

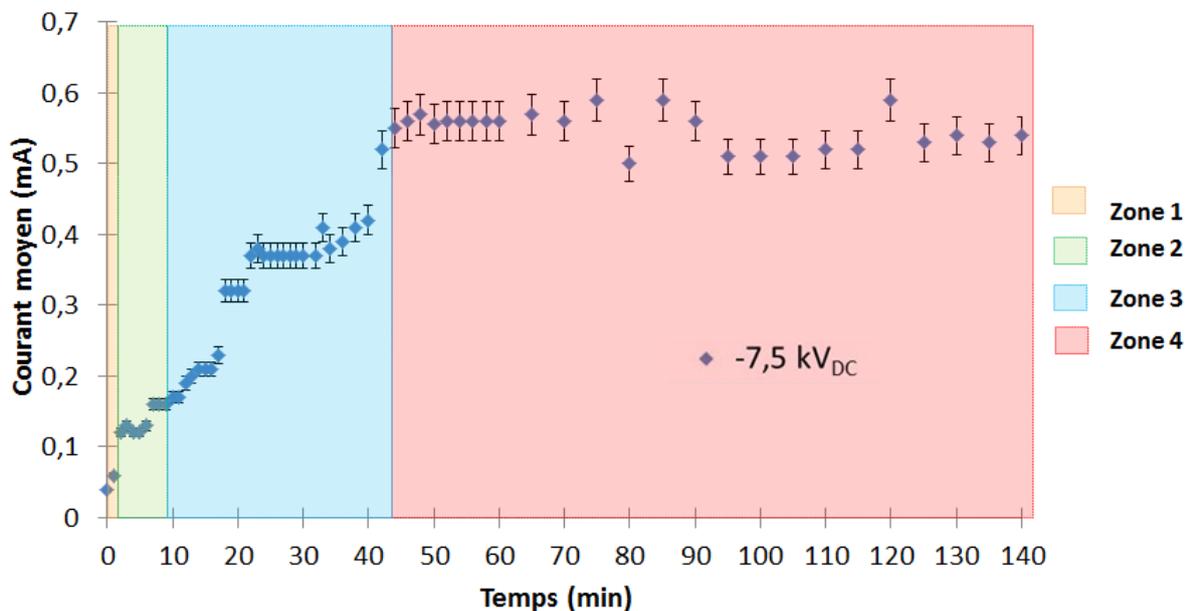


Figure 71 : Variation du courant moyen entre la pointe et le plan en fonction du temps ($U = -7,5 \text{ kV}_{DC}$)

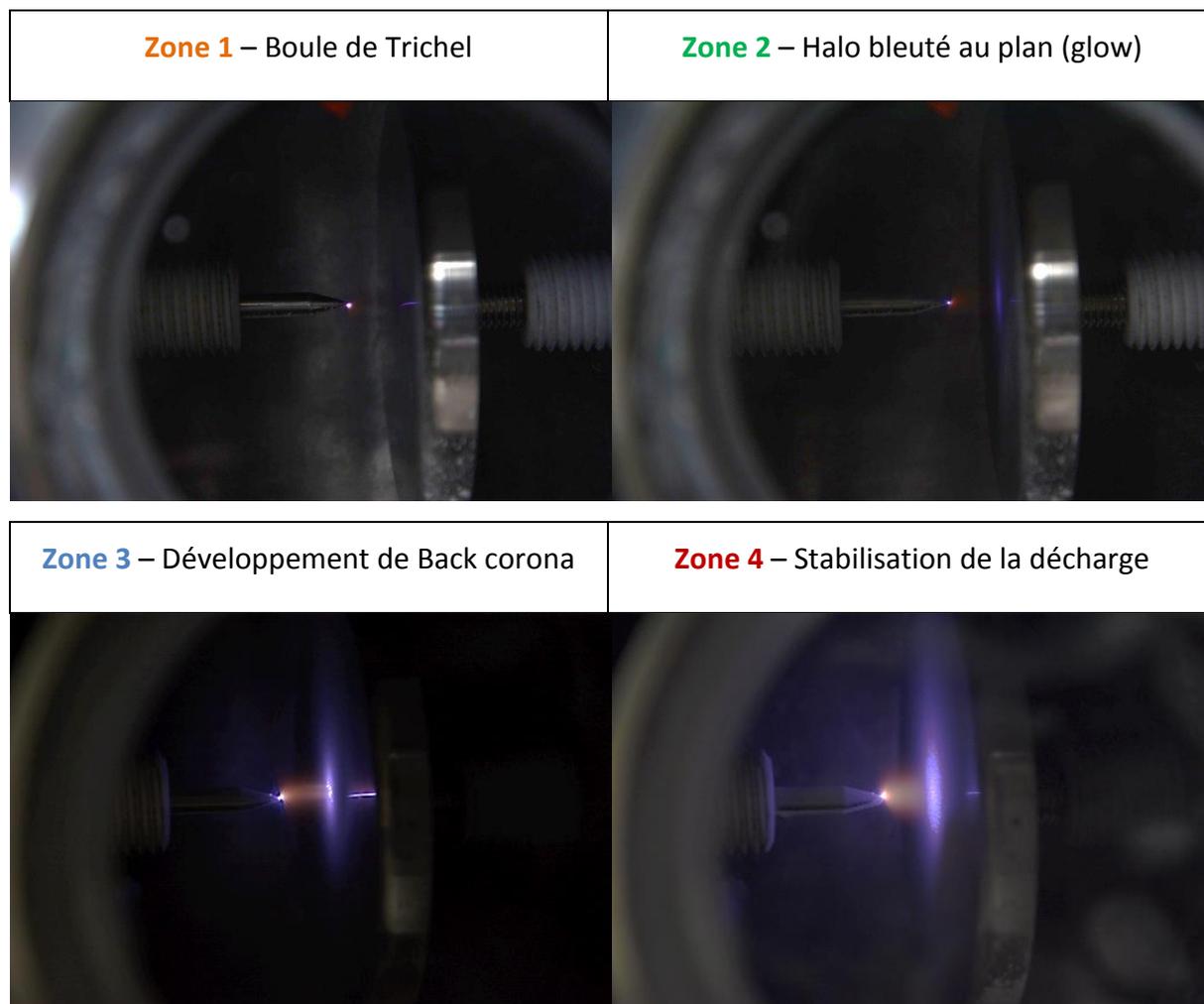


Figure 72 : Clichés photographiques associés à chaque zone

La zone 1, définie dans les travaux précédents, est en fait divisible en deux zones, qui correspondent à la formation d'une boule lumineuse caractéristique d'un régime de Trichel (zone 1 actuelle) et à l'apparition d'un halo bleuté au plan (zone 2 actuelle) assimilable à un glow [73], [106]. Les zones 3 et 4 restent inchangées et sont respectivement représentatives de la création d'un nombre croissant de back corona dans la couche de dépôt et de l'entrée dans un régime de stabilité (Figure 72).

Notons la présence, sur les clichés photographiques, d'une raie bleutée visible sur le plan, qui correspond au reflet de l'activité électrique localisée sur la pointe et dont nous ferons abstraction au cours de l'étude.

Analysons plus en détails ce qui se passe dans ces quatre zones.

I-1-a) Zone 1

L'entrée en zone 1 correspond à l'injection des poussières dans le filtre en fonctionnement et à l'initiation de la décharge de Trichel sur la pointe. Visuellement, durant cette étape, la boule de Trichel n'évolue pas (Figure 72), mais diffère de celle avant injection, passant instantanément d'un régime pulsé régulier vers un régime continu.

Au niveau de la pointe, le champ électrique est suffisamment élevé pour ioniser le gaz et donc créer des espèces chargées, susceptibles de transférer leurs charges vers les particules de poussières (Figure 73). Les particules neutres vont se charger positivement ou négativement et migrer respectivement sous l'effet du champ électrique vers la pointe ou le plan [40]. Les surfaces des deux électrodes vont être recouvertes d'une couche résistive chargée et préférentiellement le plan qui est le lieu de collecte principal des poussières. La zone 1 correspond donc aux premiers instants de filtration durant lesquels l'activité électrique se focalise sur la pointe. La faible augmentation du courant moyen correspond à l'évolution du régime de Trichel liée à la présence des particules de poussières.

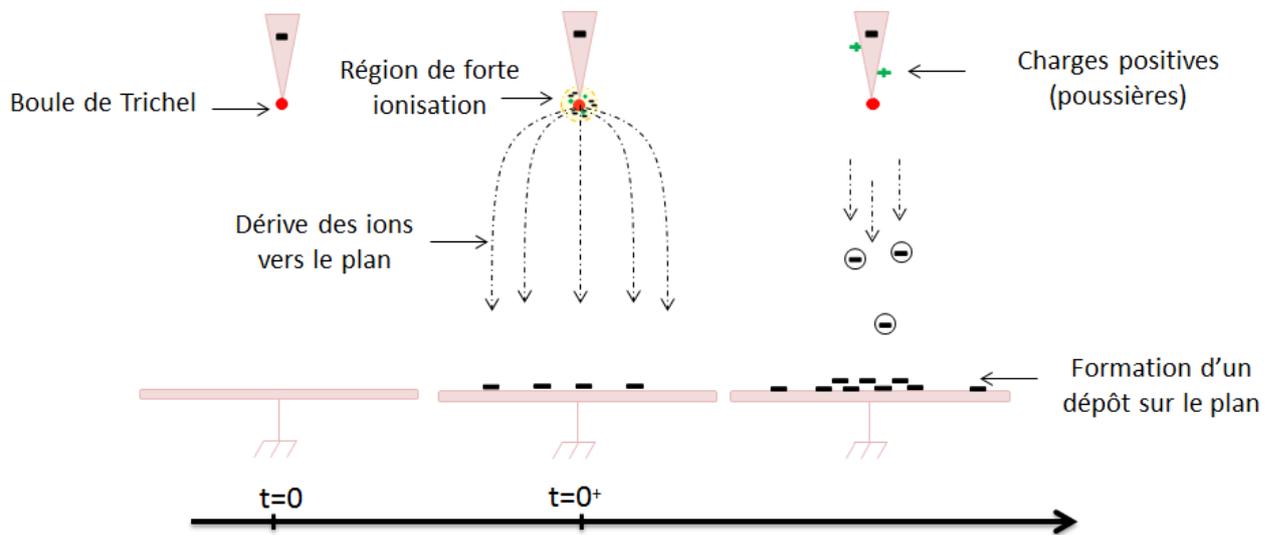


Figure 73 : Schéma de principe de l'évolution des phénomènes pendant la zone 1

I-1-b) Zone 2

Un cliché caractéristique de l'activité électrique pendant la zone 2 est présenté Figure 74. Au niveau de la pointe, la boule lumineuse de Trichel évolue vers une décharge en « plumet » caractéristique d'un Trichel continu. Le début de la seconde zone correspond également à l'apparition d'un halo bleuté sur le plan dont la surface s'étend au cours du temps. Le dépôt de poussières est donc le siège d'une activité électrique.

En effet, les charges négatives (ions du gaz et poussières chargées) viennent massivement se déposer à la surface du dépôt isolant créant ainsi, une cathode virtuelle probablement non-uniforme (Figure 75). Les poussières SIKRON utilisées sont suffisamment résistives (cf. chapitre 2) pour créer une différence de potentiel entre la couche supérieure du dépôt et l'électrode de collecte connectée à la masse. Cette tension augmente avec l'accumulation de particules chargées négativement sur le dépôt.

A. Silvestre de Ferron [98] a proposé une explication quant à la présence de ce halo bleuté, à savoir que des micro-décharges peuvent se développer au plan, au niveau de points triples (gaz / isolant / métal) où le champ est particulièrement renforcé (Figure 75).

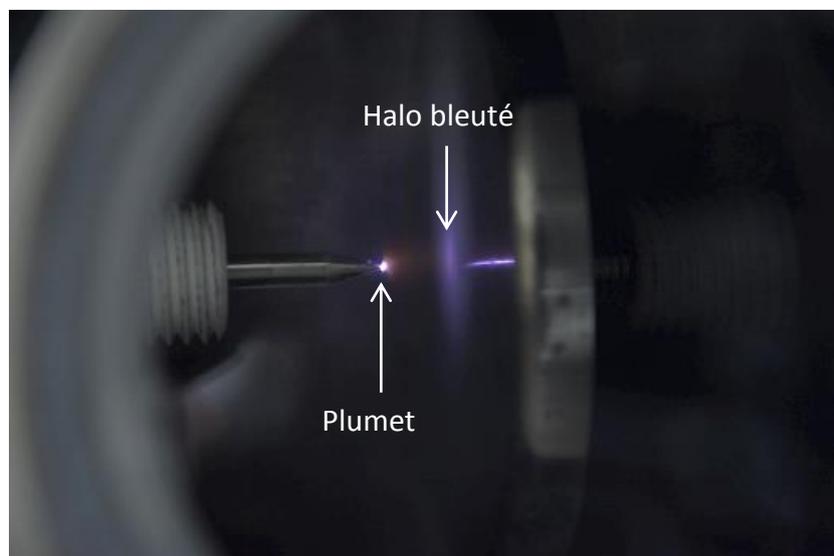


Figure 74 : Développement du plumet à la pointe et du halo bleuté au plan (zone 2) - $U = -7,5 \text{ kV}_{DC}$

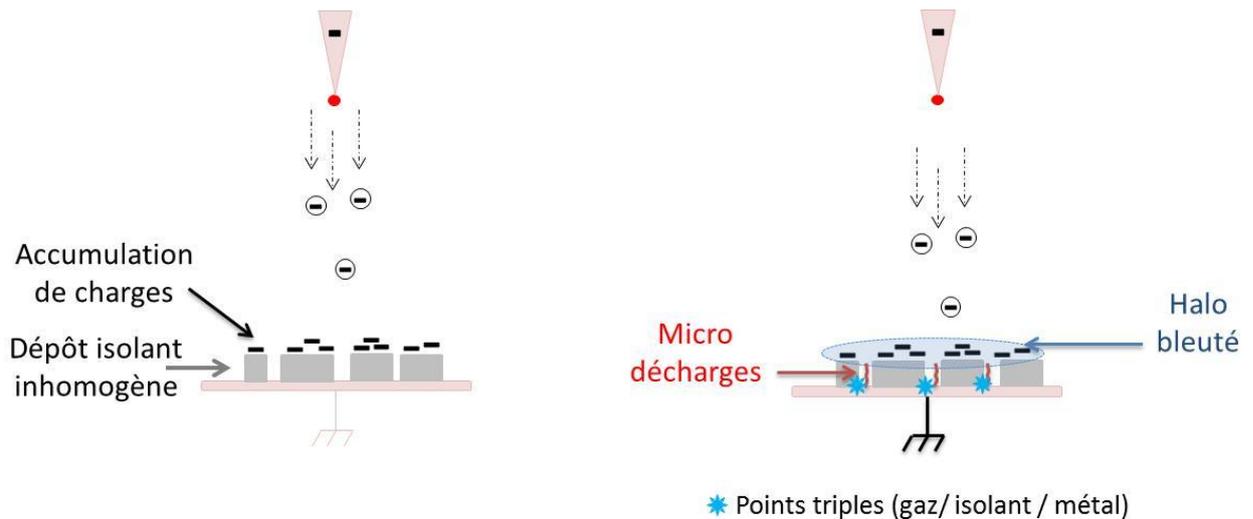


Figure 75 : Schéma de principe de l'évolution des phénomènes pendant la zone 2

Cette zone 2, par la présence de micro-décharges va correspondre au cas idéal de fonctionnement d'un électrofiltre. En effet les micro-décharges vont générer localement un plasma, au voisinage de l'anode, qui va favoriser la charge des poussières et, par un processus itératif, favoriser la précipitation des particules.

Durant cette zone, le développement des décharges au plan contribue à l'augmentation du courant moyen mesuré.

I-1-c) Zone 3

Cette zone est caractérisée par une augmentation importante du courant qui se produit de façon linéaire ou par paliers (Figure 71). L'observation visuelle des clichés photographiques montre (Figure 76), à la fois, l'élargissement du halo bleuté défini précédemment, l'apparition de spots anodiques au plan et leurs multiplications, mais aussi le développement de filaments lumineux qui connectent la pointe et le plan.

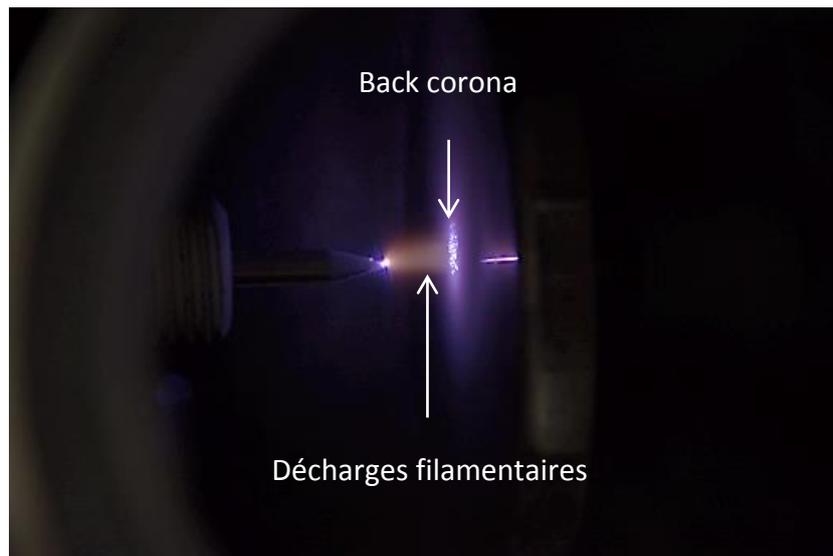
(a) $t = 17 \text{ min}$ 

Figure 76 : Formation et développement de back corona (zone 3) – $U = -7,5 \text{ kV}_{DC}$

Nous pouvons supposer que le dépôt de poussières et donc de particules chargées va s'intensifier et devenir homogène surtout dans l'axe de la pointe, là où le champ électrique est le plus important. La différence de potentiel à travers la couche croît continuellement du fait de l'accumulation de charges négatives en surface du dépôt isolant, entraînant une intensification des micro-décharges se produisant dans la couche. Lorsque la différence de potentiel atteint la tension de claquage du milieu air / poussières, il y a perforation du dépôt créant ainsi de petits cratères (spots anodiques) : les back corona ou contre émission. La zone 3 correspond donc à l'apparition et à la multiplication de ces back corona au plan. Ces back corona se manifestent par une augmentation du courant liée à leur multiplication (Figure 71). Elles produisent des ions positifs qui neutralisent localement les charges négatives accumulées en surface du dépôt isolant. Il faut donc « recharger » la couche négativement pour retrouver les conditions locales de claquage du dépôt. Ceci pourrait expliquer l'augmentation par paliers du courant moyen.

Les travaux de C. Thanh [69], montrent, à la fois comment se répartit le potentiel de surface sur une feuille de Téflon déposée sur un plan lorsque la pointe est alimentée sous tension continue et, également le rôle des back corona sur la distribution du potentiel de surface. Il explique aussi, que la présence de back corona modifie la distribution des lignes de champ dans l'espace inter-électrodes (Figure 77). Les charges négatives générées par

l'électrode émissive peuvent alors suivre deux types de lignes de flux différentes aboutissant à l'anode. L'une d'entre elles converge vers les back corona ce qui renforce la dérive des charges négatives sous l'axe de la pointe et confine la zone de multiplication des back corona (Figure 77).

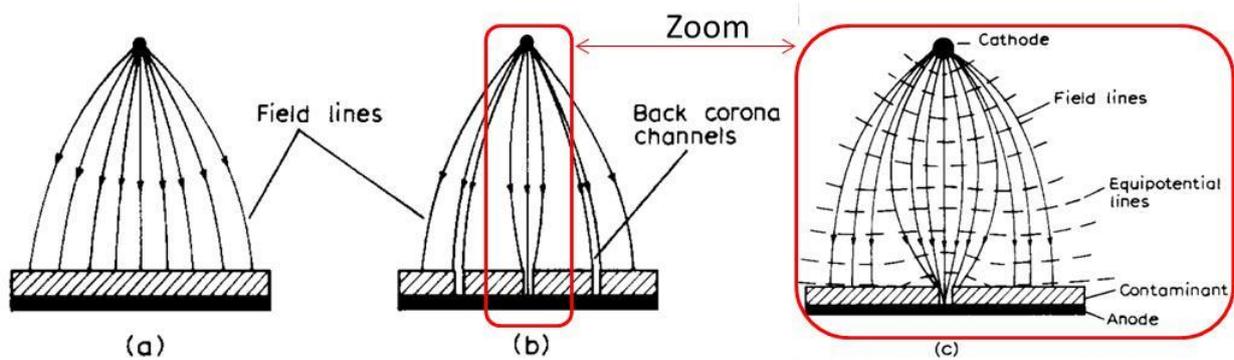


Figure 77 : Illustration des lignes de champ électrique (a) sans back corona et (b - c) avec back corona [69]

La formation des back corona de type cratère est favorisée par l'épaisseur du dépôt et la résistivité des poussières. Il est à noter que le champ seuil de création de back corona ne correspond pas au champ de claquage du diélectrique, mais dépend d'autres paramètres, comme la forme géométrique de la particule, le degré de compactage dans la couche ou encore la résistivité. Cette valeur est proche du champ de claquage de l'air, puisque le claquage du dépôt ne se fait pas à travers la particule de poussière, mais dans l'air inter-particules (Figure 78) [69].

Les back corona vont entraîner la libération, dans l'espace inter-électrodes d'ions chargés positivement, susceptibles de charger les poussières et de participer à la filtration du gaz (Figure 78). D'un point de vue électrique, la décharge Trichel peut être assimilée à un générateur d'ions négatifs et les back corona à un générateur d'ions positifs. Il est ainsi probable que, dans un premier temps, c'est-à-dire lorsque la quantité de charges négatives créée est supérieure à celle des charges positives, le développement des back corona ne soit pas préjudiciable au procédé d'électrofiltration.

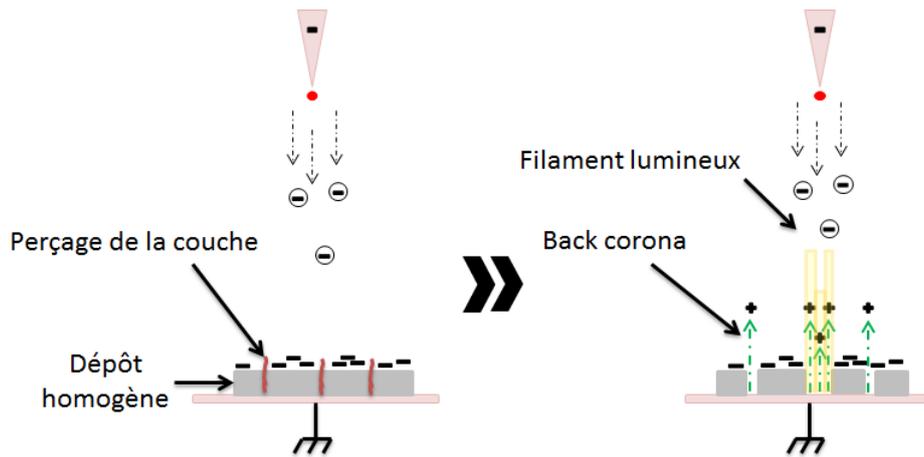


Figure 78 : Schéma de principe de l'évolution des phénomènes pendant la zone 3

Parallèlement au développement des back corona, la zone 3 se caractérise par l'apparition de décharges filamenteuses, qui se développent entre un des trous percés dans le dépôt et la pointe. Il y a donc, dans l'intervalle inter-électrodes, multiplication de canaux assimilables à des queues de streamers, dans lesquels des charges négatives et positives dérivent. L'intensification de ce phénomène conduit au développement progressif d'une région d'équi-répartition des charges dans laquelle les particules chargées vont se neutraliser entre elles, ce qui aura pour effet de réduire le champ de charge d'espace [39], [70]. Plus les back corona vont se multiplier, plus le volume occupé par ces filaments lumineux va s'étendre et former une zone que nous pouvons assimiler à une colonne positive.

L'extension spatiale de cette colonne est néfaste au bon fonctionnement de l'électrofiltre puisqu'elle ne permettra plus la dérive des particules de poussières chargées vers les régions de collectes (Figure 76).

I-1-d) Zone 4

La zone 4 correspond à un régime de stabilité ; le courant sature (Figure 71), la surface occupée par le halo bleuté et le nombre de back corona n'évoluent quasiment plus (Figure 79). Comme l'a montré C. Thanh [69], la zone de développement des back corona reste confinée sous la pointe et ne s'étend plus. La taille de la colonne positive occupe donc un

volume constant (Figure 79). Une quantité de charges importantes est émise localement par les deux générateurs d'ions (Trichel et back corona) mais ces charges se neutralisent dans l'espace inter-électrodes. Les études précédentes [30] ont montré que le rendement de filtration durant cette phase est faible.

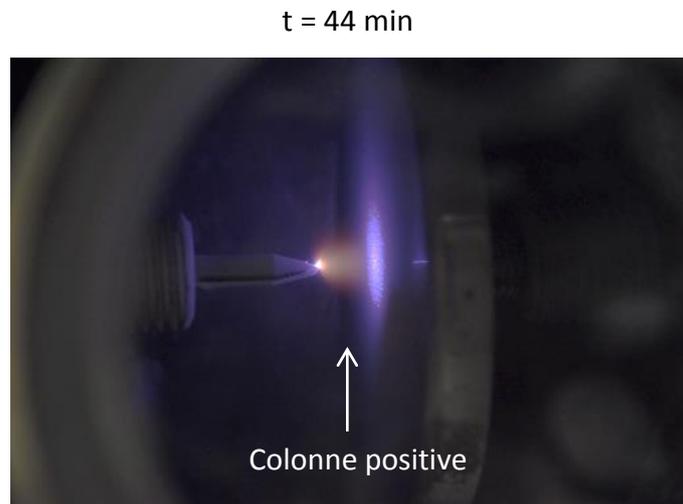


Figure 79 : Régime de stabilisation (zone 4) – $U = -7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$

I-2) Formation du dépôt de poussières

Précédemment, les clichés ont été réalisés sous faible luminosité, afin de pouvoir visualiser l'activité lumineuse. Dans cette section, notre attention ne sera plus portée sur les régimes de décharge, mais sur la formation du dépôt de poussières. Pour ce faire, les clichés photographiques réalisés à lumière ambiante sont analysés, afin d'observer la formation et l'évolution du dépôt de poussières au cours du temps.

Les photographies de la Figure 80, présentent la formation d'un dépôt sur le plan et sa croissance au cours du temps. En juxtaposant cette densification du dépôt à l'étude précédente (courbe de courant et développement de la décharge), nous constatons que ce dépôt croît dans les trois premières zones.

Tout d'abord, l'observation simple des clichés montre clairement, par comparaison des Figure 80 a - b que le dépôt de poussières se forme face à la pointe, dans la zone où le champ électrique est le plus élevé et correspond à la région où apparaît le halo bleuté observé précédemment. L'amas de poussières va continuer à s'agrandir et à se densifier (Figure 80 c - d).

En entrant en zone 3, la collecte de poussières sur le plan continue, mais est moins importante et moins rapide que précédemment (Figure 80 e - f), jusqu'à obtenir une stabilisation du dépôt (entrée en zone 4).

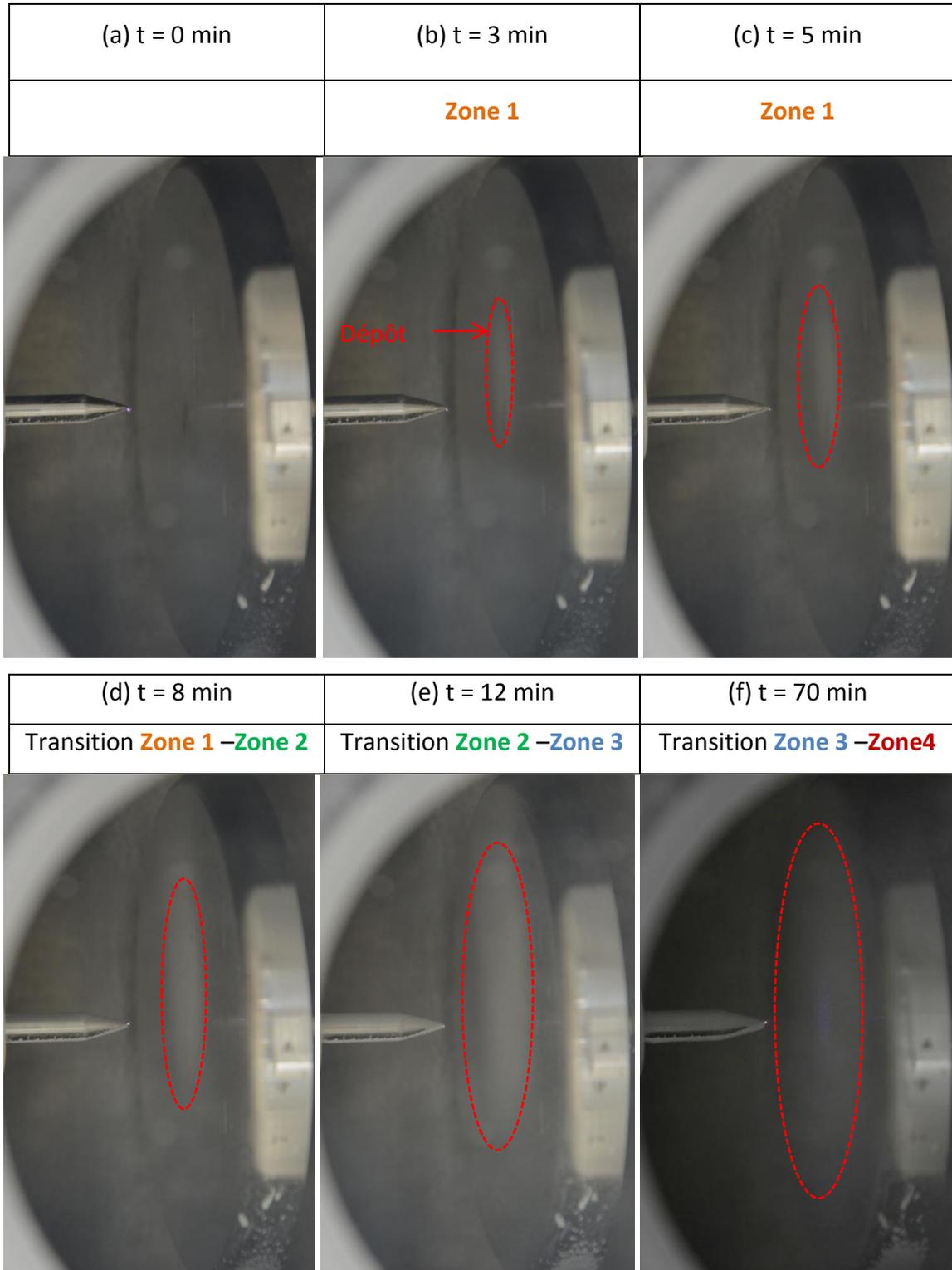


Figure 80 : Observation optique de la collecte des poussières au cours du temps ($U = -6 \text{ kV}_{DC}$)

Par ailleurs, la collecte des poussières se fait majoritairement sur le plan. Toutefois, l'étude sur le développement de la décharge a montré que des charges positives susceptibles d'interagir avec les poussières étaient émises et pouvaient dériver vers la pointe.

En comparant des expériences réalisées avec et sans tension (Figure 81), ce phénomène est mis en évidence par la présence d'un dépôt de poussières sur l'électrode émissive.

L'expérience montre qu'au bout de deux heures de fonctionnement :

- sans tension, les surfaces collectrices ne sont pas encrassées, si ce n'est les bords du plan et de la pointe qui sont opposés au sens du flux : il s'agit d'une filtration mécanique,
- avec tension, nous observons la présence d'un dépôt nettement visible de part et d'autre de la pointe, provoqué par la collecte de poussières chargées positivement. Nous pouvons également constater la présence de poussières collectées sur l'ensemble des parois dont le hublot, qui peut s'expliquer par la distribution des lignes de champ dans le faible volume d'écoulement.

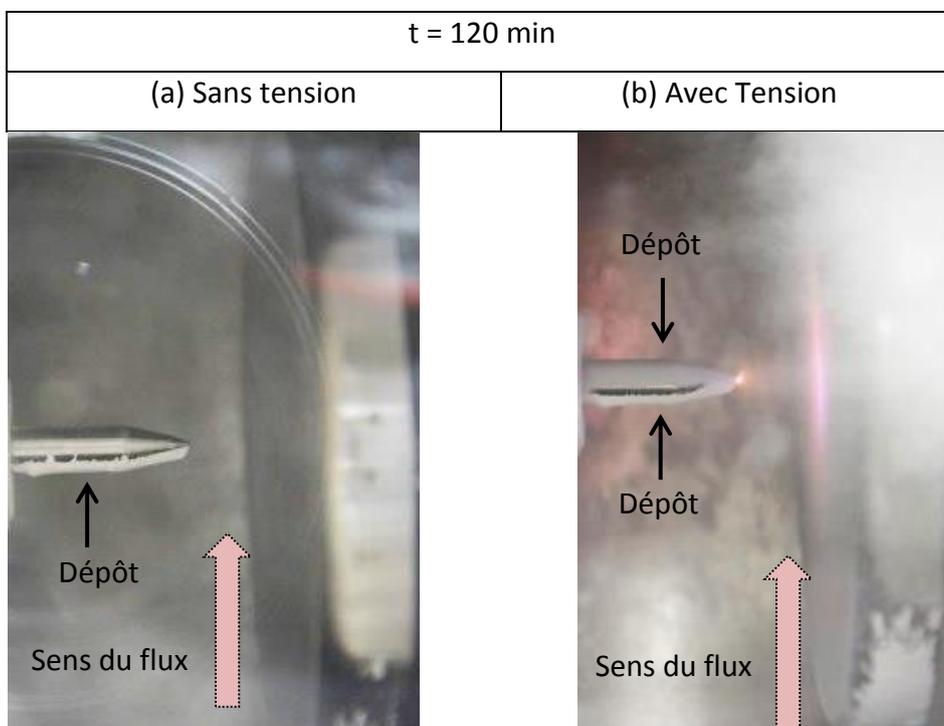


Figure 81 : Dépôt de poussières sur la pointe sans et avec tension appliquée.

I-3) Incidence de la valeur de la tension continue sur la phénoménologie

Ce paragraphe va être consacré à l'étude de l'influence du niveau de tension continue négative appliquée au dispositif sur les évolutions du courant et sur les phénomènes occurrents entre les électrodes.

Dans la configuration pointe / plan choisie et dans nos conditions d'écoulement, il est nécessaire d'appliquer une tension supérieure à $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ pour atteindre le seuil d'émission des premières impulsions de Trichel. Le régime d'arc est atteint dès la mise en fonctionnement de l'électrofiltre pour des tensions supérieures ou égales à $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

Trois niveaux de tension différents ont donc été choisis : $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$, $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ et enfin $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$. L'évolution du courant moyen en fonction du temps est présentée sur la Figure 82, pour ces trois niveaux de tension.

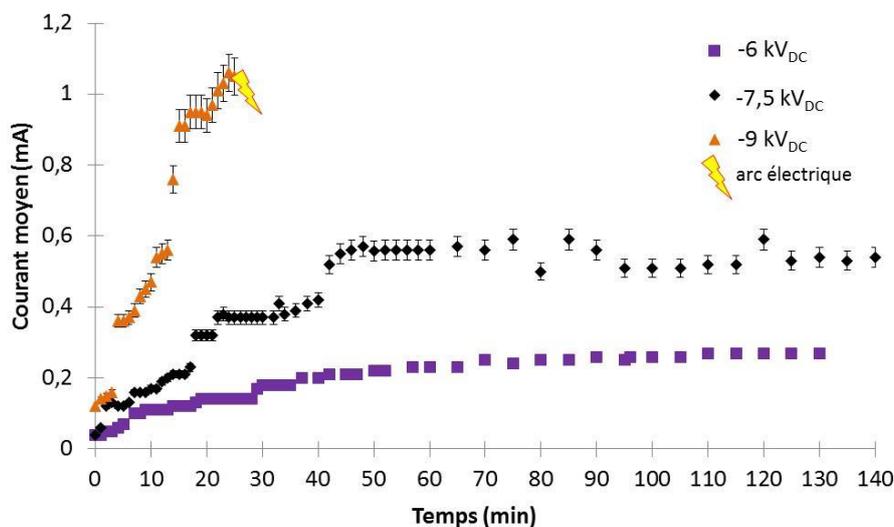


Figure 82 : Evolution du courant en fonction du temps pour trois niveaux de tension continue

La Figure 82 montre que, logiquement, le courant moyen augmente avec la tension appliquée. Elle montre, également, que la valeur de la tension appliquée influe sur la vitesse d'enchaînement des différentes zones définies précédemment. En effet, pour chaque niveau de tension, il est possible de retrouver plus ou moins distinctement les différentes zones mais sur des périodes de plus en plus courtes. Il faut noter que, pour des raisons liées au

développement d'arcs dans l'électrofiltre, la courbe correspondante à la tension de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ ne va pas au-delà de 27 min.

