

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL-ABBES



Faculté de Génie Électrique
Département d'Électrotechnique



THESE

Présentée par :

REGUIG Abdeldjalil

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Électrotechnique

Option : Réseaux Électriques

Intitulé de la thèse :

***Contribution à l'étude expérimentale et
numérique de la décharge couronne dans
différents types de configurations d'électrodes***

Présentée devant le jury composé de :

Mr. TILMATINE Amar	Professeur	U.D.L. Sidi Bel-Abbès	Président
Mr. BENDAOUD Abdelber	Professeur	U.D.L. Sidi Bel-Abbès	Directeur de thèse
Mr. DASCALESCU Lucien	Professeur	Univ. Poitiers, France	Co-directeur de thèse
Mr. OUIDDIR Rabah	Professeur	UST. MB. Oran	Examineur
Mr. MILOUA Farid	MC. A	U.D.L. Sidi Bel-Abbès	Examineur
Mr. MILOUDI Mohamed	MC. A	U.D.L. Sidi Bel-Abbès	Examineur

Soutenu en : Juin 2017

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je suis très ému à l'idée que je peux oublier de remercier certains, c'est pourquoi je témoigne tout d'abord ma reconnaissance à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, le professeur Abdelber BENDAOUD, pour avoir cru en mes capacités pour mener à bien ce travail qu'il a toujours dirigé avec une très grande rigueur. Sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements durant toutes ces années m'ont été d'une grande utilité, sur le plan humain ainsi que scientifique. Qu'il trouve ici le témoignage de ma vive reconnaissance.

Ma profonde gratitude, de façon très particulière, s'adresse aussi à mon co-directeur de thèse, Professeur Lucian DASCALESCU, pour son aide précieuse et les remarques utiles qu'il m'a procurées durant le stage que j'ai effectué pendant neuf mois au sein du Laboratoire d'Electrostatique Appliquée de l'IUT d'Angoulême (France). Je le remercie profondément pour tout ce qu'il a apporté à cette thèse, et aux différents articles publiés, aussi bien pour son encadrement scientifique que pour sa disponibilité et ses grandes qualités humaines en particulier sa gentillesse.

Je remercie le Professeur Amar TILMATINE d'avoir accepté d'être le président du jury, je le remercie en particulier de m'avoir facilité l'accès au laboratoire APELEC et aussi pour ses conseils, son admirable esprit scientifique, sa disponibilité, sa gentillesse, ses orientations et son soutien.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les membres qui m'ont fait l'honneur d'accepter avec intérêt de prendre part au jury de ma soutenance de thèse : Professeur Rabah OUIDDIR Professeur à l'université Mohammed Boudiaf d'Oran ; Docteur Farid MILOUA et Docteur Mohamed MILOUDI Maîtres de conférences A à l'université de Sidi Bel-Abbès. Je les prie de bien vouloir accepter mes plus vifs et sincères remerciements.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Professeur Karim MEDLES et Docteur Thami ZEGHLOUL, pour le soutien scientifique de grande qualité qu'ils m'ont apporté pendant mon stage à Angoulême.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes collègues, membres des laboratoires APELEC et IRECOM de l'Université de Sidi-Bel-Abbès, ainsi que de l'Institut PPRIME de l'IUT d'Angoulême, qui ont été proches de moi ces dernières années.

Je termine mes remerciements en ayant une pensée particulière à ma mère et mon père pour l'enseignement moral et humain qu'ils m'ont donné, ainsi que pour la patience et l'aide accordées durant ces années d'étude, qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude. Enfin, je salue le soutien et l'encouragement de ma sœur, mon frère et tous les membres de ma famille. Mille merci à toutes et à tous.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I. État de l'art

I.1. Physique sur la décharge couronne.....	5
I.1.1. Mécanismes de la décharge dans un gaz.....	6
I.1.2. Vent ionique.....	13
I.1.3. Paramètres influant sur le développement de la décharge couronne	14
I.2. Applications de la décharge couronne.....	15
I.3. Etat de charge d'un matériau diélectrique.....	18
I.3.1. Charge par décharge couronne	19
I.3.2. Théorie du déclin de potentiel.....	19
I.4. Analyse numérique du champ électrique généré par différentes configurations d'électrodes	22
I.4.1. Méthodes numériques utilisées	22
I.4.2. Méthode des éléments finis.....	22
I.4.3. Organisation des logiciels de calcul.....	23
I.4.4. Présentation du logiciel « <i>Comsol Multiphysics</i> ».....	24
I.5. Conclusions	25

Chapitre II. Installations expérimentales et méthodes d'analyses

II.1. Types d'électrodes utilisées	27
II.1.1. Electrodes couronne de type « duales »	27
II.1.2. Electrodes couronne munis d'un écran	29
II.1.3. Association électrode-bandes.....	30
II.1.4. Système d'électrode de type « triode ».....	31
II.2. Caractérisation des configurations d'électrodes couronne.	33
II.2.1. Caractéristiques courant-tension ($I-V$)	33
II.2.2. Distribution de la densité de courant.....	34
II.2.3. Analyse des impulsions de courant de couronne	35
II.2.4. Distribution de potentiel électrique.....	35
II.3. Installations de séparation électrostatique	41
II.3.1. Séparateur électrostatique à cylindre tournant	41
II.3.2. Séparateur électrostatique à tapis roulant.....	44
II.4. Analyse numérique du champ électrique par « <i>Comsol Multiphysics</i> »	48
II.4.1. Modèle développé	48
II.4.2. Maillage.....	50
II.5. Conclusions	51

Chapitre III. Étude des caractéristiques électriques des électrodes couronne

III.1. Caractéristiques courant-tension (I - V)	53
III.1.1. Rôle du cylindre électrostatique	53
III.1.2. Effet de la polarité de la tension appliquée	55
III.1.3. Différents types d'électrodes couronne « duales »	57
III.1.4. Electrode couronne de type « duale » munie d'un écran métallique	60
III.1.5. Association électrode-bandes	64
III.1.6. Système d'électrode de type « triode »	67
III.2. Distribution de la densité de courant	70
III.2.1. Effet de la polarité de la tension appliquée	71
III.2.2. Electrode couronne de type « duale » munie d'un écran	71
III.2.3. Association électrode-bandes	73
III.2.4. Système d'électrode de type « triode »	76
III.3. Evolution des tensions seuil de début couronne V_{onset} et de claquage V_c en fonction de la distance D	78
III.3.1. Tension seuil d'amorçage couronne V_{onset}	78
III.3.2. Tension de claquage V_c	78
III.4. Analyse expérimentale du courant de la décharge couronne négative	79
III.5. Conclusions	81

Chapitre IV. Étude de la distribution du potentiel électrique à la surface des matériaux isolants

IV.1. Modes de mesure de potentiel de surface	84
IV.1.1. Régime « statique »	84
IV.1.2. Régime « dynamique »	85
IV.2. Caractérisation des matériaux isolants utilisés	87
IV.3. Distribution spatiale du potentiel de surface	89
IV.3.1. Effet de la présence de l'écran	90
IV.3.2. Effet de la présence des bandes métalliques	90
IV.3.3. Effet de la distance inter-électrodes D	92
IV.3.4. Effet de la géométrie de la grille	94
IV.4. Déclin de potentiel à la surface des matériaux isolants	94
IV.4.1. Effet de la présence de l'écran	95
IV.4.2. Effet du niveau de la tension appliquée	97
IV.4.3. Effet du temps de chargement T_c	99
IV.5. Conclusions	100

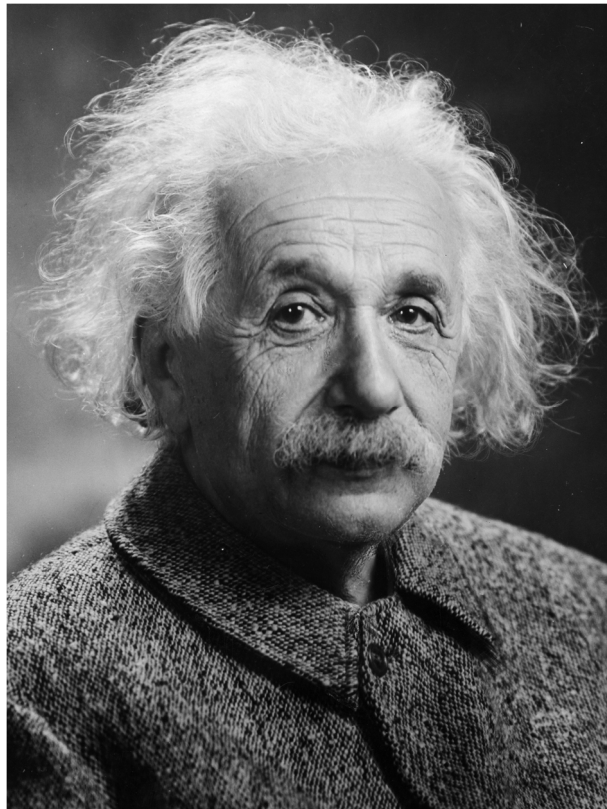
Chapitre V. Application à la séparation électrostatique des matériaux granulaires

V.1. Charge acquise par les particules isolantes	102
V.2. Séparateur électrostatique à cylindre tournant	104
V.3. Séparateur électrostatique à tapis roulant.....	107
V.3.1. Pertes dues au vent ionique	107
V.3.2. Tests de chargement par effet couronne.....	109
V.3.3. Tests de séparation électrostatique.....	112
V.4. Conclusions.....	113

Conclusion générale	114
----------------------------------	------------

Bibliographie

INTRODUCTION GENERALE



Albert Einstein

(1879 – 1955)

« Intellectual growth should commence at birth and cease only at death »

INTRODUCTION GENERALE

Dès les débuts de l'électrotechnique des hautes tensions, l'attention des ingénieurs et des chercheurs fut attirée par le curieux phénomène désigné par « Effet couronne » ou « Corona », qui est utile dans de nombreuses applications (traitement de surfaces, dépoussiérage électrique, traitement de l'eau par l'ozone, séparation électrostatique, etc...) mais qui est également nuisible dans d'autres situations (pertes d'énergie sur les lignes de transmission, perturbations radioélectriques, défauts d'isolement, etc...)

Des nouvelles applications liées d'une façon ou d'une autre à la protection de l'environnement, telles que la séparation et la précipitation électrostatique, la production des medias fibreux non-tissés utilisés pour la filtration d'air, se sont développées grâce aux études récentes menées sur les décharges couronne. Ces études ont souligné l'importance du lien entre l'amplitude du courant électrique produit par la décharge couronne et les valeurs de charges ioniques acquises par les différents matériaux diélectriques. Elles ont montré la nécessité de bien caractériser les différentes configurations d'électrodes produisant la décharge couronne, en vue de leur utilisation dans divers processus électrostatiques.

En termes d'applications industrielles, deux technologies innovantes sont à l'origine de notre étude : les procédés utilisant la décharge couronne pour la charge électrostatique des medias filtrants non-tissés et pour la séparation des matériaux granulaires ou pulvérulents en champ électrique intense.

La recherche et le développement des systèmes de filtration d'air utilisant des médias fibreux non-tissés à électret, pour habitacle d'automobile, présente un axe de recherche assez important. En effet, l'amélioration de l'efficacité des filtres d'air est une préoccupation majeure de l'industrie automobile, soucieuse d'assurer toutes les prémisses d'un transport durable. Les technologies d'épuration des particules diffèrent suivant que l'air à traiter est rejeté dans l'atmosphère ou qu'il est confiné dans un lieu clos. Dans les espaces intérieurs ventilés ou climatisés, la filtration sur médias fibreux non-tissés est couramment utilisée. Les forces électrostatiques de collecte des particules, présentes dans les filtres à électret, augmentent notablement l'efficacité de la filtration des particules plus fines, de taille submicronique.

En matière de traitement des substances granulaires par voie électrique, les séparateurs électrostatiques à effet couronne sont les plus utilisés ; l'étude de leur processus de séparation se ramène à l'étude de l'équilibre des forces mécaniques et électriques évolutives dans le temps. Il semble de nos jours, que les méthodes les plus

adéquates de la séparation isolant-métal sont celles utilisant la décharge couronne pour charger les particules à traiter.

L'objectif de la thèse est d'étudier les effets des différents facteurs influant sur le développement de la décharge couronne produite par une électrode couronne de type « duale ». Ces types de configurations sont largement utilisés dans les processus de séparation électrostatique pour charger les particules isolantes, et dans les systèmes d'électrodes de type « triode » dédiés au chargement des medias fibreux non-tissés utilisés comme des filtres à électrets. Le processus de charge par décharge couronne est réalisé dans un premier temps, sur des plaques en polymères et sur des medias fibreux posés sur l'électrode plane dans l'air atmosphérique et chargés par diverses configurations d'électrodes développées dans le cadre de cette thèse. Par la suite, des tests de chargement ont été réalisés sur des séparateurs couronne-électrostatiques à savoir : le séparateur à cylindre tournant et le séparateur multifonctionnel à tapis roulant.