Les expériences menées à $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$ et $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ permettent d'identifier, sans difficulté, les instants de transitions entre les différentes zones. Cette identification est plus délicate à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$. A titre d'exemple, la Figure 83 présente deux photographies prises après $t = 0 \text{ min}$ qui mettent en évidence le passage quasi-instantané en zone 2 lorsque la tension est de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$. Le dépôt de poussières au plan et l'activité électrique qui s'y développe (halo bleuté) se forment donc en moins de 20s, ce qui correspond au temps d'exposition de nos photographies. A ce niveau de tension, il n'est donc pas possible d'identifier l'instant de transition entre les zones 1 et 2.

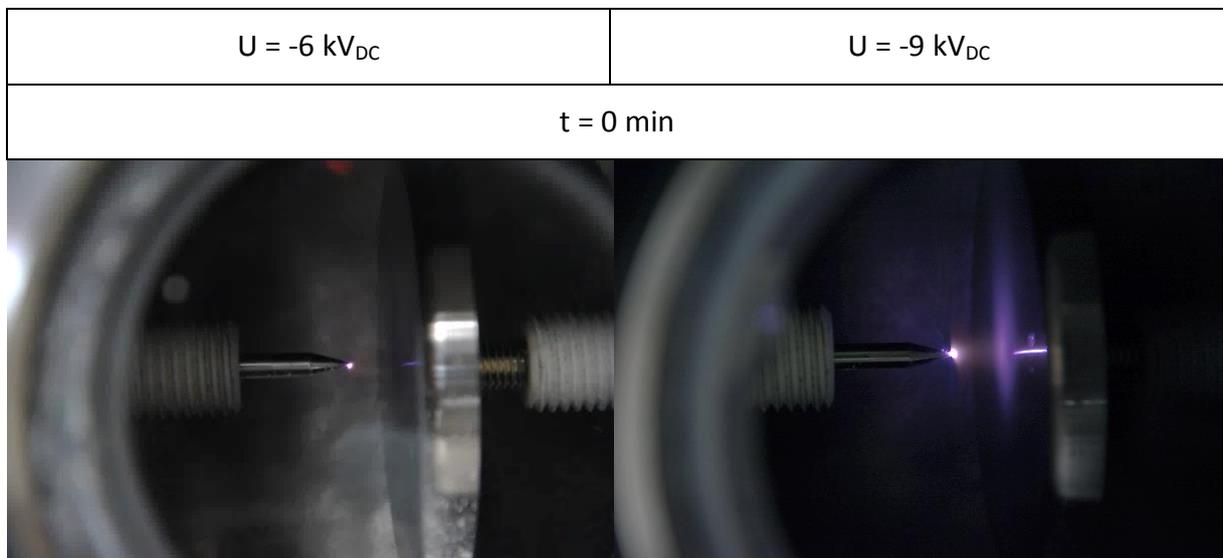


Figure 83 : Comparaison à un même instant de la décharge électrique

Le Tableau 11 regroupe les différents instants de transitions entre zones, pour les tensions étudiées. Ils sont déterminés à partir de l'évolution du courant moyen.

Tableau 11 : Bilan du passage dans les différentes zones pour différentes tensions continues

Tension Continue	Passage en Zone 2	Passage en Zone 3	Passage en Zone 4
$-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$	8 min	12 min	70 min
$-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$	2 min	8 min	44 min
$-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$	< 20 sec	4 min	17 min

Il ressort donc clairement, que plus la tension est élevée, plus l'évolution de la phénoménologie et le passage d'une zone à l'autre sont accélérés. Ce résultat peut également être confirmé par une analyse comparative des clichés caractéristiques de chacune des zones pour les tensions de $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$ et $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (Figure 84).

A $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$, le plumet se développe très rapidement, les back corona apparaissent au bout de 4 min et sont largement présentes à l'instant $t = 6 \text{ min}$. Il faut environ 12 min pour observer les premières back corona à $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (Figure 84).

De plus, à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ la tension appliquée étant élevée, le courant moyen est donc plus important et présente une croissance très abrupte (Figure 82). Les différentes séquences s'enchaînent sur un laps de temps très court ($< 25 \text{ minutes}$). La décharge est intense, plus lumineuse et, par conséquent, mieux observable (Figure 84).

Ainsi, nous venons de mettre en exergue, par les mesures de courant moyen couplées à des observations optiques, la présence de quatre zones distinctes dans le développement de la décharge, dont le temps d'apparition est dépendant de la tension appliquée.

Pour les trois niveaux de tension utilisés, seule la tension de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ conduit à un régime d'arcs dans notre dispositif. Ce régime s'établit au bout de 27 min, conduisant à l'arrêt de l'expérience.

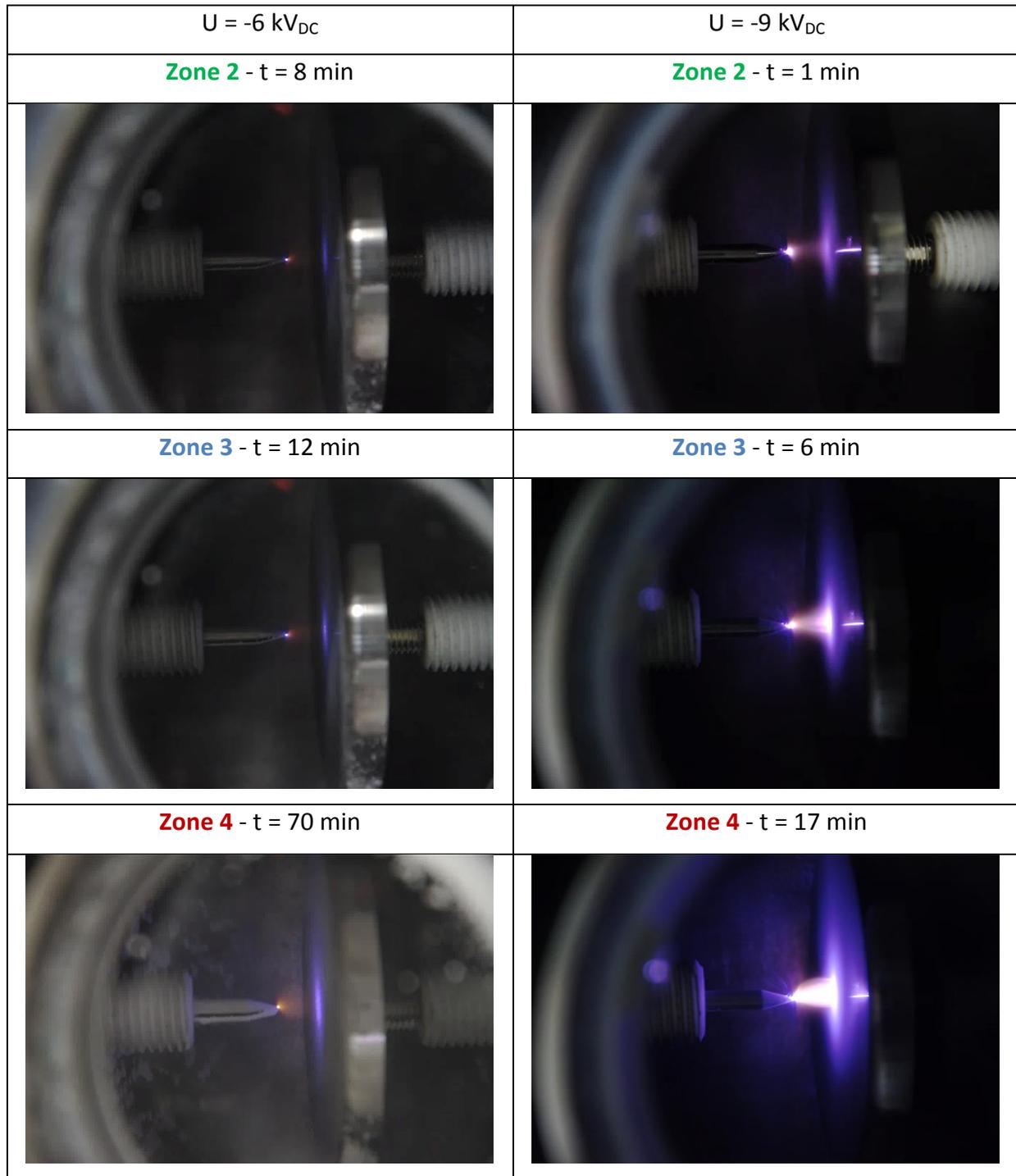


Figure 84 : Comparaison des zones 3 et 4 à U = -6 kV_{DC} et U = -9 kV_{DC}

L'évolution de la zone 4 vers la formation d'arcs électriques est conditionnée par la tension appliquée. Il est probable que la zone 4 soit maintenue tant que le dépôt de poussières sur la pointe n'est pas percé. Cette couche isolante limite ainsi le courant et s'oppose au claquage de l'intervalle (Figure 85). Il est bien établi que ce mode est néfaste au fonctionnement d'un électrofiltre, puisqu'au passage à l'arc, la différence de potentiel

pouvant être maintenue entre les électrodes est réduite voire annihilée, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité d'un électrofiltre.

Wolcott [107] a justement étudié l'influence du diélectrique sur la tension de claquage. L'étude portait sur une géométrie pointe / plan, avec différents matériaux et différentes positions dans l'espace inter-électrodes afin d'analyser leur impact sur la tension d'arc. Il a mis en évidence que cette tension d'arc dépend à la fois de la nature des poussières, mais aussi des conditions de dépôt (irrégularité de la couche, rugosités, porosité...).

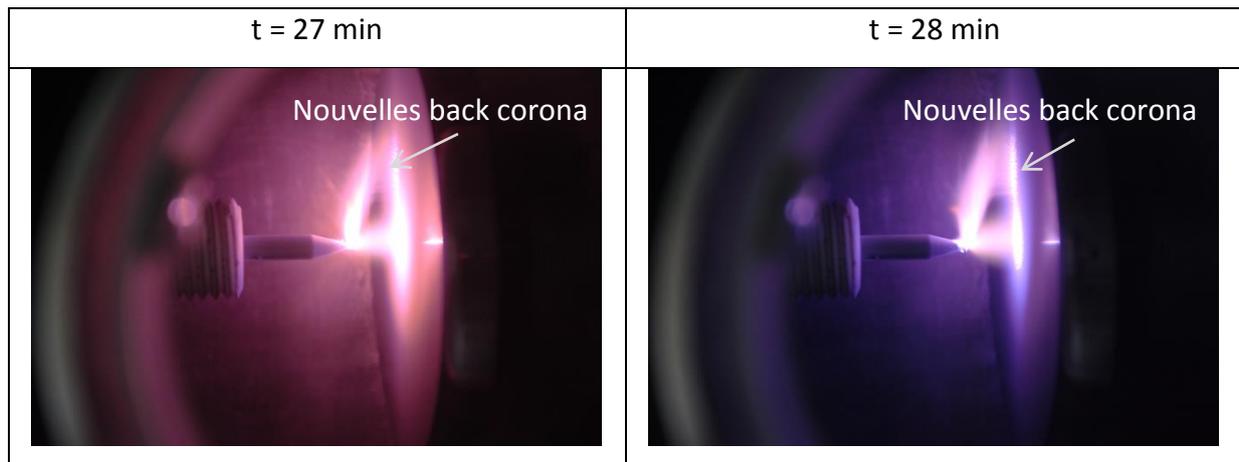


Figure 85 : Présence d'arc électrique en fin d'essai ($U = -9 \text{ kV}_{\text{DC}}$)

Outre le fait d'illustrer l'arc électrique, notons que les photographies de la Figure 85, sont intéressantes car elles mettent en évidence l'apparition de nouvelles back corona invisibles avant l'obtention de l'arc électrique (Figure 84). Cela suggère qu'il existe des régions énergétiquement actives prêtes à évoluer en back corona si des charges suffisantes y sont apportées.

Dans notre cas, avant le régime d'arc, les back corona modifient les lignes de champs en les faisant converger dans l'axe de la pointe et confinent leur développement sous la pointe [69]. La partie du halo bleuté localisée sur la périphérie n'est donc pas suffisamment alimentée en charges négatives pour permettre le développement de back corona. Le fait d'avoir un arc soufflé va apporter ces charges supplémentaires et ainsi favoriser la formation et l'apparition de nouvelles back corona dans la région où se connecte l'arc au plan.

Pour prévenir ce passage à l'arc il est possible, selon Pai [108], d'insérer des résistances dans le circuit de décharge ou encore de recourir à des faisceaux d'électrons de hautes énergies. Une autre alternative est d'utiliser des tensions pulsées qui vont générer des

champs électriques élevés et auront pour effet de favoriser l'ionisation et l'excitation du milieu [30], [87] tout en repoussant le passage à l'arc.

II) Analyses sous tension combinée avec la poussière SIKRON

Tout en travaillant dans les mêmes conditions opératoires que précédemment, l'objectif est d'analyser l'influence d'une tension combinée (cf. chapitre 2) sur la phénoménologie de la décharge et son évolution au cours du temps de filtration.

Trois configurations différentes de tension combinée sont utilisées :

- -3 kV_{DC} superposées à -3 kV_p (1 kHz)
- -4,5 kV_{DC} superposées à -4,5 kV_p (1 kHz)
- -6 kV_{DC} superposées à -6 kV_p (1 kHz)

L'évolution du courant moyen total relevé pour ces trois couples de tension combinée confirme que le courant est d'autant plus important que la tension appliquée est élevée (Figure 86). De plus, l'allure générale obtenue est similaire à celle étudiée sous tension continue : une première phase de légère croissance du courant suivie d'une forte augmentation linéaire ou par palier et enfin une phase de saturation. Ces résultats tendent à confirmer la présence des différentes zones introduites précédemment.

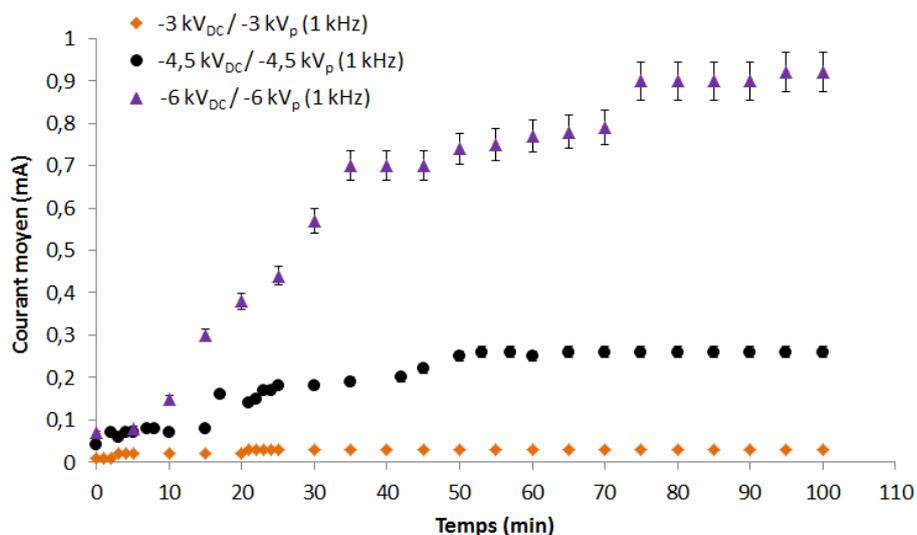


Figure 86 : Evolution temporelle du courant global pour différentes tensions combinées

Une analyse optique des clichés photographiques permet de valider cette hypothèse.

Pour $-3 \text{ kV}_{\text{DC}} / -3 \text{ kV}_p$ à 1 kHz, la boule de Trichel est bien visible sur la photographie présentée Figure 87 - a. Rappelons que dans le cas d'une tension combinée, à chaque impulsion de tension, un régime de Trichel s'établit puis diminue au fur et à mesure de la décroissance de tension [98]. Dans notre cas, la tension mise en jeu est trop faible pour que le régime de Trichel évolue et la formation du halo bleuté, qui caractérise le développement de micro-décharges dans le dépôt, ne peut être observée.

Toutefois, il semble que la filtration fonctionne et permette de collecter quelques poussières (Figure 87 – b). Cela peut s'expliquer par le fait que la tension n'atteint que par intermittence un niveau de -6 kV suffisant pour ioniser le gaz et charger quelques particules. La quantité de charges créées (donc le niveau de courant) est néanmoins trop faible pour obtenir une filtration efficace. Dans ce cas et en considérant le temps d'étude, il semblerait que le système reste dans la zone de fonctionnement n°1.

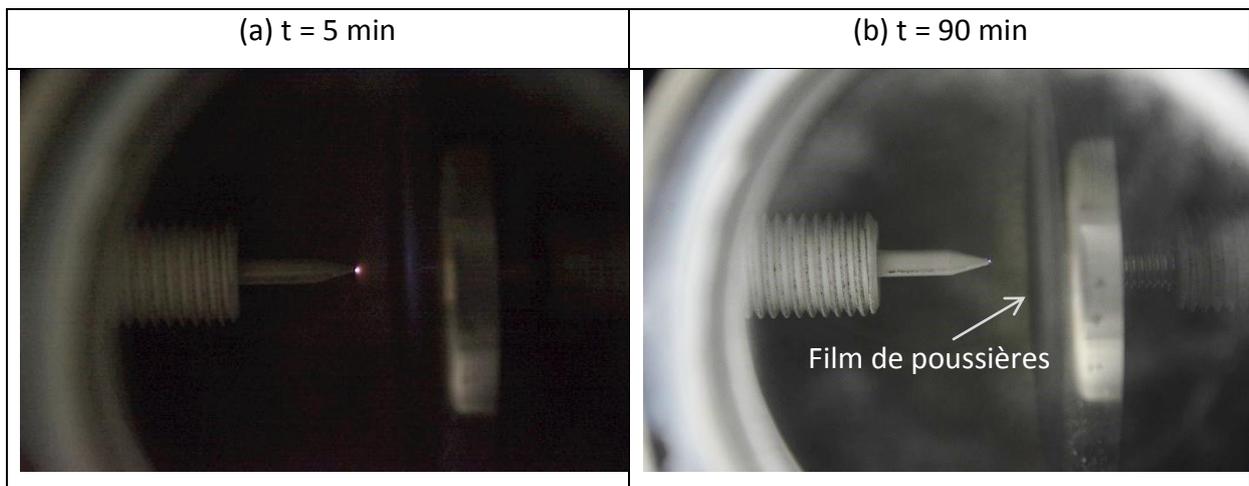


Figure 87 : Cliché à $-3 \text{ kV}_{\text{DC}} / -3 \text{ kV}_p$ (1 kHz)

L'examen des clichés obtenus pour les couples de tensions combinées $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ et $-6 \text{ kV}_{\text{DC}} / -6 \text{ kV}_p$ confirme la présence des quatre zones, à savoir la formation de la boule de Trichel, puis le développement du halo bleuté, suivi par l'apparition de back corona et enfin l'obtention d'un régime de stabilité (Figure 88 + Annexe D).

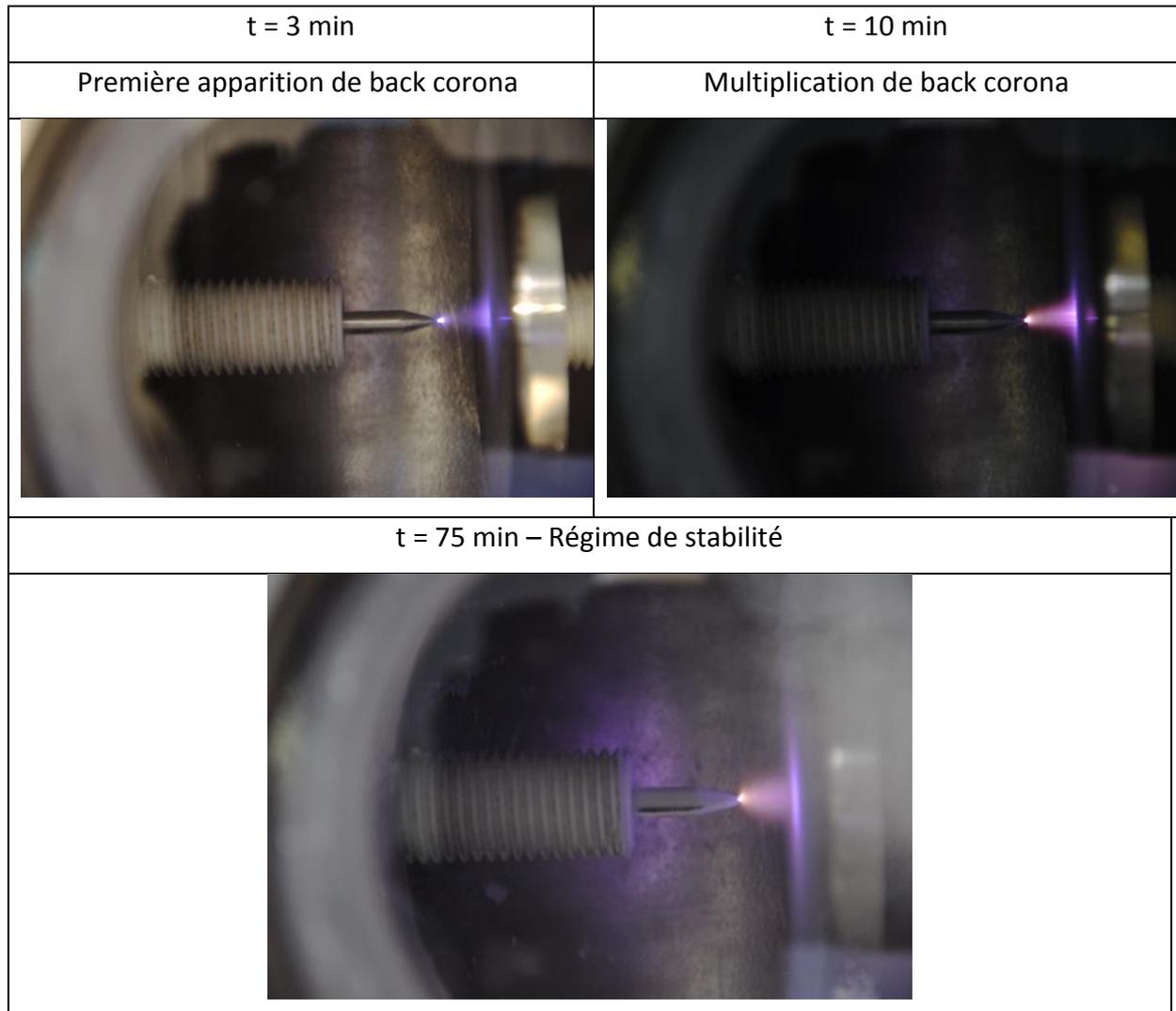


Figure 88 : Phénoménologie à $-6 \text{ kV}_{\text{DC}} / -6 \text{ kV}_{\text{p}}$ (1 kHz)

Le Tableau 12 résume ces résultats en indiquant le temps d'entrée dans chacune des zones.

Pour le couple de tension combinée $-6 \text{ kV}_{\text{DC}} / -6 \text{ kV}_{\text{p}}$ (à 1 kHz), l'entrée en zone 3 (apparition des premières back corona) est très rapide (moins de 5 minutes), comme constaté sous tension continue à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$. Cela s'explique par le caractère impulsionnel de la tension, puisque des tensions crêtes instantanées de -12 kV sont atteintes. Rappelons qu'à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$, des arcs électriques se développent au bout de 27 min. La tension combinée permet effectivement d'atteindre des niveaux de tension élevés sans jamais passer au régime d'arc.

Notons que l'estimation du temps de passage en zone 4 présente une anomalie puisqu'il semble intervenir trop tôt sous tension combinée $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_{\text{p}}$. Ce résultat

pourrait s'expliquer par la durée de l'expérience. Il est possible d'envisager qu'au-delà de 100 minutes, le courant aurait pu présenter une nouvelle augmentation par palier, ce qui repousserait le passage en zone 4 au-delà de celui obtenu dans la configuration $-6 \text{ kV}_{\text{DC}} / -6 \text{ kV}_p$.

Quoi qu'il en soit et comme sous tension continue, il existe un lien entre l'évolution du courant et les phénomènes optiques observés. La phénoménologie va dépendre de la tension utilisée. Selon le couple de tension combinée, le passage d'une zone à l'autre sera plus ou moins rapide.

Tableau 12 : Bilan du passage dans les différentes zones pour diverses tensions combinées

Tension combinée	Passage en Zone 2	Passage en Zone 3	Passage en Zone 4
$-3 \text{ kV}_{\text{DC}} / -3 \text{ kV}_p$	Pas d'évolution constatée		
$-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$	< 20 sec	15 min	70 min
$-6 \text{ kV}_{\text{DC}} / -6 \text{ kV}_p$	< 20 sec	3 min	75 min

Deux questions primordiales demeurent : quelles zones est-il préférable d'utiliser dans le fonctionnement d'un électrofiltre ? En quoi l'utilisation de tensions combinées est préférable pour améliorer l'efficacité d'un électrofiltre ?

III) Etude comparative entre le couple de tension combinée et la tension continue

Les expériences sous tension combinée et sous tension continue vont maintenant être confrontées. Pour cela, les résultats obtenus avec l'alimentation combinée $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ (à 1 kHz) vont être comparés à ceux sous tensions continues de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ et de $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (Figure 90).

Le choix de comparer ces tensions s'explique par le fait qu'en utilisant la tension combinée $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ (à 1 kHz), deux extrema de -9 kV et $-4,5 \text{ kV}$ sont atteints ponctuellement. Il paraît donc naturel, dans le cadre d'une étude comparative, de choisir les tensions équivalentes de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ et de $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$. Cependant, la tension continue de $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$

n'est pas assez élevée pour initier la décharge et ne servira donc pas ici. Par ailleurs, nous avons choisi de comparer la tension combinée à sa valeur moyenne définie par :

$$\langle U \rangle = \frac{1}{T} * \int_0^T U(t) dt \quad (3.1)$$

L'oscillogramme produit Figure 89 retrace la tension combinée de $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ (à 1 kHz) et sa tension moyenne équivalente à $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

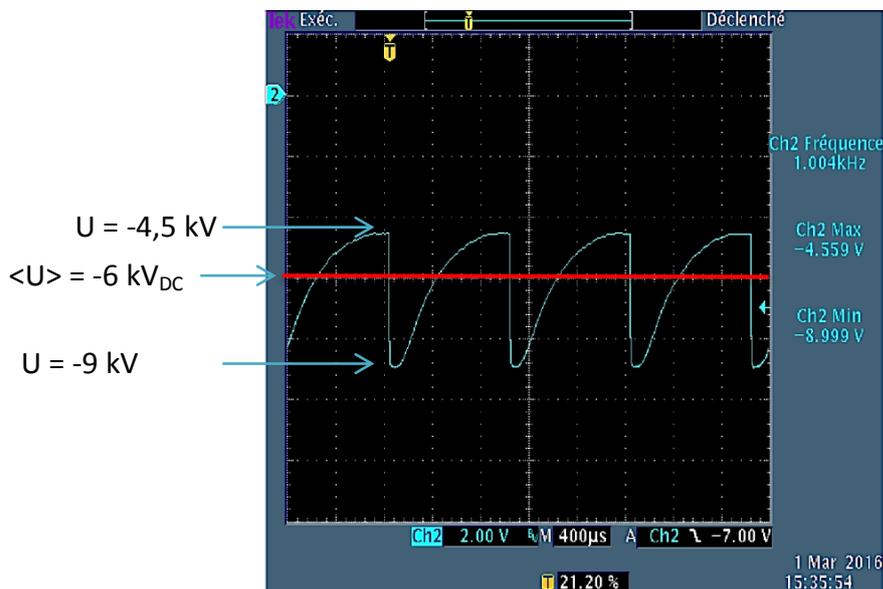


Figure 89 : Oscillogramme de la tension combinée $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ (1 kHz)

La variation du courant moyen au cours du temps présentée dans le graphique ci-dessous (Figure 90) est donnée pour chacune des configurations retenues.

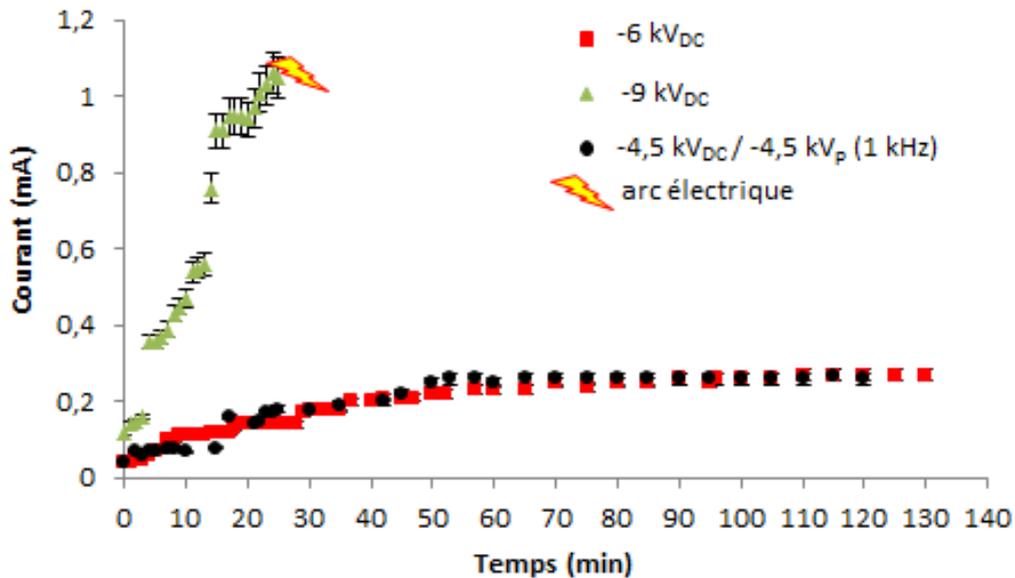


Figure 90 : Evolution temporelle du courant pour différentes tensions continues et combinées

Le courant moyen relevé pour la tension combinée $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ (à 1 kHz) est nettement plus faible qu'avec la tension continue de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$, mais similaire à la tension moyenne de $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

Comme vu précédemment, à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$, la phénoménologie est très rapide et conduit au passage à l'arc au bout de 27 minutes. L'utilisation d'une tension combinée retarde la formation de back corona et évite le passage à l'arc. Ainsi le temps de fonctionnement de l'électrofiltre est prolongé et doit permettre d'obtenir une meilleure filtration (cf. chapitre 4).

L'analyse montre qu'en terme de courant moyen, la tension combinée $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (à 1 kHz) se comporte comme une tension continue de $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (Figure 90), mais avec l'avantage de produire des tensions crêtes de -9 kV , ce qui va favoriser l'ionisation des particules et donc la filtration.

Après avoir réalisé une comparaison en termes de courant, il est intéressant de voir quelles sont les variantes optiquement visibles à un même instant entre les trois tensions étudiées. La Figure 91 présente les résultats obtenus à l'instant $t = 15 \text{ minutes}$. La colonne de gauche regroupe les photos relatives à l'expérience sous $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$, celle du milieu concerne la tension combinée et les cases de droite la tension continue de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

Les premières back corona apparaissent au bout de 12 minutes de fonctionnement, sous une tension de $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$. Elles ne se développent qu'à partir de l'instant $t = 15$ minutes sous tension combinée et sont déjà largement présentes à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ à ce même instant (Figure 91). Cela signifie que la formation de back corona (B.C.) se fait plus tardivement sous tension combinée, que sous sa tension continue moyenne équivalente.

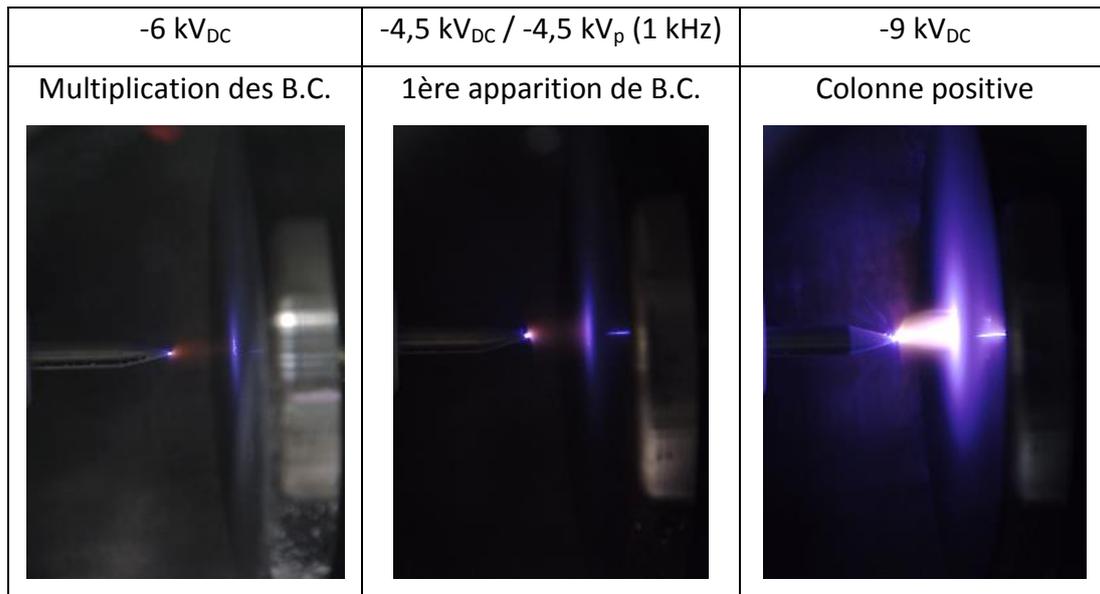


Figure 91 : Clichés au bout de 15 minutes de filtration

Une explication à ce phénomène peut se faire en étudiant le principe de l'électrofiltre. Lors de son fonctionnement optimal, les particules de poussières sont entièrement chargées (saturation de la charge). Les charges négatives créées ne vont pas rester en suspension dans le gaz, mais vont dériver en suivant les lignes de champ vers le plan. Ces charges vont entraîner une augmentation de la différence de potentiel sur la couche de dépôt et selon le type de tension appliquée, la différence de potentiel sera différente.

Thanh [68] a étudié la distribution du potentiel à la surface d'un dépôt dans un électrofiltre de type pointe / plan, pour une alimentation négative. Les tensions appliquées étaient soit continue, soit pulsée avec les caractéristiques suivantes : durée d'impulsion à mi-hauteur de 0,3 ms, temps de montée et de descente de 0,2 ms et une fréquence de répétition $f = 30 \text{ Hz}$. Un papier filtre en téflon simulait le dépôt dans l'électrofiltre. Ce travail met en évidence que, pour obtenir la même valeur de potentiel de surface, la tension pulsée appliquée est plus élevée que la tension continue (Figure 92). Par exemple, pour obtenir un

potentiel surfacique d'environ 1600 V, il faut une tension continue de -4,2 kV et une tension pulsée de -7,2 kV.

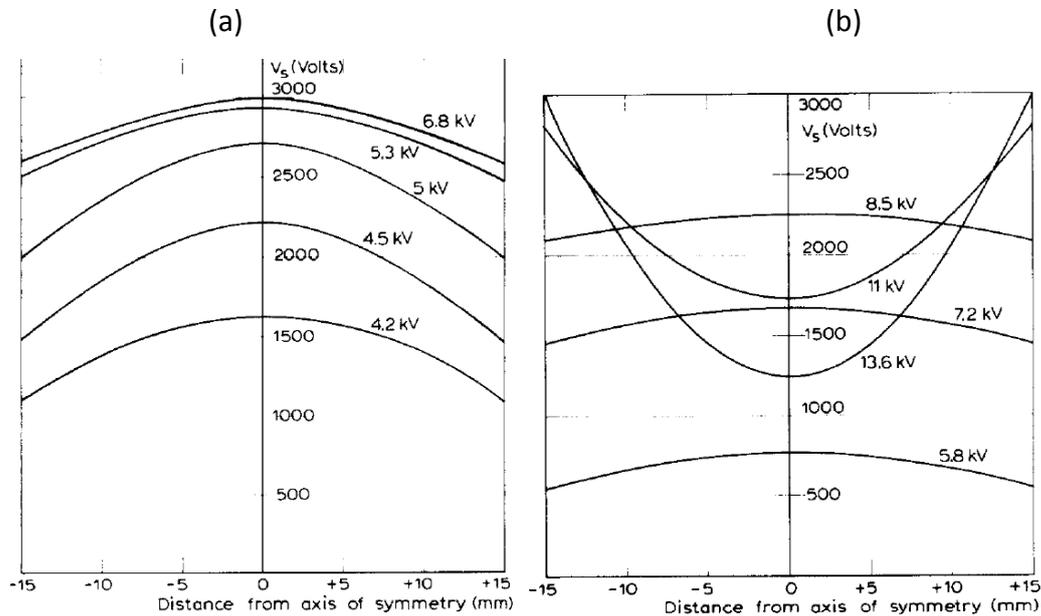


Figure 92 : Potentiel de surface (a) sous tension continue et (b) sous tension pulsée en valeur absolue [68]

D'après Thanh [68], la charge surfacique a une distribution normale et est donnée par (3.2).

$$q(r) = \frac{q_0}{\pi r_e^2} \exp\left(-\frac{r^2}{r_e^2}\right) \quad (3.2)$$

$$r_e = \sqrt{\frac{r_2^2 - r_1^2}{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}} \quad (3.3)$$

où $\mathbf{q(r)}$ est la densité de charge à la surface à une distance \mathbf{r} à partir du centre du dépôt, $\mathbf{q_0}$ la charge totale restant à la surface du dépôt. $\mathbf{r_e}$ est défini comme étant le rayon moyen de l'aire au-dessus duquel les charges se dispersent, avec $\mathbf{V_1}$ et $\mathbf{V_2}$ les potentiels à travers la couche, aux rayons $\mathbf{r_1}$ et $\mathbf{r_2}$.

Ces profils de potentiel de surface sont interprétés par le fait que les charges qui dérivent au plan suivent les lignes de champ. Le long de l'axe de l'électrode, le champ étant plus intense, les poussières chargées vont se déposer préférentiellement au centre du plan

et renforcer ainsi le potentiel surfacique de cette région. Les charges négatives présentes à la surface du dépôt, sont soumises à une diffusion radiale, mais leur mobilité peut être négligée car très faible. Par contre, à partir d'un certain seuil, la répulsion entre charges devient importante, ce qui entraîne une expansion spatiale du potentiel de surface sur le plan. Le potentiel de surface au plan augmente d'autant plus que la tension appliquée est importante. Lorsqu'il atteint le seuil de rupture diélectrique de la feuille de Téflon, il y a apparition des back corona qui vont engendrer une diminution du potentiel de surface. Il y a alors une inversion de la courbe de distribution (Figure 92 - b).

Ces résultats prouvent qu'il y a moins de charges collectées sous tension pulsée que sous tension continue au niveau de l'électrode de collecte. Ceci conforte nos observations qui montrent l'apparition plus tardive des back corona sous tension combinée. Mais alors comment expliquer qu'avec un même courant moyen, les back corona apparaissent plus tôt sous tension continue ?

Tout d'abord, rappelons que dans un électrofiltre, les charges collectées au plan sont à la fois les poussières chargées mais également les ions négatifs créés dans l'air. Une explication serait de supposer que, sous tension combinée, il y ait, en raison du passage à de faibles tensions, donc de faibles champs, un plus grand nombre de réactions de recombinaison qui se produirait. Ces réactions de recombinaison, plus importantes qu'en continu, font diminuer le nombre total d'ions négatifs du gaz qui vont dériver vers la surface du dépôt sans interagir sur la quantité de poussières chargées. Ce processus de recombinaison serait compensé par une forte ionisation au niveau de la pointe lorsque la tension atteint sa valeur maximale de -9 kV crête. De ce fait, la quantité d'ions négatifs qui atteint le plan serait moindre, limitant ainsi l'élévation de potentiel en surface du dépôt et repoussant l'instant de développement des back corona.

En revanche, une fois que les back corona sont créées, leur développement (Figure 93 + Annexe E) n'est pas identique entre $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ (1 kHz) et $-6 \text{ kV}_{\text{DC}}$. Elle est progressive sous tension continue et par saut sous tension combinée. Deux hypothèses peuvent permettre d'expliquer cela.

En premier lieu, le caractère pulsé de la tension combinée va, en raison de passage ponctuel au niveau de tension de -9 kV, générer un apport supplémentaire de charges. Ces

charges vont s'accumuler à la surface du dépôt, siège de micro-décharges (halo bleuté) et augmenter la différence de potentiel. Cela va accroître brusquement le nombre de back corona dans la zone où le halo bleuté est formé. Il s'agit du même phénomène que celui introduit précédemment (Figure 85) à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$, au cours duquel de nouvelles back corona étaient formées par l'apport de charges manquantes avec l'arc soufflé. Il faut garder à l'esprit, qu'au même instant à $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$, la colonne positive est entièrement formée et que le régime de stabilité est installé. Les back corona ainsi formées vont entraîner une décharge de la couche de dépôt (inversion de la courbe de potentiel), et un certain temps sera nécessaire pour recharger et reformer des back corona, ce qui permettra la collecte de nouvelles poussières.

La seconde hypothèse est liée au mode de prise de vue et à la fréquence de la tension combinée. Il est important de se rappeler que les clichés photographiques observés ne sont pas instantanés et que le temps d'exposition est de 20 secondes. Or pour le couple $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_p$ (à 1 kHz), la durée d'impulsion est d'environ $300 \mu\text{s}$ (temps de réouverture des semi-conducteurs). Cela signifie que sur une photographie, plusieurs variations de tension ont eu lieu et donc les clichés obtenus ne sont qu'une intégration de plusieurs cycles de tension. Cela peut également expliquer pourquoi le nombre de back corona (B.C.) augmente brusquement dans les clichés (Figure 93).

Notons que pour $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$, le régime d'arc est atteint au bout de 27 minutes de fonctionnement (Figure 93), or bien que cette valeur soit atteinte de manière impulsionnelle avec la tension combinée, il n'y a pas de passage au régime d'arc. Il s'agit d'un avantage notable de la tension combinée par rapport à la tension continue.

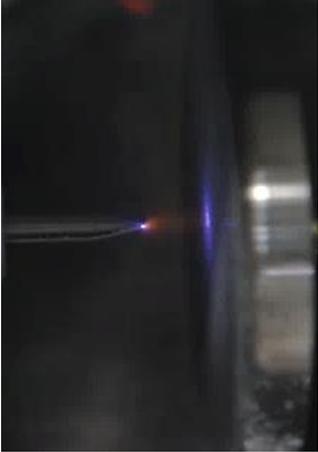
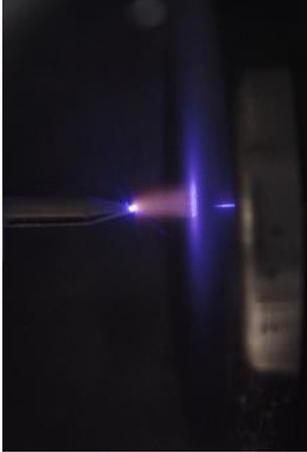
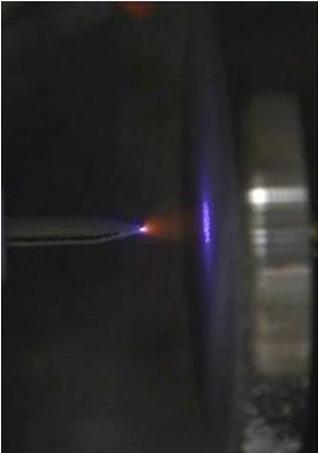
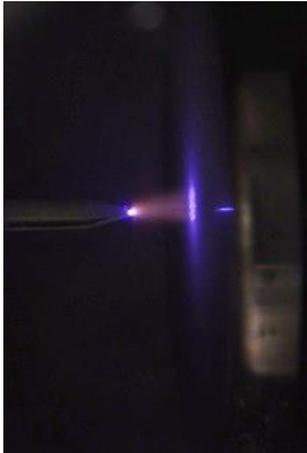
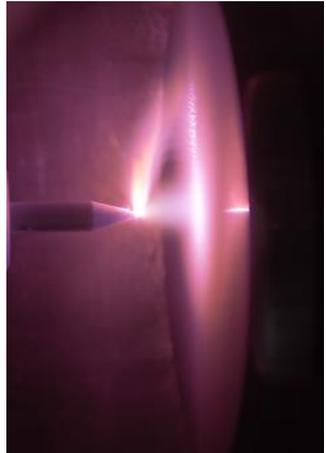
-6 kV _{DC}	-4,5 kV _{DC} / -4,5 kV _p (1 kHz)	-9 kV _{DC}
t = 17 min		
B.C. : accroissement progressif	B.C. : accroissement brusque	Zone 4
		
t = 27 min		
Zone 3	Zone 3	Arc électrique
		

Figure 93 : Clichés au bout de 17 et 27 minutes de filtration

Il ressort de cette analyse que la formation de back corona, qui est le phénomène le plus néfaste à l'efficacité d'un électrofiltre, est favorisée par une alimentation en continue. Leur effet sera d'autant plus important que les particules traitées sont petites, car elles vont influencer, à la fois leur charge, et leur migration [50]. Ainsi, il est préférable de travailler sous tension combinée.

Une étude comparative du rendement de filtration d'un couple combiné à sa tension continue moyenne sera réalisée, afin de vérifier que le filtre soumis à une tension combinée

est plus performant que le filtre alimenté sous tension continue. Cette analyse sera réalisée dans le chapitre 4 qui portera sur l'optimisation des rendements de filtration.

IV) Etude comparative sous tensions continues avec les poussières SHIVA

Les mêmes conditions opératoires sont utilisées mais cette fois avec la poussière SHIVA (cf. chapitre 2).

IV-1) Phénoménologie à -7,5 kV_{DC}

La poussière SHIVA est intéressante car elle présente une résistivité plus faible que la SIKRON et surtout en deçà de la limite d'apparition de back corona définie par Parker [35] ($3 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) (cf. chapitre 2). Ainsi, en utilisant la poussière SHIVA, aucune back corona ne devrait théoriquement se former dans la couche de dépôt.

Des essais sont réalisés avec la poussière SHIVA (Figure 94 + Annexe F) à une tension de -7,5 kV_{DC} et comparés avec les clichés obtenus dans les mêmes conditions avec la poussière SIKRON.

L'évolution de la décharge avec la poussière SHIVA est très différente de celle constatée avec la poussière SIKRON puisqu'il n'y a pas le développement des différentes zones définies précédemment. Au bout de 20 minutes de fonctionnement, alors que les back corona sont bien présentes avec la poussière SIKRON, elles sont inexistantes avec la poussière SHIVA et cela est valable même après 45 minutes de fonctionnement. Ceci est cohérent avec les connaissances concernant l'apparition de back corona. Les poussières étant conductrices, la différence de potentiel créée au niveau du dépôt n'est pas suffisante pour induire un claquage dans la couche. Les back corona ne peuvent pas se développer, ni les décharges filamenteuses. L'évolution de la décharge se caractérise uniquement par l'intensification d'une décharge de type glow à la pointe et d'un halo rosé au plan.

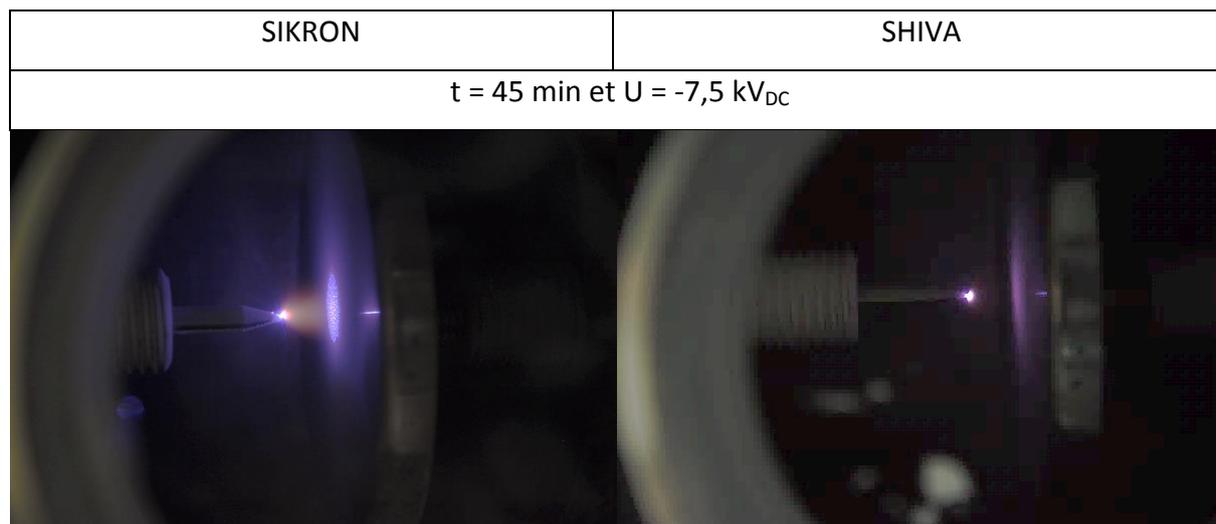


Figure 94 : Comparaison optique des décharges

Il peut arriver, pour les particules conductrices chargées arrivant sur le collecteur, que la charge s'écoule si rapidement que la particule siège à la surface comme une particule neutre. Cette dernière peut donc être ré-entraînée par le flux de gaz. Ce phénomène induit un faible rendement de filtration. L'ampleur de ce phénomène dépend de nombreux facteurs tels que la cohésion des particules, la vitesse de l'effluent gazeux, la turbulence ou encore les forces électrostatiques agissant sur la particule (cf. chapitre 1).

IV-2) Influence de la tension

L'enjeu de cette expérience est d'observer l'évolution de la décharge jusqu'au claquage. Une tension continue augmentée progressivement est appliquée à la pointe. L'évolution de la décharge est observée optiquement et le courant moyen mesuré.

Il est important de noter que pour une tension donnée le courant n'évolue pas au cours de l'expérience contrairement au cas précédent (SIKRON). Cela s'explique par l'absence de back corona susceptibles de générer un accroissement de courant. L'évolution du courant en fonction de la tension appliquée est donnée Figure 95.

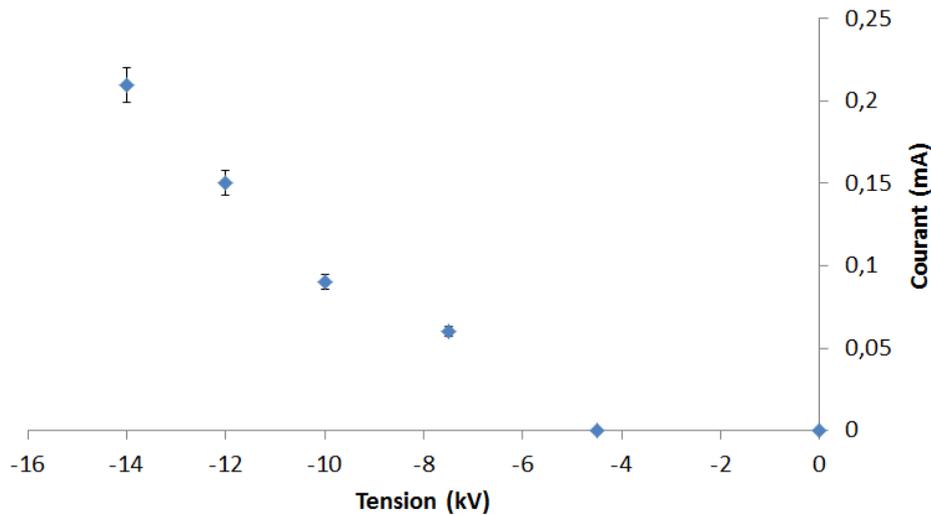


Figure 95 : Caractéristiques courant / tension (poussières SHIVA)

En augmentant la tension (Figure 96 – a – b) jusqu'à $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$, il y a une intensification du halo rosé au plan. A partir de $-12 \text{ kV}_{\text{DC}}$, la boule de Trichel va devenir plus intense et un cône lumineux commence à se former. La poussière SHIVA ne permet qu'une amplification des phénomènes, alors qu'aux mêmes niveaux de tension des arcs électriques sont présents avec la poussière SIKRON.

A partir de $-14 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (Figure 96 - c), le cône lumineux continue à s'élargir, il s'allonge et devient plus intense. En parallèle, le dépôt de poussière s'épaissit sur le plan (Annexe G).

Le régime d'arc est atteint avec la poussière SHIVA pour une tension de $-16 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (Figure 96 - d), alors que dans les mêmes configurations opératoires, elle est de $-9 \text{ kV}_{\text{DC}}$ avec la poussière SIKRON et de $-13,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ sans poussière. Cela prouve que lorsqu'il n'y a pas de back corona, le dépôt de poussières résistif limite le courant et s'oppose à l'établissement d'un arc. Alors que lorsque des back corona se développent (poussière SIKRON), le dépôt est percé par des décharges positives ascendantes, qui favorisent le passage à l'arc.

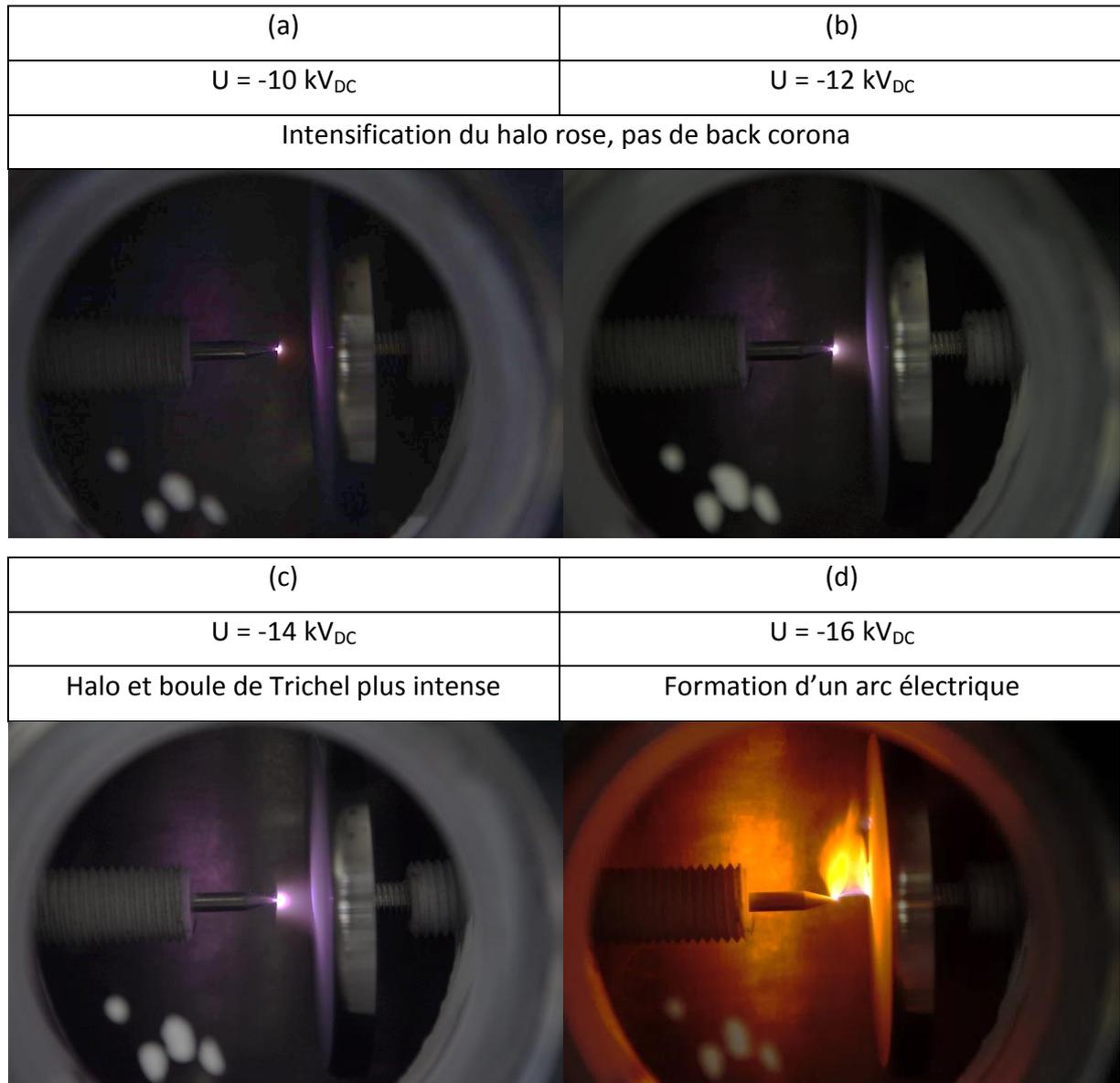


Figure 96 : Evolution de la décharge en fonction de la tension appliquée (poussière SHIVA)

À $-16 \text{ kV}_{\text{DC}}$, un arc étincelant semblable à une flamme est visible signe d'une réaction exothermique. Cet arc entraîne un claquage de la couche de dépôt illustré Figure 97.

Le dépôt est plus épais et moins large que celui obtenu avec les poussières SIKRON. Il paraît également décentré par rapport à l'axe de la décharge et donc plus dépendant de l'écoulement du gaz. Il n'y a donc pas ici l'effet de « spray » observé avec SIKRON et IRIS [98] lié au développement des glow et des premières back corona dans la couche. Il est probable que, les poussières une fois collectées au plan, se déchargent rapidement du fait de leur faible résistivité. Les poussières risquent d'être ré-entraînées dans le flux et certainement d'affecter le rendement de filtration, qui sera moins bon.



Figure 97 : Rupture diélectrique de la couche de dépôt à -16 kV_{DC}

V) Bilan

Ce chapitre a porté sur l'étude d'un dispositif pointe / plan, afin, à la fois, d'étudier les régimes de décharge au niveau d'un unique site émissif, mais aussi d'observer l'évolution de la zone de collecte ainsi que l'activité électrique qui s'y développe. Pour cela, des mesures de courant moyen et des clichés optiques de la décharge ont été réalisés. L'analyse a été divisée en quatre parties.

Tout d'abord, l'évolution de la décharge a été étudiée sous tension continue avec la poussière SIKRON. A partir de cette analyse, l'existence de quatre zones différentes, correspondant à des étapes clefs du développement de la décharge a été mise en évidence. La zone 1 correspond à l'initiation de la décharge, et à la formation de la boule de Trichel à la pointe. L'entrée en zone 2 est liée à l'apparition d'un halo bleuté au plan, assimilable à de micro-décharges (glow) qui favorisent la charge des poussières. L'apparition et le développement du halo bleuté entraîne une augmentation constatée du courant. Le dépôt de poussière au plan augmente, ce qui occasionne un accroissement de la différence de potentiel aux bornes de la couche de dépôt. Lorsque cette dernière atteint la tension de rupture du dépôt, il se produit une perforation de ce dernier, assimilable à des micro-cratères appelés back corona. L'apparition de cette contre-émission est le signe de l'entrée en zone 3. Dans cette zone, le nombre de back corona va croître et la répartition des lignes de champ va être modifiée, ce qui va entraîner un renforcement de la dérive des charges négatives. La formation de back corona libère des charges positives qui vont neutraliser les charges négatives et entraîner la formation et le développement d'une colonne positive.

Cette dernière correspond à une région électriquement neutre où le champ est réduit et par conséquent la filtration faible. La présence et l'accroissement des back corona dépendent de nombreux paramètres et sont surtout connus pour être néfaste au fonctionnement de l'électrofiltre. Durant cette étape, il y existe une forte croissance linéaire et / ou par saut du courant. La zone 4 correspond à l'entrée dans un régime de stabilité. La colonne positive ne croît plus et le courant sature.

L'analyse menée pour différentes valeurs de tension continue a permis de montrer, que le passage d'une zone à l'autre dépend de la tension continue appliquée : plus elle est élevée, plus la phénoménologie est accélérée. De plus, pour certains niveaux de tension, il est possible de former, au bout de quelques minutes, des arcs électriques dans le filtre.

Les essais conduits sous tensions combinées ont montré que l'évolution de la décharge à la pointe et au plan est identique à ce qui a été constaté sous tensions continues (même phénoménologie avec quatre zones). L'utilisation d'une tension combinée retarde la formation de back corona et leur accroissement se fait par saut de courant. Sous tension combinée, des niveaux élevés de tensions sont atteints sans jamais passer à l'arc. Ainsi le temps de fonctionnement de l'ESP est prolongé, ce qui doit permettre d'obtenir une meilleure efficacité de filtration.

C'est l'étude comparative des tensions continues et des tensions combinées, qui a permis de montrer que l'apparition de back corona se fait préférentiellement sous tension continue et que l'emploi de tension combinée évite la formation d'arc électrique.

Une dernière étude a été faite avec une autre poussière plus conductrice (poussière SHIVA). Les essais menés ont confirmé que, selon la poussière traitée et, plus précisément, selon sa résistivité, il y aura, ou non, formation de back corona. De par la faible résistivité des poussières SHIVA, les charges s'écoulent rapidement une fois celles-ci déposées au plan. La différence de potentiel au dépôt ne croît pas suffisamment. Il n'y a donc pas apparition de back corona. La couche de dépôt n'est pas percée par des décharges positives qui émanent du plan. La résistivité du dépôt limite donc en permanence le courant qui reste quasi-constant (pour une tension fixée) et s'oppose au développement d'un arc. La tension de

claquage est supérieure à celle obtenue dans le même écoulement sans poussière et très supérieure à celle mesurée avec les poussières SIKRON.

Le chapitre 4 suivant repose sur l'évaluation et l'optimisation des rendements de filtration avec la nouvelle électrode Solectrode du procédé semi-industriel.

*Chapitre 4 - Analyse et optimisation de
l'évolution temporelle des rendements de
filtration*

Dans ce chapitre, il s'agira de déterminer les points de fonctionnement de l'alimentation de l'électrofiltre qui permettent d'obtenir un rendement de filtration optimum avec la nouvelle électrode Solectrode développée au chapitre 2. Les conditions d'écoulement du gaz (température, débit) resteront inchangées et correspondent à celles définies au chapitre 2.

Dans un premier temps, l'objectif est de remettre en service la boucle de filtration. Il s'agit de vérifier son fonctionnement en y associant quelques nouveautés, mais également de retrouver, dans les mêmes conditions expérimentales, des résultats de mesures de rendement de filtration identiques à ceux obtenus lors de la précédente étude de 2006 [98].

Nous nous attacherons ensuite à déterminer, sur la nouvelle géométrie d'électrode, des points de fonctionnement optimum sur des temps courts de filtration (maximum trois heures) pendant lesquels l'électrofiltre n'a pas le temps de trop s'encrasser. Durant cette étude, le développement de back corona reste insuffisant pour interférer sur l'efficacité de filtration. Le rendement de filtration est, par conséquent, fonction uniquement de la configuration expérimentale et non pas du temps de fonctionnement de l'électrofiltre. L'intérêt réside dans le fait qu'il est possible de multiplier les configurations d'essais tout en limitant le nettoyage de la boucle.

L'influence de plusieurs paramètres sur l'efficacité de filtration est ainsi étudiée : la granulométrie, le type de poussières, le taux de particules injectées et bien évidemment tous les paramètres liés à l'alimentation électrique.

Une analyse du dépôt de poussières sur les électrodes émettrice et collectrice est également présentée.

Dans un troisième temps, le but sera d'étudier, dans une configuration fixée, l'évolution du rendement de filtration au court du temps. Les études porteront alors sur des durées de fonctionnement pouvant atteindre treize heures. En raison des quantités de poussières disponibles, seule la poussière SIKRON sera alors utilisée.

D'après les résultats présentés dans le chapitre précédent, l'enchaînement des processus physiques mis en jeu dans le procédé d'électrofiltration doit conduire plus ou moins rapidement, mais inévitablement, au développement massif de back corona qui

feront irrémédiablement chuter le rendement. Il est bien évident que, dans l'optique d'une application industrielle, le temps de fonctionnement de l'électrofiltre à rendement optimum est un paramètre fondamental. Par conséquent, nous nous attacherons à déterminer le type d'alimentation qui permet d'obtenir le rendement le plus endurant.

Des résultats intéressants seront également présentés concernant l'impact de la granulométrie des poussières sur la chute du rendement de filtration.

Enfin, les dépôts de poussières sur les électrodes feront l'objet d'une analyse comparative.

I) Remise en fonctionnement de la boucle expérimentale

Depuis 2006, le pilote de laboratoire n'avait plus fonctionné. Un premier travail a donc consisté à remettre en service et vérifier tous les points de fonctionnement de la boucle (débit, température).

Des essais sont également menés pour concevoir un procédé d'injection plus adapté et vérifier le fonctionnement des compteurs de particules GRIMM utilisés. Cette remise en service s'achèvera par des comparaisons des rendements de filtration d'anciens essais à de nouveaux réalisés dans les mêmes conditions opératoires. La poussière IRIS sera utilisée dans cette partie.

I-1) Stabilisation de l'injection

L'injection des poussières dépend de nombreux paramètres tels que le débit d'air entrant, l'agitation des poussières, la quantité de poussières contenues dans le ballon ou encore leur nature. L'important est que le procédé permette, en priorité, d'obtenir une injection stable, régulière et contrôlée du nombre de particules à l'entrée du pilote (environ 2.10^6 à 4.10^6 particules/litre).

Pour cela, des études de stabilité d'injection en entrée de filtre sont menées. La Figure 98 illustre les données obtenues pour deux procédés d'injection. L'un utilise une agitation mécanique (par pâles rotatives) et l'autre magnétique (agitateur mis en mouvement par induction).

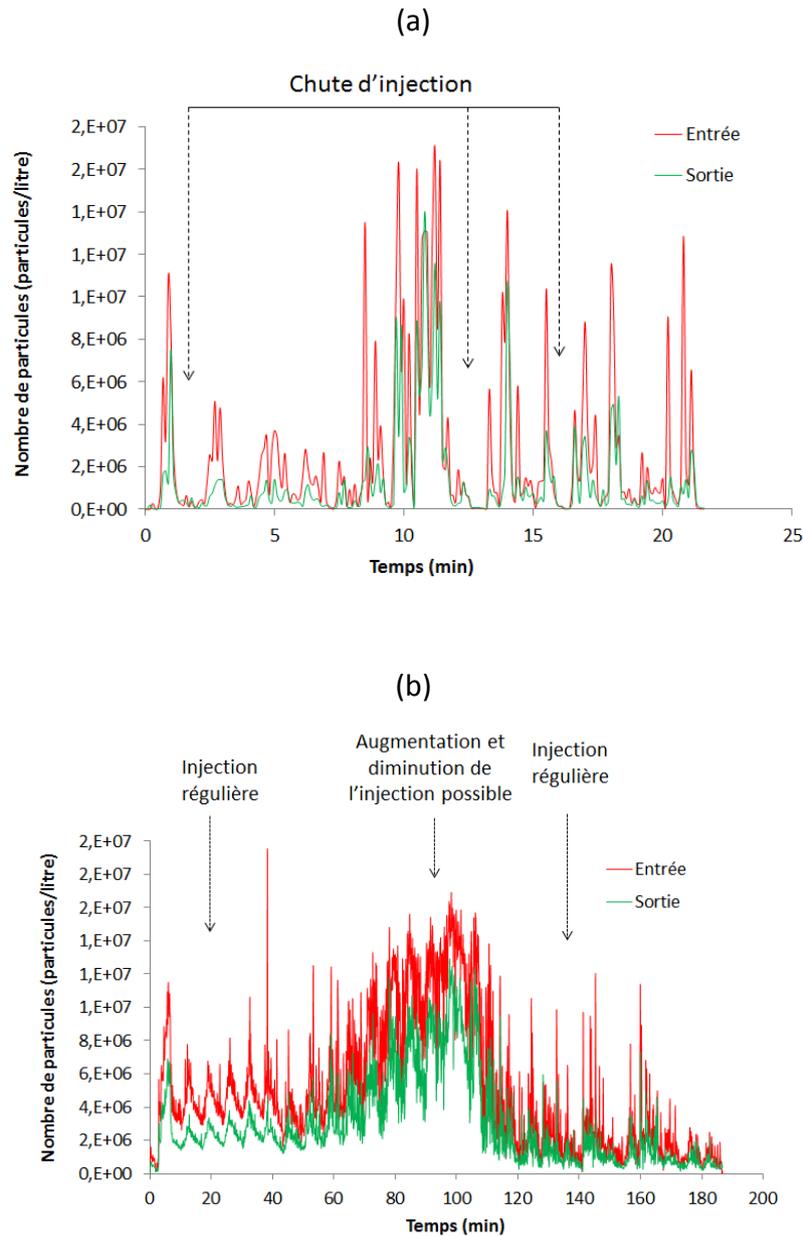


Figure 98 : Comparaison de deux procédés d'injection de poussière pour deux modes d'agitation (a) agitation mécanique et (b) agitation magnétique

Nous observons que, dans le procédé d'injection (a), la quantité de poussières entrante est peu stable. L'injection est très irrégulière, avec des chutes à des seuils très bas qui sont non-contrôlées.

Par contre, l'injection via le procédé (b) permet d'obtenir une quantité de poussières entrante maîtrisée dans la plage définie. L'injection reste stable et il est surtout possible de la contrôler en augmentant et diminuant la quantité de poussières injectée. Nous avons donc opté pour le procédé d'injection (b) utilisant une agitation par barreau aimanté.

I-2) Vérifications des compteurs GRIMM

Bien que les deux GRIMM aient été étalonnés sur une même base par la société INTERTEK, nous avons, dans un premier temps, vérifié et validé leur étalonnage. Pour cela, les deux compteurs (A et B) sont placés alternativement soit en entrée soit en sortie du filtre. La Figure 99 présente les évolutions mesurées en entrée de filtre, la même observation peut être faite en sortie. Ainsi, aux deux extrémités du filtre, le taux de particules détecté reste identique. Ces essais confirment la validité de l'étalonnage des compteurs de particules.

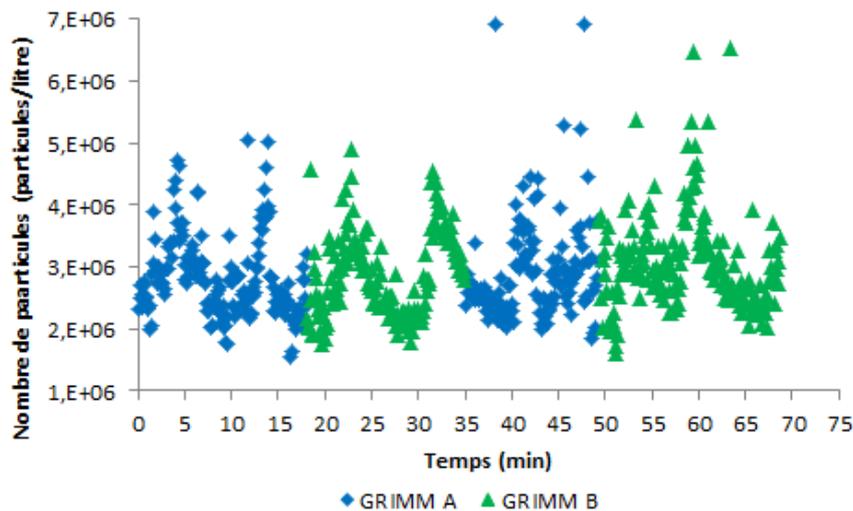


Figure 99 : Comparaison des deux GRIMM placés en entrée

I-3) Comparaisons entre anciens et nouveaux essais

Une fois les points de fonctionnement de la boucle validés, l'injection de poussières et les deux compteurs de particules étalonnés, des tests de filtration ont pu être réalisés afin de vérifier que les nouveaux résultats de filtration soient bien identiques à ceux obtenus par A. Silvestre de Ferron [98] dans les mêmes conditions opératoires. Ces essais comparatifs ont été menés avec l'Héritrode et la poussière IRIS, uniquement pour différents niveaux de tension continue (Figure 100). Les résultats obtenus sont très proches des anciens et valident le nouveau dispositif et sa remise en service.