Dans un premier temps, les effets de plusieurs paramètres sur les caractéristiques courant-tension $I(V)$ et la distribution de la densité de courant au niveau de l'électrode plane ont été étudiés : le niveau et la polarité de la tension appliquée, la présence des écrans métalliques à proximité de l'électrode couronne et également les dimensions géométriques des différents éléments constituant la configuration d'électrode « duale ». Les électrodes couronne munies d'un écran ou de bandes métalliques ont été testées dans les processus de charge des medias filtrants non-tissés et aussi avec des plaques en polymères présentant une meilleure homogénéité de structure. Des calculs numériques du champ électrique sur la surface du fil ionisant sont discutés en rapport avec les résultats obtenus expérimentalement.

Les recherches développées ont été réalisées sur deux sites : d'abord au niveau du laboratoire APELEC de l'université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbès pour déterminer les caractéristiques électriques des différentes configurations d'électrodes étudiées, puis au laboratoire d'Electrostatique appliquée de l'Institut PPRIME, UPR 3346 CNRS – Université de Poitiers – ENSMA, sur le site de l'Institut Universitaire de Technologie d'Angoulême (ce laboratoire est reconnu mondialement pour sa production scientifique dans le domaine) où on a étudié l'évaluation d'une part de l'état de charge des matériaux isolants et d'autre part, le rendement de la séparation électrostatique utilisant l'effet couronne.

La thèse s'articule autour de cinq chapitres : le premier est une synthèse bibliographique de l'état de l'art de la décharge couronne. Nous exposerons une vue générale sur le mécanisme de la formation de la décharge couronne dans les intervalles d'air, en décrivant les différentes étapes qui la constituent. Ensuite, la présentation des différentes applications industrielles de la décharge couronne sera suivie par une description générale des différents processus caractérisant l'état de charge des

matériaux diélectriques ainsi que les méthodes numériques couramment utilisées pour calculer le champ électrique.

Le deuxième chapitre contient les informations essentielles concernant la composition des bancs expérimentaux, notamment sur des dispositifs utilisés pour générer la décharge couronne et ainsi, les équipements nécessaires pour les expériences effectuées, à savoir : (1) le relevé des caractéristiques courant-tension $I(V)$, (2) la distribution de la densité de courant et (3) la mesure du potentiel de surface au moyen d'une sonde électrostatique. Les deux séparateurs électrostatiques faisant l'objet de notre étude sont également présentés. Une brève description des modèles numériques établies pour les différentes configurations d'électrodes étudiées complète ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, les résultats expérimentaux concernant le relevé des caractéristiques $I(V)$ et la mesure de la densité de courant d'une décharge couronne générée par différents types d'arrangements d'électrodes sont accompagnés par l'interprétation des résultats de l'analyse numérique du champ électrique obtenu par le logiciel « Comsol Multiphysics ». Une attention particulière est accordée aux impulsions de Trichel générées en polarité négative.

Le quatrième chapitre est entièrement dédié à la caractérisation de l'état de charge des matériaux isolants chargés par effet couronne. L'analyse des particularités du mode de fonctionnement de la sonde de mesure du voltmètre électrostatique utilisée pour la mesure du potentiel de surface facilitera l'interprétation des valeurs lues en mode statique et dynamique (sonde immobile ou en mouvement relatif à l'échantillon examiné). Les différents résultats relatifs à la distribution spatiale ainsi que le déclin de potentiel de surface seront présentés en fonction de plusieurs paramètres : le type de la configuration d'électrode utilisée, distance entre électrodes, géométrie de la grille utilisée dans le système d'électrode de type « triode » et le niveau de la tension appliquée.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de l'efficacité de plusieurs types de configurations d'électrodes dédiées à la charge des matériaux granulaires et pulvérulents dans deux séparateurs électrostatiques différents : le séparateur à cylindre tournant et le séparateur à tapis convoyeur.

Enfin, la conclusion générale met en valeur les apports de cette étude et présente quelques perspectives de ce travail de thèse.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

En 1752, Benjamin Franklin effectua l'expérience du cerf-volant électrique à Philadelphie. Il mit pour la première fois en évidence la présence d'électricité dans les nuages. Ce fait d'histoire représente le premier pas dans la recherche sur les décharges électriques. Thomas François Dalibard mit en œuvre le dispositif imaginé par Franklin, dont ce dernier avait surestimé la difficulté, et réalisa le paratonnerre.

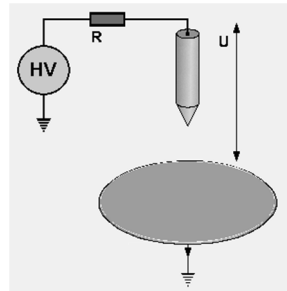
En 1915, F. W. Peek [1] réalisa la première étude sur l'effet couronne. La décharge couronne est une décharge qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes fortement asymétriques entre lesquelles s'établit un champ électrique hétérogène. Le halo lumineux apparaissant au seuil de la décharge au niveau de l'électrode à fort champ est à l'origine de la dénomination générale de *décharge couronne*. Des progrès ont été réalisés dans la compréhension du phénomène de la décharge couronne mais les recherches sont toujours en cours, en particulier dans le domaine des applications liées à ces décharges [2, 3].

De nos jours, la compréhension des phénomènes de la décharge couronne présente un grand intérêt du point de vue industriel et de l'environnement. On peut citer parmi les principales applications, celles relatives à la préservation de l'environnement (précipitateurs électrostatiques, filtres à électrets, séparateurs électrostatiques, etc...) et à plusieurs d'autres applications incontournables : photocopieurs, imprimantes [4].

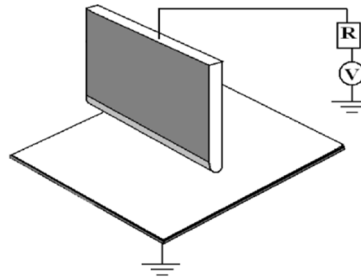
Ce chapitre est consacré à l'étude bibliographique de la théorie de la décharge couronne. En premier lieu, nous décrirons les mécanismes de développement de la décharge dans les deux polarités positive et négative et en tension alternative. Par la suite, nous citerons certaines applications essentielles de la décharge couronne dans le domaine de l'électrostatique. Nous évoquerons également le phénomène de charge d'un matériau diélectrique exposé à la décharge couronne, en expliquant les processus responsables du déclin de potentiel de surface. La dernière partie sera consacrée à la description de la méthode de calcul du champ électrique utilisée pour la modélisation numérique de la décharge couronne présentée en rapport avec les résultats expérimentaux. Cette partie a pour but de déterminer numériquement les distributions du champ électrique dans les diverses configurations d'électrodes développées dans le cadre de cette thèse.

I.1. PHYSIQUE DE LA DÉCHARGE COURONNE

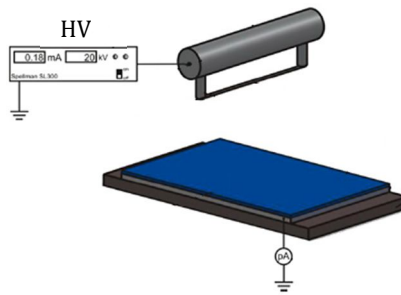
La décharge couronne représente l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure, les électrodes étant soumises à une différence de potentiel élevée. On désigne sous le nom d'électrode active celle qui possède le plus petit rayon de courbure, la décharge étant positive ou négative suivant que cette électrode joue le rôle d'anode ou de cathode. Le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes ou molécules en électrons et ions positifs.



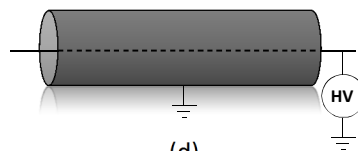
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure I-1. Différentes géométries produisant la décharge couronne, (a) pointe-plan, (b) lame-plan, (c) cylindre-fil-plan, (d) fil-cylindre.

Les types d'ions générés dans des décharges couronne positives et négatives ont été déterminés par plusieurs auteurs utilisant des techniques de spectroscopie de masse. Leurs études ont montré que les types d'espèce générées par la décharge couronne dépendent fortement du type de gaz présent au voisinage de la pointe. Dans l'air, les espèces dominantes pour une décharge couronne positive sont des ions hydratées avec la formule générale $(\text{H}_2\text{O})_n\text{H}^+$ où n est un nombre entier qui augmente avec l'humidité relative. Pour des faibles taux d'humidité, d'autres espèces d'ions dominant, tels que $(\text{H}_2\text{O})_n\text{NO}^+$ et $(\text{H}_2\text{O})_n(\text{NO}_2)^+$. Pour des couronnes négatives, les ions les plus importants sont CO_3^- ; à 50% d'humidité relative environ 10% d'ions sont sous forme hydratée $(\text{H}_2\text{O})_n\text{CO}_3^-$ [5].

D'autres types d'ions peuvent être générés par la décharge couronne tels que, (positifs) : CO^+ , C^+ , C_2O^+ , C_3O_2^+ , CO_2^+ , H_3O^+ , CHO^+ , CHO_2^+ et (négatifs): O^- , O_2^- , O_3^- , CO_3^- , CO_4^- , H^- , OH^- [6].

Sur la base de la géométrie d'électrodes, différentes configurations de la décharge couronne existent. Aiguille-plan (ou pointe-plan) [8], fil-cylindre [9], lame-plan [10], et cylindre-fil-plan (duale) [11] sont les plus connus. En général, les configurations composées du fil et cylindre sont les plus utilisées dans les applications concernant le traitement des gaz. Des schémas descriptifs de ces configurations sont présentés sur la figure I-1. Des configurations multi-électrodes sont également utilisées dans l'industrie, par exemple, un ensemble d'aiguilles ou des fils pourraient être placés à proximité du plan de masse dans les applications impliquant le passage du flux d'air à travers le volume de la décharge couronne (Fig. I-2) [7]. Il est impératif de noter que la plage de la tension appliquée dans la décharge couronne doit être plus élevée que le niveau seuil d'amorçage couronne (qui dépend de la courbure de la pointe de l'électrode couronne et de la longueur d'intervalle d'air séparant les deux électrodes), et inférieure à la tension de claquage.



Figure I-2. Aspect lumineux de la décharge couronne dans une configuration multi-pointes [7].

I.1.1. Mécanismes de la décharge dans un gaz

Le phénomène de la décharge couronne est le résultat de la collision des électrons accélérés avec des molécules neutres du gaz, provoquant un déclenchement d'une avalanche d'ionisation dans la région de champ électrique intense (près de l'électrode couronne). Les électrons qui se trouvent dans une région de champ électrique faible plus

loin de l'électrode couronne, ne possèdent pas suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules, et vont s'attacher aux molécules neutres. En d'autres termes, l'espace entre les électrodes peut être divisé en deux régions : la zone d'ionisation, où les électrons déclenchent l'ionisation des molécules neutres; ou de nouvelles paires électrons-ions positifs sont créés; et la zone dérive, dans laquelle les électrons ont une énergie plus faible et peuvent s'attacher aux molécules neutres pour former des ions négatifs lors d'une décharge négative, contrairement à la décharge positive où un nuage d'ions positifs prend naissance dans cette zone (Fig. I-3).

a) Polarité positive

Si l'électrode couronne (avec le plus faible rayon de courbure) est connectée à une tension continue positive, la décharge est appelée décharge couronne positive. Dans ce cas, les électrons et les ions négatifs sont rapidement absorbés par la pointe (ou le fil). Au même temps, les ions positifs migrent plus loin de la pointe pour être déposés finalement sur l'électrode plane reliée à la terre. En plus des électrons et des ions chargés, il existe aussi des molécules excitées et des atomes présents dans l'intervalle de la décharge.

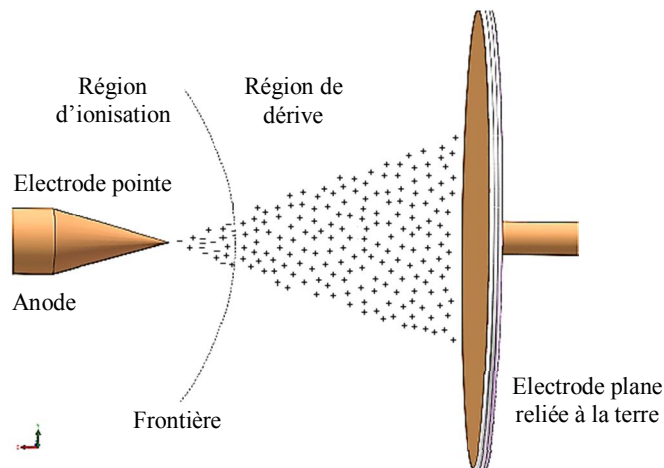


Figure I-3. Topographie de la décharge couronne positive en configuration pointe – plan.

Dans le processus de retour de quelques espèces excitées à leurs états principaux, des photons sont émis, qui déclenchent à leur tour le processus de la photo-ionisation. En d'autres termes, l'ionisation des molécules neutres, en raison de l'impact des photons, est appelée photo-ionisation. Il est généralement connu dans la littérature que la photo-ionisation dans l'air est le résultat de l'absorption, par les molécules d'oxygène, des photons émis par le retour des molécules d'azote excitées à leurs états d'origine. Ceci est le mécanisme clé pour le maintien de la décharge couronne positive. Comme les électrons énergétiques entrent en collision avec les différentes molécules présentes dans le gaz, ils génèrent des ions positifs ainsi que des molécules excitées, les photons sont émis par le retour des espèces excitées à leurs états principaux. Ces photons sont capables de traverser une certaine distance et de déclencher le processus de photo-ionisation à un endroit plus loin de l'anode.