Nous noterons que, pour des tensions inférieures à $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$, l'efficacité de filtration est faible et comprise entre 10 % et 30 %. Il s'agit essentiellement d'une filtration mécanique (dépôt obtenu par impaction avec les électrodes ou encore via les mouvements de diffusion, par frottement, contact et gravité).

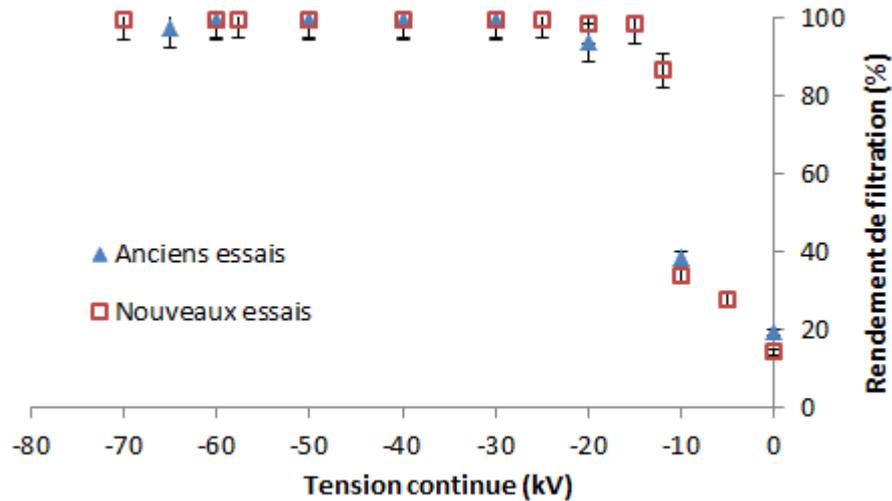


Figure 100 : Rendement de filtration obtenu avec l'Héritrode sous tension continue sur la poussière IRIS

La boucle de filtration et les différents dispositifs d'injection et de mesures étant à nouveau opérationnels, nous allons maintenant nous attacher à caractériser l'efficacité de filtration de la nouvelle géométrie Solectrode / cylindre.

II) Fonctionnement sur un temps court

Cette partie vise à évaluer les rendements obtenus avec l'électrode nommée Solectrode sur des temps de fonctionnement courts du pilote, c'est-à-dire n'excédant pas trois heures. L'intérêt de cette étude est multiple :

- sur une durée relativement courte de fonctionnement, la boucle n'a pas le temps de trop s'encrasser, cela signifie que les back corona n'ont pas le temps de se développer massivement et de faire chuter l'efficacité de filtration (cf. chapitre 3). Le rendement obtenu restera donc constant sur ce laps de temps de fonctionnement et correspondra donc à celui le plus élevé qu'il soit possible d'obtenir dans la configuration expérimentale utilisée,

- cette étude sur des temps courts va permettre de multiplier les configurations d'essais afin de pouvoir comparer les rendements de filtration en fonction d'un maximum de paramètres : le niveau de tension continue, les paramètres intrinsèques liés à la tension combinée (niveau du fond continu, amplitude de la tension pulsée, fréquence), le taux d'injection, le type et la granulométrie des poussières,
- travailler sur temps court permet enfin d'éviter de multiplier les fastidieuses séquences de démontage, nettoyage, séchage et remontage de notre électrofiltre. Soulignons que chaque nettoyage de boucle nécessite au minimum deux journées de manutention et donc d'immobilisation de l'électrofiltre.

Etant donné le nombre de variables et la quantité limitée de certaines poussières, il ne sera pas possible d'étudier toutes les configurations envisageables. Des choix ont dû être faits dans les configurations expérimentales étudiées et, en particulier, lors de l'utilisation de l'alimentation combinée.

Avant tout, nous allons nous débarrasser d'un paramètre en répondant à une question : dans une configuration fixée, est-ce que le rendement de filtration dépend de la granulométrie de la poussière étudiée ?

En effet, les mesures de rendements de filtration qui vont être présentées correspondent systématiquement à des valeurs moyennes de rendement calculées sur toute la gamme de tailles de particules mesurable par un compteur GRIMM (0,25 μm - 32 μm). Une étude préalable relative à l'influence de la taille des poussières sur le rendement est donc menée afin de répondre à cette question.

L'analyse des résultats obtenus indique que, quelles que soient les poussières utilisées et la tension appliquée, il n'y a pas d'écart significatif de rendement selon la taille des poussières, lors d'un fonctionnement sur temps court. Un exemple caractéristique de ce résultat est présenté Figure 101. Dans la configuration d'essais, le rendement moyen obtenu sur toute la gamme de granulométrie ($\eta = 99,8 \%$) est identique, aux incertitudes de mesures près, aux rendements calculés en fonction de la classe des particules.

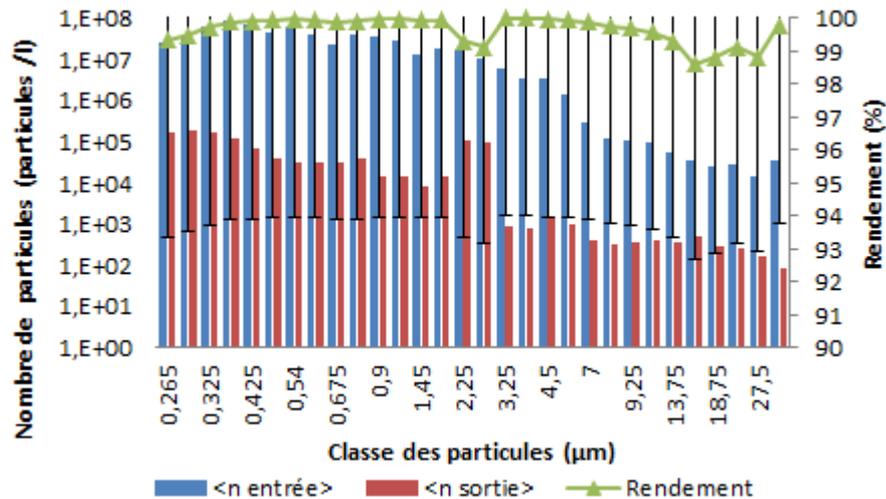


Figure 101 : Rendement en fonction de la taille des particules (poussières IRIS – U = -20 kV_{DC})

De ce fait, le rendement global donné dans cette étude sur des temps courts de fonctionnement est valable pour toute la granulométrie de la poussière traitée (gamme de mesure du GRIMM) sans aucune influence de la taille des particules sur l'efficacité de filtration.

Comme nous l'avons déjà spécifié dans ce manuscrit, White [10] a montré que le processus de charge des particules diffère selon la taille des particules. Il distingue :

- le mécanisme de charge par champ pour les particules supérieures à 0,5 µm,
- le mécanisme de charge par diffusion pour les poussières inférieures à 0,2 µm,
- le mécanisme de charge mixte (charge par champ + diffusion) pour les particules comprises entre 0,2 µm et 0,5 µm.

La limite inférieure de mesures de nos compteurs (0,25 µm) correspond donc à la taille des particules qui, selon White, induirait un changement de mécanisme de charge et qui impacterait sur l'efficacité de filtration. Par conséquent, il ne semble pas anormal que nos résultats soient indépendants de la taille des particules.

Toutefois, il est à noter que différentes études [38], [50], [79], [109] avancent que l'efficacité de filtration diminue pour ces particules submicroniques. Cela serait dû, selon ces auteurs, à une baisse significative de leur charge et à une augmentation de leur mobilité liée à la diminution de leur taille (en raison de la diminution des forces de dérive).

Cette chute d'efficacité sur les poussières inférieures à $0,25 \mu\text{m}$ ne peut être constatée ici, mais nous pouvons confirmer que, pour des particules supérieures à $0,25 \mu\text{m}$, il n'y a pas d'influence de la granulométrie sur l'efficacité de filtration pour des durées de fonctionnement dits « courts ».

II-1) Expérimentations avec la poussière SIKRON

II-1-a) Etude sous tension continue

Cette partie vise à caractériser les rendements de la nouvelle géométrie Solectrode / cylindre alimentée sous tension continue.

La Figure 102 présente à la fois l'évolution du rendement de filtration et du courant moyen lorsqu'une tension continue est appliquée sur l'électrode émissive. En corrélant la variation de ces deux courbes, il apparaît que la filtration électrostatique débute lorsque le courant commence à augmenter, ce qui correspond au seuil d'initiation du régime de Trichel (corona onset). En effet, pour $-5 \text{ kV}_{\text{DC}}$, la tension est trop faible pour amorcer la décharge et donc le rendement obtenu correspond à de la filtration mécanique qui est comprise entre 10 % et 30 %. À partir de $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$, le courant commence à croître. La décharge de Trichel aux extrémités des pointes de l'électrode émissive se forme et le courant libéré est suffisant pour pouvoir mesurer un rendement électrique qui s'ajoute au rendement mécanique. À partir de $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$ la filtration est optimale ($>98 \%$). L'augmentation de la tension n'impacte plus le rendement mais ne fait qu'augmenter le courant moyen injecté dans l'électrofiltre, ce qui pourra être préjudiciable à un fonctionnement longue durée (formation de back corona favorisée). Par conséquent, cette nouvelle géométrie d'électrofiltre permet d'obtenir des rendements optimums pour de faibles niveaux de tension continue. Notons que le régime d'arcs est initié pour des tensions supérieures à $-35 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

Il semble cohérent de considérer que l'évolution de la décharge est identique entre toutes les pointes de la Solectrode et celle étudiée dans la configuration d'une pointe unique (cf. chapitre 3). Le courant moyen mesuré correspond donc à la somme des contributions

des 120 pointes de la Solectrode. L'analyse de la courbe courant / tension (Figure 102) montre une évolution de type exponentielle.

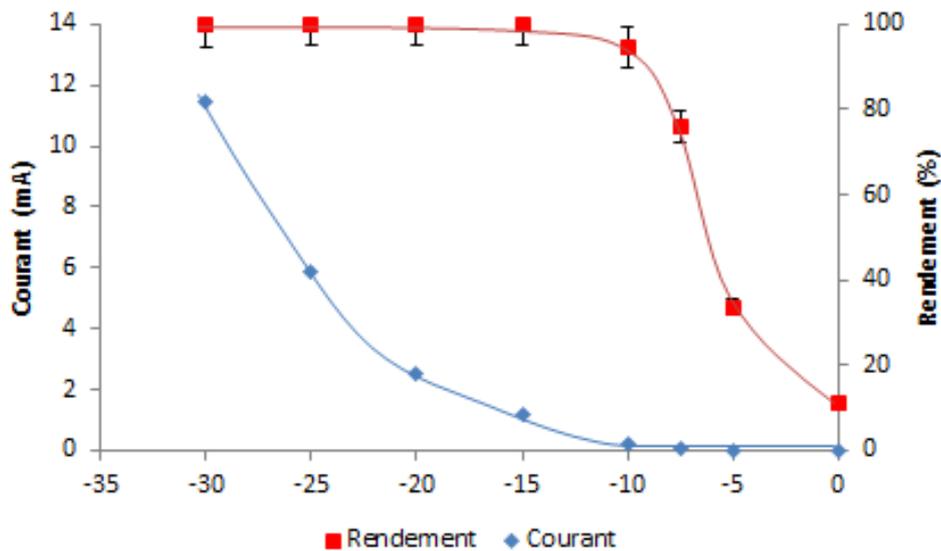


Figure 102 : Evolution du rendement et du courant sous tension continue avec la poussière SIKRON

Malgré les précautions expérimentales prises concernant la durée des expériences qui n'excède pas les trois heures et qui limite l'état d'encrassement de la boucle, il est important de souligner qu'une courbe d'évolution du courant moyen comme celle présentée sur la Figure 102 est peu reproductible. Elle dépend de la période durant laquelle est réalisée la mesure dans le laps de temps imparti des trois heures. Concrètement cela signifie que la détermination d'une évolution de courant réalisée sur un filtre parfaitement propre présente des écarts significatifs par rapport à cette même évolution déterminée juste avant le nettoyage de la boucle (filtre légèrement encrassé). Ce résultat s'explique par le fait que l'évolution du courant est liée à l'augmentation de la tension appliquée mais également à l'évolution du régime de décharge au cours du temps (développement du halo bleuté sur l'électrode de collecte), comme étudiée dans le chapitre précédent.

Par contre, les rendements de filtration ne sont pas sensibles à l'état d'encrassement de la boucle à partir du moment où la durée n'excède pas les trois heures (limitation des back corona).

Par conséquent, dans toute cette étude sur des temps de fonctionnement dits courts, il ne sera pas possible d'associer des évolutions de courant aux courbes d'évolution de

rendement. Nous ne pourrions donc pas tirer de conclusion chiffrée en termes de puissance moyenne consommée.

II-1-b) Etude sous tension pulsée seule

L'influence de la tension pulsée seule sur le rendement de filtration est maintenant à l'étude. L'objectif est de comparer l'utilisation d'une tension continue par rapport à une tension pulsée cadencée à 1 kHz. Cette fréquence de 1 kHz correspond à la fréquence maximale de fonctionnement de notre commutateur à thyristors.

Les rendements obtenus sont donnés sur la Figure 103. Pour une tension appliquée de $-7,5 \text{ kV}_p$, la filtration est de l'ordre de 35 %, ce qui est faible et très proche du rendement mécanique. Il faut appliquer une tension d'au moins -10 kV_p pour mesurer un rendement supérieur à 90 %. A partir de -15 kV_p , un rendement optimum de 99,9 % est atteint.

La filtration est naturellement meilleure à $-7,5 \text{ kV}_{DC}$ que sous tension pulsée seule, bien que, dans ces deux situations, le rendement ne soit pas maximal.

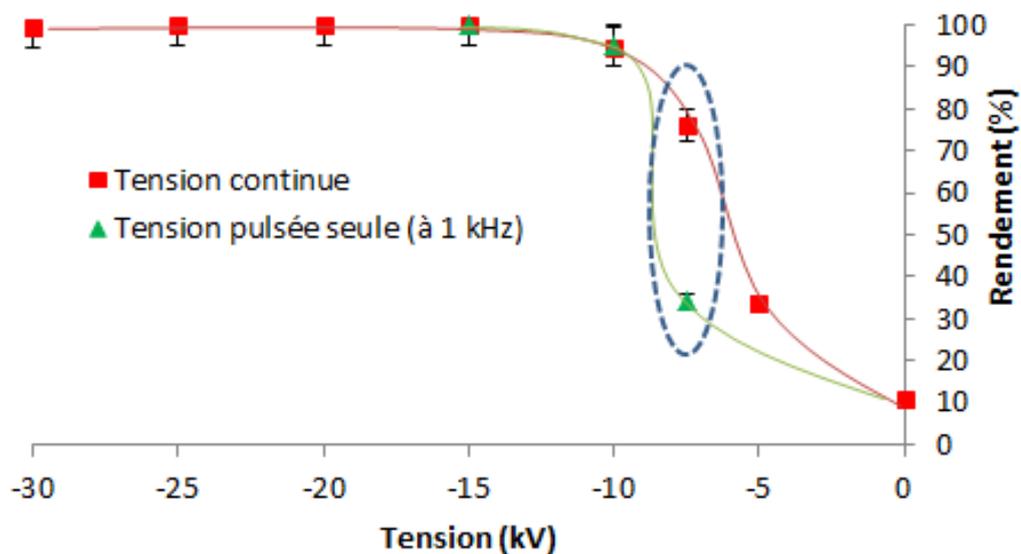


Figure 103 : Evolution du rendement de filtration sous tension pulsée seule et continue

Cette étude montre que, dans la nouvelle géométrie utilisée, une tension pulsée relativement « faible » de -15 kV_p permet d'atteindre des rendements optimaux. Ce résultat, couplé à ceux obtenus sous tension continue, va nous conduire à utiliser des

tensions combinées dont les amplitudes des composantes continues et pulsées seront inévitablement peu élevées.

II-1-c) Etude sous tension combinée

II-1-c-(i) Comparaison de rendement

En fonction des résultats précédents et afin de ne pas multiplier les essais, trois couples de tension combinée sont retenus :

$$-5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -5 \text{ kV}_p, -7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p \text{ et } -10 \text{ kV}_{\text{DC}} / -10 \text{ kV}_p.$$

Les résultats de rendements obtenus dans ces configurations (Tableau 13) confirment qu'ajouter une tension pulsée à un fond continu est efficace pour améliorer la filtration électrostatique. Tout en travaillant avec des niveaux faibles de tension continue, il est possible d'obtenir une filtration optimale. Par exemple, le rendement passe d'un peu plus de 30 % à 98 % en additionnant seulement -5 kV_p (à 1 kHz) à un fond continu de $-5 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

Alors que pris indépendamment $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ et $-7,5 \text{ kV}_p$ (à 1 kHz) ne permettent pas d'obtenir une bonne filtration, le couple $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ à 1 kHz offre un très bon rendement ($\eta = 99,9 \%$). Ce couple de tension sera par la suite privilégié car il permet d'obtenir un rendement optimum à courant injecté minimum. En effet, il est clair que le courant moyen délivré par l'alimentation est inférieur dans la configuration $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ ($I = 0,38 \text{ mA}$) que dans celle à $-10 \text{ kV}_{\text{DC}} / -10 \text{ kV}_p$ pour une fréquence de 1 kHz ($I = 0,93 \text{ mA}$).

Par ailleurs, notons que la tension combinée $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ à 1 kHz offre un meilleur rendement que sa tension moyenne équivalente qui est de -10 kV . Il en est de même pour $-5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -5 \text{ kV}_p$ à 1 kHz dont la tension moyenne est de $-6,4 \text{ kV}$, qui présente un meilleur rendement que $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

Tableau 13 : Efficacité de filtration pour divers couple de tension combinée

$U_{DC} / U_{pulsée} - f = 1 \text{ kHz}$	Rendement (en %)
-5 kV _{DC} / 0 kV _p	33,7
-5 kV _{DC} / -5 kV _p	98,8
-7,5 kV _{DC} / 0 kV _p	75,9
-7,5 kV _{DC} / -7,5 kV _p	99,9
-10 kV _{DC} / 0 kV _p	97,1
-10 kV _{DC} / -10 kV _p	99,9

II-1-c-(ii) Influence du taux d'injection

Les analyses antérieures [98] menées sur ce même électrofiltre ont montré que le débit avait peu d'influence sur le courant libéré, donc sur la filtration, au contraire de la température. Cependant aucune étude n'avait été menée sur l'influence du taux d'injection.

Jusqu'à présent, les essais étaient conduits pour un taux d'injection de 2.10^6 à 4.10^6 particules/litre. La Figure 104 illustre l'évolution du rendement de filtration pour différents taux d'injection lorsque l'électrofiltre est alimenté sous tension combinée de -7,5 kV_{DC} / -7,5 kV_p (à 1 kHz). Aucune influence du taux d'injection (de 2.10^4 à 4.10^6 particules/litre) sur le rendement de filtration n'est observée. Rappelons que l'effluent gazeux issu des procédés de traitement de déchets aura un taux de particules/litre supérieur à 2.10^4 particules/litre.

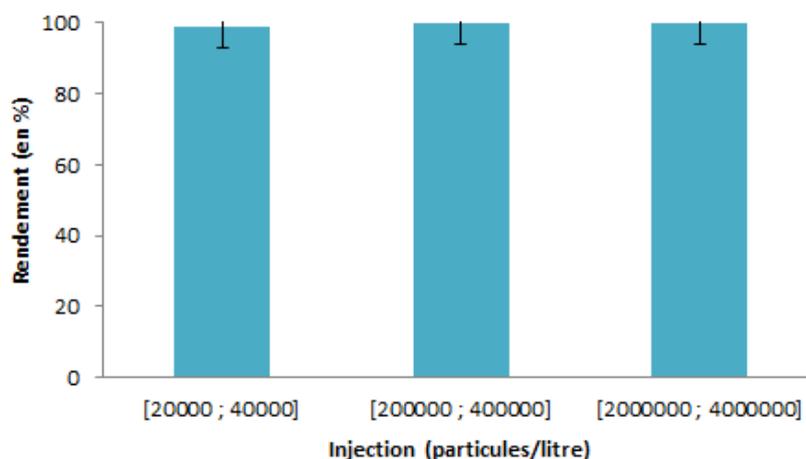


Figure 104 : Injection de particules dans le filtre

II-1-c-(iii) Influence de la fréquence des impulsions

Pour les trois couples de tension combinée utilisés, l'influence de la fréquence des impulsions sur le rendement de filtration est présentée sur la Figure 105. Bien évidemment, plus la fréquence de répétition est élevée, plus le rendement tend vers son optimum. Il apparaît également qu'une fréquence de 100 Hz suffit au couple $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ pour obtenir le rendement optimum. D'un point de vue énergétique cela est préférable, puisque la puissance moyenne consommée sera beaucoup plus faible.

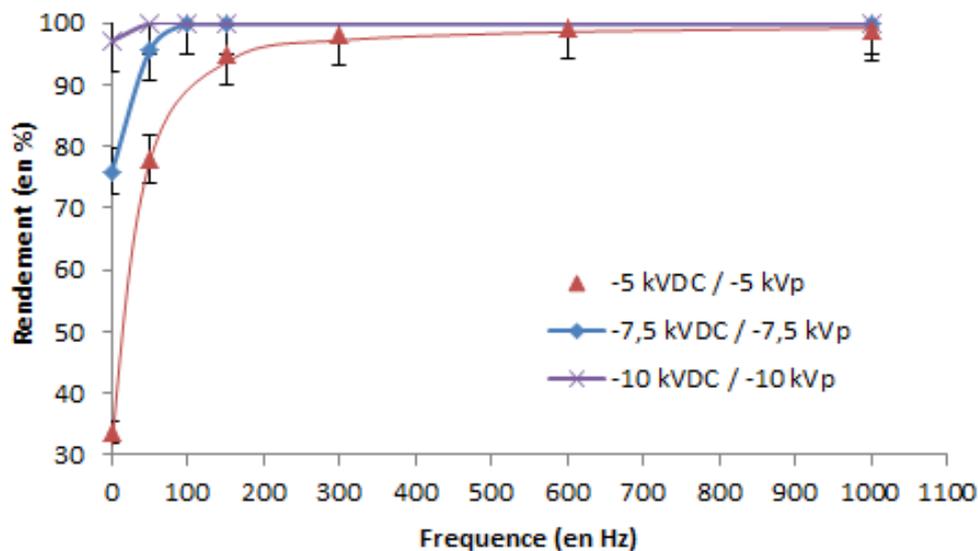


Figure 105 : Variation du rendement en fonction de la fréquence

Ces études menées sur des temps de fonctionnement courts ont permis d'identifier un couple de tension combinée ($-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ cadencé à 100 Hz) qui offre un fonctionnement optimal avec la Solectrode à courant consommé minimum. Rappelons que l'intérêt de minimiser le courant injecté dans le dispositif est double : il retarde l'instant de développement des back corona et réduit le coût de l'alimentation combinée (puissance nécessaire inférieure).

II-2) Influence des poussières sur l'efficacité de l'électrofiltre

II-2-a) Sous tension continue

Les résultats de filtration obtenus sous tension continue pour les quatre poussières utilisées (cf. chapitre 2) sont comparés et retranscrits dans le graphique de la Figure 106. Pour toutes les poussières traitées, l'électrofiltration fonctionne insuffisamment en dessous de $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ et pas du tout en dessous de $-5 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (filtration mécanique).

Des rendements similaires sont obtenus pour les poussières IRIS et V5, avec des taux de filtration d'environ 50 % à $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$, ce qui est logique puisqu'elles présentent des propriétés électriques comparables (cf. chapitre 2). En revanche, avec les poussières SHIVA et SIKRON des rendements de filtration différents sont obtenus. La poussière SIKRON permet d'obtenir le meilleur rendement de filtration ($\eta = 76 \%$) à $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}}$, alors que la poussière SHIVA donne un rendement plus faible de 35 % assimilable à de la filtration mécanique. L'étude met donc en évidence l'influence de la résistivité sur l'efficacité de filtration (Figure 106). SIKRON est la plus résistive ($\rho = 1,8 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) et présente le meilleur rendement, par opposition à SHIVA qui est une poussière plus conductrice ($\rho = 4,7 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$) et dont le taux de filtration est faible.

Des recherches antérieures montrent que la résistivité influe sur la dérive des poussières [10]. D'autres travaux [31], [38], [110] indiquent également, que la très faible résistivité des particules va entraîner une diminution des forces d'attraction sur l'électrode de collecte et une baisse de la cohésion des particules après dépôt. La décharge rapide et le ré-entraînement des poussières vont engendrer une chute de rendement.

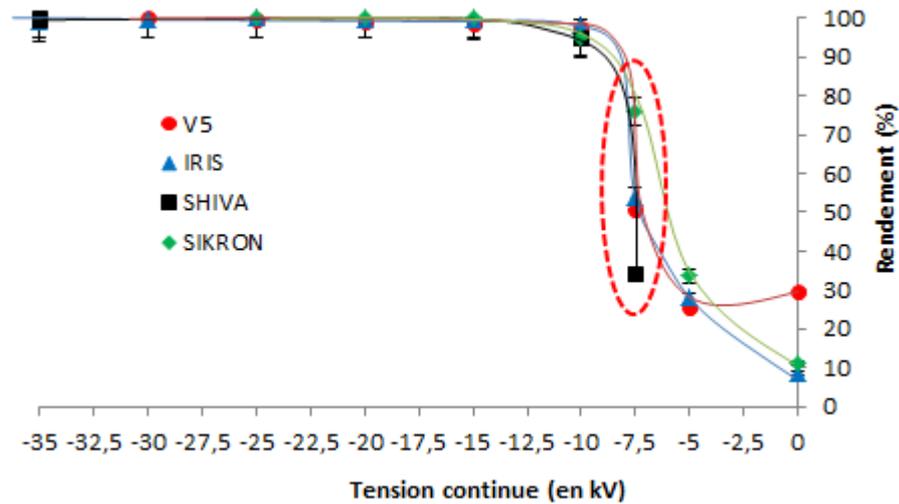


Figure 106 : Evolution du rendement de filtration pour différentes poussières sous tension continue

Il ressort de ces expériences, que lorsque le rendement n'est pas de 100 %, il est possible d'observer l'effet de la résistivité des poussières sur l'efficacité de filtration. Néanmoins, la Solectrode développée permet d'atteindre une efficacité de filtration optimale pour toutes les poussières traitées. Il suffit pour cela de compenser les écarts de rendement constatés entre les différentes poussières en augmentant la tension continue appliquée. Une tension continue d'au moins $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$ est nécessaire pour obtenir une filtration de 100 % pour toutes les poussières étudiées.

II-2-b) Sous tension combinée

Le Tableau 14 regroupe les résultats de filtration pour ces mêmes poussières, mais cette fois-ci sous tension combinée à la fréquence de 1 kHz.

Comme indiqué précédemment, les quantités de poussières fournies par le CEA sont limitées. L'étude sous tension combinée n'a pas pu être réalisée avec la poussière SHIVA. De plus, les poussières IRIS et V5 étant similaires (cf. chapitre 2), des résultats identiques ont également été obtenus sous tension combinée. Ainsi, dans un souci de clarté, les valeurs obtenues avec la poussière IRIS sous tension combinée ne sont pas retranscrites, mais donnés en (Annexe H). N'est finalement présentée ici qu'une comparaison entre les poussières V5 et SIKRON.

Le constat est que l'utilisation de tensions combinées est aussi performante sur la poussière V5 que sur la poussière SIKRON. L'ajout d'impulsion de -5 kV_p à 1 kHz permet d'accroître nettement le rendement. Toutefois, un léger écart entre la poussière V5 et SIKRON est obtenu pour les faibles tensions. Cette différence est liée, comme vu précédemment, à l'écart de résistivité entre la poussière SIKRON et V5.

Tableau 14 : Efficacité de filtration pour différents couples de tension à la fréquence de 1 kHz pour les poussières V5 et SIKRON

$U_{DC} / U_{pulsée}$	V ₅ Rendement (en %)	SIKRON Rendement (en %)
$-5 \text{ kV}_{DC} / 0 \text{ kV}_p$	25,8	33,7
$-5 \text{ kV}_{DC} / -5 \text{ kV}_p$	95,4	98,8
$-5 \text{ kV}_{DC} / -7,5 \text{ kV}_p$	99,5	NR*
$-7,5 \text{ kV}_{DC} / 0 \text{ kV}_p$	50,5	75,9
$-7,5 \text{ kV}_{DC} / -5 \text{ kV}_p$	99,5	NR*
$-7,5 \text{ kV}_{DC} / -7,5 \text{ kV}_p$	99,7	99,9
$-7,5 \text{ kV}_{DC} / -10 \text{ kV}_p$	99,8	NR*
$-10 \text{ kV}_{DC} / 0 \text{ kV}_p$	NR*	97,1
$-10 \text{ kV}_{DC} / -10 \text{ kV}_p$	NR*	99,9

*NR : non réalisé

Une étude en fréquence est conduite (Figure 107), pour le couple de tension combinée $-5 \text{ kV}_{DC} / -5 \text{ kV}_p$, afin de visualiser l'impact de ce paramètre. La croissance du rendement est plus rapide avec la poussière SIKRON, qu'avec la poussière V5. À 50 Hz , un rendement plutôt mécanique est obtenu avec V5 ($\eta = 25 \%$), alors qu'avec SIKRON, la filtration est déjà de 78% . Il faut atteindre une fréquence de 300 Hz pour que le taux d'efficacité avec les particules V5 égale celui obtenu à 50 Hz avec SIKRON.

Cette différence dans l'évolution de la filtration s'explique encore par la différence de résistivité existante entre les poussières V5 et SIKRON.

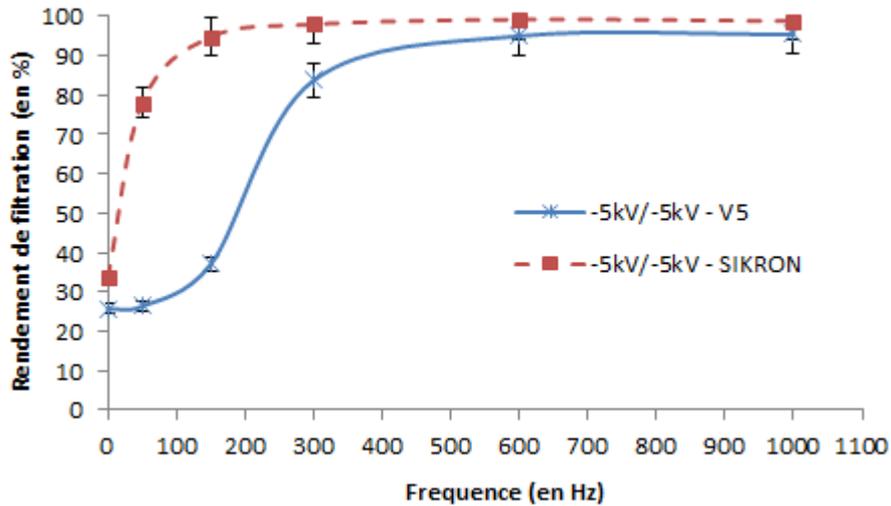


Figure 107 : Evolution du rendement de filtration en fonction de la fréquence de pulsation

Pour la poussière V5, nous pourrions nous poser la question de savoir si l'augmentation de la fréquence de fonctionnement de notre commutateur au-delà de 1 kHz aurait permis d'atteindre un rendement de 100 %. Il ne nous a pas été possible de le vérifier expérimentalement.

II-3) Analyses des dépôts de poussières

Des clichés photographiques des dépôts de poussières sur les électrodes de collecte et émissive obtenus après filtration sous tension continue et sous tension combinée sont analysés.

Lors de l'étude précédente [98], il a été montré que la superficie du dépôt dépend essentiellement de la distance inter-électrodes et du sens du flux. Dans notre configuration géométrique, la distance inter-électrodes ne varie pas et vaut 7 cm. Un dépôt de poussières est obtenu sous tension continue sur les électrodes de collecte et émissive. Le dépôt est similaire pour les poussières IRIS, V5 ou encore SIKRON et présente deux caractéristiques principales (Figure 108 - a) :

- une partie fortement adhérente de forme elliptique, qui va s'épaissir au cours du temps et qui correspond au dépôt principal (1ère couche de poussières),
- et un dépôt plus léger faiblement lié à la paroi qui s'élimine facilement (mouvement d'air, nettoyage léger).

Le dépôt principal de forme elliptique (Figure 108 - b) correspond à des zones de collecte bien distinctes les unes des autres situées en face de chaque pointe. Il peut être attribué selon Jedrusik [31] à la distribution du courant local, au vent électronique ou selon Thanh [68] à la répartition des lignes de champ.

En revanche, avec la poussière SHIVA, des différences au niveau de la partie basse du filtre (entrée de l'effluent gazeux) sont observées. Le dépôt de poussières est moins uniforme et régulier, bien qu'un dépôt principal de forme elliptique soit toujours présent. Ce dernier est cependant moins homogène dans la partie basse et le dépôt léger est moins présent (Figure 108 - c). Après un nettoyage de la couche fine sur la partie haute du filtre (comme réalisé précédemment), aucun dépôt ne reste. Il n'y a pas de trace résiduelle de la première couche (Figure 108 - d). Il semble que cette poussière soit plus volatile et moins adhérente sur les parois et ce tout le long du filtre.

Trois hypothèses peuvent expliquer les résultats constatés, quant à l'obtention d'un dépôt irrégulier dans la partie inférieure du filtre.

La première concerne la présence du coude d'entrée de l'effluent gazeux, qui génère un écoulement turbulent, susceptible de perturber et ré-entraîner les poussières très volatiles collectées.

La seconde hypothèse est liée aux propriétés électriques de la poussière. La poussière étant conductrice, il faut un temps plus long pour la charger et la collecter. De ce fait, la poussière ne s'étant pas chargée sur le premier tronçon du cylindre, elle ne pourra être collectée qu'une fois chargée dans le second tronçon du filtre.

La troisième hypothèse est aussi liée, aux propriétés électriques de la poussière. A cause de sa faible résistivité, il y aura un écoulement rapide des charges dans la couche de dépôt, qui va donc se décharger. Les poussières vont être ré-entraînées suite à une diminution des forces d'adhésion [38], [111].