Le processus de photo-ionisation, contrairement à son homologue d'ionisation par impact (l'impact des molécules neutres avec les électrons énergétiques), est un phénomène non localisé. Les électrons produits par la photo-ionisation, sur leurs chemins vers la pointe, déclenchent l'ionisation par impact et l'excitation des différentes molécules et, par conséquent, la décharge est auto-entretenu.

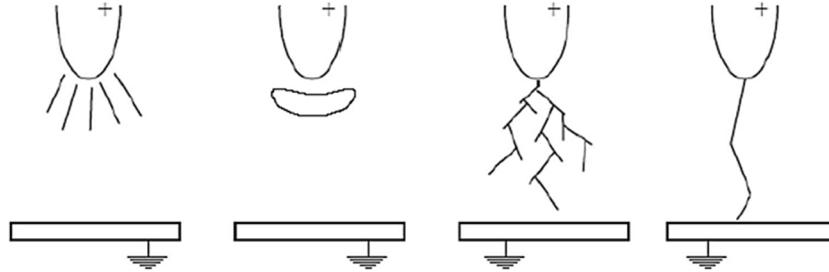


Figure I-4. Différents régimes de la décharge couronne positive en augmentant la tension appliquée.
(de gauche à droite : bourse pulse, glow, streamer, et l'arc) [12].

Dans l'intervalle d'air pointe-plan à la pression atmosphérique, différents phénomènes répétitifs peuvent être observés selon la valeur de la tension (Fig. I-4) [12]. Le courant de la décharge couronne étant de forme d'onde impulsionnelle, la fréquence de ces impulsions varie en fonction de la tension appliquée (Fig. I-5). On distingue trois régimes entre le seuil V_0 de l'apparition de l'effet couronne et la tension de claquage V_c :

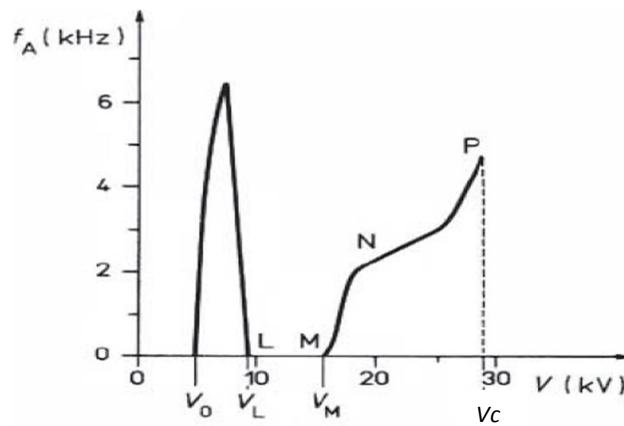


Figure I-5. Fréquence d'apparition des impulsions de couronne dans l'air en fonction de la tension appliquée V en configuration pointe – plan, et en polarité positive; $D = 31$ mm, rayon de la pointe = 0,17 mm [13].

- Entre V_0 et V_L , on observe des impulsions (*burst pulses*) qui se manifestent au niveau de la pointe et dont le courant est faible (de l'ordre du microampère) ; à ces impulsions s'ajoutent des dards préliminaires (*pre-onset streamers*) qui s'étendent assez loin de la pointe.

- Entre V_L et V_M , apparaît un régime parfaitement stabilisé dans lequel subsiste un courant continu, sans aucune impulsion; cette région est appelée zone d'Hermstein (*glow*). Le courant continu de la zone d'Hermstein se manifeste par une décharge lumineuse entourant l'électrode [13].

- Au-delà de V_M , de nouvelles impulsions régulières apparaissent avec des dards (Streamers) qui soit disparaissent avant d'atteindre la cathode (dards pré-disruptifs ou *prebreakdown streamers*, zone MN), soit traversent tout l'espace inter électrodes (dards disruptifs ou *breakdown streamers*, zone NP) conduisant au phénomène de claquage à partir de la tension disruptive V_c .

b) Polarité négative

Si l'électrode active est reliée à une tension continue négative, la décharge est appelée décharge couronne négative. Les différents régimes de la décharge négative, en augmentant le niveau de la tension appliquée, sont représentés sur la figure I-6. Les régimes, comme il est montré de gauche à droite, sont : les impulsions de Trichel, le régime glow (lueur négative), et l'arc.

Le courant de la décharge dans le régime d'impulsions de Trichel apparaît sous la forme d'un train d'impulsions régulières nommées Trichel d'après G. W. Trichel (Fig. I-7) [14]. Ces impulsions ont été découvertes premièrement comme un train d'impulsions régulières de courant dans une configuration pointe-plan, avec l'aiguille connectée à une tension continue négative.

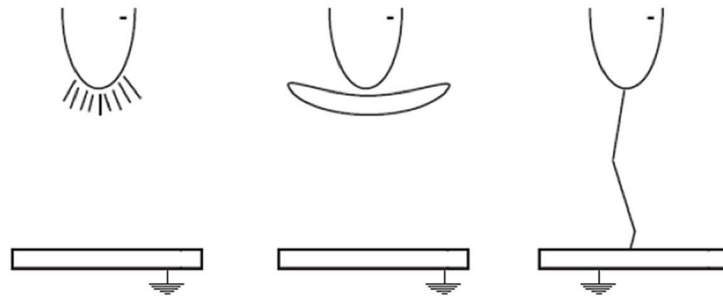


Figure I-6. Différents régimes de la décharge couronne négative en augmentant la tension appliquée dans une configuration pointe-plan. De gauche à droite : impulsions de Trichel, glow, et l'arc [12].

Trichel a mené les expériences en plaçant l'aiguille à 30 mm au-dessous du plan relié à la terre. Il a répété les expériences avec 4 aiguilles différentes et déduit par conséquent l'hypothèse que l'amplitude et la fréquence des impulsions ont une relation définie avec le courant de la décharge, la taille de l'aiguille et la pression du gaz. Il a également prédit que la fréquence est indépendante de la distance entre la pointe et le plan.

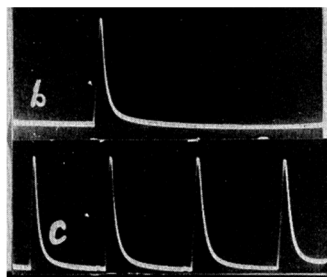


Figure I-7. Train d'impulsions régulières observées par G. W. Trichel [14].

Les impulsions de Trichel, qui sont un train régulier d'impulsions de courant observé dans la décharge couronne négative, sont le résultat d'une série de processus répétitifs dans l'espace inter-électrodes. En raison de la transition rapide du régime d'impulsions Trichel au régime d'arc en pression atmosphérique, dans la pratique, il est difficile de réaliser un état stable d'une couronne « glow » négative. En fait, la stabilité de la couronne « glow » négative est classiquement connu pour exister que dans les basses pressions des tubes à gaz scellés. Cependant, ce régime est réalisable à la pression atmosphérique en introduisant un flux de gaz dans l'intervalle de la décharge qui éteint les instabilités thermiques par l'enlèvement convective de l'énergie dissipée dans la décharge. La modification de la forme de l'électrode plane à une forme cratère en dessous de la pointe peut être utilisée pour stabiliser le régime « glow » négative aussi [15].

Comme mentionné précédemment, il existe deux régions distinctes dans la décharge couronne : la région proche de la pointe, région d'ionisation et la région plus loin de la pointe, région de dérive. Dans la région d'ionisation, en raison de la collision des électrons fortement accélérés avec les molécules neutres, une avalanche d'ionisation se produit. Dans la plupart des cas, cette région est inférieure à une fraction de millimètre autour de l'électrode couronne. D'autre part, la région de dérive est la zone remplie d'ions négatifs la plupart du temps. Dans la zone d'ionisation, la réaction d'ionisation prédomine par rapport à la réaction d'attachement. La limite entre la zone d'ionisation et la zone de dérive est généralement défini où le champ électrique réduit :

$$\frac{E}{N} = 120 \text{ Td} \quad (\text{I-1})$$

Avec E est l'amplitude du champ électrique et N est la densité des molécules neutres, $1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ V.m}^2$.

Au-delà de la zone d'ionisation, le champ électrique diminue et les électrons ne possèdent pas suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules neutres. Par conséquent, la réaction de l'attachement devient prédominante dans la zone de dérive, le nombre d'électrons décroît, à condition que le gaz contient suffisamment de molécules électronégatifs. Etant donné que dans la région de dérive, il peut y avoir quelques électrons laissés avec suffisamment d'énergie pour l'ionisation des molécules de gaz, certains auteurs supposent une autre couche, dite couche de plasma, qui commence à partir de la limite d'ionisation et se prolonge jusqu'à quelques millimètres de la région de dérive. Davidson [16] a défini cette région comme une région de plasma couronne, dans laquelle certaines réactions chimiques renforcée par effet couronne sont possibles et sa limite est donnée par le rayon auquel le champ électrique réduit soit égal à :

$$\frac{E}{N} = 80 \text{ Td} \quad (\text{I-2})$$

A cette valeur, l'énergie cinétique moyenne des électrons est à 1,85 eV et quelques électrons sont assez énergétiques pour provoquer l'ionisation par impact. La figure I-8

montre le schéma de l'ionisation et les régions de dérive dans une décharge couronne pointe-plan négative.

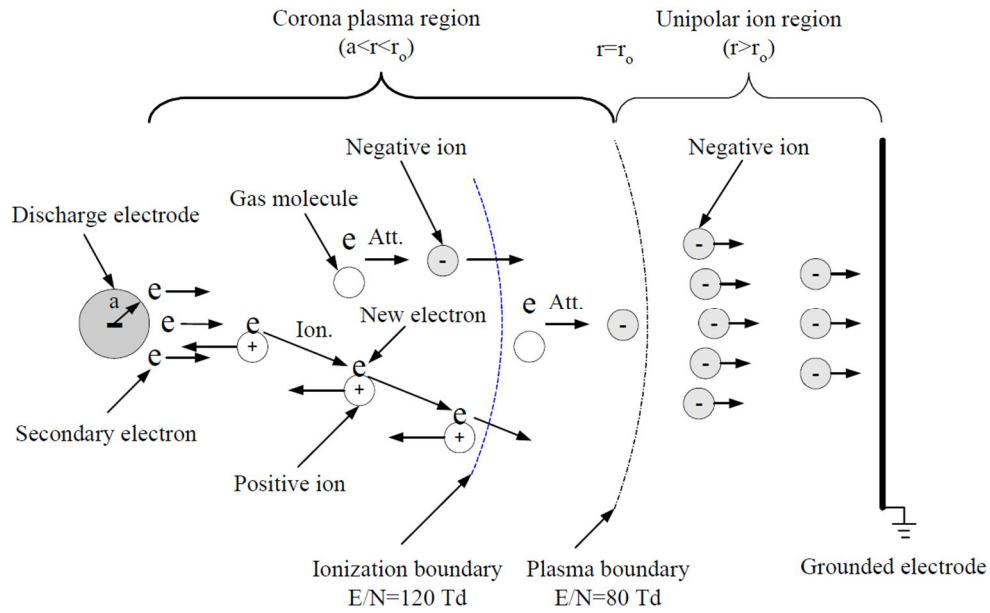


Figure I-8. Schéma des régions d'ionisation et de dérive dans une décharge couronne négative [17].

À la suite de l'avalanche d'ionisation, un nuage d'ions positifs est créé à proximité de l'électrode couronne dans la région d'ionisation. D'autre part, les réactions d'attachements créent un nuage d'ions négatifs juste en dehors de la zone d'ionisation. Lorsque ces nuages deviennent suffisamment denses pour perturber le champ Laplacien créé entre les deux électrodes, le champ électrique dans la zone située entre les deux nuages diminue. Par ailleurs, le champ électrique entre les ions positifs et l'électrode couronne est augmenté (Fig. I-9).

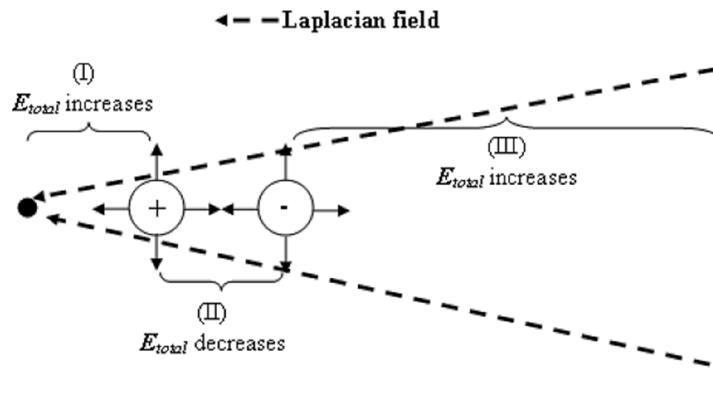


Figure I-9. Schéma de la perturbation du champ Laplacien quand les nuages d'ions positifs et négatifs deviennent assez denses [17].

Le champ électrique intensifié dans la zone d'ionisation accélère l'avalanche d'ionisation dans cette région, ce qui provoque une intensification très rapide du courant de couronne. Dès que le nuage d'ions négatifs devient suffisamment dense, la

couche d'ionisation et, par conséquent, l'avalanche d'ionisation est limitée à la région (I), comme le montre la figure I-9. D'autre part, étant donné que l'électrode couronne à une polarité négative, les ions positifs, se dirigent vers l'électrode couronne. Lorsque le point de la concentration maximale des ions positifs atteint l'électrode couronne, l'injection des électrons secondaires à partir de l'aiguille atteindra son maximum. Par conséquent, le courant de couronne sera à son maximum aussi. A ce moment, l'avalanche d'ionisation n'a pas encore cessé. Pendant une courte période après le maximum de l'impulsion, l'avalanche d'ionisation se produit toujours. Par conséquent, le nombre total des électrons dans l'espace augmente encore après le pic de l'impulsion. Cependant, étant donné que les ions positifs déposés sur l'électrode couronne par un taux de dépôt plus grand que le taux de production, le nombre d'ions positifs diminue au cours de cette période.

Enfin, les ions négatifs, qui sont accumulés tout au long du processus au niveau du bord de la zone d'ionisation, deviennent suffisamment denses pour diminuer le champ électrique dans toute la région d'ionisation. Par conséquent, le processus d'ionisation cesse et l'impulsion de courant s'affaiblit. Après cette étape, la réaction d'attachement est le seul processus présent qui augmente le nombre total d'ions négatifs dans l'intervalle de la décharge.

Il est généralement accepté que l'émission secondaire des électrons par l'électrode couronne est le mécanisme principal pour maintenir la décharge couronne négative. Ces électrons sont éjectés de la surface de l'électrode couronne en raison du bombardement de la surface de l'électrode par les ions positifs. Étant donné que les ions négatifs se déplacent vers le plan relié à la terre, le champ électrique dans les régions d'ionisation commence à augmenter de nouveau. D'autre part, l'émission secondaire des électrons depuis la pointe fournit des électrons d'ensemencement pour l'impulsion suivante. Par conséquent, la décharge est maintenue.

c) Tension alternative

En appliquant un champ alternatif au gaz, le comportement du système dépendra de la distance inter électrodes et de la fréquence de la tension d'alimentation. En effet, si le temps de parcours de l'intervalle par les particules chargées du gaz est inférieur au temps d'inversion de la polarité, alors les charges d'espace créées par une décharge auront quitté l'espace inter électrodes avant l'apparition de la décharge suivante. Le comportement élémentaire du système consistera donc en une alternance de décharges positives puis négatives indépendantes.

En augmentant la fréquence du signal électrique, les ions n'ont pas le temps d'être évacuées avant le changement de polarité de la tension appliquée et une charge d'espace résiduelle persistera dans l'espace inter électrodes, ceux-ci réduisent le champ électrique et l'intensité des décharges pendant l'alternance suivante. Donc, pour une même tension, les décharges sont moins intenses en tension alternative qu'en tension continu [18].

I.1.2. Vent ionique

La génération d'un vent ionique par les décharges couronnes a été mise en évidence il y a très longtemps [19] et a été largement étudiée dans le cas d'une décharge couronne entre une pointe et un plan [20]. Sous l'effet de la décharge, des espèces chargées (ions positifs, négatifs ou électrons) sont créés dans l'espace inter-électrodes. Ces espèces sont accélérées par le champ électrique par la force Coulombienne et entraînées vers la cathode pour les ions positifs, et vers l'anode pour les ions négatifs et les électrons. Ces particules chargées percutent les molécules neutres auxquelles elles transmettent une partie de leur quantité de mouvement. Le transfert étant proportionnel au rapport des masses des particules en collision, le processus est efficace uniquement lors des collisions ion-neutre. L'accélération du gaz dans l'espace inter-électrodes, sous l'effet de la décharge, génère un flux de gaz couramment appelé vent électrique ou vent ionique. Il est en partie responsable de la dispersion et du mélange des espèces actives (radicaux, molécules excitées) du gaz. Dans la configuration pointe-plan, le vent ionique va toujours de la pointe vers le plan quel que soit la polarité de la pointe. Lorsque la pointe est positive, le vent ionique est produit par les ions positifs créés par ionisation. Le vent ionique est généré aussi bien par des décharges couronnes en régime luminescent (glow) qu'en régime de breakdown streamer.

Dans le premier cas, le vent ionique est généré par la zone de dérive ionique qui est un cône dont le sommet se confond avec la pointe et dont la base est un disque de rayon à peu près égal à la distance inter-électrode. Le régime de décharge est stationnaire et le vent ionique est proportionnel à la tension appliquée.

Dans le régime de breakdown streamer, la zone de transfert de quantité de mouvement se limite au filament de la décharge. Cependant, les effets combinés de la fréquence de répétition des décharges (de l'ordre de la dizaine de kHz), de la dynamique des décharges (présentant de fort champ électrique et de charge d'espace) ainsi que des variations de température du gaz, sont à même d'induire un mouvement ordonné du gaz par transfert de quantité de mouvement des ions vers les neutres [21].

Si la décharge électrique se produit au voisinage d'une surface, le transfert de quantité de mouvement entre particules chargées et particules neutres peut être utilisé pour modifier la couche limite de l'écoulement dans l'aéronautique. Dans ce cas, le vent ionique constitue la base du contrôle d'écoulement [22].

Cette propriété de la décharge peut être appliquée au niveau de la couche limite d'un écoulement afin d'augmenter localement (proche de la paroi) la vitesse ou de la diminuer selon si le vent ionique est dans le même sens ou non que l'écoulement (Fig. I-10). Dans le même sens, l'effet positif du vent ionique est recherché quand il s'agit d'augmenter la vitesse d'écoulement des gaz, alors que dans le sens contraire on cherchera plutôt à le diminuer à cause du gêne qu'il présente à des applications comme, par exemple, les séparateurs électrostatiques des particules fines.

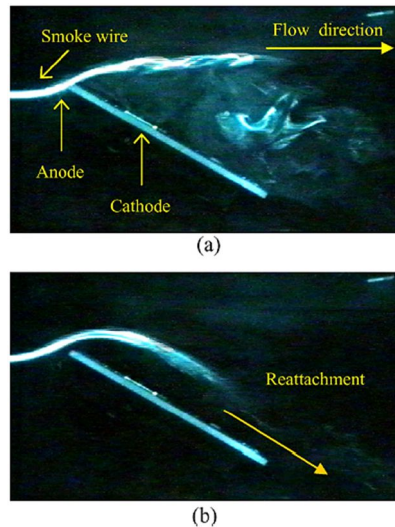


Figure I-10. Visualisation d'écoulement d'air (a) en absence de la décharge (b) en présence de la décharge [22].

I.1.3. Paramètres influant sur le développement de la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne. A la pression atmosphérique, l'humidité relative et la température environnante jouent un rôle très important lors de l'étude de la décharge. La nature du gaz dans lequel la décharge est établie influe également sur le comportement des différentes espèces présentes dans l'intervalle de la décharge [23, 24].

I.1.3.1. Effet de l'humidité relative

Lors des années 1960, plusieurs chercheurs ont mesuré les coefficients d'ionisation et d'attachement dans l'air humide, ils ont démontré que ces coefficients sont affectés par l'humidité relative de l'air [25]. En 1969, Gallo et al. [26] ont étudié l'effet de l'humidité sur les caractéristiques (I - V) et sur le comportement de la décharge couronne dans une configuration fil plan. Depuis ce temps, de nombreuses études ont été menées pour mettre en œuvre l'influence de l'humidité relative sur la rigidité de l'air [27]. Il s'est avéré que le seuil d'apparition de la décharge couronne survient à des tensions plus basses pour des taux d'humidités relativement élevés, ceci pourrait s'expliquer par l'augmentation de la conductivité de l'air lorsque l'humidité relative de la cellule de décharge augmente [28]. En polarité négative, l'amplitude des impulsions de courant de couronne augmente avec l'augmentation de l'humidité ; par contre, le taux de répétition des impulsions (fréquence) diminue. Par ailleurs, le courant moyen de la décharge couronne diminue. Ce phénomène serait lié d'une part à l'accroissement de l'attachement des électrons libres, du fait de la présence de vapeur d'eau dans l'air (grande électronégativité) et d'autre part à la grande absorption des photons en tête des streamers, dans la région où se produisent les avalanches secondaires par photo-ionisation [29]. L'évolution de la tension de claquage a fait l'objet d'un autre effet de l'humidité, ceci a montré une diminution de la tension de claquage avec une humidité relative élevée [30].

I.1.3.2. Effet de la température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Ceci est dû au fait que le libre parcours moyen des électrons augmente [29, 31]. Il a été ainsi démontré que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de seuil et de la tension de rupture du gaz. Ce qui implique, d'après [23] une proportionnalité entre le courant de couronne total et la température du gaz environnant.

I.1.3.3. Effet du gaz environnant

Loeb et ses collaborateurs [32] croyaient que les impulsions de Trichel ne peuvent exister que dans les gaz électronégatifs, tels que l'oxygène et l'air. Ceci a été ensuite soutenu par les résultats trouvés par Weissler [33], qui a étudié l'existence des impulsions Trichel dans différents gaz. Il a rapporté que ces impulsions ne sont pas observées dans l'hydrogène pur et dans l'azote (ce sont des gaz électropositifs), mais il a remarqué que l'addition d'une trace d'oxygène dans ces gaz entraîne la production d'impulsions Trichel. Cette idée a été contestée plus tard par Akishev et al. [34], qui ont prouvés que dans des circonstances spécifiques, ces impulsions peuvent être observées aussi dans de l'azote.

Une autre étude menée par Nygaard et al. [35] qui ont analysé la variation de la fréquence des impulsions Trichel causée par le soufflage d'un vent. Récemment, Deng et al. [36] ont rapporté que, en augmentant le débit d'air transversal (perpendiculaire à l'axe de symétrie pointe-plan), la fréquence devient plus faible et le pic d'impulsion augmente progressivement à des valeurs plus élevées.

I.2. APPLICATIONS DE LA DÉCHARGE COURONNE

La décharge couronne a de nombreuses applications dans l'industrie, la médecine et dans la vie quotidienne également. Certaines de ces applications ont été découvertes et commercialisés depuis plus d'un siècle. La première grande application commerciale réussie de la précipitation électrostatique a été accomplie en 1907 [37]. Depuis ce temps, de nombreux chercheurs ont consacré leurs attentions à la charge des particules et des précipitateurs électrostatiques utilisant différentes géométries (Fig. I-11) [38].

L'effet couronne est largement utilisé dans les techniques de séparation électrostatique des matériaux granulaires [39]. Cette dernière représente une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement, car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des métaux par rapport aux méthodes conventionnelles de traitement des déchets. Les électro-séparateurs à effet couronne (Fig. I-12), assurent la séparation de mélanges composés de particules granuleuses isolant-métal de tailles moyennes différentes, allant des particules micronisées jusqu'à des tailles d'ordre millimétrique [40].

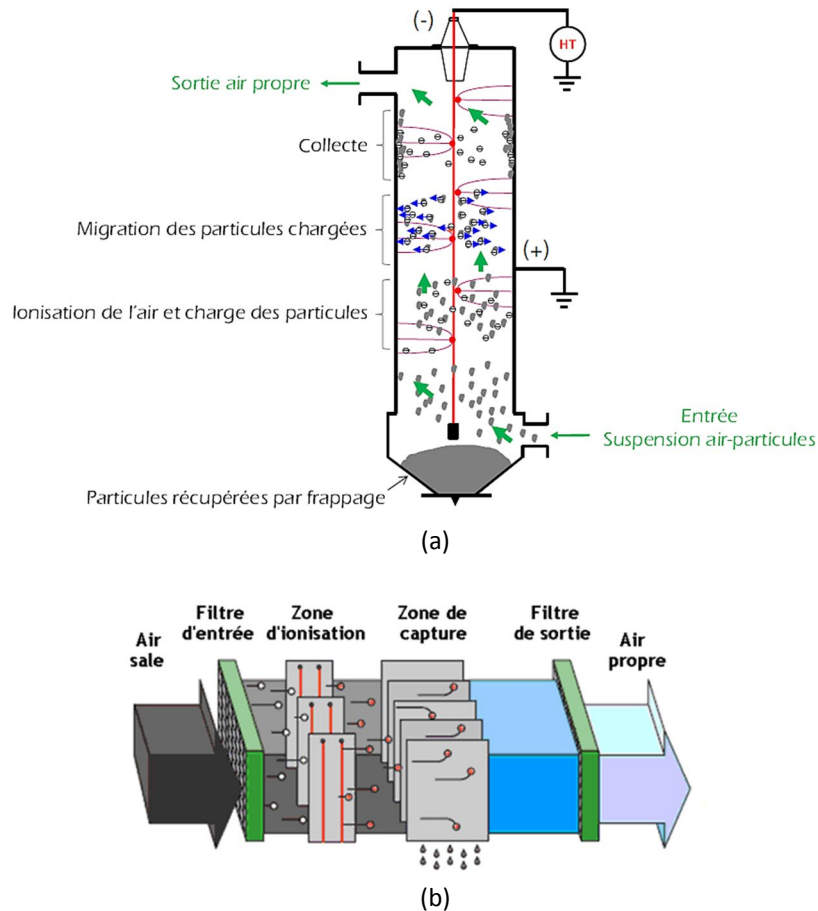


Figure I-11. Principe de fonctionnement d'un filtre électrostatique, (a) configuration cylindrique, (b) structure industrielle à deux étages [41].