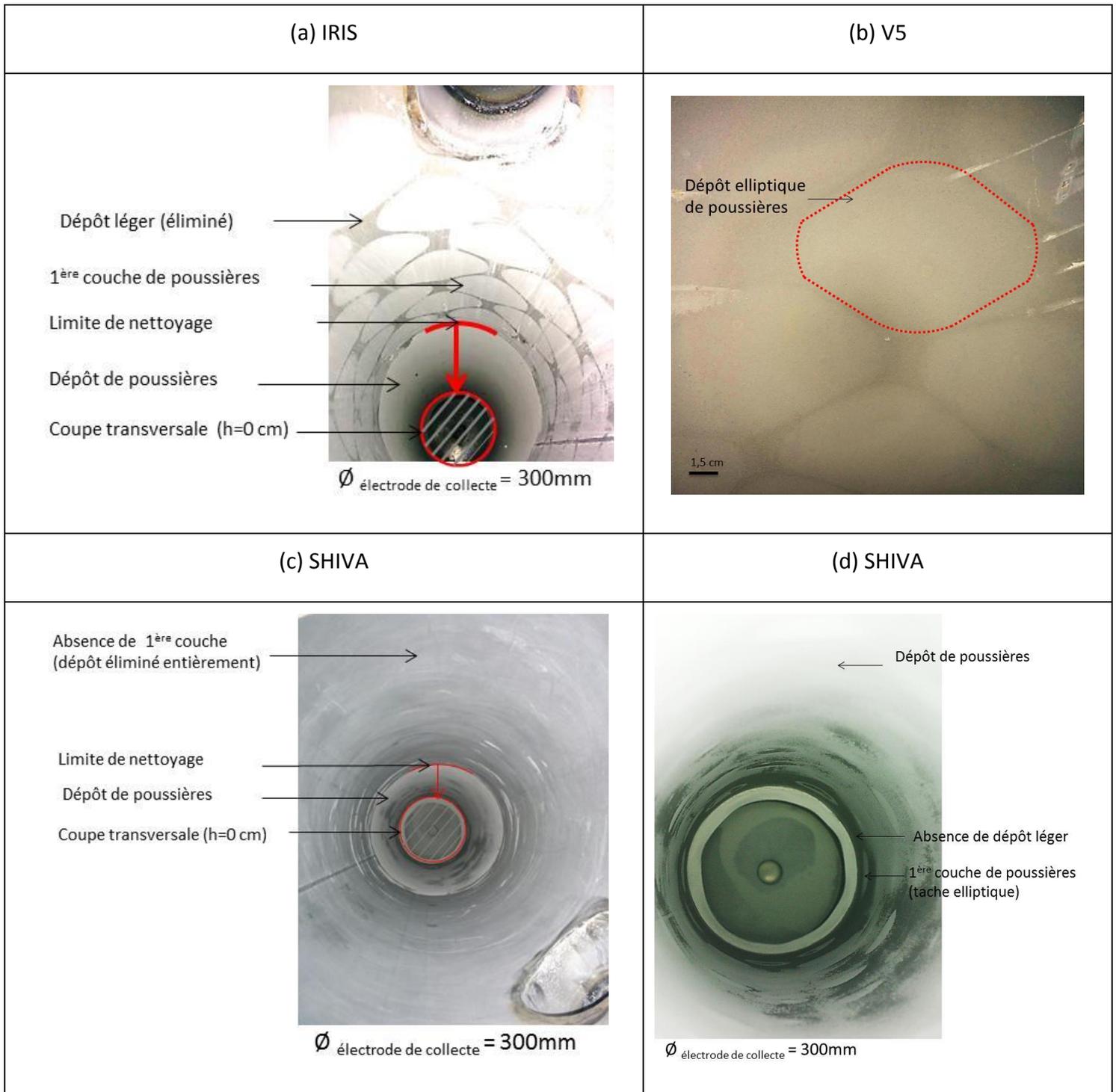


Figure 108 : Dépôt de poussières sur l'électrode de collecte sous tension continue

Ainsi, le dépôt de poussières dépend de la nature des poussières traitées, bien que la forme générale de la tache de dépôt ne soit pas influencée.

Dans le chapitre précédent, il a été montré, lors de l'étude pointe / plan, que des poussières étaient également récupérées par l'électrode émettrice. La Figure 109 confirme

ce résultat, quelle que soit la poussière filtrée, mais ce dépôt diffère entre une alimentation sous tension continue et sous tension pulsée.

Sous tension continue, le dépôt est présent tout le long de l'électrode, il est plus dense sur la partie inférieure de l'électrode émissive (zone d'entrée de l'effluent gazeux). En revanche, avec la poussière SHIVA, (Figure 109 - c), la couche est plus fine et plus légère qu'avec les autres poussières.

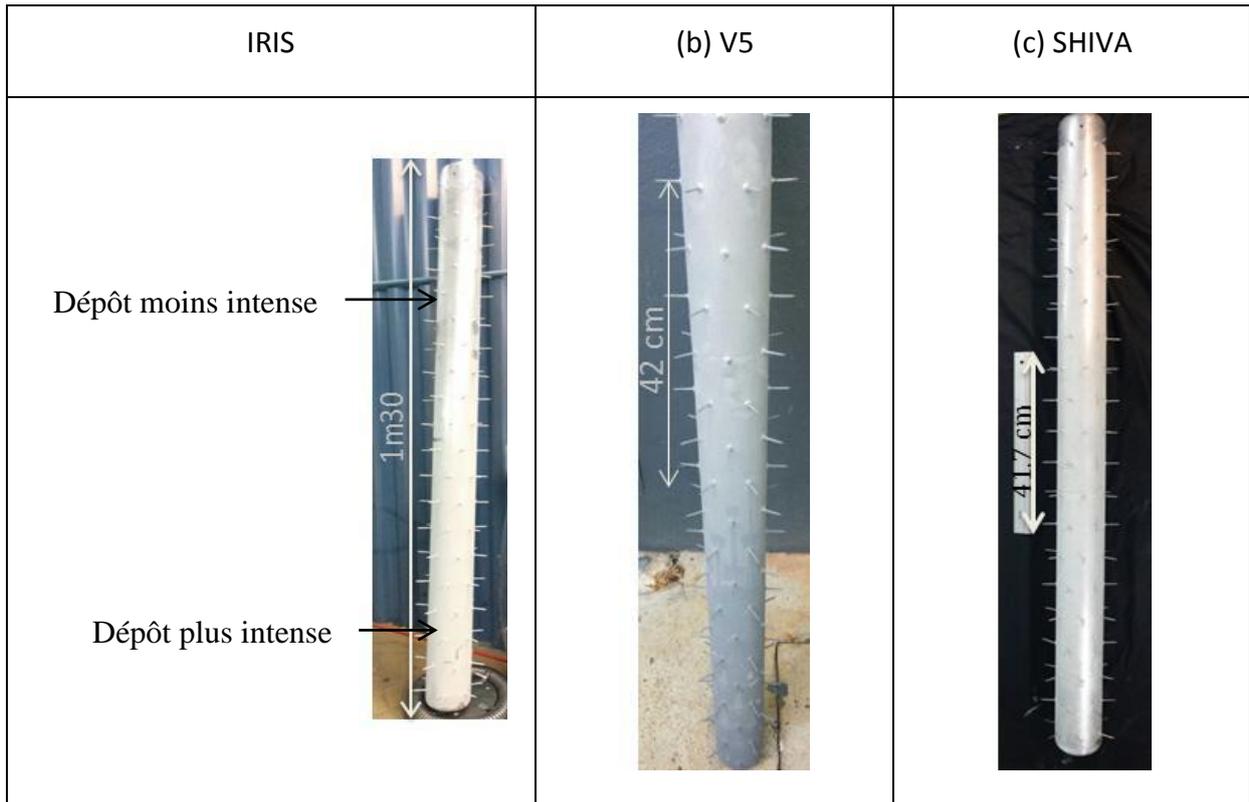


Figure 109 : Dépôt de poussières récupérées sur l'électrode émettrice sous tension continue

Sous tension combinée, l'analyse des clichés photographiques montrent des différences quant à la répartition des dépôts de poussières. L'électrode émissive n'est pas encrassée sur toute sa longueur, comme sous tension continue, mais uniquement sur sa partie inférieure, à la section correspondant à l'entrée du filtre (Figure 110). Ce phénomène ne peut être attribué qu'à la tension appliquée, puisqu'il s'agit du seul paramètre modifié. Le dépôt majoritaire sur le tiers inférieur de l'électrode tend à prouver qu'il y a suffisamment de charges générées sur une pointe pour charger jusqu'à saturation les poussières et les collecter. Le fonctionnement de l'électrofiltre est optimal sur sa partie inférieure et il semble y avoir une action par tronçon de l'électrofiltre sous tension combinée. Si cette observation

se confirme, cela permettrait d'accroître le temps de traitement du filtre, en concevant un électrofiltre fonctionnant par secteur.



Figure 110 : Dépôt de poussières sur l'électrode émettrice

L'étude suivante réalisée pour des temps de fonctionnement long va permettre de vérifier cette hypothèse.

III) Fonctionnement sur un temps long

L'étude du fonctionnement sur un temps long consiste à mesurer, toutes les minutes, le rendement de filtration et le courant moyen en débutant l'expérience avec l'électrofiltre propre et en la terminant lorsque l'efficacité de filtration a chuté de manière significative. Deux différences essentielles existent entre cette étude et la précédente :

- la durée moyenne d'une expérience est d'une dizaine d'heures. Le contrôle du taux d'injection et l'enregistrement des données s'effectuent manuellement et de façon continue pendant toute la durée de l'essai,
- les conditions initiales relatives à l'état d'encrassement du filtre sont rigoureusement identiques entre les différents essais. Par conséquent, les évolutions temporelles des courants moyens pourront être comparées.

Le fonctionnement de l'électrofiltre sur des temps longs permet une évolution complète des différents régimes de décharge, avec des passages dans les différentes zones identifiées dans l'étude pointe / plan du chapitre précédent. Il y aura donc apparition et développement des back corona (avec SIKRON). La colonne positive va pouvoir s'installer et le régime de saturation sera atteint contrairement au fonctionnement sur des temps courts. Ce régime de fonctionnement occasionnera inévitablement une chute du rendement au bout d'un certain temps de filtration. Il faudra identifier cette durée et essayer de la prolonger en influant sur les paramètres électriques. Le but est d'obtenir un fonctionnement optimum de l'électrofiltre, à la fois en termes de rendement de filtration et de durée de fonctionnement.

Notons qu'en raison des quantités de poussières nécessaires, seule la poussière SIKRON sera utilisée pour cette étude.

III-1) Etude préalable

Pour des raisons de sécurité et de contrôle du taux d'injection, il est impossible de laisser la boucle en fonctionnement sur une longue période sans surveillance. Une étude préalable est donc conduite sous tension continue, afin de vérifier si un arrêt de l'expérimentation a une influence sur l'évolution du rendement et du courant au cours du temps.

L'expérience a été menée pour une tension de $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$ durant 8 heures de fonctionnement (jour J), suivie d'un arrêt du pilote et de l'alimentation pendant 10 heures, puis une reprise de l'expérience (jour J+1). La Figure 111 illustre les résultats obtenus. Nous pouvons observer qu'un arrêt « longue durée » d'une expérience influe sur les mesures réalisées à la reprise. Alors que le rendement de filtration avait largement chuté à la fin du jour J, la valeur mesurée est remontée à son maximum de 100 % lors de la reprise de l'essai le jour J+1. Notons toutefois que la durée de fonctionnement à rendement optimum est très courte le jour J+1. En ce qui concerne l'évolution du courant, elle est beaucoup plus rapide le jour J+1 bien que la valeur de départ soit proche de celle du Jour J.

Ces observations peuvent s'expliquer par le fait qu'en arrêtant l'essai, les charges présentes sur les dépôts de poussières vont s'écouler et annuler la différence de potentiel créée en surface de l'électrode de collecte. Ainsi, les conditions initiales du jour J+1 ne correspondent plus aux conditions finales du jour J. Il faut un certain temps de fonctionnement pour recharger la couche de dépôt afin de recréer les conditions de développement des back corona et de la colonne positive. Par contre, comme la couche de dépôt est déjà formée, l'enchaînement des régimes de décharge est beaucoup plus rapide. Le fait que la valeur du courant initial soit proche les deux jours confirme qu'il s'agit bien du courant de Trichel non modifié par une activité électrique au plan.

Par conséquent, il ne sera pas possible d'interrompre une expérience. Tous les essais présentés par la suite auront donc été réalisés de façon continue et sans aucune interruption.

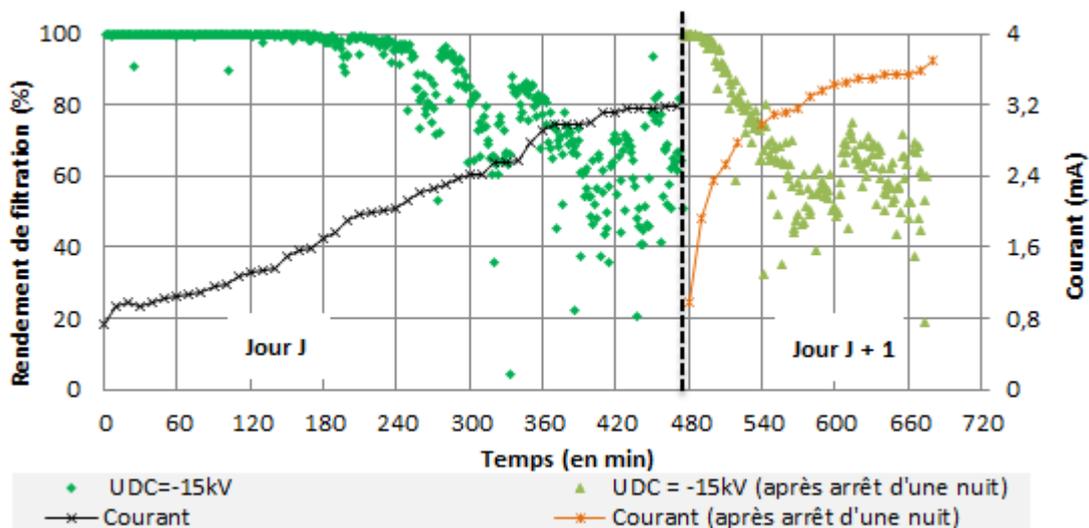


Figure 111 : Fonctionnement du pilote sur 2 jours, avec arrêt durant la nuit

Par ailleurs, bien que le courant augmente à la fois de façon linéaire et par paliers, son évolution temporelle (Figure 111) est assez différente de celle enregistrée lors de l'étude d'une unique pointe / plan. Dans le cas de notre électrode à pointes multiples, il est remarquable de noter que le courant croît aussi bien lorsque le rendement est constant que lorsqu'il chute. Cela peut s'expliquer en considérant que l'enchaînement des différents régimes de décharges étudiées au chapitre précédent ne s'opère pas simultanément sur l'ensemble des sites émissifs. Il est très probable que les passages dans les zones 1, 2, 3 et 4

se fassent progressivement, en commençant par les pointes localisées en entrée de l'électrofiltre. L'extension spatio-temporelle de la surface du dépôt et de l'activité électrique qui s'y développe expliquerait que le courant puisse augmenter à rendement de filtration constant. L'hypothèse de l'expansion progressive du dépôt, depuis l'entrée vers la sortie, est bien corroborée par l'analyse des dépôts de poussières sur les électrodes présentées dans la section précédente.

Au bout d'un certain temps, nous pouvons supposer que les premiers sites émissifs (étages d'entrée) deviennent inopérants (saturation en zone 4), alors que les régimes de décharges des étages supérieurs continuent d'évoluer et de filtrer de façon efficace. Le courant associé à la section d'entrée du filtre commence à saturer (zone 4), mais le courant continue d'augmenter sur les autres pointes. Tout se passe donc comme si la longueur d'efficacité de l'électrofiltre raccourcissait progressivement, bien que le courant moyen continue d'augmenter. Le rendement de filtration commence à diminuer dès que la longueur active de l'électrode devient insuffisante en regard des conditions expérimentales (tension appliquée, distance inter-électrodes, vitesse d'écoulement).

Nous noterons, tout de même, un effet de saturation du courant en toute fin d'essais (entre 420 et 480 minutes de fonctionnement du jour J) qui correspondrait à un électrofiltre dans lequel des colonnes positives se seraient développées entre quasiment toutes les pointes et le cylindre. Le dispositif devient alors inopérant sur toute sa longueur et le rendement tend vers un rendement mécanique.

Pour terminer l'analyse de la Figure 111, il est intéressant d'observer que la chute du rendement de filtration se fait de façon quasi-continue, entrecoupée par des reprises de filtration. Pour expliquer ce phénomène, il faut se référer aux travaux de Thanh [68]. Le potentiel de surface sur le dépôt de poussières peut localement diminuer sous l'effet des premières back corona, ce qui peut occasionner une perte locale de charges au niveau de la couche de poussières. Il faudrait ensuite un certain temps pour « recharger » la couche supérieure du dépôt ; temps pendant lequel une section préalablement inactive de l'électrofiltre pourrait redevenir opérationnelle en termes de filtration. Le rendement augmente soudainement puis rechute progressivement. Au cours du temps, le nombre de

sites, autour desquels ces phénomènes se développent, tend à diminuer, expliquant ainsi que la reprise du rendement s'opère de moins en moins bien.

III-2) Influence de la granulométrie

Nous avons déjà montré que, pour un rendement de filtration constant associé à un fonctionnement sur des temps courts, l'efficacité de filtration reste la même quelle que soit la granulométrie des particules de la poussière considérée (Figure 101). Qu'en est-il lorsque le rendement chute (temps de fonctionnement long) ?

Reprenons les résultats précédents obtenus sous $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$ en différenciant l'évolution du rendement en fonction de la granulométrie (Figure 112). La poussière SIKRON est ainsi répartie en trois catégories de taille :

- inférieure à $1 \mu\text{m}$
- comprise entre $1 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$
- supérieure à $10 \mu\text{m}$.

Cette fois, il semble bien que les différentes chutes du rendement impactent préférentiellement les poussières fines (taille inférieure à $1 \mu\text{m}$). Par exemple, la première légère diminution du rendement enregistrée un peu après 180 minutes de fonctionnement (Figure 111) ne concerne quasiment que les poussières submicroniques (Figure 112). Nous retrouvons ensuite les chutes successives par blocs qui s'appliquent tout particulièrement aux poussières submicroniques, puis à celles dont la taille est comprise entre 1 et $10 \mu\text{m}$. Les tracés des courbes de tendance confirment l'écart de rendement de filtration entre les trois catégories de tailles. Notons que les « grosses » poussières sont correctement filtrées quasiment jusqu'au bout de l'expérience. De plus, la dispersion des mesures vis-à-vis de la courbe de tendance est d'autant plus marquée que les particules sont fines. Il est donc possible de conclure que la chute du rendement de filtration, liée au développement massif de back corona, impacte les particules selon leur taille et préférentiellement les poussières submicroniques.

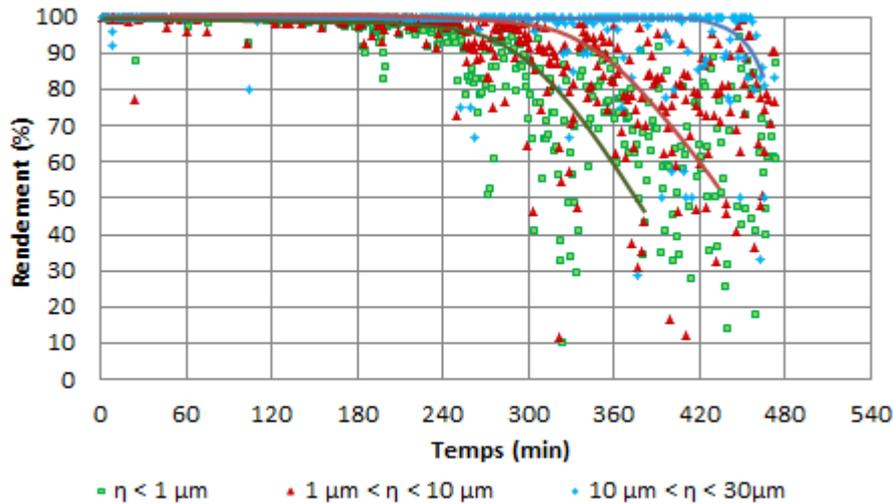


Figure 112 : Rendement en fonction de la granulométrie pour $U = -15 \text{ kV}_{DC}$

Ce résultat a déjà été mis en évidence par Chang et Bai [38], [50], [79], [109] puisqu'ils ont montré que l'efficacité de filtration pour les petites particules chute significativement avec l'accroissement des back corona. Ils suggèrent que cette baisse d'efficacité est due au fait que la charge et la migration des petites particules sont plus sensibles aux effets des « contre-ions » des back corona que les grosses particules. Cela a été confirmé par une simulation illustrant le taux d'efficacité en fonction du degré de back corona. Cette analyse confirme que plus le degré de back corona augmente, plus l'efficacité diminue, surtout pour les petites particules.

III-3) Influence de la valeur de la tension continue

Nous savons que le niveau de tension continue appliqué influe sur la vitesse d'enchaînement des différents régimes de décharge. La phénoménologie étant accélérée, une chute de rendement plus rapide devrait être obtenue pour des tensions continues élevées.

La Figure 113, sur laquelle est tracée l'évolution temporelle du rendement pour deux tensions continues de -15 kV_{DC} et -10 kV_{DC} , confirme ce résultat. Plus la tension appliquée est élevée, plus le temps de fonctionnement du filtre est réduit. À -10 kV_{DC} , la tension appliquée n'est pas suffisante pour obtenir un rendement optimal du filtre, mais l'électrofiltre fonctionne de manière constante durant plus de 5 heures. En revanche, avec la tension

continue de $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$, un rendement optimal est atteint, mais l'efficacité de traitement chute au bout de 3 heures.

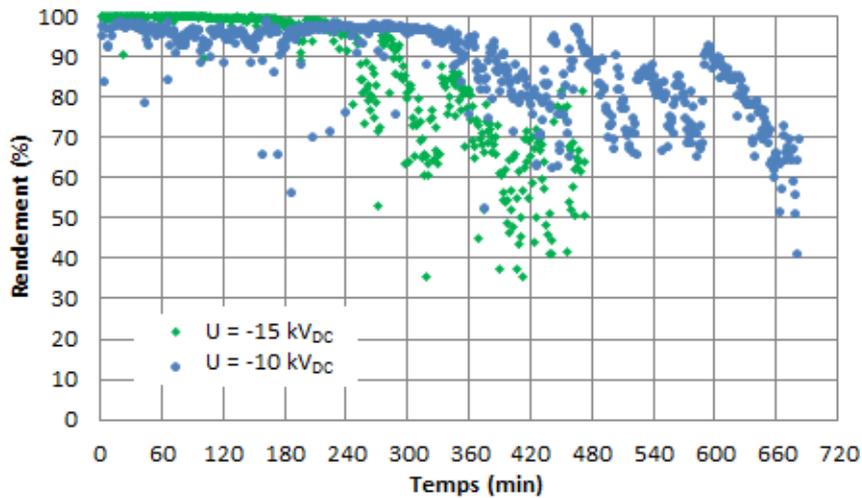


Figure 113 : Evolution du rendement de filtration sous tension continue

La chute par intermittence du rendement de filtration est, une nouvelle fois, clairement observable sur la courbe correspondant à la tension de $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$.

Notons que des problèmes expérimentaux n'ont pas permis de relever le courant moyen lors de l'essai mené sous $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$. L'évolution temporelle du courant ne pourra donc pas être présentée

III-4) Tension continue versus tension combinée

Dans le chapitre 3, la phénoménologie de la décharge sous tension combinée a été comparée à celle obtenue pour deux niveaux de tension continue : sa tension moyenne et sa valeur crête maximale. Il a été prouvé que l'utilisation d'une tension combinée retarde l'apparition de back corona par rapport aux deux tensions continues. Dans cette section, la même étude est réalisée afin de comparer l'évolution dans le temps des rendements.

Les essais sont menés avec la tension combinée de $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ à 1 kHz précédemment identifiée. Les résultats de filtration sont donc comparés (Figure 114) à ceux issus des deux tensions continues de $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (tension moyenne correspondante) et de $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$ (tension crête).

La durée de fonctionnement de l'électrofiltre à filtration optimum est clairement plus longue en utilisant la tension combinée que la tension continue, puisque le rendement est maintenu à 100 % pendant plus de 9 heures. Notons toutefois un « accident » inexplicable survenu autour de 330 minutes de fonctionnement.

Une comparaison entre les courants indique que, sous tension continue, la croissance est plus rapide que sous tension combinée. Le courant de Trichel de départ à $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$ est logiquement plus élevé que sous tension combinée en raison du niveau de tension continue utilisé. Cet écart de courant permet de comprendre et d'expliquer la différence de durée optimale de fonctionnement. En effet, dans les deux situations, suffisamment de charges sont créées pour permettre la charge des poussières et leur collecte, mais le surplus de charges formé sous tension continue va favoriser le développement des back corona et donc la chute du rendement. En revanche la tension de $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$ ne permet pas d'atteindre un rendement optimum. Nous retrouvons le même résultat déjà mis en évidence sur temps courts : alors que la tension continue de $-10 \text{ kV}_{\text{DC}}$ ne permet pas d'atteindre un rendement optimum, la tension combinée $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ à 1 kHz (de valeur moyenne équivalente) offre une efficacité de filtration maximale.

Ce résultat confirme sur un électrofiltre de taille industrielle ce que nous avons mis en évidence sur un dispositif pointe / plan : l'utilisation de puissances pulsées retarde le développement massif de back corona.

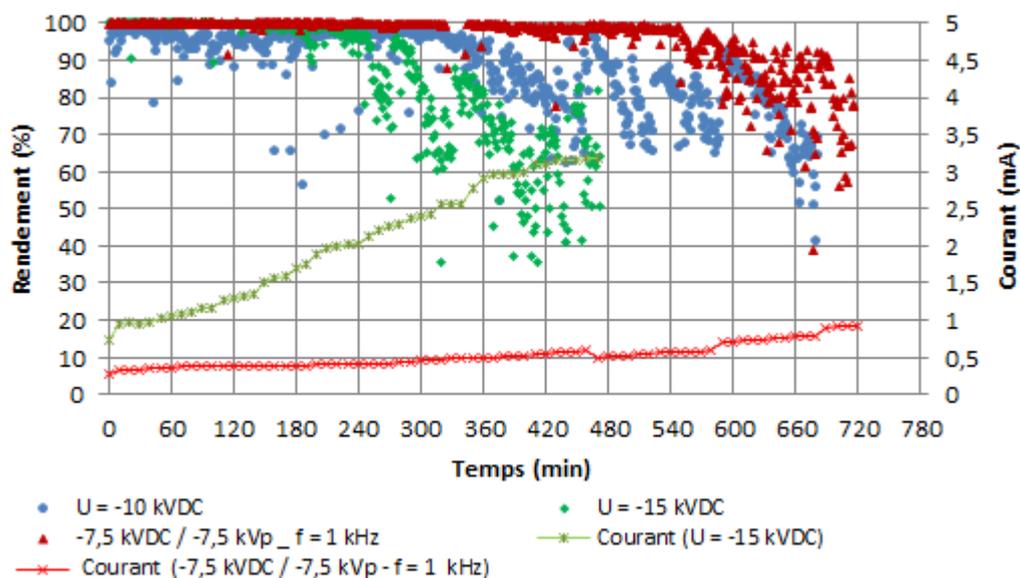


Figure 114 : Comparaison de l'évolution du rendement sous tension combinée et tension continue

Par ailleurs, contrairement au fonctionnement sous tension continue, il ne semble pas y avoir, sous tension combinée, de chute par blocs des rendements entrecoupés par des reprises de la filtration. Au bout des 9 heures de fonctionnement, dès lors que le rendement commence à chuter, les mesures présentent une dispersion importante mais ne permettent pas de distinguer des séquences de reprises de l'efficacité de filtration.

Ce résultat est confirmé par un autre essai d'endurance réalisé sous tension combinée de $-15 \text{ kV}_{\text{DC}} / -15 \text{ kV}_{\text{p}}$ à 1 kHz (Figure 115). Dès lors que le rendement commence à diminuer ($t = 150 \text{ min}$), une instabilité s'instaure dans les mesures sans véritable chute régulière. Il n'y aurait donc pas, ou bien de façon moins marquée, de séquences de déchargement puis rechargement du dépôt de poussières sur l'électrode de collecte sous tension combinée. Le développement et l'entretien de back corona sont probablement perturbés par l'application de niveaux relativement faibles de tensions générées par l'alimentation combinée.

Bien que le courant libéré soit plus élevé pour $-15 \text{ kV}_{\text{DC}} / -15 \text{ kV}_{\text{p}}$ à 1 kHz que pour $-15 \text{ kV}_{\text{DC}}$, l'ajout d'une tension pulsée évite une chute brutale du rendement par bloc et maintient un rendement de plus de 80 % pendant une plus longue durée.

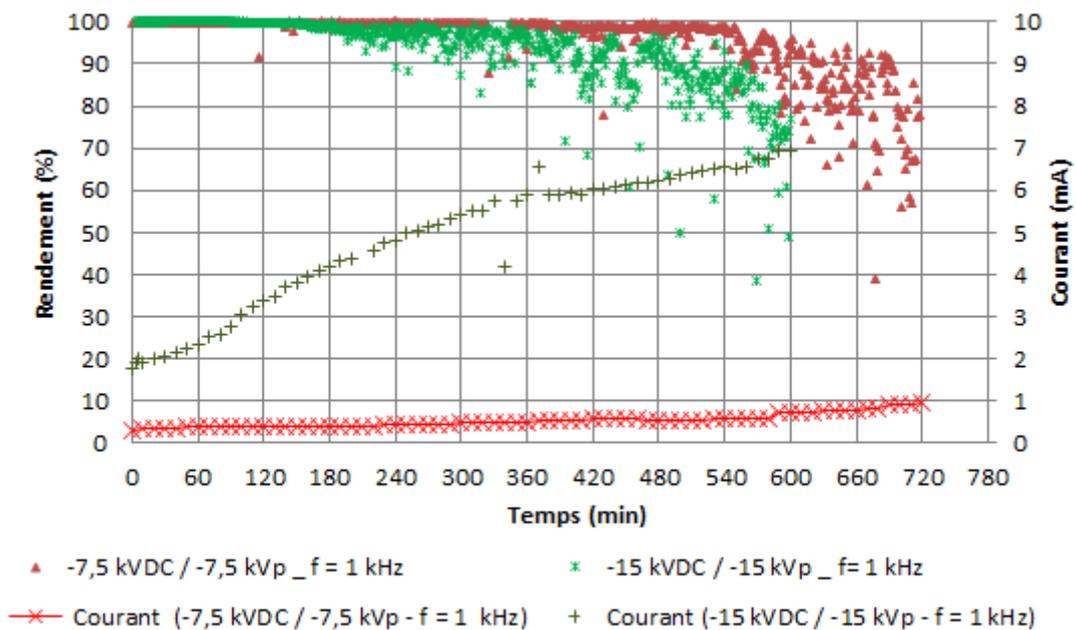


Figure 115 : Comparaison de l'évolution du rendement sous tensions combinées

Qu'en est-il de l'influence de la granulométrie sur la chute du rendement sous tension combinée ?

Le tracé, sous tension combinée, de l'évolution du rendement pour différentes granulométries (Figure 116) indique que la diminution de l'efficacité de filtration va dépendre, comme sous tension continue, de la taille des particules. Le rendement chute plus rapidement pour les particules fines. Néanmoins, l'écart de rendement entre les différentes granulométries est moins marqué sous tension combinée (Figure 116).

Ce résultat est également vérifiable sous la tension combinée $-15 \text{ kV}_{\text{DC}} / -15 \text{ kV}_{\text{p}}$ à 1 kHz (Annexe I).

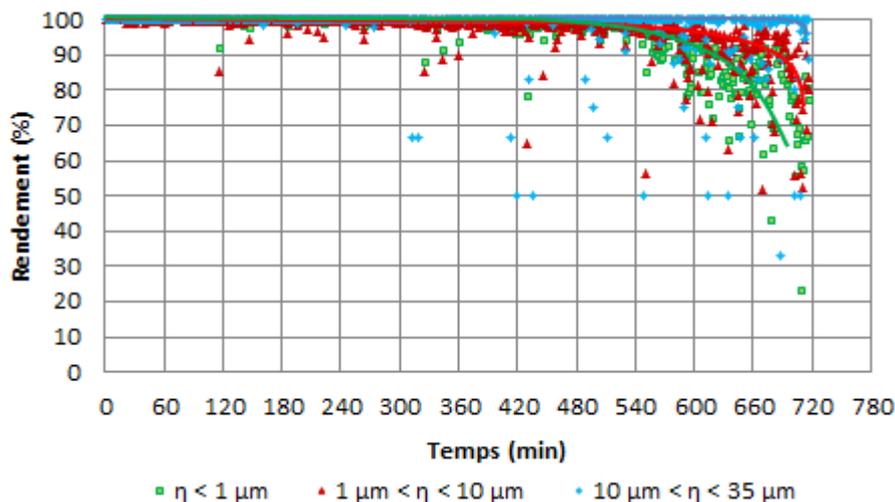


Figure 116 : Rendement en fonction de la granulométrie pour la tension combinée $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_{\text{p}}$ à 1 kHz

Ainsi, l'utilisation de tensions combinées va permettre à la fois d'augmenter la durée de filtration optimale des ESP, de favoriser la filtration des petites particules et de limiter la chute brusque du rendement.

III-5) Influence de la fréquence de répétition des impulsions

L'étude sur des temps courts a montré qu'utiliser une fréquence de 100 Hz pour le couple $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_{\text{p}}$ suffit pour obtenir un rendement de 100 %. En deçà de cette fréquence, le rendement n'est plus optimum. La diminution de la fréquence de répétition des impulsions influe sur le courant moyen et donc sur les charges créées qui sont moins nombreuses. Par conséquent, les back corona sont moins entretenues et il est cohérent de penser qu'une minimisation de la fréquence de répétition des impulsions améliore

également la durée de filtration. Cette hypothèse a donc été vérifiée expérimentalement (Figure 117) avec le couple $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_{\text{p}}$ cadencé à 100 Hz et 1 kHz.

Les résultats montrent que le fonctionnement est optimisé sur environ 10 heures de traitement pour la fréquence de 100 Hz. Néanmoins, des instabilités de rendement, non présentes à 1 kHz, sont enregistrées à 7 et 8 heures de fonctionnement. Il se peut que la fréquence utilisée soit un peu trop faible et que, par conséquent, l'électrofiltre se rapproche d'un fonctionnement sous tension continue. A faible fréquence, cette instabilité serait similaire à la chute du rendement par paquets observée sous tension continue. Cette baisse de filtration correspond essentiellement aux petites particules qui entraînent, comme vu précédemment, une chute du rendement (Annexe I).

Diminuer la fréquence des impulsions permet d'accroître le temps de fonctionnement de l'électrofiltre et réduit l'écart de filtration constaté entre petites et grandes particules. En supposant que la charge des particules est maximale, la dispersion constatée entre petites et grandes particules ne semble explicable que par une différence de migration (la dérive n'est pas optimale) ou par un ré-entraînement plus important des petites particules. En effet, à ce niveau de fréquence ($f = 100 \text{ Hz}$) la tension combinée se rapproche d'une tension continue faible et peut expliquer cette dispersion ponctuelle plus élevée, probablement due au fait que les particules chargées ne migrent pas totalement vers l'électrode de collecte ou bien que, une fois captées, elles se déchargent rapidement et sont vite ré-entraînées.

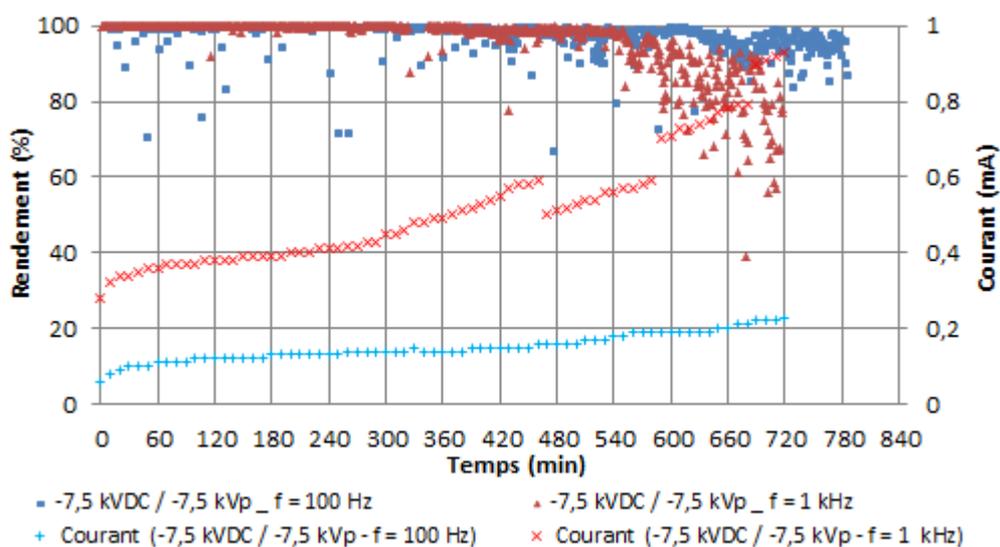


Figure 117 : Influence de la fréquence de la pulsation pour un fonctionnement de longue durée

Comme nous l'avons déjà souligné, les quantités de poussières disponibles étant limitées, il n'a pas été possible de réaliser l'étude sur des longs temps de fonctionnement, selon la nature des poussières. En particulier, il aurait été intéressant d'observer le comportement de la poussière SHIVA dont la résistivité ne permet pas le développement des back corona.