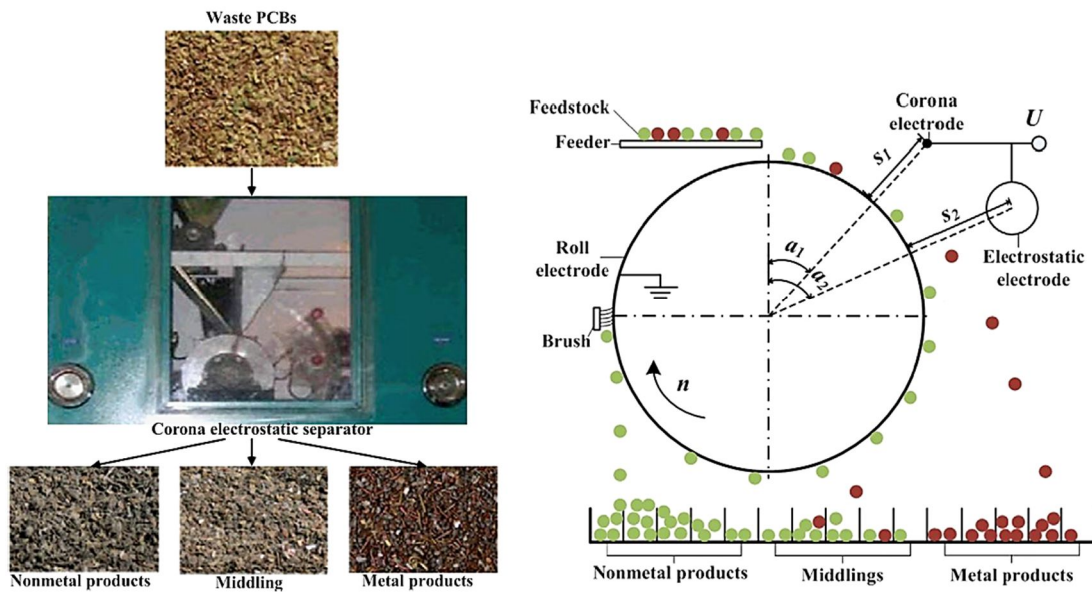


Figure I-12. Séparateur électrostatique à cylindre tournant [42].

L'électro-photographie et l'impression électro-graphique utilisent des petits appareils couronne comme des chargeurs de surface. Le tambour photoconducteur d'une copieuse/imprimante doit recevoir une charge uniforme avant l'exposition à

l'image lumineuse [43]. L'exposition à la lumière décharge la surface, laissant des motifs de charge sur le tambour qui peuvent attirer les particules de toner chargées de signe opposée. Le toner est ensuite transféré sur le papier sous l'influence d'un chargeur situé dans le deuxième côté du papier; le chargeur produit un champ électrique qui améliore le transfert. Les chargeurs couronne éliminent également les charges résiduelles situant sur le tambour photoconducteur, afin qu'il puisse être nettoyé avant des expositions ultérieures. Le système de charge des photorécepteurs est présenté sur la figure I-13 pour deux configurations connues ; les corotrons et les scorotron [44].

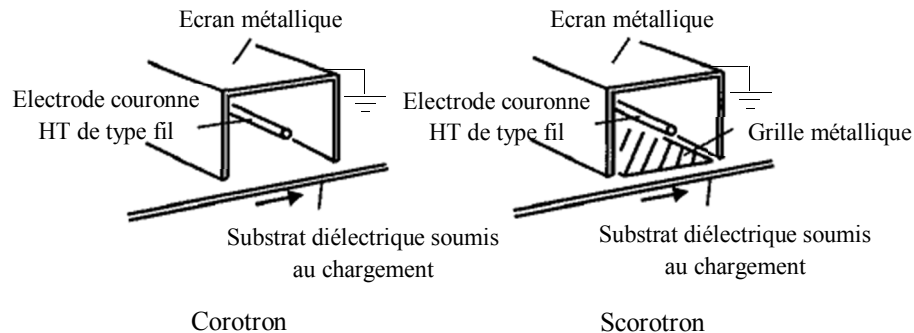


Figure I-13. Constructions de base d'un corotron et d'un scorotron [44].

La génération d'ozone est aussi une application importante de la décharge couronne. Les propriétés d'oxydation de ce gaz ont été utilisées pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs [45]. L'ozone est généralement produit en faisant passer un courant d'air sec ou d'oxygène à travers une décharge couronne volumique, où les molécules d'oxygène (O_2) dans le flux sont converties à l'ozone (O_3). Mettre un film diélectrique sur l'électrode de masse convertit la décharge couronne à une décharge à barrière diélectrique (DBD) et augmente l'efficacité du processus.

Le traitement des fumées et le contrôle de la pollution d'air sont d'autres applications connues des décharges couronne. Des études numériques et expérimentales sur l'élimination des NO_x et de SO_x du gaz de combustion ont été menées [46]. L'idée de la fumée a déclenché une décharge couronne pour un capteur de fumée ionique fonctionnant sans une source d'ionisation radioactive, et a été publié par Mokhtari et al. [47]. Elle est basée sur la diminution de la tension d'apparition de la décharge couronne par un facteur de 5 en présence des particules de fumée.

Une nouvelle méthode pour la conception d'un capteur de surveillance respiratoire basée sur les impulsions de Trichel a été suggérée par Deng et al. [48]. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un détecteur d'ionisation de champ simple, qui se compose d'une électrode à aiguille et un plan de masse. Il est montré que différents modèles respiratoires tels que la respiration normale, respiration rapide, et de l'apnée peuvent être surveillés en temps réel en détectant les changements dans la fréquence des impulsions Trichel.

Les applications médicales telles que le traitement de la cavité dentaire à l'aide du plasma produit dans une décharge couronne [49] et la décontamination du biofilm sur la

surface des dents en exposant les dents à un streamer positif ou des impulsions négatives de Trichel [50] ont été étudiées par les chercheurs aussi.

La charge par effet couronne des matériaux non-tissés utilisés comme des medias filtrants, permet d'améliorer l'efficacité de collecte des particules nocives à la santé par le mécanisme de capture déclenché grâce à des forces électrostatique [51].

L'électro-pulvérisation [52], technologie des semi-conducteurs [53], contrôle du flux d'air [22], décoloration de composés chimiques [54], la nourriture et la décontamination de l'eau [55] sont d'autres applications de la technologie de la décharge couronne.

L'importance de la décharge couronne est non seulement due aux applications utiles dont elle dispose ; elle peut avoir des effets indésirables ainsi. Elle est généralement non souhaitable dans les lignes de transmission de l'énergie électrique (Fig. I-14), où elle provoque la perte de puissance, un bruit audible et des perturbations radioélectriques. La décharge couronne est également néfaste si elle se produit à l'intérieur des composants électriques, tels que les transformateurs, les condensateurs, les moteurs électriques et les générateurs où elle endommage progressivement les matériaux isolants [56].

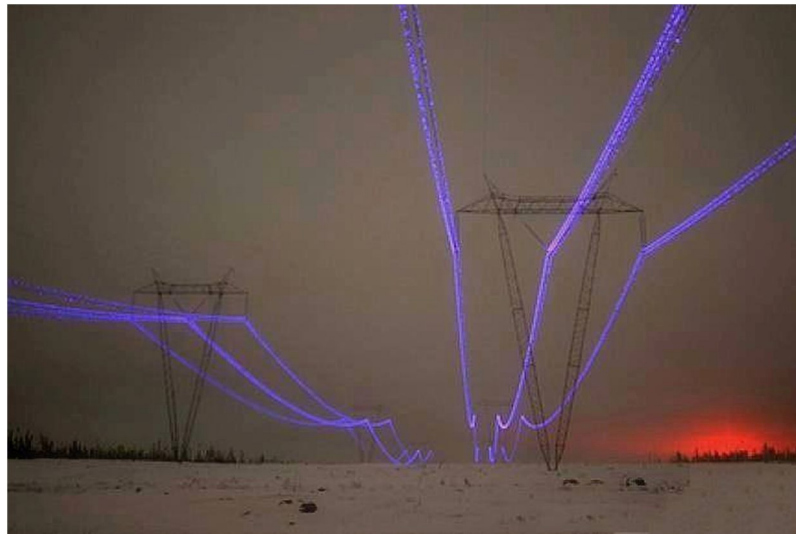


Figure I-14. Effet couronne dans les lignes de transmission (735 kV) [57].

I.3. ETAT DE CHARGE D'UN MATÉRIAU DIÉLECTRIQUE

La compréhension des phénomènes liés à la génération de la charge d'espace et à son évolution ainsi qu'au comportement d'un diélectrique préalablement chargé permettra non seulement la prévention des risques électrostatiques, mais aussi l'amélioration des performances de plusieurs procédés électrostatiques.

De nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont été impulsés pour résoudre les problèmes posés par la mise au point des installations de charge électrostatique dans le domaine industriel. Plusieurs articles fondamentaux sur les mécanismes de dépôt de charge par effet couronne, d'injection de charge, ou sur la dynamique du déclin de

potentiel aient été produits par les laboratoires de recherche, notamment, une série de modélisations du déclin de potentiel dû à des mécanismes de transport dans des matériaux désordonnés (photoconducteurs, polymères...etc.) [58].

I.3.1. Charge par décharge couronne

La décharge couronne est le moyen le plus simple et le plus fiable pour reproduire le chargement électrostatique des isolants. Grâce à ce moyen, il est possible de déposer des charges aussi bien positives que négatives selon la polarité du système de décharge dans les niveaux de surface de l'isolant [59]. Le diélectrique est posé sur le plan de masse. Sous l'action du champ électrique, il reçoit des charges de même polarité que l'électrode couronne. La figure I-15 illustre le principe de charge d'un diélectrique par décharge couronne négative.

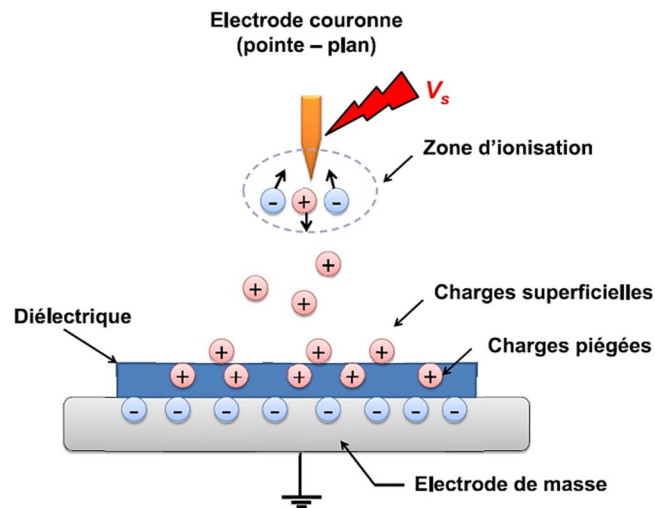


Figure I-15. Principe de charge d'un matériau diélectrique par décharge couronne.

Si la décharge couronne se produit à partir d'une électrode de polarité négative, des ions négatifs seront formés. Une fois ces ions atteignent la surface libre du diélectrique, ils seront neutralisés en cédant leurs électrons et une couche d'électrons piégés est formée juste au-dessous de la surface libre du diélectrique. Par contre, les ions positifs produits lorsque la polarité des électrodes couronne est positive, seront neutralisés en acceptant des électrons lorsqu'ils atteignent le diélectrique, laissant ainsi une couche de trous piégés au-dessous de la surface libre du matériau.

La charge par décharge couronne est adéquate pour la formation des électrets, qu'ils soient des films ou des matériaux fibreux. Cette méthode de charge est largement utilisée dans l'industrie où la formation d'électrets est réalisée à la chaîne [59].

I.3.2. Théorie du déclin de potentiel

La figure I-16 résume schématiquement les différents processus qui peuvent contribuer au déclin du potentiel de surface.

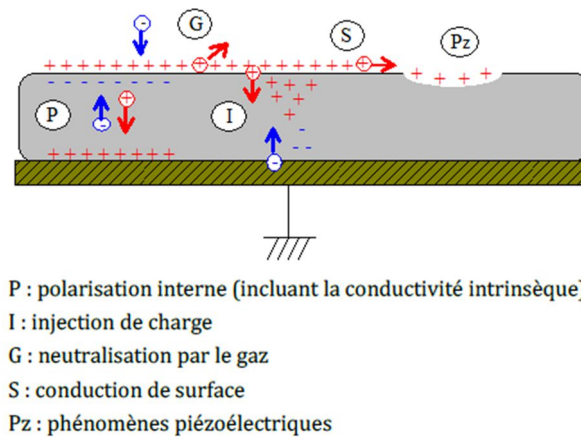


Figure I-16. Différents mécanismes possibles pour expliquer le déclin de potentiel [58].

Un diélectrique, chargé en surface, présente un potentiel surfacique local. Au cours du temps, cette valeur du potentiel décroît et ce fait représente nettement l'aptitude du matériau à évacuer, par plusieurs mécanismes cette charge déposée (Fig. I-16). Le champ appliqué par les charges déposées en surface crée un phénomène de polarisation dipolaire par l'orientation des dipôles déjà existant, les dipôles les plus proches de la surface s'orientent de telle manière qu'ils viennent compenser la charge surfacique. Ces charges ne peuvent se déplacer que sur une distance de l'ordre de grandeur d'une molécule. Chaque molécule présente alors un dipôle. La polarisation peut être interfaciale ainsi, par la migration des charges vers les interfaces. Ceci provoque l'apparition d'une charge en surface, de signe opposé par le phénomène d'influence totale [60].

La conduction surfacique est une autre cause du déclin de potentiel en surface, en particulier dans le cas des polymères épais vieillis [61]. Les charges se déplacent sur les couches primaires de la surface, ce phénomène se manifeste surtout sur les polymères en dehors de conditions particulières d'activation (par la température, le champ et le rayonnement) [62].

Dans le cas des films minces ou certains types de cristaux, les phénomènes piézoélectriques peuvent aussi participer à l'évolution temporelle du potentiel en surface. La charge déposée exerce une force sur le matériau qui subit l'effet d'une contrainte mécanique pouvant générer un effet piézo-électrique.

La charge déposée en surface peut être neutralisée par les porteurs libres provenant de l'atmosphère environnante le matériau, ou aussi traverser l'interface et pénétrer dans le volume pour engendrer un phénomène d'injection [62].

Tous ces phénomènes peuvent agir en même temps et devront être considérés pour interpréter le déclin. Toutefois, on peut noter la présence prédominante de trois interprétations dans la littérature : la conduction de surface, la conduction de volume et le phénomène de polarisation des matériaux diélectriques.

Plusieurs modèles décrivant le déclin de potentiel ont été développés dans la littérature ainsi, le premier modèle développé est celui de « Ieda, Sawa et Shinohara » en 1969 [63]. Dans ce travail, sur le polyéthylène, il a été montré que les courbes de déclin

de potentiel obtenues à divers niveaux de chargement par décharge couronne se croisaient. Autrement dit, le potentiel de surface de films chargés à une tension élevée déclinait plus vite que celui de films chargés à une tension inférieure (Fig. I-17). Ce phénomène, intéressant pour les théoriciens, appelé le « cross-over » a été depuis observé dans plusieurs travaux pour différents matériaux isolants [5].

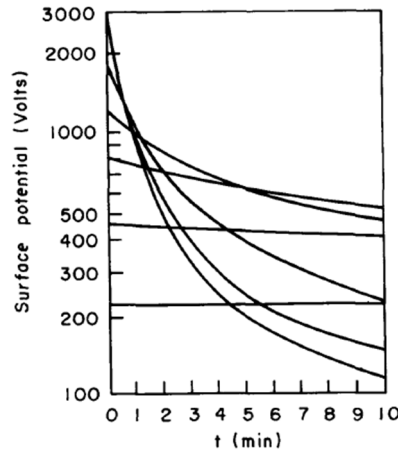


Figure I-17. Déclins de potentiels de surface pour des échantillons de polyéthylène illustrant l'effet du « cross-over » [5]

Batra et al [64] ont développé un modèle du déclin de potentiel qui inclue l'hypothèse d'une injection partielle des charges (rétention partielle de charges à la surface). Si l'injection de surface est instantanée, ce modèle prévoit une décroissance linéaire initiale du potentiel tant que le front de charges n'a pas atteint l'électrode de masse. Le taux initial du déclin est extrêmement sensible au processus d'injection de la charge déposée; il augmente avec l'augmentation des valeurs initiales du potentiel. Le modèle de Sonnonstine et Perlman [65] développé pour le déclin de potentiel dans les isolants chargés par décharge couronne explique le phénomène de cross-over par une mobilité et une efficacité d'injection qui dépendent du champ électrique ainsi qu'une injection dépendante du temps. D'autres phénomènes, notamment le piégeage et le dépiégeage des charges injectées dans le volume sont inclus dans certains modèles surtout dans un matériau désordonné. Von Berlepsh [66] a ensuite développé un modèle basé sur le transport par sauts (hopping) dépendant du piégeage en surface et en volume des charges injectées. Ce modèle introduit également l'existence des pièges profonds et peu profonds dans le volume. En plus, les expériences qui ont été menées par Baum et al [67] ont mis en évidence le rôle des photons et des espèces neutres excitées produits par la décharge couronne dans l'injection de charges. Perlman et al [68] ont mis en évidence que ce sont uniquement les espèces neutres excitées qui assistent l'injection de charges et non pas la radiation de la décharge couronne.

L'énergie de la décharge couronne, le temps d'exposition à la décharge couronne, la température et l'humidité sont des facteurs qui peuvent jouer un rôle important dans l'injection de charges [62].

I.4. ANALYSE NUMERIQUE DU CHAMP ELECTRIQUE GENERE PAR DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'ELECTRODES

Chaque phénomène naturel, soit biologique, mécanique ou électrique, peut être décrit à l'aide des lois physiques. Ces lois peuvent être représentées soit par des équations algébriques, différentielles ou intégrales qui rapportent des informations substantielles sur le comportement du phénomène. Outre l'expérimentation, qui est toujours nécessaire, la conception ou l'amélioration des systèmes d'électrodes produisant la décharge couronne doit s'appuyer sur un modèle de représentation et de simulation. Un modèle précis et fiable permet de prédire l'impact du choix des conditions de fonctionnement sur les performances de ces systèmes d'électrodes. Ainsi, le calcul numérique du champ électrique généré par les différentes configurations d'électrodes joue un rôle essentiel pour le bon fonctionnement de ces arrangements, d'où l'importance que revêt son étude.

I.4.1. Méthodes numériques utilisées

Diverses méthodes ont été utilisées dans le domaine de la modélisation du champ électrique pour résoudre les équations de Poisson ainsi que l'équation de conservation de la charge. En général les deux équations couplées sont résolues par approximations successives : ρ étant connue, V est déterminé par la résolution de l'équation de Poisson ; avec les nouvelles distributions de V et E , une nouvelle approximation de ρ est déterminée par la résolution de l'équation de conservation de la charge. Le plus souvent deux méthodes numériques différentes sont utilisées pour résoudre les deux équations couplées. Les conditions aux limites sont les mêmes pour l'équation de Laplace et pour l'équation de Poisson; pour cette dernière il faut intégrer la densité de charge qui est calculée soit par la méthode des caractéristiques *MC*, soit par la méthode des volumes finis *MVF*.

Les équations de Laplace et Poisson peuvent être résolues par la méthode de différences finies *MDF*, la méthode d'éléments finis *MEF* ou par la méthode de volumes finis *MVF* ; mais la méthode la plus utilisée, c'est la méthode d'éléments finis [69].

I.4.2. Méthode des éléments finis

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

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

$$\sum_{i=1}^n \Omega_i = \Omega \quad (I-3)$$

Les Ω_i sont une partition de Ω comme illustré par la figure I-18.

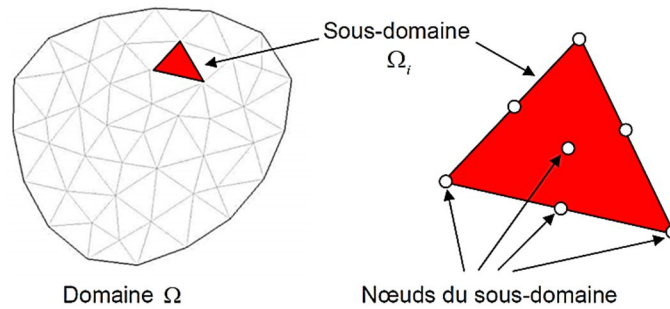


Figure I-18. Représentation du domaine discrétisé Ω et d'un de ses sous-domaines [70].

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

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

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

La qualité de la solution approchée (proximité de la solution exacte) dépend de la division en sous-domaines (nombre et dimensions des sous domaines), du choix de la famille de champs locaux dans chaque sous-domaine et des conditions de continuité qu'on impose aux frontières des sous-domaines. Une fois ces choix faits, il reste à chercher une combinaison de champs locaux qui satisfait au mieux les équations [70].

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

I.4.3. Organisation des logiciels de calcul

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

Les logiciels de calcul ont pratiquement tous, la même structure qui consiste en un programme, appelé *pré-processeur* qui permet de décrire la géométrie du domaine, ses propriétés physiques et ses conditions aux limites, et de réaliser un découpage de

manière automatique ou manuelle avec assistance du programme. Le *processeur* de calcul qui résout les équations linéaires ou non linéaires, issues de l'assemblage des éléments et fournit un ensemble de résultats bruts qui sont les valeurs de la longueur inconnue en tous les nœuds de découpage. Ces résultats, stockés dans un fichier de sortie, sont alors repris par le *post-processeur* qui les met en forme pour fournir au concepteur un ensemble de résultats cohérents sous la forme de grandeurs physiques significatives (flux, force, couples, énergie, inductances) ou de courbes associées aux grandeurs physiques intéressantes (induction le long de l'entrefer, champ électrique le long d'un isolant, etc..) [69].

Notre travail consiste à déterminer numériquement les distributions de champ et de potentiel électrique dans des configurations d'électrodes basées sur une électrode de type « dual » largement utilisée dans les domaines de séparation électrostatique. Un logiciel est disponible pour effectuer le calcul du champ électrique avec une grande précision nommé : COMSOL MULTIPHYSICS (Fig. I-19).

I.4.4. Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS

Il est très intéressant d'avoir un environnement de simulation qui inclut la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle étudié. C'est dans cette philosophie que **Comsol Multiphysics** a été développé. C'est un logiciel de calcul numérique par éléments finis modulaire permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant un problème réel.

Différents modules physiques existent sous Comsol, parmi lesquels on trouve la mécanique des fluides, le transfert thermique, l'électricité, l'électrostatique, la chimie, la mécanique des structures, etc... Il est possible de combiner plusieurs phénomènes physiques lors d'une même simulation numérique : c'est l'un des points forts de ce logiciel [71].

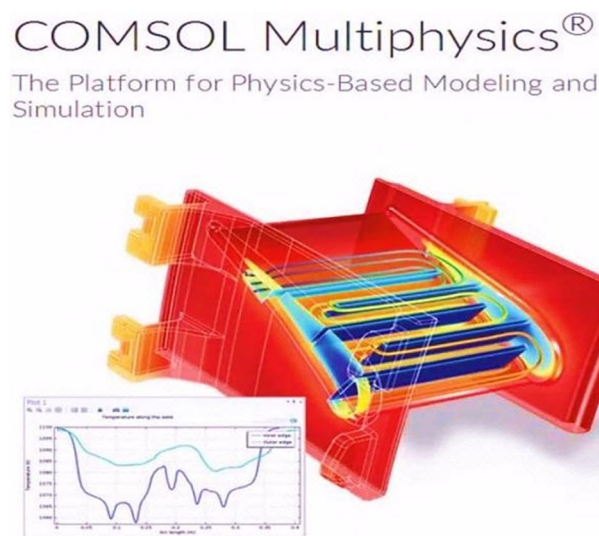


Figure I-19. Présentation du logiciel COMSOL MULTIPHYSICS

I.5. CONCLUSIONS

Ce premier chapitre nous a permis de rappeler les différents régimes et l'ensemble des mécanismes de création des décharges couronne positive ainsi que négative sous tension continue et à la pression atmosphérique, ces deux types de décharges sont caractérisés par des phénomènes différents liés à leurs créations ainsi que leurs développements. Les variations de la température et de l'humidité relative de l'air peuvent également influencer le développement et les caractéristiques électriques de ces types de décharges.

La décharge couronne a une multitude d'applications. La séparation électrostatique et la charge des médias filtrants sont celles qui nous intéressent dans le cadre de notre étude. Ainsi, un matériau diélectrique exposé à la décharge couronne acquiert des charges électriques réparties sur sa surface et piégées dans son volume. Nous avons mis en lumière les mécanismes responsables du mouvement de charges sur la surface ou à l'intérieur des polymères, ainsi que les phénomènes physiques responsables du déclin de potentiel de surface en fonction du temps.

Concernant le calcul du champ électrique, nous avons donné uniquement un aperçu sur ce type de calcul qui nécessite d'être approfondi. L'analyse du champ électrique peut nous aider à expliquer certains phénomènes et résultats expérimentaux qui seront traités dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II

INSTALLATIONS EXPERIMENTALES ET METHODES D'ANALYSE

Depuis plusieurs décennies de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des décharges couronne dans l'air atmosphérique [1-3]. Cependant, ce domaine a attiré récemment plus d'attention auprès des chercheurs pour de nouvelles applications dans le domaine de l'électrostatique telles que : la précipitation des poussières, la fabrication de films plastiques et de médias textiles, les processus d'électro-photographie et la séparation des mélanges granulaires [4, 37]. Les électrodes couronne de type « dual » sont largement utilisées pour générer des décharges couronne dans des procédés électrostatiques tel que le chargement des matériaux granulaires dans les séparateurs électrostatiques et le chargement des medias fibreux des filtres à air industriels [72-74].

Dans ce chapitre nous présentons des nouvelles configurations d'électrodes basées sur des électrodes « duales » classiques, en intégrant un écran, une grille ou des bandes métalliques à proximité de ces électrodes « standard ». Ceci nous permet d'avoir des caractéristiques électriques de plus en plus avantageuses en termes d'intensité et de répartition de courant électrique produit par la décharge couronne au niveau d'une électrode collectrice, accompagnées ainsi d'une augmentation importante des potentiels électriques mesurés sur les surfaces des matériaux isolants exposés aux décharges couronne dans ces configurations spécifiques. Un banc de mesure a été réalisé pour nous permettre le monitoring et l'enregistrement de potentiel de surface de différents matériaux isolants chargés dans les différents arrangements d'électrodes étudiés, à l'aide d'une sonde à condensateur vibrant (sonde de Kelvin), pour plusieurs situations en faisant varier divers paramètres expérimentaux.