III-6) Les dépôts de poussières

L'utilisation de longue durée de fonctionnement entraîne logiquement une densification du dépôt et un encrassement tout le long de l'électrode de collecte. Comme observé lors du fonctionnement sur temps court, un dépôt elliptique dense se forme, que ce soit sous tension continue (Figure 118 - a) ou sous tension combinée (Figure 118 - b).

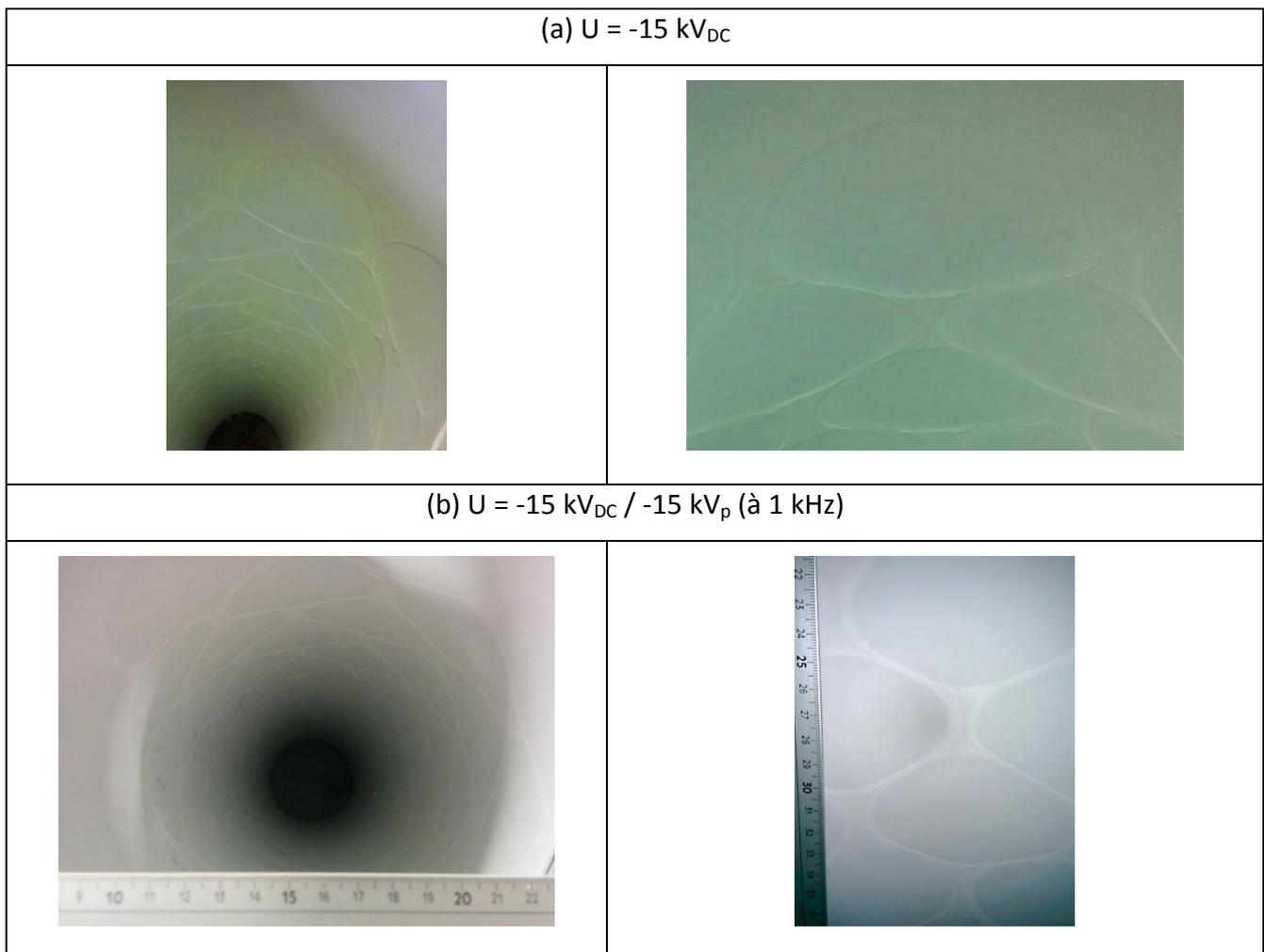


Figure 118 : Dépôt de poussières sur l'électrode de collecte (temps de fonctionnement long)

Une analyse des poussières récupérées sur l'électrode émissive apporte de plus amples informations. Contrairement au fonctionnement pour des temps courts, que ce soit sous tension continue ou bien sous tension combinée (Figure 119), un dépôt est observé tout le long de l'électrode émissive avec néanmoins un dépôt plus dense sur la partie inférieure.

Un décollement de poussières sur le tiers inférieur de l'électrode émissive est visible lors du fonctionnement sous tension continue (Figure 119). Il y a, à ce niveau, une destruction de la couche de dépôt, comme si les poussières collectées étaient ré-entraînées.

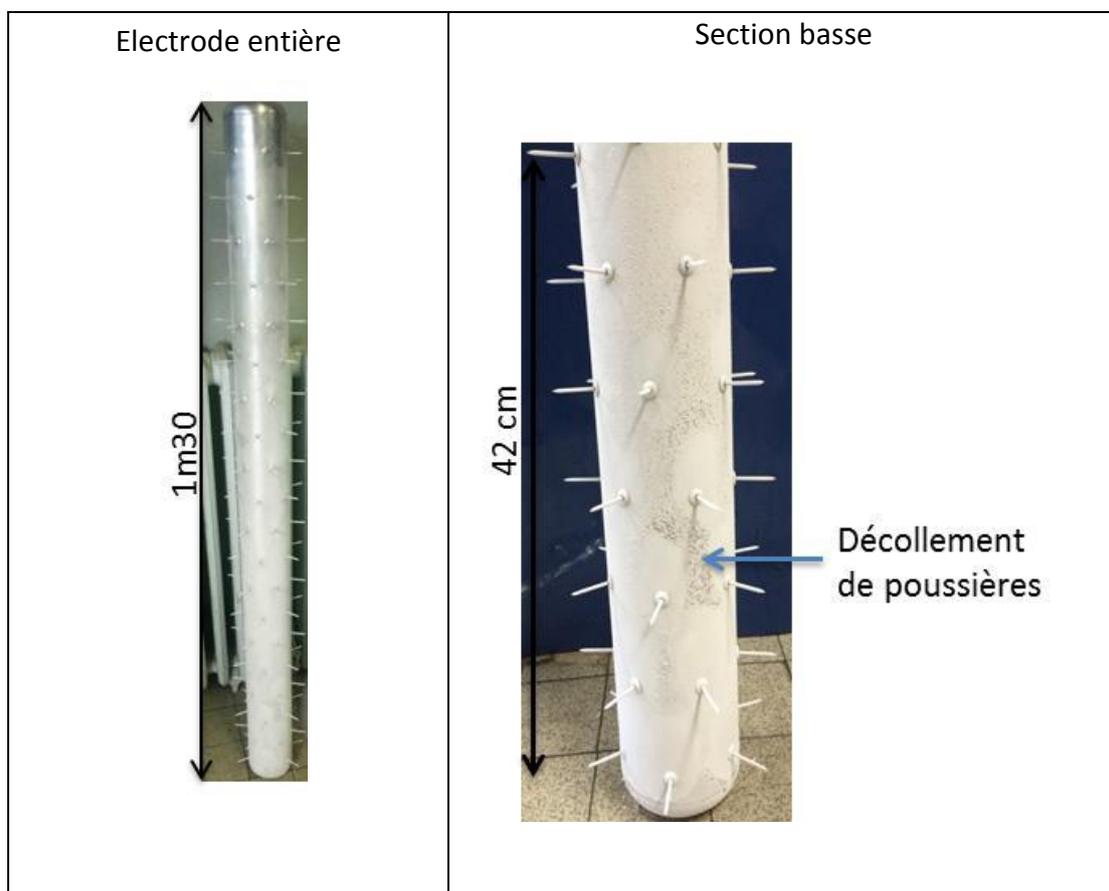


Figure 119 : Dépôt de poussière sur l'électrode émissive sous tension continue de -15 kV_{DC}

Sous tension combinée (Figure 120), ce décollement n'est pas observable, mais il semble toutefois y avoir, sur le tube support des pointes, une différence de densités de dépôt. Autour de chaque pointe, nous constatons que la couche est légère, puis elle se densifie en s'éloignant de la pointe. La tache de dépôt est semblable et régulière pour chacune des pointes.

L'analyse des électrodes a montré que le dépôt est plus important dans la partie basse du filtre, mais contrairement au fonctionnement sur temps courts, il est présent tout le long de l'électrode. Cela tend à confirmer l'hypothèse avancée précédemment, à savoir que l'électrofiltre ne fonctionne pas de façon uniforme sur toute sa longueur. Il y a un effet de sectorisation.

Par rapport à un fonctionnement sous tension continue, la tension combinée va générer ponctuellement sur chaque pointe un nombre élevé de charge, qui vont permettre un traitement optimal du gaz. En entrant dans le filtre les particules sont rapidement chargées et collectées. Il reste moins de poussières à récupérer dans la partie haute, d'où un dépôt moins dense sur la partie supérieure.

Au cours du temps, les pointes vont s'encrasser et fonctionner jusqu'à saturation, puis la portion suivante située au-dessus prendra la relève.

Cela explique pourquoi seulement une portion de l'électrode émissive est encrassée pour des temps de fonctionnement courts et, au contraire, toute l'électrode pour des temps plus longs.

Toutefois, cela ne suffit pas à justifier pourquoi sous tension continue (Figure 119), le dépôt est plus dense en bas, avec un décollement de la couche.

Ni [112] suggère, dans une étude réalisée sur un électrofiltre fil / cylindre, que la variation de l'épaisseur du dépôt est liée à une perte de chaleur le long de l'anode (tube de collecte). Cela occasionne un moins bon fonctionnement des décharges couronnes dans les zones où la température est plus faible.

Une autre explication, tout aussi plausible, est liée à la présence du coude à l'entrée du filtre qui génère une perturbation de l'écoulement (turbulence) et qui pourrait influencer sur la collecte des particules.

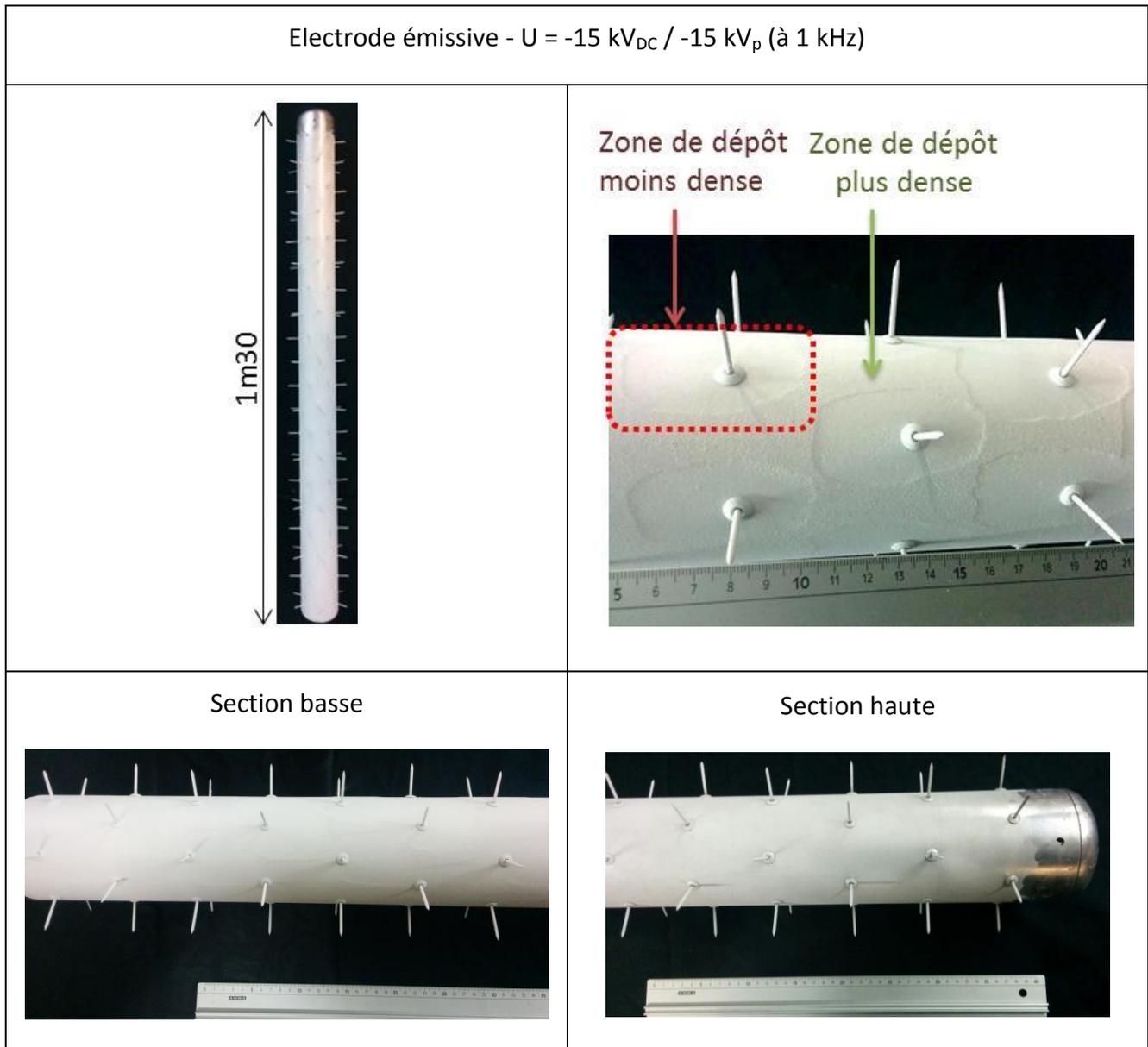


Figure 120 : Dépôt de poussière sur l'électrode émissive (temps de fonctionnement long) – tension combinée

IV) Bilan

Ce chapitre a porté sur l'analyse et l'optimisation de l'évolution temporelle des rendements de filtration dans la nouvelle géométrie Solectrode / cylindre. Le travail a porté sur l'influence de divers paramètres tels que la granulométrie, le type de poussières, le taux de particules injectées et bien évidemment les paramètres liés à l'alimentation électrique. L'analyse est divisée en deux parties principales :

Une première partie a consisté à étudier l'évolution du rendement de filtration sur des temps de fonctionnement courts. L'intérêt consiste à pouvoir caractériser l'efficacité de filtration dans de multiples configurations expérimentales tout en limitant l'encrassement du filtre. Dans ces conditions, le rendement de filtration peut être considéré comme constant puisque les back corona n'ont pas eu le temps d'interférer sur le rendement. Néanmoins, l'état d'encrassement du filtre n'étant pas identique pour chaque essais, la non-reproductibilité des mesures de courant moyen n'a pas permis de comparer les puissances moyennes mises en jeu entre les diverses configurations étudiées.

La première constatation est que l'utilisation de la nouvelle configuration Solectrode / cylindre permet d'obtenir des rendements de filtration optimum pour des niveaux de tensions relativement faibles en comparaison de ceux mises en jeu dans la configuration Héritrode / cylindre. Ce résultat est parfaitement logique en regard des géométries des deux configurations (distance inter-électrodes plus courte aujourd'hui).

Trois couples de tension combinée ont été utilisés pour caractériser l'efficacité de la filtration :

- $-5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -5 \text{ kV}_p$, $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ et $-10 \text{ kV}_{\text{DC}} / -10 \text{ kV}_p$.
- Les principaux résultats sont :
- l'utilisation du couple $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_p$ à 1 kHz et 100 Hz offre de très bons rendements de filtration,
- le taux d'injection de poussières n'a pas d'impact sur le rendement,
- l'étude de l'efficacité de filtration par taille de particules a montré que, lors d'un fonctionnement sur temps court, le rendement obtenu est optimal pour toutes les tailles de poussière. La filtration s'opère indifféremment sur les poussières submicroniques que sur celles de diamètre supérieur à 10 μm . Ce résultat semble cohérent avec les données bibliographiques si nous considérons que la limite inférieure de mesures des compteurs GRIMM est de 0,25 μm ,
- la résistivité des poussières influe sur l'efficacité de filtration. Néanmoins, un rendement optimum a pu être obtenu pour toutes les poussières étudiées.

La seconde partie de ce chapitre a porté sur le fonctionnement du précipitateur électrostatique sur de longues durées, pouvant atteindre jusqu'à treize heures. Le protocole expérimental a consisté à débiter une séquence de filtration à partir de la boucle propre,

puis de mesurer les évolutions du rendement et du courant moyen au cours du temps jusqu'à observer la chute du rendement. Le but était donc de caractériser le temps de fonctionnement à rendement maximum et de déterminer les configurations d'alimentation associées aux rendements les plus durables. En raison des quantités de poussières disponibles, seule la poussière SIKRON a été utilisée pour ces expériences.

Une étude préalable a montré qu'une expérience ne pouvait être interrompue. A cause de la perte des charges en surface du dépôt pendant l'interruption, le rendement et le courant libéré ne redémarrent pas à des valeurs identiques.

Lors du fonctionnement sur temps long, des back corona vont inévitablement se former avec SIKRON et affecter le rendement de filtration. Une étude granulométrique du rendement a montré que la formation de back corona affecte, en premier lieu, les particules dont la taille est inférieure à $1\ \mu\text{m}$, puis celle entre $1\ \mu\text{m}$ et $10\ \mu\text{m}$. Cette influence de la granulométrie sur le rendement est d'autant plus marquée si le filtre est alimenté sous tension continue par rapport à une tension combinée.

L'analyse des courbes de rendement a montré une chute par paquets sous tension continue non présente sous tension combinée, certainement due à la formation et au développement de back corona plus intenses en continu.

Il a été montré qu'en réduisant la tension continue appliquée de $-15\ \text{kV}_{\text{DC}}$ à $-10\ \text{kV}_{\text{DC}}$, il est possible de faire fonctionner plus longtemps le filtre (de 3 heures à 5 heures) avec un bon rendement, mais ce dernier n'est pas maximal. En revanche l'utilisation de la tension combinée $-7,5\ \text{kV}_{\text{DC}} / -7,5\ \text{kV}_{\text{p}}$ à $1\ \text{kHz}$ permet de faire fonctionner l'ESP durant 9 heures à un rendement optimum. Ainsi, l'application de tensions combinées est préférable aux tensions continues. Une optimisation de la tension combinée est possible en diminuant, par exemple, la fréquence d'impulsion. Les essais conduits à $-7,5\ \text{kV}_{\text{DC}} / -7,5\ \text{kV}_{\text{p}}$ à $100\ \text{Hz}$ ont permis d'allonger la durée de fonctionnement d'au moins 1 heure et également de diminuer les écarts de rendement par tranches granulométriques.

L'analyse du dépôt de poussière sur les électrodes émettrice et de collecte indique que, selon la nature de la poussière, le dépôt diffère légèrement en entrée du filtre pour la poussière la moins résistive (SHIVA). Pour les autres, le dépôt sur l'électrode de collecte est similaire et se caractérise par une tache elliptique en face des pointes émissives formant la couche principale et entourée d'un dépôt plus fin.

De la poussière est aussi collectée sur l'électrode émissive :

- sous tension continue, toute l'électrode émissive est encrassée, avec un dépôt plus dense sur la partie basse (entrée des poussières),
- sous tension combinée, l'électrode émissive est encrassée principalement sur le tronçon inférieur.

De plus, nous avons montré que le courant moyen augmente au cours du temps de filtration et ce, que le rendement reste constant ou bien qu'il chute. L'analyse des courants et des dépôts de poussières indiquent donc que l'ESP fonctionne par étage en partant de sa partie basse. Les premières pointes situées à l'entrée du filtre semblent d'abord fonctionner de façon optimale, puis évoluent progressivement jusqu'à se retrouver dans la zone 4 préalablement définie. Il y aurait alors un effet de saturation du courant au niveau de ces pointes qui deviendraient inopérantes en termes de filtration. Les étages situés au-dessus prendraient le relais. Tout se passe comme si la longueur effective de filtration d'un ESP diminuait au cours du temps.

Conclusion

Cette thèse s'est inscrite dans le cadre d'une collaboration établie depuis de nombreuses années entre le CEA Marcoule et le l'Equipe Génie Electrique du laboratoire SIAME de l'Université de Pau.

Les travaux portent sur l'amélioration des performances d'électrofiltres utilisés en sortie de procédés, développés par le CEA, de traitement de déchets solides par « incinération / vitrification ».

Les précédents travaux avaient conduit, entre autres, au développement d'un couple électrode émettrice / alimentation électrique spécifiquement optimisé pour les géométries des électrofiltres du CEA. Leur performance de filtration avait ainsi pu être améliorée de façon significative.

Le développement actuel d'un nouveau procédé d'incinération imposait de redimensionner l'électrofiltre et plus précisément de modifier la géométrie de l'électrode émissive. Les objectifs de cette thèse étaient donc clairement identifiés :

- dimensionner et réaliser une nouvelle électrode émissive qui devait répondre aux critères géométriques définis par le CEA,
- déterminer les nouveaux points de fonctionnement de l'alimentation combinée qui, associée à la nouvelle électrode, offraient des performances optimales de filtration,
- analyser comment évoluaient ces points de fonctionnement selon les caractéristiques physico-chimiques des poussières et selon le taux de particules injectées,
- caractériser l'évolution en fonction du temps du rendement et améliorer, autant que possible, la durée de fonctionnement de l'électrofiltre à filtration optimale.

Pour mener à bien ces travaux, le laboratoire de Pau dispose d'un pilote modulable dont il est possible de modifier les paramètres d'écoulement du gaz, la géométrie des électrodes et le taux d'injection de particules. Une alimentation combinée a également été développée pour cette application. Elle permet de superposer à un fond continu de tension réglable de 0 à 50 kV, des impulsions de niveau ajustable (0 – 50 kV) et de fréquence variable (0 – 1 kHz).

Le CEA a mis à disposition du laboratoire deux compteurs de particules GRIMM qui, positionnés en aval et en amont de notre pilote, permettent de mesurer les taux de

particules entrantes et sortantes afin de déterminer le rendement de filtration. Sept types de poussières ont également été initialement fournis par le CEA. **Les différentes caractérisations physico-chimiques** ont permis d'en retenir quatre : les poussières SHIVA, IRIS et V5 qui sont issues des procédés du CEA et les poussières SIKRON qui proviennent du commerce. Cette sélection a reposé sur plusieurs critères :

- sélectionner les poussières qui présentent des granulométries différentes tout en respectant la plage de mesures des compteurs GRIMM. Les essais par granulométrie laser couplés à des techniques MEB ont permis de répondre à cette première contrainte. Globalement, SIKRON est la moins dispersée et comporte des poussières dites grossières (PM_{10}) et fines ($PM_{2,5}$). IRIS et V5 sont des poussières avec une granulométrie proche, polydispersée qui les classe dans les PM_{10} et au-delà. SHIVA est une poussière relativement grosse et homogène contenant quelques PM_{10} . Sa granulométrie indique qu'elle se situe, en partie, au-delà de la limite supérieure des GRIMM,
- identifier celles de caractéristiques électriques différentes. Pour cela, des tests ont été menés pour mesurer, en fonction de la fréquence, leur résistivité et leur permittivité relative. Les résultats obtenus montrent que, concernant la permittivité relative, toutes les poussières sont identiques. Il n'en est pas de même en termes de résistivité. La poussière SIKRON est la plus résistive. C'est d'ailleurs la seule qui présente une résistivité mesurée sous tension continue supérieure à la limite fixant le seuil initiation de back corona. Les trois poussières issues des procédés ont donc des résistivités en deçà de ce seuil, SHIVA étant la moins résistive.

Le dimensionnement de la nouvelle électrode a consisté à définir la meilleure répartition longitudinale et radiale de pointes émissives disposées sur un tube support ainsi que leur longueur optimale.

Dans un premier temps, les travaux ont reposé sur des modélisations de la distribution spatiale du champ électrique dans l'électrofiltre. Deux critères ont été retenus et ont abouti à un pré-dimensionnement de la nouvelle électrode émissive : la maximalisation du champ électrique sur les pointes (régions de forte ionisation du gaz) et la limitation du champ moyen dans l'intervalle inter-électrodes (région de propagation des streamers).

Une étude expérimentale, qui reposait sur l'optimisation du courant injecté, a confirmé les résultats de modélisation. La nouvelle électrode multi-pointes, dénommée Solectrode, est ainsi constituée de 120 pointes de longueur 30 mm disposées sur un tube support de diamètre 100 mm. Ces caractéristiques géométriques entraînent une diminution de la distance inter-électrodes (70 mm) par rapport aux anciens dispositifs (116,5 mm), et donc inévitablement une baisse des niveaux de tensions de l'alimentation électrique associée. Nous pouvons également nous demander si cela aura une répercussion sur les paramètres d'écoulement des gaz ?

La détermination des nouveaux points de fonctionnement de l'alimentation combinée associée à cette nouvelle géométrie a également été réalisée en deux étapes.

- Dans un premier temps, afin d'améliorer nos connaissances sur les décharges électriques mises en jeu dans les mécanismes d'électrofiltration, les essais ont porté sur un électrofiltre simplifié constitué d'une pointe unique positionnée face à un plan de collecte.

Pour les poussières les plus résistives (SIKRON), quel que soit le type d'alimentation (continue ou combinée), l'analyse de l'évolution des régimes de décharge a montré l'existence de quatre zones différentes correspondant à des étapes clés du développement des mécanismes d'électrofiltration. L'enchaînement de ces différentes séquences s'accompagne d'une augmentation du courant moyen injecté et conduit, plus ou moins rapidement, mais inévitablement, à l'instauration d'un régime de back corona. Ce régime est responsable de la chute d'efficacité de filtration du procédé car il permet le développement, dans l'intervalle inter-électrodes, d'une colonne positive dans laquelle le champ électrique devient quasi-nul. Par ailleurs, les back corona sont également responsables de la diminution de la tension de claquage par rapport à celle obtenue dans les mêmes conditions opératoires mais sans injection de poussières.

En revanche, il a été clairement démontré que l'utilisation d'une alimentation combinée retarde le développement des back corona. Une explication a été proposée. Elle repose sur le fait que l'alimentation combinée génère successivement des niveaux de champ élevés, puis faibles. Globalement, la quantité de charges négatives (particules de poussières chargées et ions négatifs du gaz) collectée sur le plan semble moindre que sous tension continue. Comme ce sont ces charges qui contribuent à accroître la

différence de potentiel sur le dépôt de poussières collectées, le régime de back corona est retardé.

Dans les mêmes conditions opératoires, l'utilisation des poussières SHIVA de faible résistivité ont confirmé qu'aucun régime de back corona n'apparaît. La couche de dépôt est le siège d'une activité électrique mais qui ne modifie pas la valeur du courant qui reste quasiment constant durant tout l'essai. Le dépôt n'est pas percé, il forme une couche résistive qui limite le courant et s'oppose à l'établissement d'un arc électrique. Il faut monter à des niveaux de tension plus élevés que ceux obtenus sans poussière pour initier un arc et percer la couche de poussières au plan.

● Dans un second temps, fort de ces résultats, les essais ont été réalisés sur le pilote du laboratoire équipé de l'électrode Solectrode. L'état d'encrassement du filtre est un paramètre essentiel dans l'analyse des résultats puisqu'il modifie les conditions d'évolution des régimes de décharge et les mesures du courant moyen. La détermination des points de fonctionnement optimaux a donc été menée sur des temps de fonctionnement court de la boucle (entre deux nettoyages). Les principaux résultats obtenus sont :

- le taux d'injection de poussières n'a pas d'impact sur l'efficacité de la filtration,
- la géométrie de la Solectrode permet d'obtenir des rendements de filtration optimum pour des niveaux de tension relativement faibles,
- l'utilisation de tensions combinées offre de très bons rendements de filtration en comparaison de ceux obtenus sous tension continue. Le couple $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_{\text{p}}$ cadencé à au moins 100 Hz a été retenu,
- la filtration est optimale pour toute la granulométrie des poussières traitées. Elle s'opère indifféremment sur les poussières submicroniques que sur celles de diamètre supérieur à $10 \mu\text{m}$,
- pour une même configuration d'alimentation, la filtration est d'autant meilleure que la résistivité des poussières est grande.

La caractérisation de l'évolution en fonction du temps du rendement a été réalisée à partir de l'électrofiltre nettoyé, sur des temps longs et sans discontinuité de fonctionnement. En raison des quantités de poussières disponibles, seule la poussière SIKRON a été utilisée pour ces expériences. Dans ces conditions :

- des back corona se sont inévitablement formés et ont fait chuter le rendement,

- la formation de back corona affecte tout d'abord l'efficacité de filtration des particules de diamètre inférieur à $1\ \mu\text{m}$, puis sur celles comprises entre $1\ \mu\text{m}$ et $10\ \mu\text{m}$, puis celles dont le diamètre est supérieur à $10\ \mu\text{m}$. Cette influence de la granulométrie sur le rendement est plus marquée sous tension continue que sous tension combinée. Ce résultat conforte l'intérêt d'utiliser une alimentation pulsée,
- les essais conduits à $-7,5\ \text{kV}_{\text{DC}} / -7,5\ \text{kV}_{\text{p}}$ à $100\ \text{Hz}$ ont permis d'atteindre des durées de fonctionnement à rendement optimum d'environ 10 heures. Les tests d'endurance sous tension continue n'ont pas permis de dépasser les 5 heures et $\frac{1}{2}$ de filtration,
- l'analyse des courants et des dépôts de poussières indiquent que le filtre fonctionne par étage en partant de sa partie basse. Les premières pointes situées à l'entrée du filtre semblent d'abord fonctionner de façon optimale, puis deviennent inopérantes en termes de filtration. Les étages situés au-dessus prennent alors le relais. Tout se passe comme si la longueur effective de filtration diminuait au cours du temps. Le filtre s'auto-sectorise jusqu'à devenir inefficace.

Ces travaux méritent d'être complétés suivant différents axes :

- Le premier concerne l'analyse de l'évolution des rendements sur des temps de fonctionnement longs avec des poussières « faiblement » résistives de type SHIVA. La question que nous pouvons nous poser est de savoir si l'efficacité de filtration diminue au cours du temps et quelles sont les causes de cette chute lorsqu'il n'y a pas de régime de back corona.
- Cette question en soulève directement une autre. D'après nos résultats, le seuil d'initiation du régime de back corona n'est pas aussi clairement défini que ce qui est établi dans la littérature. Il y a vraisemblablement des paramètres autres que la résistivité des poussières qui influent sur la valeur de ce seuil. Il y en aurait deux particulièrement intéressants à étudier : la température d'écoulement qui joue sur la densité de courant des couronnes positives et la permittivité relative qui favorise les renforcements du champ électrique (points triples) dans le dépôt de poussières sur l'électrode de collecte.

- Si nous comparons les résultats de cette thèse avec les précédents travaux menés au laboratoire SIAME, il apparaît que la diminution du volume effectif d'écoulement (augmentation du diamètre du tube support de l'électrode émissive) permet de réduire significativement la puissance délivrée par l'alimentation électrique sans que cela ne soit préjudiciable à l'efficacité de filtration. Cette solution, simple à mettre en œuvre, a forcément des répercussions sur la dynamique des écoulements. Il serait alors intéressant de mener des études complémentaires à travers des modélisations des écoulements gazeux dans l'électrofiltre, ce qui permettrait, en plus, de les analyser en regard de la chicane présente en entrée de l'électrofiltre.
- Pour terminer, l'intérêt de l'utilisation d'une alimentation combinée est clairement établi. Néanmoins, notre générateur pulsé doit être amélioré en termes de performances et de compacité. De par sa construction, une partie non négligeable de la puissance délivrée est perdue dans la résistance de référencement du commutateur à thyristors. Par ailleurs, la durée de l'impulsion de tension ne peut être modifiée. Il est probable qu'un meilleur contrôle de la forme de l'impulsion, comme par exemple un signal carré HT de rapport cyclique variable, participerait à l'optimisation du procédé.

Annexes

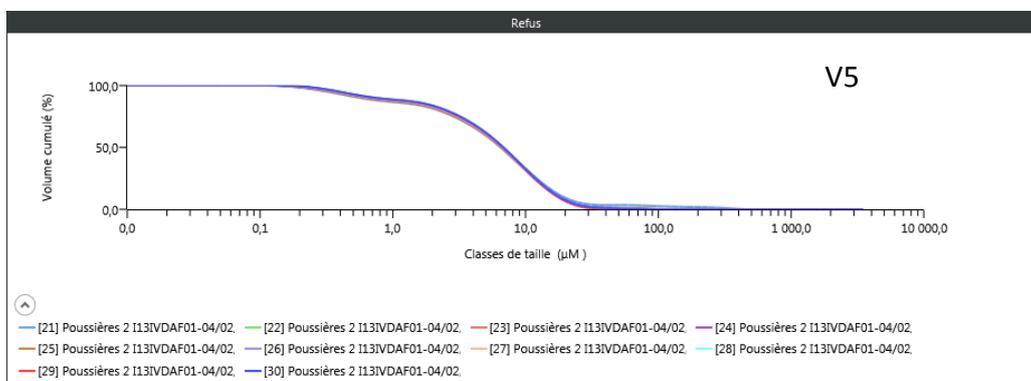
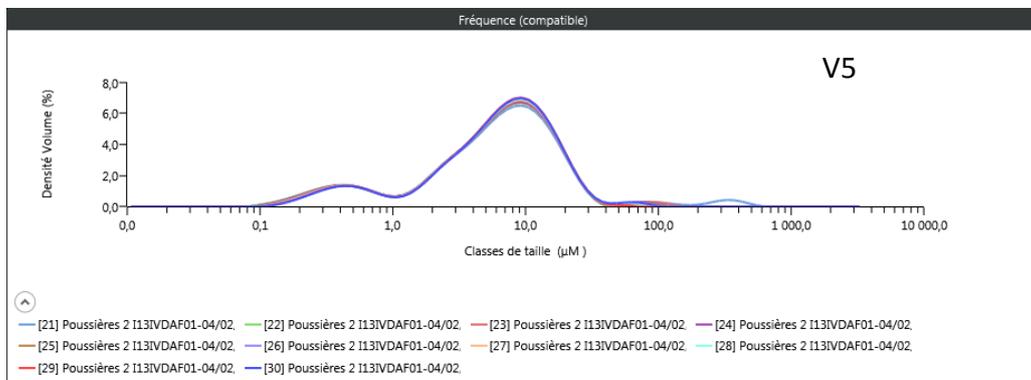
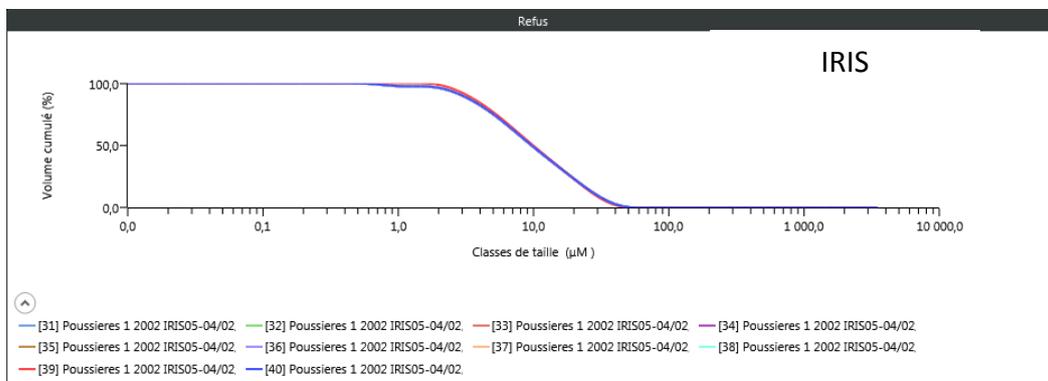
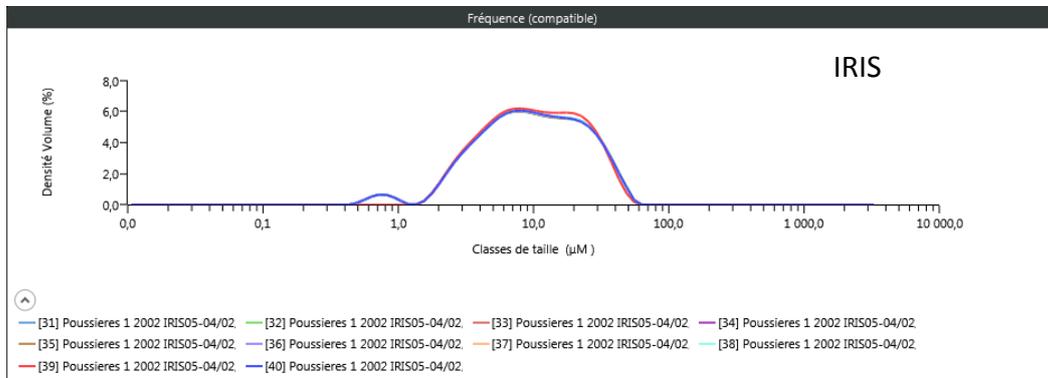
Annexe B.