Par la suite, nous allons présenter le domaine de la séparation électrostatique, qui est devenue une technologie standard dans le traitement des minerais et la récupération du cuivre à partir de déchets de câbles électriques [40]. Nous allons décrire les deux séparateurs électrostatiques, à tambour rotatif et à tapis roulant, utilisés comme des installations de test pour les configurations d'électrodes développées. A la fin de ce chapitre, nous exposerons les méthodes numériques et les hypothèses utilisées pour

l'analyse des champs électriques générés dans les différentes configurations d'électrodes étudiées dans le cadre de cette thèse.

II.1. TYPES D'ÉLECTRODES UTILISÉES

La décharge couronne est la méthode la plus fréquemment utilisée pour la charge électrique des médias fibreux, des poudres ou des matériaux granulaires dans divers procédés électrostatiques [42, 51]. Elle est produite entre deux électrodes fortement asymétriques, une électrode active (sous forme d'aiguilles métalliques, lames ou fils) connectée à une source de haute tension continue DC, et une autre électrode mise à la terre (cylindre métallique ou plaque). Il existe plusieurs types d'électrodes couronne de type « dual » utilisées dans l'industrie, tel que : fil, aiguille ou lame [75]. Ainsi il y a certains cas où des systèmes d'électrode de type « triode » sont utilisés, pour mieux contrôler la valeur du potentiel de surface des échantillons exposés aux décharges couronne, tels que les processus de fabrication des médias de filtration d'air [72].

II.1.1. Electrodes couronne de type « dual »

Parmi plusieurs systèmes d'électrodes produisant la décharge couronne dans des applications industrielles telles que la séparation électrostatique, on distingue la configuration d'électrode baptisée « duale » qui est largement utilisée dans ce domaine [11]. Les éléments constituant cette électrode « duale » sont montrés sur la figure II-1 (a) :

Un fil mince de tungstène, de longueur 120 mm, d'un diamètre de 0,2 mm, attaché à un cylindre en cuivre, d'un diamètre de 26 mm. Le fil ionisant et le cylindre sont alimentés par la même source d'alimentation en haute tension (Spellman, modèle SL40), les deux éléments sont parallèles et le plan défini par leurs axes est perpendiculaire à l'électrode reliée à la terre. L'électrode plane consiste en une plaque rectangulaire de cuivre (250 mm x 160 mm). Les électrodes les plus couramment utilisées sont montrées sur la figure II-1, les besoins spécifiques de chaque application décident du type adéquat à utiliser [76].

Le bombardement ionique représente le mécanisme le plus important d'acquisition de charge par les granules isolants déposés sur la surface d'une électrode plane et soumis au chargement par effet couronne dans différentes configurations d'électrodes. Les électrodes couronne à fil fin ont été depuis longtemps les plus utilisées dans l'industrie et ont encore de beaux jours devant elles dans les applications industrielles, à cause de la facilité de réalisation et leur faible coût de revient. Elles sont préférées aux électrodes à aiguilles qui possèdent pourtant une meilleure caractéristique $I(V)$ du courant en fonction de la tension (tension critique d'amorçage d'effet couronne plus petite, tension critique de claquage plus grande, etc...), mais exigent plus de maintenance car les extrémités des aiguilles s'usent avec le temps à cause de la décharge couronne.

Dans les séparateurs électrostatiques, on peut utiliser des électrodes de type segments de fil (Fig. II-1 (b)), dont la partie active (le segment émetteur) est ajustable en longueur, offre la possibilité d'être remplacé rapidement. La matière des segments de fil doit être caractérisée par une grande température de fusion. Durant le fonctionnement de l'électro-séparateur, la longueur des segments de fil diminue à cause de la transportation de matière qui accompagne l'effet couronne, mais la configuration géométrique ne change pas (cylindrique de diamètre constant). Comme l'extrémité de chaque segment doit dépasser le bout de la tige d'une longueur de 1 à 3 mm, de temps en temps, la position de ces segments doit être réajustée pour garder le même intervalle inter-électrodes; ceci est facilement accompli en tirant simplement sur le segment. Le remplacement des segments de fil est effectué manuellement après seulement plusieurs centaines d'heures de travail [76].

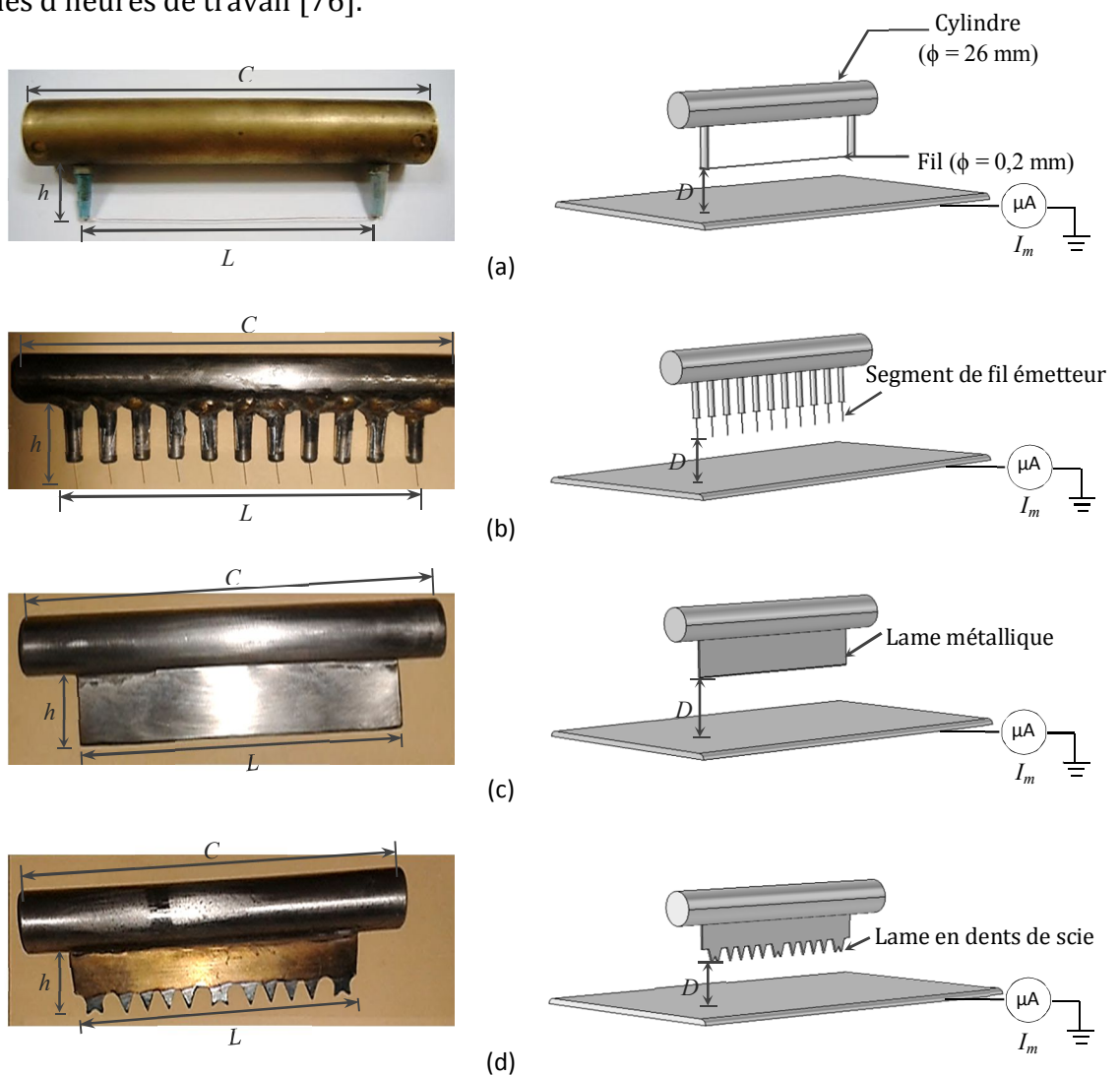


Figure II-1. Photographies (à gauche) et représentations schématiques (à droite) des électrodes couronne de type dual, (a) à fil, (b) à segments de fil, (c) à lame, (d) à lame en dents de scie ($C = 150 \text{ mm}$).

Les électrodes de type lame présentent une forte résistance aux chocs mécaniques et peuvent fonctionner plus longtemps dans des procédés industriels, par contre leurs

caractéristiques $I(V)$ sont les plus faibles parmi les autres électrodes étudiées (Fig. II-1). À cet effet, la partie ionisante de cette électrode a été développée pour une électrode de type lame en dents de scie, présentant à la fois une meilleure résistance mécanique et une production plus élevée de courant électrique de la décharge couronne.

II.1.2. Electrodes couronne munis d'un écran

Dans les procédés de l'électro-photographique, les « Corotrons » présentent les dispositifs les plus utilisés pour charger les photorécepteurs et les surfaces des papiers à des niveaux souhaités de densité de charge [44]. Le but de notre travail est d'analyser en détail les effets de l'association d'un écran métallique mis à la terre aux électrodes couronne classiques de type « dual », utilisées dans les séparateurs électrostatiques pour charger les particules isolantes. Cette arrangement d'électrode modifie la distribution volumique du champ électrique dans la zone de la décharge et améliore l'efficacité de charge du système d'électrode couronne ; elle peut présenter une configuration alternative avantageuse aux procédés de séparation électrostatiques et au chargement des medias filtrants.

La configuration d'électrode de base étudiée dans ce travail comporte une électrode duale de type fil (précédemment décrite), composée d'un fil mince de tungstène, attaché à un support cylindrique de cuivre. L'ensemble est placé à l'intérieur d'un écran métallique conçu en aluminium et relié à la terre. L'association (électrode couronne + écran) est située au-dessus d'une électrode plane (250 mm × 160 mm) avec une distance D variable, comme le montre la figure II-2.

Dans une première série d'expériences, deux micro-ampèremètres ont été utilisés pour mesurer simultanément le courant produit par la décharge au niveau de l'électrode plane I_m et le courant de fuite traversant l'écran métallique I_f .

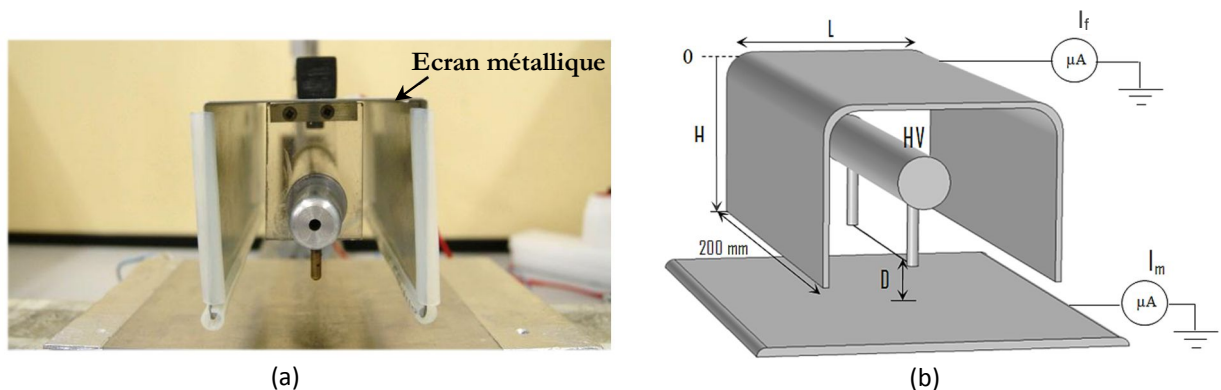


Figure II-2. Photographie (a) et représentation schématique (b) du système d'électrode « duale » munie d'un écran métallique.

Dans une deuxième série d'expériences, en se basant sur les valeurs de courant I_m mesurées au niveau de la plaque et pour une distance inter-électrodes constante D , des caractéristiques courant-tension ont été enregistrées dans le cas d'une configuration « standard » sans écran et comparées avec celles obtenues en présence de plusieurs écrans à différentes largeurs L (Fig. II-3 (a)) et à différentes hauteurs H (Fig. II-3 (b)),

afin d'étudier l'effet des dimensions géométriques de l'écran (hauteur et largeur) sur le courant total de la décharge produit par cette configuration d'électrode.