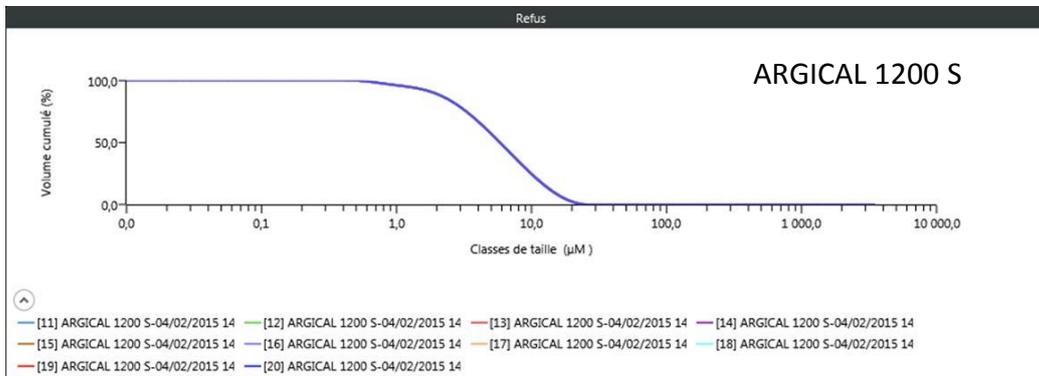
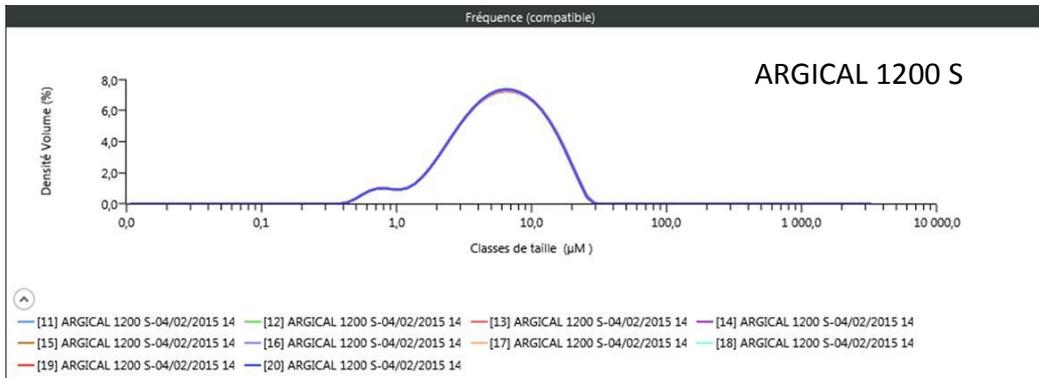
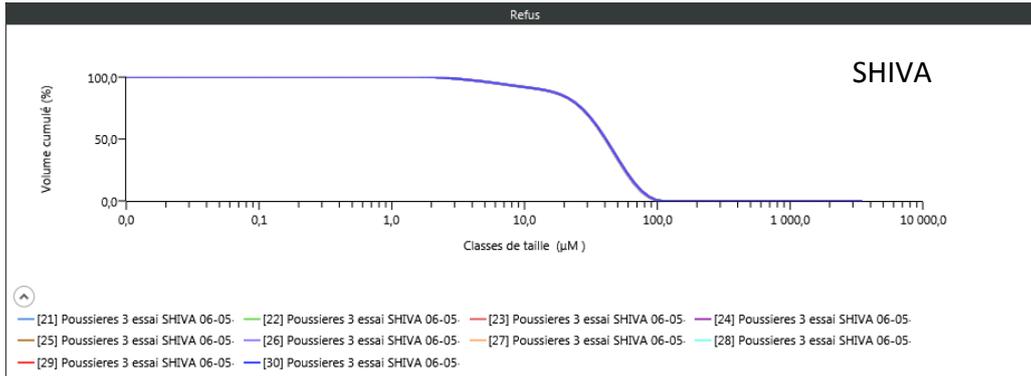
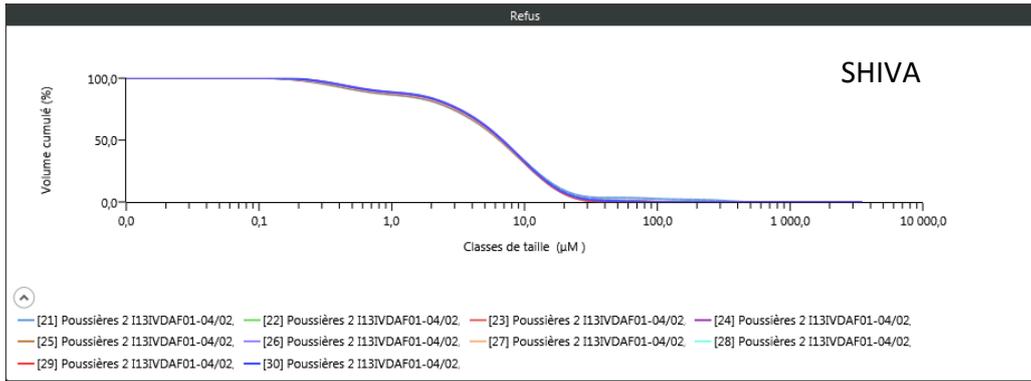
Complément d'information sur les analyses chimiques SOCOR

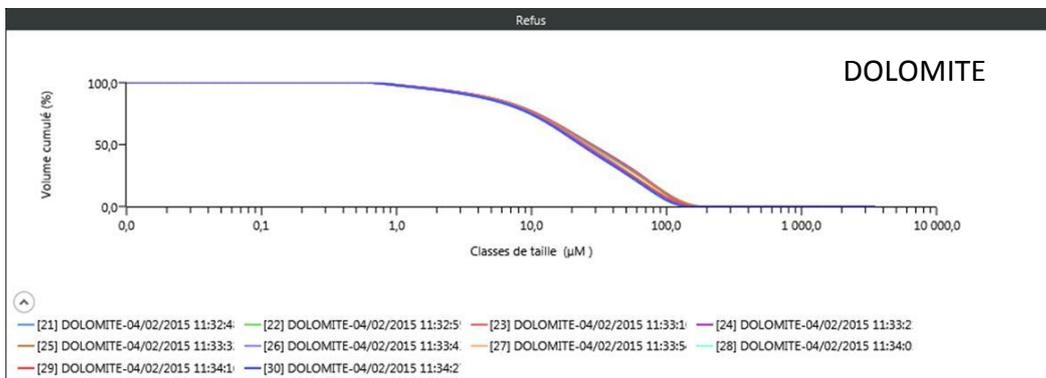
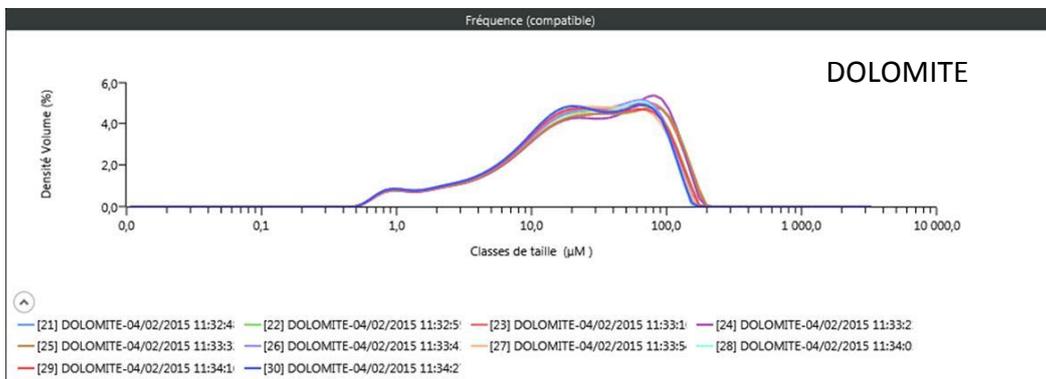
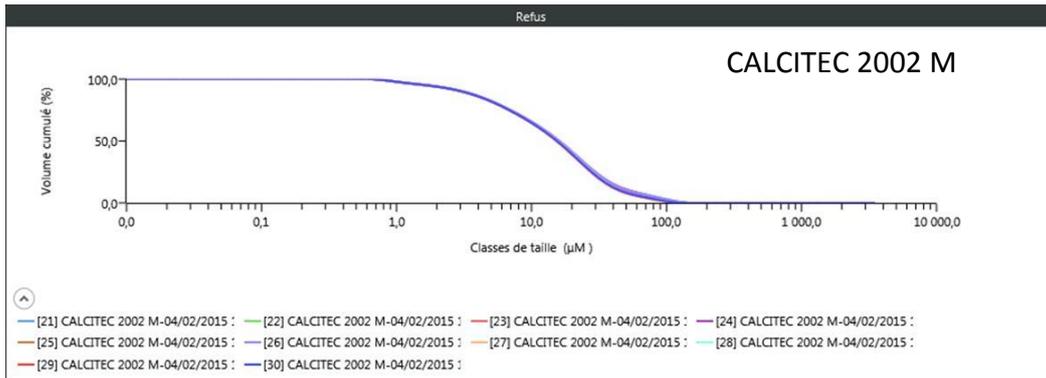
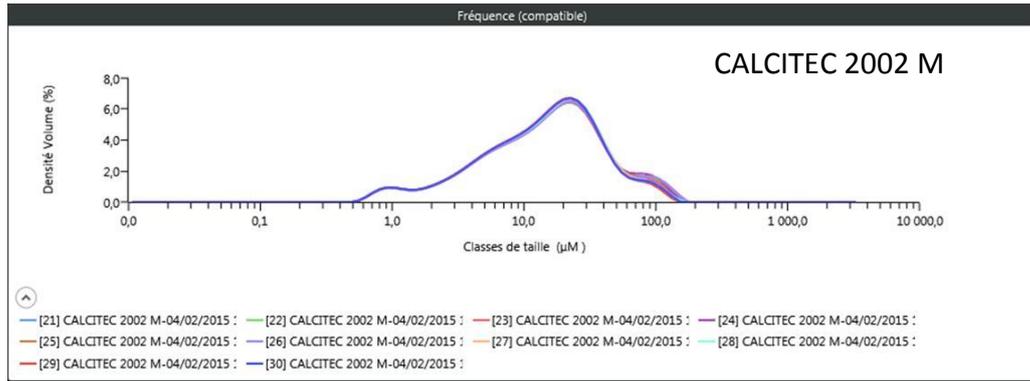
Elément	méthode d'analyse	normes associées
C	Combustion puis Microanalyse par conductibilité thermique en phase gazeuse	NF EN 15407
H	Combustion puis Microanalyse par conductibilité thermique en phase gazeuse	NF EN 15407
N	Combustion puis Microanalyse par conductibilité thermique en phase gazeuse	NF EN 15407
O	Calculé pour boucler à 100%	
Cl	Frittage alcalin (peroxyde de sodium) puis lavage des gaz et analyse par chromatographie liquide	NF EN 14582
S	Frittage alcalin (peroxyde de sodium) puis lavage des gaz et analyse par chromatographie liquide	NF EN 14582
P	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
F	Frittage alcalin (peroxyde de sodium) puis lavage des gaz et analyse par chromatographie liquide	NF EN 14582
Li	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Na	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
K	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
Mg	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
Ca	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
Ba	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Ti	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
Cr	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Mn	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
Fe	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
Co	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Ni	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Cu	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Zn	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Cd	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Al	Minéralisation aux micro-ondes + ICP optique	NF M03-052
Si	Fusion alcaline + ICP optique	NF M03-042
Sn	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	
Pb	Minéralisation aux micro-ondes + ICP massique	

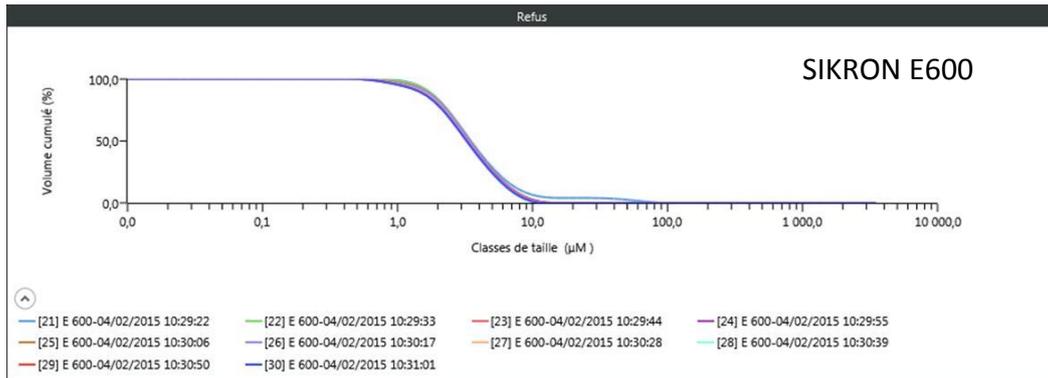
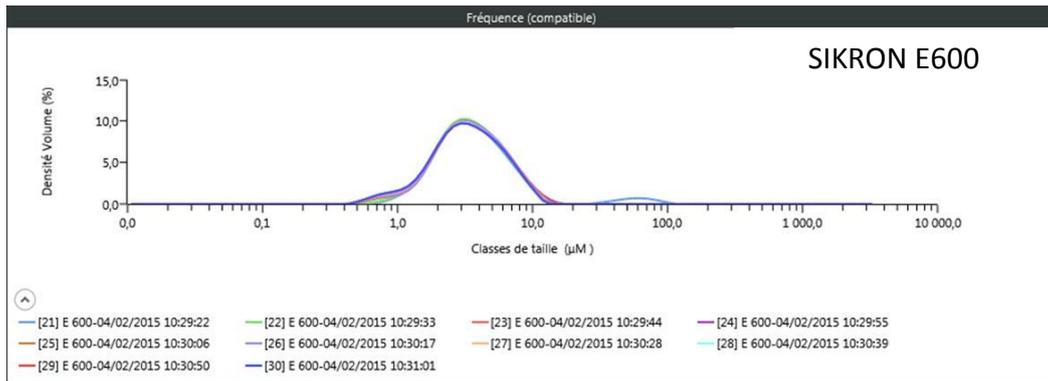
Annexe C.

Fiches Produits et Analyse Granulométrique







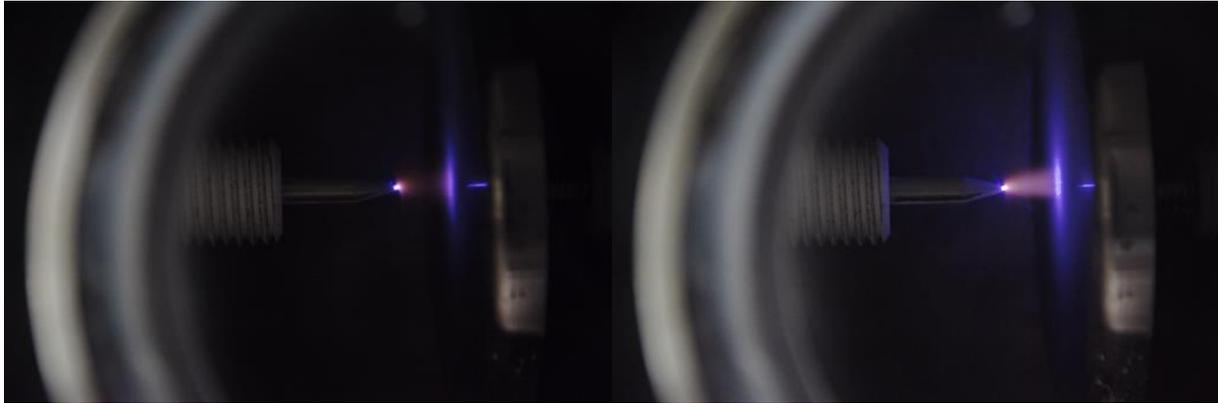


Annexe D.

Phénoménologie à $-4,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -4,5 \text{ kV}_0$ (1 kHz)

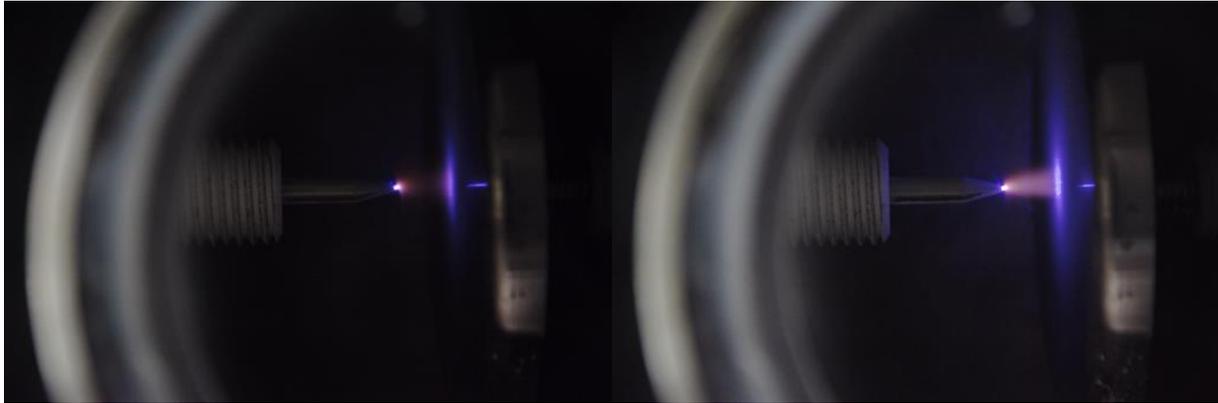
t = 15 min

Première apparition de back corona



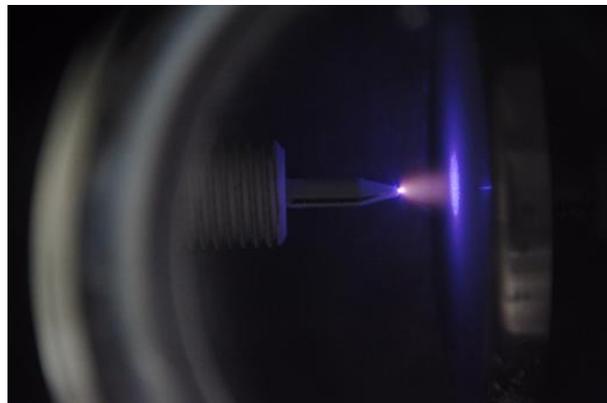
t = 35 min

Multiplication des back corona



t = 76 min

Régime stable



Annexe E.

Comparaison tension combinée et continue**-6 kV_{DC}****-4,5 kV_{DC} / -4,5 kV_p (1 kHz)****-9 kV_{DC}**

t = 12 min

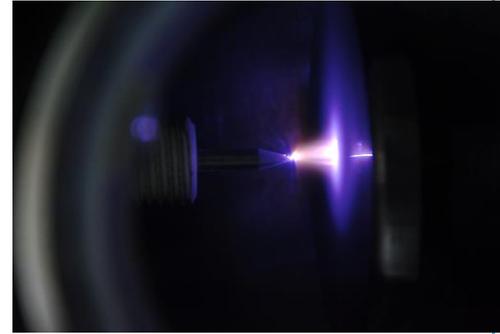
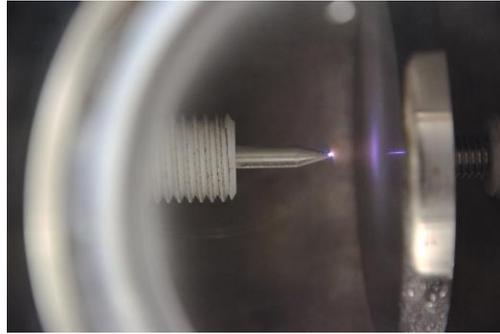
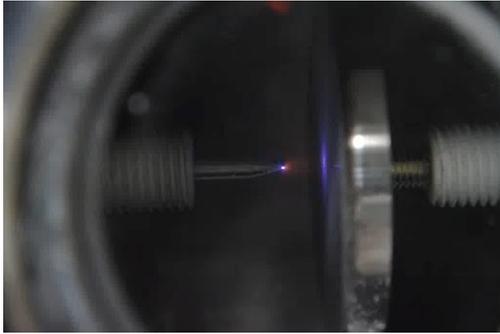
t = 12 min

t = 12 min

Première apparition de back corona

Pas de back corona

Nombreuses de back corona



t = 15 min

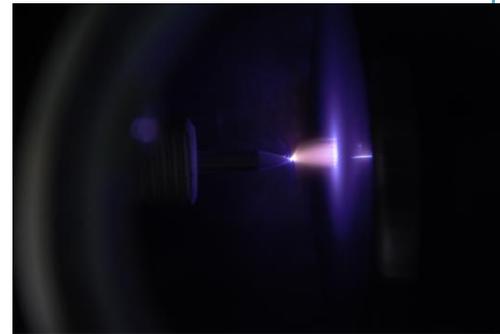
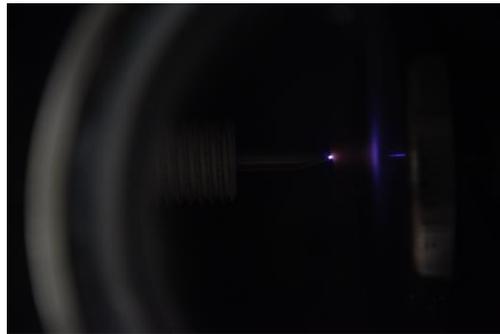
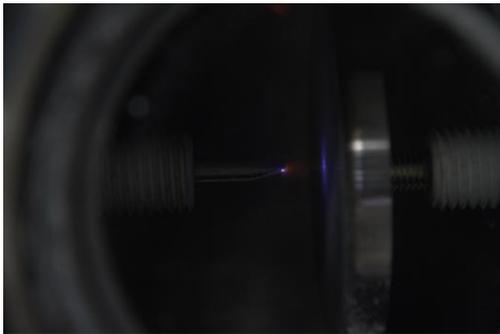
t = 15 min

t = 15 min

Accroissement des back corona

Première apparition de back corona

Colonne positive visible



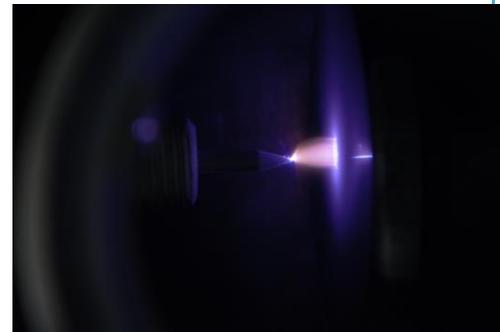
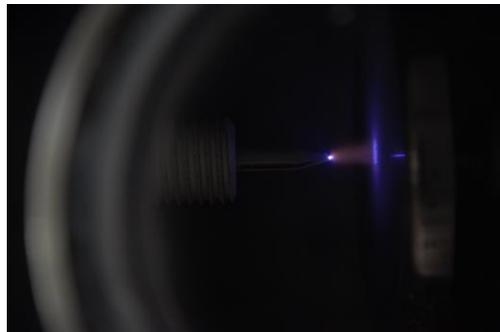
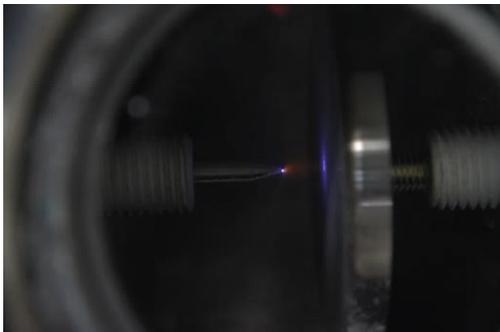
t = 17 min

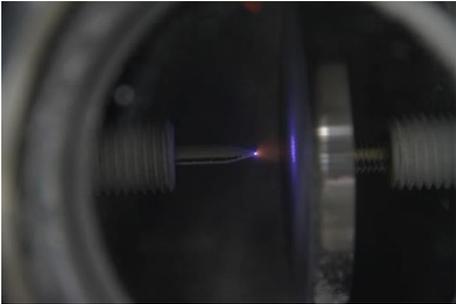
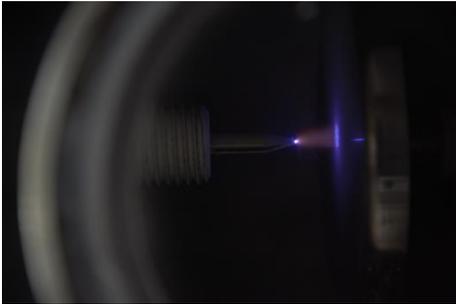
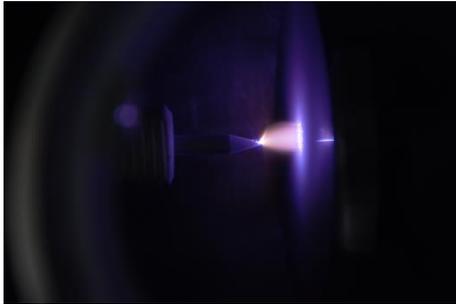
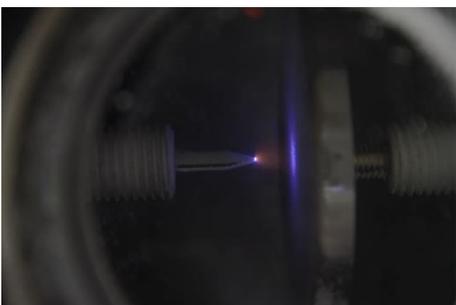
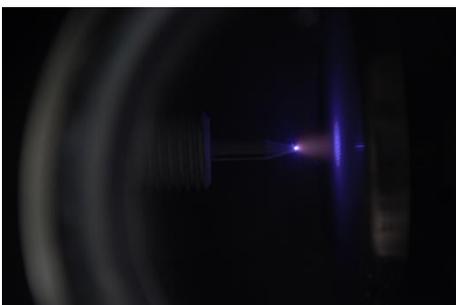
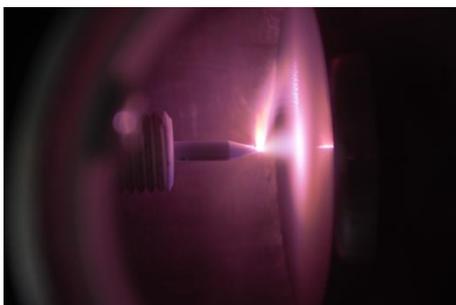
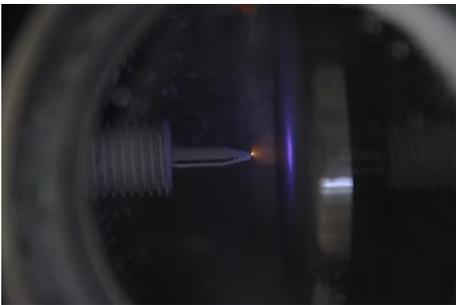
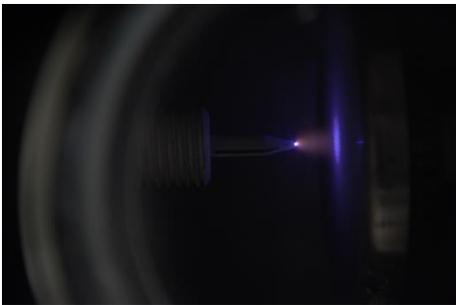
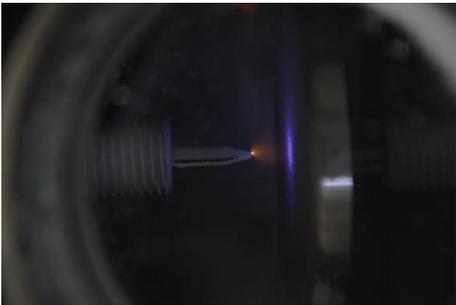
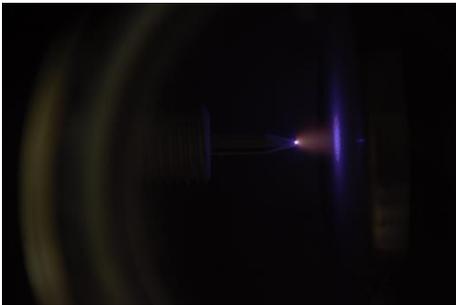
t = 17 min

t = 17 min

Accroissement progressif des B.C.

Accroissement par saut des B.C.



-6 kV _{DC}	- 4,5 kV _{DC} / -4,5 kV _p (1 kHz)	-9 kV _{DC}
<p>t = 24 min</p> 	<p>t = 24 min</p> 	<p>t = 24 min</p> 
<p>t = 50 min</p> 	<p>t = 50 min</p> 	<p>t = 27 min Arc électrique</p> 
<p>t = 73 min - Plus d'augmentation de la zone active.</p> 	<p>t = 73 min - Plus d'augmentation de la zone active.</p> 	<p>Arc électrique</p> 
<p>t = 77 min - Les back corona semble comme le courant se stabiliser.</p> 	<p>t = 77 min - Les back corona semble comme le courant se stabiliser.</p> 	

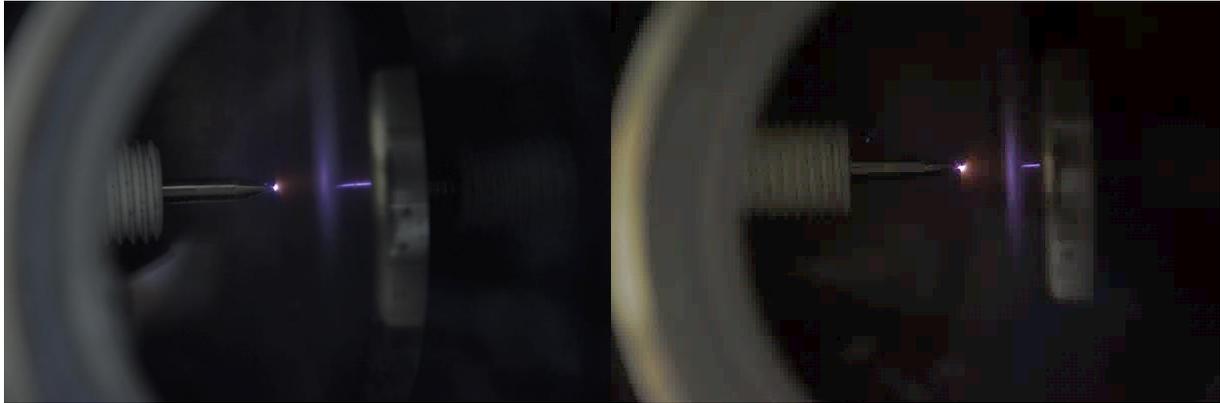
Annexe F.

SIKRON versus SHIVA à -7,5 kV_{DC}

SIKRON

SHIVA

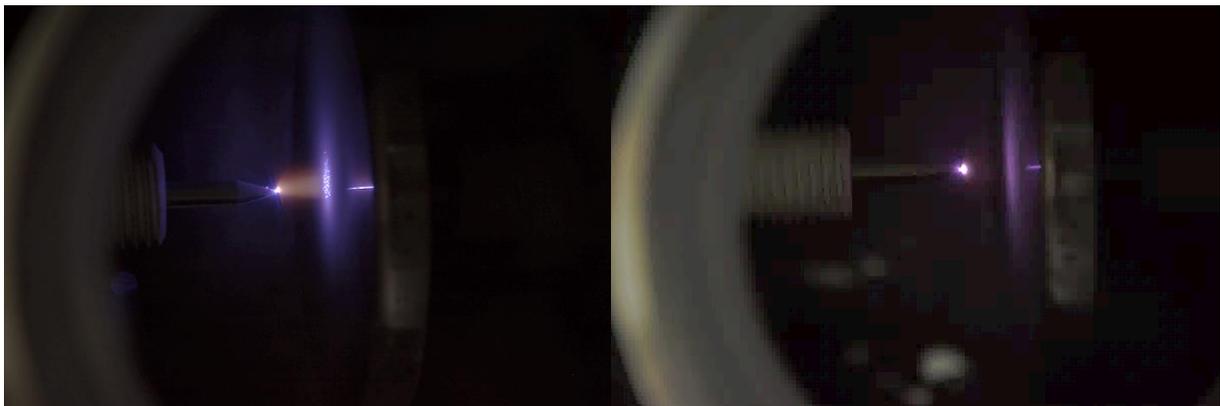
t = 1 min



t = 20 min

(a) Présence de back corona

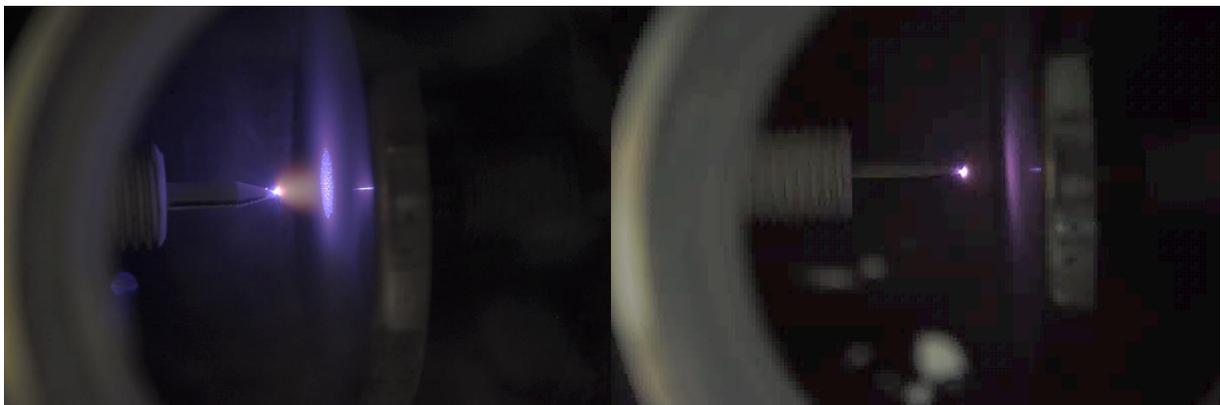
(b) Absence de back corona



t = 45 min

(c) Intensification des back corona

d) Toujours pas de back corona



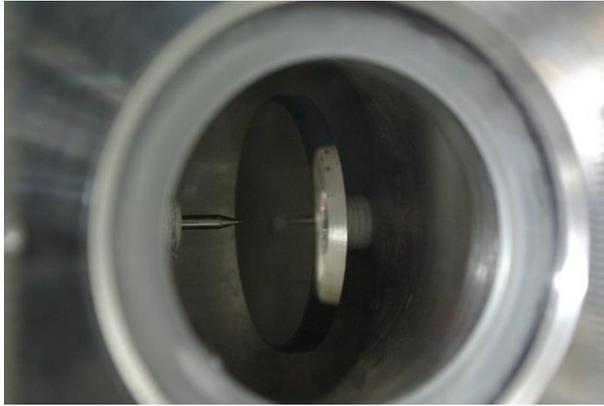
Annexe G.

Formation du dépôt avec SHIVA à -10 kV_{DC}

U = -10 kV_{DC}

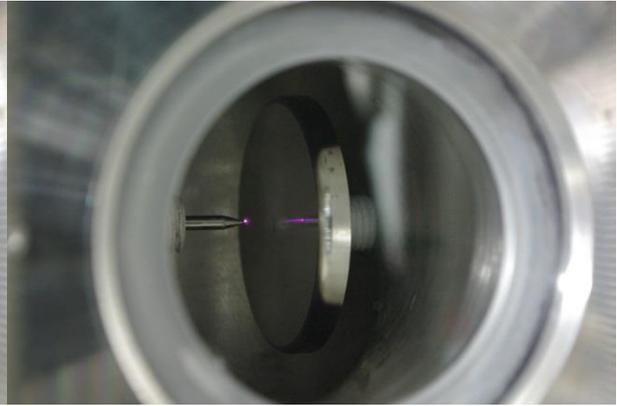
t = 0 min

Sans tension, sans flux



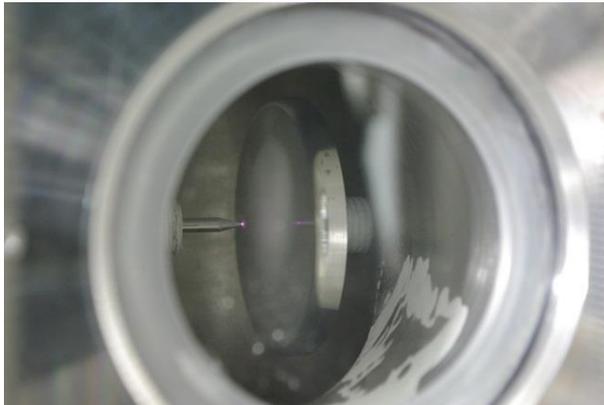
t = 0 min

Avec tension, sans flux



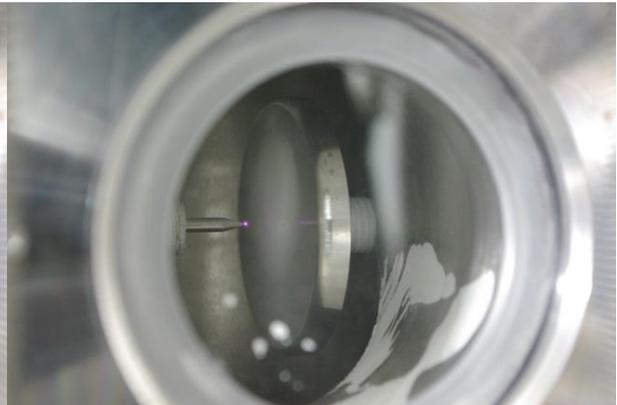
t = 1 min

Avec tension, avec flux



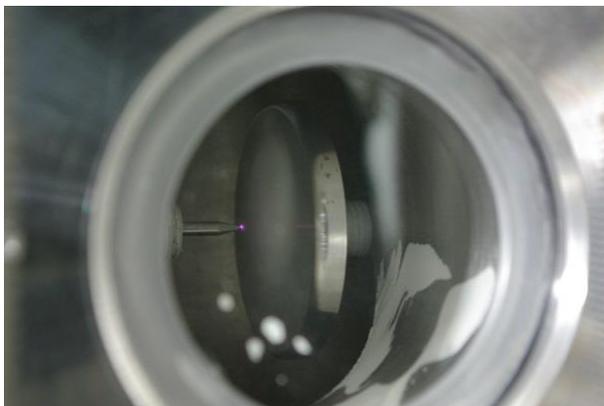
t = 3 min

Augmentation du dépôt



t = 6 min

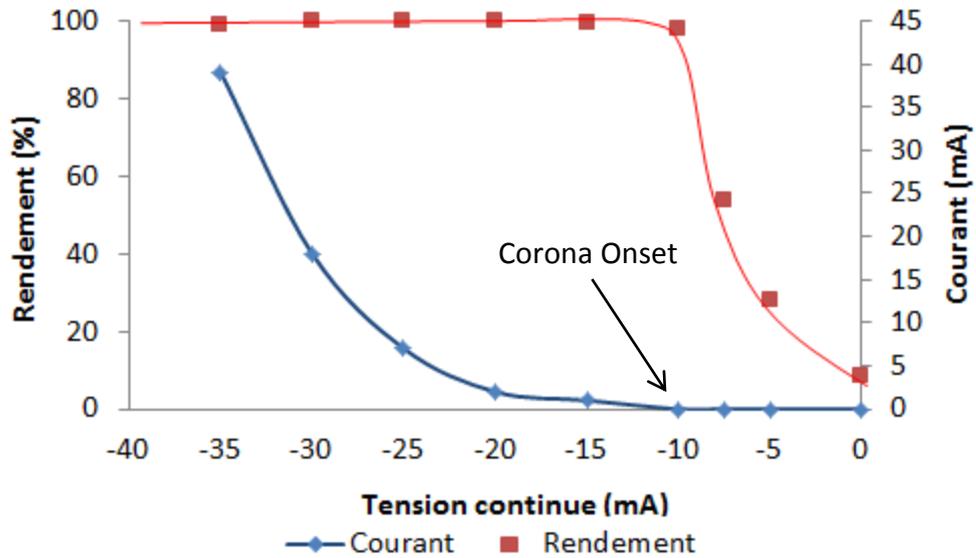
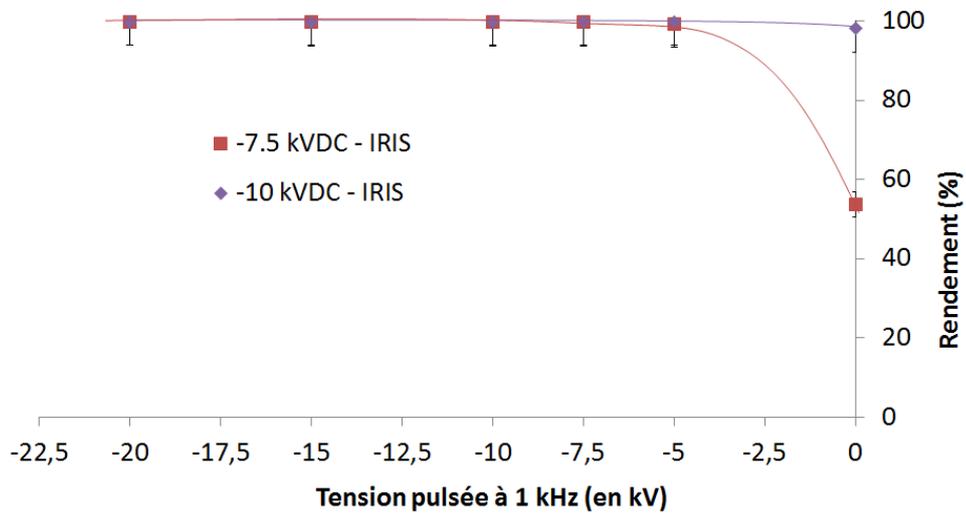
Epaissement du dépôt



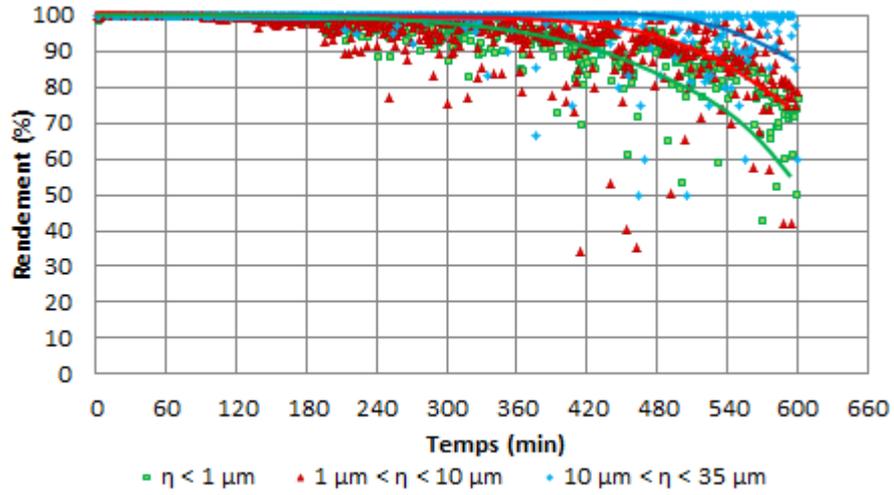
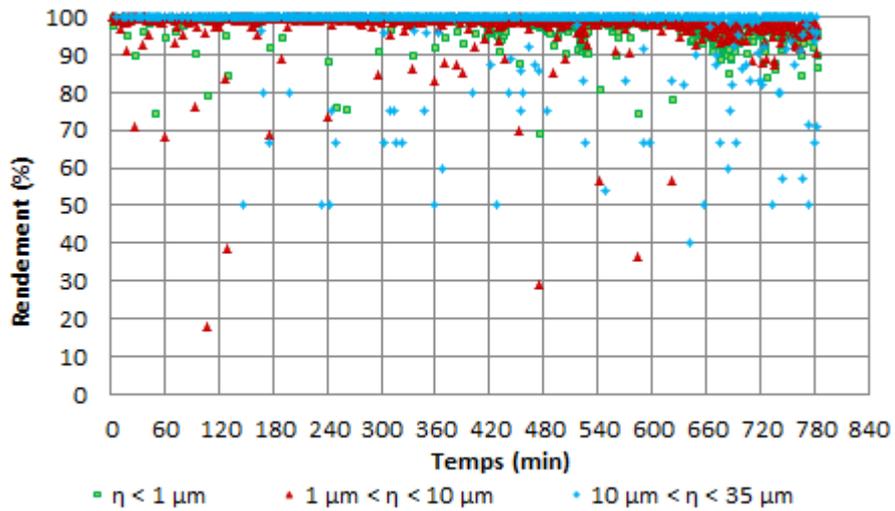
t = 13 min



Annexe H.

Evolution du rendement et du courant sous tension continue avec la poussière IRISInfluence de la tension combinée sur le rendement de filtration avec la poussière IRIS

Annexe I.

 $-15 \text{ kV}_{\text{DC}} / -15 \text{ kV}_{\text{p}}$ $(f = 1 \text{ kHz})$  $-7,5 \text{ kV}_{\text{DC}} / -7,5 \text{ kV}_{\text{p}}$ $(f = 100 \text{ Hz})$ 

Bibliographie

- [1] F. Lemont, D. F. A. Silvestre, T. Reess, et A. Russello, « Dispositif de filtration électrostatique au moyen de sites émissifs optimisés », WO2009103704 A2, 27-août-2009.
- [2] « Airparif - Réglementation - Les indices de qualité de l'air - L'indice français Atmo ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.airparif.asso.fr/reglementation/indice-qualite-air-francais>.
- [3] J. Koiwanit, A. Manuilova, C. Chan, M. Wilson, et P. Tontiwachwuthikul, « Human health risks of post- and oxy-fuel combustion carbon dioxide capture technologies: Hypothetically modeled scenarios », *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 47, p. 279-290, avr. 2016.
- [4] « CITEPA Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique - CITEPA ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.citepa.org/fr/>. [Consulté le: 06-juill-2015].
- [5] C. canadien d'hygiène et de sécurité au Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, « Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail », 21-juill-2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.cchst.com/>. [Consulté le: 21-juill-2016].
- [6] K. Cho, Y. J. Cho, D. K. Shrivastava, et S. S. Kapre, « Acute Lung Disease After Exposure to Fly Ash », *Chest*, vol. 106, n° 1, p. 309-311, juill. 1994.
- [7] « Principaux procédés de filtration des gaz ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.enssib.fr/bibliotheque-numerique/documents/61353-principaux-procedes-de-filtration-des-gaz.pdf>. [Consulté le: 22-juill-2016].
- [8] J. Vehlow, « Air pollution control systems in WtE units: An overview », *Waste Manag.*, vol. 37, p. 58-74, mars 2015.
- [9] W. Peukert et C. Wadenpohl, « Industrial separation of fine particles with difficult dust properties », *Powder Technol.*, vol. 118, n° 1-2, p. 136-148, août 2001.
- [10] H. J. White, *Industrial electrostatic precipitation*. Addison-Wesley, 1965.
- [11] A. Jaworek, A. Krupa, et T. Czech, « Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review », *J. Electrostat.*, vol. 65, n° 3, p. 133-155, mars 2007.

- [12] Z. Al-Hamouz et A. El-Hamouz, « Analysis of a wire–duct electrostatic precipitator under dust loading conditions », *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, n° 2, p. 1235-1243, févr. 2011.
- [13] G. Leonard, M. Mitchner, et S. A. Self, « Particle transport in electrostatic precipitators », *Atmospheric Environ.* 1967, vol. 14, n° 11, p. 1289-1299, 1980.
- [14] « Dry type Electrostatic precipitator : Fixed-electrode type : Hitachi Infrastructure Systems (Asia) Pte. Ltd. » [En ligne]. Disponible sur: http://www.hitachi-infra.com.sg/services/energy/dustcollection/dry_type/index.html. [Consulté le: 28-juill-2016].
- [15] S. A. Jaasund, « Control of fine particle emissions with wet electrostatic precipitation », *Environ. Int.*, vol. 6, n° 1–6, p. 233-238, 1981.
- [16] R. Gouri, N. Zouzou, A. Tilmatine, et L. Dascalescu, « Enhancement of submicron particle electrostatic precipitation using dielectric barrier discharge in wire-to-square tube configuration », *J. Electrostat.*, vol. 71, n° 3, p. 240-245, juin 2013.
- [17] J. H. Byeon *et al.*, « Collection of submicron particles by an electrostatic precipitator using a dielectric barrier discharge », *J. Aerosol Sci.*, vol. 37, n° 11, p. 1618-1628, nov. 2006.
- [18] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau, et G. Touchard, « Electrostatic precipitation in wire-to-cylinder configuration: Effect of the high-voltage power supply waveform », *J. Electrostat.*, vol. 67, n° 2–3, p. 117-122, mai 2009.
- [19] N. Zouzou, A. C. A. Ndong, P. Braud, et E. Moreau, « Time-resolved measurements of electrohydrodynamic phenomena in an AC dielectric barrier discharge electrostatic precipitator », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, n° 2, p. 651-657, avr. 2016.
- [20] R. Gouri, N. Zouzou, A. Tilmatine, E. Moreau, et L. Dascalescu, « Collection efficiency of submicrometre particles using single and double DBD in a wire-to-square tube ESP », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 44, n° 49, déc. 2011.
- [21] R. Gouri, N. Zouzou, A. Tilmatine, E. Moreau, et L. Dascalescu, « Collection of submicron particles using DBD electrostatic precipitator in wire-to-square tube configuration », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 301, juin 2011.
- [22] N. Zouzou et E. Moreau, « Effect of a filamentary discharge on the particle trajectory in a plane-to-plane DBD precipitator », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 44, n° 28, juill. 2011.

- [23] N. Zouzou, B. Dramane, E. Moreau, et G. Touchard, « EHD Flow and Collection Efficiency of a DBD ESP in Wire-to-Plane and Plane-to-Plane Configurations », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, n° 1, p. 336-343, janv. 2011.
- [24] T. Han, M. Wren, K. DuBois, J. Therkorn, et G. Mainelis, « Application of ATP-based bioluminescence for bioaerosol quantification: Effect of sampling method », *J. Aerosol Sci.*, vol. 90, p. 114-123, déc. 2015.
- [25] K.-S. Kim, S. Kim, et T. H. Jun, « Activated Carbon-Coated Electrode and Insulating Partition for Improved Dust Removal Performance in Electrostatic Precipitators », *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 226, n° 11, p. 1-13, oct. 2015.
- [26] H. Chen *et al.*, « Effects of simultaneous acoustic and electric fields on removal of fine particles emitted from coal combustion », *Powder Technol.*, vol. 281, p. 12-19, sept. 2015.
- [27] D. Zhou, Z. Luo, J. Jiang, H. Chen, M. Lu, et M. Fang, « Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment », *Powder Technol.*, vol. 289, p. 52-59, févr. 2016.
- [28] J. Zhang, D. Xu, J. Ren, H. Wu, et W. Pan, « Modeling and simulation of PM2.5 collection efficiency in a wire-plate ESP subjected to magnetic field and diffusion charging », *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 34, n° 3, p. 697-702, 2015.
- [29] E. J. Eschbach et D. E. Stock, « Optimization of collection efficiency by varying plate spacing within an electrostatic precipitator », *Environ. Int.*, vol. 6, n° 1-6, p. 177-180, 1981.
- [30] A. Silvestre de Ferron, T. Reess, L. Pécastaing, P. Pignolet, et F. Lemont, « Optimizing the operation of an electrostatic precipitator by developing a multipoint electrode supplied by a hybrid generator », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 42, n° 10, mai 2009.
- [31] M. Jedrusik, A. Swierczok, et R. Teisseyre, « Experimental study of fly ash precipitation in a model electrostatic precipitator with discharge electrodes of different design », *Powder Technol.*, vol. 135-136, p. 295-301, oct. 2003.
- [32] F. Menéndez, A. Gómez, F. Voces, et V. García, « Porcelain insulators in electrostatic precipitator », *J. Electrostat.*, vol. 76, p. 188-193, août 2015.
- [33] R. Gouri, « Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré. Application aux particules

- submicroniques », Thèse en génie électrique, Université de Poitiers, <http://www.theses.fr/16728990X>, 2012.
- [34] B. Benamar, « La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : Etude expérimentale et numérique », Thèse en sciences du bois et des fibres, Université H. Poincaré, Nancy 1, <http://www.theses.fr/2008NAN10100>, 2008.
- [35] K. R. Parker, Éd., *Applied Electrostatic Precipitation*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996.
- [36] Journées internationales francophones de tribologie, M. A. Bueno, B. Camillieri, et M. Tournalonias, Éd., *Matériaux et tribologie: actes des 26es Journées Internationales Francophones de Tribologie 2015 (JIFT 2014 - Mulhouse -26-28 mai 2014)*. Paris: Mines ParisTech : TRANSVALOR - Presses des MINES, 2014.
- [37] Boni Dramane, « Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge à barrière diélectrique : étude électrique, granulométrique et aérodynamique », Thèse en génie électrique, Université de Poitiers, 2009.
- [38] Y. Zhuang, Y. Jin Kim, T. Gyu Lee, et P. Biswas, « Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators », *J. Electrostat.*, vol. 48, n° 3-4, p. 245-260, mars 2000.
- [39] T. Czech, A. T. Sobczyk, A. Jaworek, et A. Krupa, « Corona and back discharges in flue-gas simulating mixture », *J. Electrostat.*, vol. 70, n° 3, p. 269-284, juin 2012.
- [40] M. M. Pauthenier et M. Moreau-Hanot, « La charge des particules sphériques dans un champ ionisé », *J Phys Radium*, vol. 3, n° 12, p. 590-613, 1932.
- [41] A. Sudrajad et A. F. Yusof, « Review of Electrostatic Precipitator Device for Reduce of Diesel Engine Particulate Matter », *Energy Procedia*, vol. 68, p. 370-380, avr. 2015.
- [42] R. Ladenburg, « Untersuchungen über die physikalischen Vorgänge bei der sogenannten elektrischen Gasreinigung: I. Teil Über die maximale Aufladung von Schwebeteilchen », *Ann. Phys.*, vol. 396, n° 7, p. 863-897, 1930.
- [43] W. B. Smith et J. R. McDonald, « Development of a theory for the charging of particles by unipolar ions », *J. Aerosol Sci.*, vol. 7, n° 2, p. 151-166, 1976.

- [44] K. Dastoori, B. Makin, M. Kolhe, M. Des-Roseaux, et M. Conneely, « CFD modelling of flue gas particulates in a biomass fired stove with electrostatic precipitation », *J. Electrostat.*, vol. 71, n° 3, p. 351-356, juin 2013.
- [45] R. Cochet, « Lois de charge des fines particules (submicroniques). La Physique des forces électrostatiques et leurs applications. », *CNRS*, vol. 102, p. 331-338, 1961.
- [46] P. A. Lawless et R. F. Altman, « ESPM: an advanced electrostatic precipitator model », in , *Conference Record of the 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1994*, 1994, p. 1519-1526 vol.2.
- [47] D. Brocilo, J. S. Chang, R. D. Findlay, « Modeling of electrode geometry effects on dust collection of wire-plate electrostatic precipitators », 2001.
- [48] K. R. Parker, « The precipitation of difficult dust », *J. Electrostat.*, vol. 8, n° 4, p. 355-367, avr. 1980.
- [49] V. Arrondel, J. Salvi, I. Gallimberti, et G. Bacchiega, « ORCHIDEE: Efficiency Optimisation of Coal Ash Collection in Electrostatic Precipitators », *ResearchGate*.
- [50] C.-L. Chang et H. Bai, « An experimental study on the performance of a single discharge wire-plate electrostatic precipitator with back corona », *J. Aerosol Sci.*, vol. 30, n° 3, p. 325-340, mars 1999.
- [51] B. S. Choi et C. A. J. Fletcher, « Turbulent particle dispersion in an electrostatic precipitator », *Appl. Math. Model.*, vol. 22, n° 12, p. 1009-1021, déc. 1998.
- [52] W. Deutsch, « Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator », *Ann. Phys.*, vol. 373, n° 12, p. 335-344, 1922.
- [53] M. Robinson, « A modified deutsch efficiency equation for electrostatic precipitation », *Atmospheric Environ. 1967*, vol. 1, n° 3, p. 193-204, mai 1967.
- [54] P. S. Larsen et S. K. Sørensen, « Effect of secondary flows and turbulence on electrostatic precipitator efficiency », *Atmospheric Environ. 1967*, vol. 18, n° 10, p. 1963-1967, 1984.
- [55] A. Niewulis, J. Podliński, M. Kocik, R. Barbucha, J. Mizeraczyk, et A. Mizuno, « EHD flow measured by 3D PIV in a narrow electrostatic precipitator with longitudinal-to-flow wire electrode and smooth or flocking grounded plane electrode », *J. Electrostat.*, vol. 65, n° 12, p. 728-734, nov. 2007.

- [56] G. L. Leonard, M. Mitchner, et S. A. Self, « An experimental study of the electrohydrodynamic flow in electrostatic precipitators », *J. Fluid Mech.*, vol. 127, p. 123-140, 1983.
- [57] P. Cooperman, « A new theory of precipitator efficiency », *Atmospheric Environ.* 1967, vol. 5, n° 7, p. 541-551, juill. 1971.
- [58] C. Riehle et F. Löffler, « Particle Dynamics in an Electrohydrodynamic Flow Field investigated with a two-component laser-doppler velocimeter », *Part. Part. Syst. Charact.*, vol. 10, n° 2, p. 41-47, avr. 1993.
- [59] S. Bernstein et C. T. Crowe, « Interaction between electrostatics and fluid dynamics in electrostatic precipitators », *Environ. Int.*, vol. 6, n° 1-6, p. 181-189, 1981.
- [60] J. Mizeraczyk *et al.*, « Measurements of the velocity field of the flue gas flow in an electrostatic precipitator model using PIV method », *J. Electrostat.*, vol. 51-52, p. 272-277, mai 2001.
- [61] J. S. Chang *et al.*, « On-set of EHD turbulence for cylinder in cross flow under corona discharges », *J. Electrostat.*, vol. 64, n° 7-9, p. 569-573, juill. 2006.
- [62] K. Mehalaine, D. Semmar, N. A. Messaoudene, J. M. Bauchire, et D. Hong, « Effects of corona discharges on a turbulent air flow: Simulation on a high-lift system », *J. Electrostat.*, vol. 76, p. 171-177, août 2015.
- [63] E. Moreau et G. Touchard, « Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharges », *J. Electrostat.*, vol. 66, n° 1-2, p. 39-44, janv. 2008.
- [64] E. Moreau, L. Léger, et G. Touchard, « Effect of a DC surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25m/s », *J. Electrostat.*, vol. 64, n° 3-4, p. 215-225, mars 2006.
- [65] J.-B. Lee, J.-H. Hwang, et G.-N. Bae, « Soot Particle Re-entrainment in a Corona Discharge Reactor », *JSME Int. J. Ser. B*, vol. 43, n° 4, p. 602-607, 2000.
- [66] D. Blanchard, P. Atten, et L.-M. Dumitran, « Correlation between current density and layer structure for fine particle deposition in a laboratory electrostatic precipitator », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, n° 3, p. 832-839, mai 2002.
- [67] B. Navarrete, L. F. Vilches, M. Rodriguez-Galan, B. Alonso-Fariñas, et L. Cañadas, « A pilot scale study of the rapping reentrainment and fouling in electrostatic precipitation », *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 34, n° 1, p. 7-14, janv. 2015.

- [68] L. C. Thanh, « Back corona Part I: Its formation », *J. Electrostat.*, vol. 6, n° 2, p. 139-160, avr. 1979.
- [69] L. C. Thanh, « Back corona Part II: Its effects on sparkover voltage », *J. Electrostat.*, vol. 6, n° 2, p. 161-179, avr. 1979.
- [70] G. Bacchiega, I. Gallimberti, V. Arrondel, N. Caraman, et M. Hamlil, « Back-corona model for prediction of ESP efficiency and voltage-current characteristics », *X ICESP Cairns–Australia*, 2006.
- [71] Bacchiega et Arrondel, « Static and dynamic back-corona characterization and signature ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.isesp.org/ICESP%20IX%20PAPERS/ICESP%2009%20A07.pdf>. [Consulté le: 06-nov-2015].
- [72] A. Jaworek, T. Czech, E. Rajch, et M. Lackowski, « Laboratory studies of back-discharge in fly ash », *J. Electrostat.*, vol. 64, n° 5, p. 326-337, mai 2006.
- [73] S. Masuda et A. Mizuno, « Light measurement of back discharge », *J. Electrostat.*, vol. 2, n° 4, p. 375-396, août 1977.
- [74] T. R. Snyder, P. Vann Bush, et D. H. Pontius, « Laboratory analysis of back-corona discharge », *J. Electrostat.*, vol. 19, n° 1, p. 101-114, janv. 1987.
- [75] M. Ni *et al.*, « Development of back corona discharge in a wire-cylinder electrostatic precipitator at high temperatures », *Powder Technol.*, vol. 286, p. 789-797, déc. 2015.
- [76] Q. Chang *et al.*, « Systematic Approach to Optimization of Submicron Particle Agglomeration Using Ionic-Wind-Assisted Pre-Charger », *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 15, n° 7, 2015.
- [77] J.-H. Ji, J. Hwang, G.-N. Bae, et Y.-G. Kim, « Particle charging and agglomeration in DC and AC electric fields », *J. Electrostat.*, vol. 61, n° 1, p. 57-68, mai 2004.
- [78] J. Hautanen, M. Kilpeläinen, E. I. Kauppinen, K. Lehtinen, et J. Jokiniemi, « Electrical Agglomeration of Aerosol Particles in an Alternating Electric Field », *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 22, n° 2, p. 181-189, janv. 1995.
- [79] T. Watanabe, F. Tochikubo, Y. Koizumi, T. Tsuchida, J. Hautanen, et E. I. Kauppinen, « Submicron particle agglomeration by an electrostatic agglomerator », *J. Electrostat.*, vol. 34, n° 4, p. 367-383, mai 1995.

- [80] J. Hautanen, M. Kilpeläinen, E. I. Kauppinen, J. K. Jokiniemi, et K. E. J. Lehtinen, « Electrical agglomeration of fly ash particles », *J. Aerosol Sci.*, vol. 23, Supplement 1, p. 783-786, 1992.
- [81] C. Riehle et F. Löffler, « May an Increase of the Effective Migration Rate Observed in Electrostatic Precipitators with Wider Plate Spacings or Faster Gas Streams Really Be Termed “Non-Deutschian”? », *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 16, n° 1, p. 1-14, 1992.
- [82] A. Yawootti, P. Intra, N. Tippayawong, et P. Rattanadecho, « An experimental study of relative humidity and air flow effects on positive and negative corona discharges in a corona-needle charger », *J. Electrostat.*, vol. 77, p. 116-122, oct. 2015.
- [83] J. Chen et J. H. Davidson, « Model of the Negative DC Corona Plasma: Comparison to the Positive DC Corona Plasma », *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 23, n° 1, p. 83-102, mars 2003.
- [84] Z. Ning *et al.*, « Electrode geometry optimization in wire-plate electrostatic precipitator and its impact on collection efficiency », *J. Electrostat.*, vol. 80, p. 76-84, avr. 2016.
- [85] A. Zouaghi, N. Zouzou, A. Mekhaldi, et R. Gouri, « Submicron particles trajectory and collection efficiency in a miniature planar DBD-ESP: Theoretical model and experimental validation », *J. Electrostat.*, vol. 82, p. 38-47, août 2016.
- [86] A. C. Mermigkas, I. V. Timoshkin, S. J. MacGregor, M. J. Given, M. P. Wilson, et T. Wang, « Impulsive Corona Discharges for Fine Particles Precipitation in a Coaxial Topology », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 42, n° 10, p. 3089-3094, oct. 2014.
- [87] A. C. Mermigkas, I. V. Timoshkin, S. J. MacGregor, M. J. Given, M. P. Wilson, et T. Wang, « Removal of Fine and Ultrafine Particles From Air by Microelectrostatic Precipitation », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 41, n° 10, p. 2842-2850, oct. 2013.
- [88] A. C. Mermigkas, I. V. Timoshkin, S. J. MacGregor, M. J. Given, M. P. Wilson, et T. Wang, « Superposition of DC Voltage and Submicrosecond Impulses for Energization of Electrostatic Precipitators », *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 40, n° 10, p. 2388-2394, oct. 2012.
- [89] X. Zhang, Y. Huang, Z. Liu, et K. Yan, « Aerosol emission and collection in styrene-contaminated air remediation with a multi-stage plasma system », *J. Electrostat.*, vol. 76, p. 31-38, août 2015.

- [90] H. Ait Said, H. Nouri, et Y. Zebboudj, « Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator », *J. Electrostat.*, vol. 73, p. 19-25, févr. 2015.
- [91] « Avalanche de Townsend ». [En ligne]. Disponible sur: <http://slideplayer.com/slide/4216746/>. [Consulté le: 10-août-2016].
- [92] S. Gaychet, « Modélisation des décharges couronnes négatives - application à la précipitation électrostatique », *Genie Electrique*, UPPA, 2010.
- [93] H. Raether, *Electron avalanches and breakdown in gases*. Washington: Butterworths, 1964.
- [94] L. B. Loeb et J. M. Meek, *The Mechanism of the Electric Spark*. Stanford University Press, 1941.
- [95] « Le conditionnement des déchets nucléaires ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.materials.cea.fr/PDF/MonographiesDEN/Leconditionnementdesdechetsnucleaires_CEA-fr.pdf.
- [96] « Évaluation de l'AERES sur l'unité : Département d'études du Traitement et du Conditionnement des Déchets ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aeres-evaluation.fr/content/download/23987/368788/file/E2015-EV-0912281K-S2PUR150007920-005969-RD.pdf>. [Consulté le: 25-juill-2016].
- [97] H. Chateauvieux et P. Guiberteau, « THE VALDUC WASTE INCINERATION FACILITY STARTS ACTIVE OPERATIONS (IRIS PROCESS) », 28-mars-1999. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.wmsym.org/archives/1999/60/60-4.pdf>. [Consulté le: 04-oct-2016].
- [98] A. Silvestre de Ferron, « Utilisation des fortes puissances électriques pulsées dans l'électrofiltration d'effluents gazeux. », Thèse en génie électrique, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2006.
- [99] J. Bac, « Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires », Thèse en génie électrique, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2005.
- [100] U. Becker et others, « CST's commercial beam-physics codes », http://epaper.kek.jp/ICAP06/TALKS/THM2IS03_TALK.PDF, 2006.
- [101] T. Weiland, « A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields », *Arch. Elektron. Uebertragungstechnik*, vol. 31, p. 116-120, mars 1977.

- [102] M. Bartsch *et al.*, « Solution of Maxwell's equations », *Comput. Phys. Commun.*, vol. 73, n° 1-3, p. 22-39, déc. 1992.
- [103] « CST Studio Suite ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cst.com/>. [Consulté le: 21-oct-2016].
- [104] B. Krietenstein, R. Schuhmann, P. Thoma, T. Weiland, et others, « The perfect boundary approximation technique facing the big challenge of high precision field computation », in *Proceedings of the XIX International Linear Accelerator Conference (LINAC 98), Chicago, USA, 1998*, p. 860–862.
- [105] « Model 1.109 ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.dustmonitor.com/Research/1109.htm>. [Consulté le: 05-sept-2016].
- [106] S. Masuda et A. Mizuno, « Initiation condition and mode of back discharge », *J. Electrostat.*, vol. 4, n° 1, p. 35-52, déc. 1977.
- [107] E. R. Wolcott., « Effects of Dielectrics on the Sparking Voltage », *Phys. Rev.*, vol. 12, n° 4, p. 284-292, oct. 1918.
- [108] D. Z. Pai, D. A. Lacoste, et C. O. Laux, « Transitions between corona, glow, and spark regimes of nanosecond repetitively pulsed discharges in air at atmospheric pressure », *J. Appl. Phys.*, vol. 107, n° 9, p. 93303, 2010.
- [109] C. H. Lin, B. T. Chao, et S. L. Soo, « Effect of Soot Particles on Corona Discharge », *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 13, n° 4, p. 434-449, 1990.
- [110] P. V. Bush et T. R. Snyder, « Implications of particulate properties on electrostatic precipitator and fabric filter performance », *Powder Technol.*, vol. 72, n° 3, p. 207-213, nov. 1992.
- [111] Y. Aleksin, A. Vora, et U. Riebel, « A new understanding of electric conduction in highly resistive dusts and bulk powders », *Powder Technol.*, févr. 2016.
- [112] M. Ni *et al.*, « Experimental investigation on the characteristics of ash layers in a high-temperature wire–cylinder electrostatic precipitator », *Sep. Purif. Technol.*, vol. 159, p. 135-146, févr. 2016.

Résumé

La lutte contre la pollution atmosphérique est un enjeu majeur de ce XXI^{ème} siècle. Le centre de Marcoule du CEA développe différents procédés de traitement de déchets issus du nucléaire par incinération / vitrification qui génèrent des gaz de combustion nécessitant un traitement. Pour ce faire, le CEA utilise la précipitation électrostatique, technique de traitement d'effluents gazeux employée pour la filtration des particules fines.

Cette thèse est consacrée à l'optimisation des performances d'un électrofiltre alimenté par hautes puissances pulsées. L'un des objectifs est de dimensionner et réaliser une nouvelle électrode émissive adaptée au développement d'un nouveau procédé d'incinération. Cette nouvelle électrode couplée à son alimentation HT, dont les paramètres électriques ont été optimisés, ont permis d'obtenir des rendements de filtration maximum durant des temps de fonctionnement en adéquation avec des applications industrielles. L'impact des caractéristiques physico-chimiques des poussières sur l'efficacité de filtration a été analysé.

Une étude spécifique a également porté sur l'évolution des différents régimes de décharge qui se développent dans l'électrofiltre de manière à identifier les phénomènes responsables de la chute d'efficacité du procédé. Les bénéfices de l'électrode émissive et d'un générateur hybride, combinant des impulsions de tension superposées à un fond continu, ont clairement été mis en évidence par leurs effets sur l'initiation des back corona et par conséquent sur la durée de fonctionnement à rendement optimal.

Mots-clés

Dépollution, haute tension, générateur impulsif, précipitation électrostatique, décharge couronne, back corona, particules fines.

Performance optimization of an industrial electrofiltration process supplied by high pulsed powered

Summary

The fight against air pollution is a major issue in the twenty-first century. The center of Marcoule of CEA develops different waste treatment processes by incineration / vitrification that generate combustion gases requiring treatment. To do this, the CEA uses the electrostatic precipitation, a technical waste gas treatment employed for thin particles filtration.

This thesis is dedicated to optimizing the performance of an electrofilter supplied by high pulsed powered. One of the goals is to size and achieve a new emissive electrode adapted to the development of a new incineration process. This new electrode coupled to its High Voltage (HV) power supply, which electrical parameters were optimized, allowed to obtain maximum filtration efficiency during operating times in line with industrial applications. The impact of the physicochemical characteristics of dusts on the filtration efficiency was analyzed.

A specific study also focused on the evolution of different discharge conditions that develop in the electrofilter to identify the phenomena responsible for the process efficiency fall. The intake of the emissive electrode and a hybrid generator, combining a continuous background voltage superimposed with impulses, has clearly been demonstrated by their effects on back corona initiation and therefore on the optimal efficiency operation duration.

Keywords

Decontamination, high voltage, pulse generator, electrostatic precipitation, corona discharge, back-corona, fine particles.