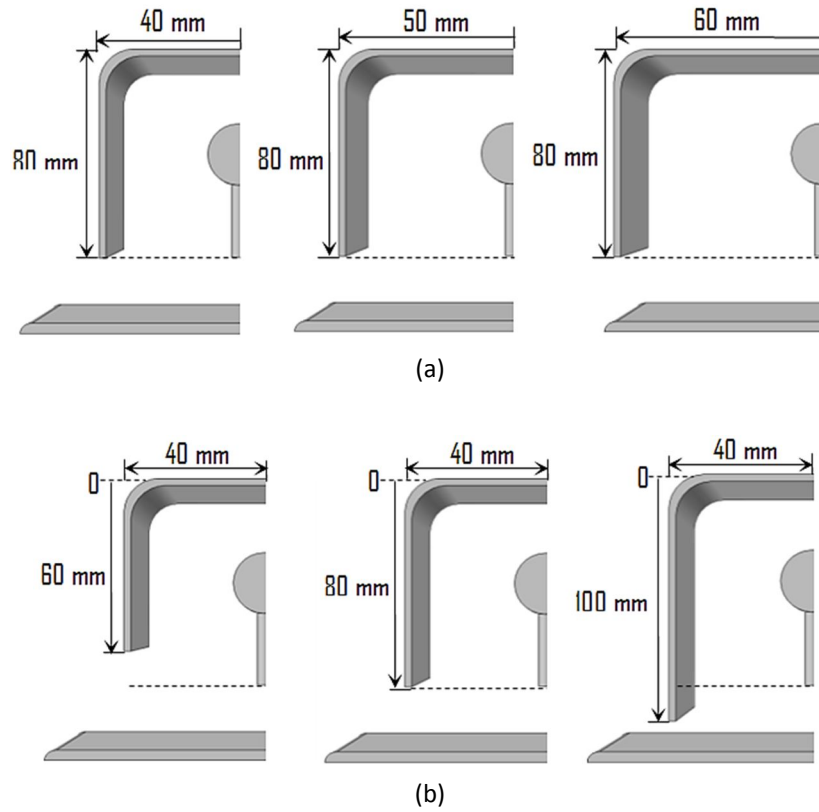


Figure II-3. Ecrans à différentes dimensions, (a) différentes largeurs $L = 80, 100$ et 120 mm pour $H = 80$ mm, (b) différentes hauteurs $H = 60, 80$ et 100 mm pour $L = 80$ mm.

II.1.3. Association électrode-bandes

D'autres expériences ont été réalisées en présence de deux bandes métalliques parallèles reliées à la terre à proximité de l'électrode couronne, ou chacune d'entre eux se trouve à une certaine distance D_b du fil ionisant de l'électrode duale. Les bandes métalliques sont collées sur un isolant qui sert comme un support rigide (une plaque de en PVC). L'axe horizontal du fil et les limites inférieures des bandes ont été ajustés pour être dans le même plan horizontal, comme c'est présenté sur la figure II-4. La hauteur, l'épaisseur et la longueur de chaque bande ont été, respectivement, $L_b = 10$ mm, $\phi = 1$ mm et $b = 120$ mm.

Le travail réalisé dans cette partie vise à analyser, premièrement et d'une façon générale, l'effet de la présence des bandes métalliques à proximité de l'électrode duale, et d'établir en second temps, une comparaison entre cette configuration et celle de la présence d'un écran métallique mis à la terre précédemment décrite.

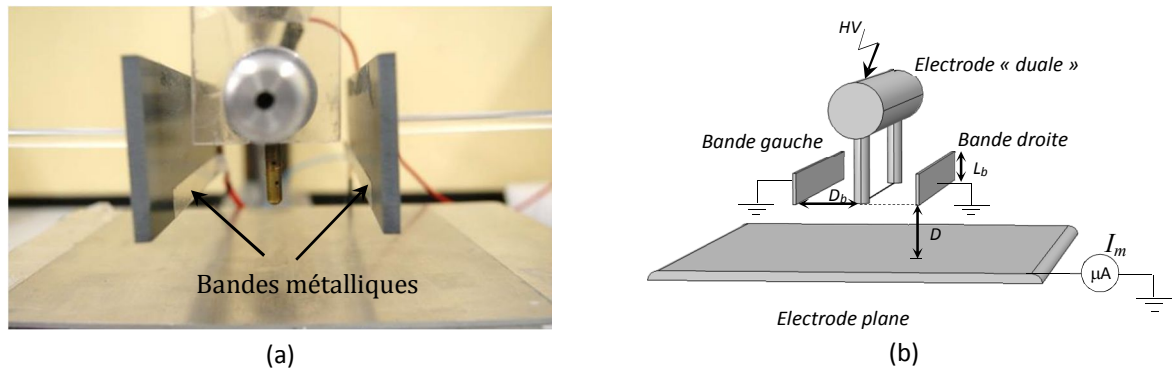


Figure II-4. Photographie (a) et représentation schématisée (b) de l'électrode « duale » munie de deux bandes métalliques.

II.1.4. Système d'électrode de type « triode »

Le contrôle du dépôt de charges sur les matériaux diélectriques par les dispositifs dites classiques (pointe-plan, fil-plan, etc...), est extrêmement difficile, voire impossible. L'insertion, entre l'électrode plane et l'électrode couronne, d'une grille conductrice (Fig. II-5) portée à un potentiel plus faible et de même polarité que le potentiel appliqué à l'électrode active permettra le contrôle du niveau du potentiel de surface et l'obtention d'un dépôt uniforme au niveau de la surface des matériaux posés sur l'électrode plane (Fig. II-6). Dans ce système d'électrode, appelée « triode », les charges issues de l'ionisation de l'air sont accélérées sous l'action du champ électrique, passent à travers la grille et viennent se déposer sur la surface libre du diélectrique. Le potentiel de surface du diélectrique croît jusqu'au niveau du potentiel de la grille. A partir de ce moment-là, le champ entre la grille et la surface du diélectrique est nul. Les ions ne traversent plus la grille. Ainsi le potentiel de surface est limité par le potentiel de la grille. Il existe plusieurs dispositifs à « triode » pour la formation contrôlée d'électrets [59].

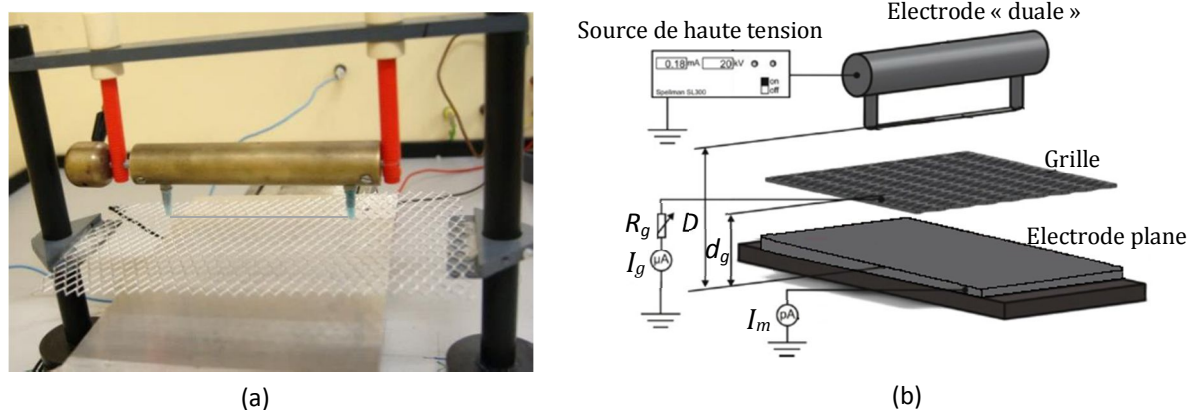


Figure II-5. Photographie (à gauche) et représentation schématisée (à droite) du système d'électrode de type « triode » [77].

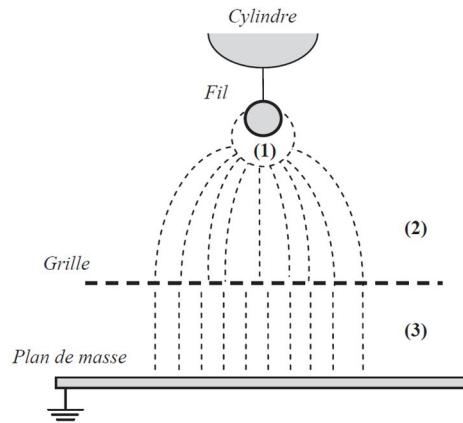


Figure II-6. Décharge couronne dans le système d'électrode de type « triode » [59].

La grille métallique (Fig. II-7 (b)) intercalée entre l'électrode couronne de type « dual » et une plaque métallique reliée à la terre, se compose de boucles en forme de losange. La distance entre la grille métallique et la plaque reliée à la terre est d_g . La grille est reliée à la masse à travers une résistance R_g variable et un micro-ampèremètre pour mesurer le courant de la grille I_g . Le potentiel initial à la surface de l'échantillon chargé est égal au potentiel de la grille calculé par :

$$V_g = R_g I_g \quad (\text{II-1})$$

L'espace inter électrodes est réparti en trois zones telles qu'elles sont illustrées sur la figure II-6. La zone active (1) est près de l'électrode active où le champ est supérieur au champ critique du minimum d'ionisation. Elle est caractérisée par une densité de charge totale nulle, ainsi le champ électrique satisfait les équations de Laplace. L'utilisation de l'électrode duale (décrite au § II.1.1) dans des procédés électrostatiques permet l'orientation de la décharge couronne dans une zone bien définie de l'espace. Cette classe d'électrodes est caractérisée par l'injection non uniforme de charge autour de l'élément ionisant.

Avant que la décharge se produise et l'électrode duale soit portée à un potentiel élevé, la grille a le même potentiel que celui du plan de masse. Ainsi le champ électrique est très inhomogène dans la zone (2) et pratiquement nul dans la zone (3). En présence de la décharge, des charges de même polarité que celle de l'électrode duale sont collectées par la grille et s'écoulent à travers la résistance vers la masse. La tension produite aux bornes de la résistance fixe le potentiel de la grille. La zone (2) est caractérisée par une charge d'espace importante tandis que la zone (3) est caractérisée par un champ électrique et une charge d'espace pratiquement négligeables [59].

Trois grilles de tailles géométriques différentes ont été utilisées, afin d'étudier l'influence des dimensions des mailles de la grille sur l'intensité, la distribution de la densité de courant et par la suite, sur la répartition du potentiel de surface des matériaux isolants. Les trois grilles testées sont présentées sur la figure II-7. Cependant, la grille N° 02 contenant des mailles avec des dimensions moyennes (Fig. II-7(b)) est celle utilisée dans toutes les expériences établies sur le système d'électrode de type « triode ».

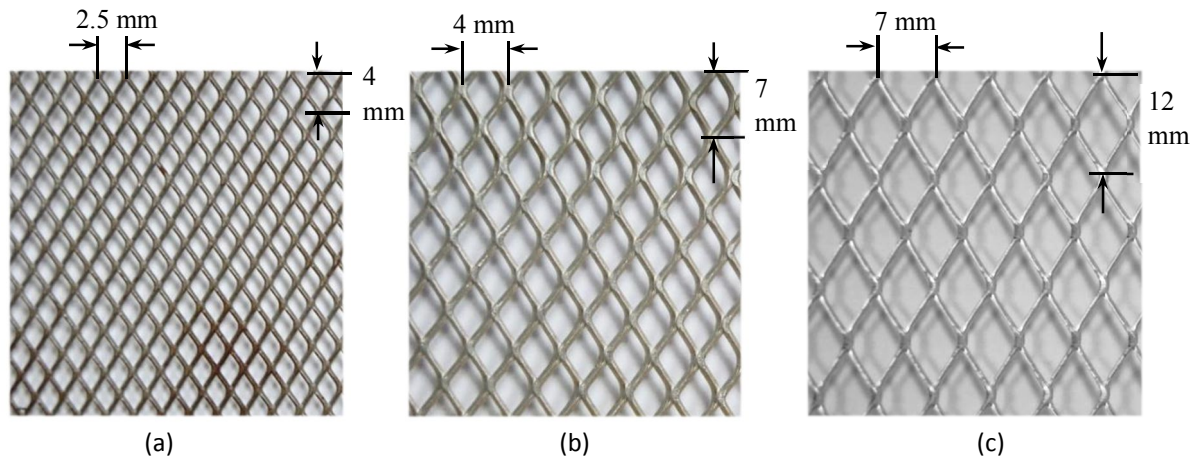


Figure II-7. Photographies des différentes grilles utilisées, (a) Grille N°01, (b) Grille N°02, (c) Grille N°03.

II.2. CARACTÉRISATION DES CONFIGURATIONS D'ÉLECTRODES COURONNE

Les ions produits suite à des mécanismes élémentaires de la décharge couronne servent à charger les particules isolantes, les poudres ou les matériaux fibreux dans divers procédés électrostatiques, tel que la séparation électrostatique et la fabrication des medias de filtration [78]. En effet ces domaines d'applications ont souligné l'importance d'établir un lien entre l'amplitude de courant électrique produit par la décharge couronne dans différentes configurations d'électrode et les valeurs de charges ioniques acquises par les matériaux isolants dans les processus de chargement électrostatiques, en vue d'établir d'abord une caractérisation expérimentale des différentes configurations d'électrodes pour leurs utilisations dans les procédés industriels [11].

II.2.1. Caractéristiques courant – tension ($I-V$)

Les caractéristiques courant-tension $I(V)$ relatives à différentes configurations d'électrodes couronne dépend de plusieurs paramètres : la composition, la température, et la pression du gaz, la géométrie du système d'électrodes, la polarité de la tension d'alimentation, et plusieurs d'autres variables liées entre elles [79]. Le principe consiste à appliquer une tension en l'augmentant progressivement et mesurer les valeurs correspondantes du courant de la décharge à l'aide d'un multimètre avec une précision de $1 \mu A$. Ces mesures révèlent qu'une fois la tension dépasse une certaine valeur de seuil V_0 , on enregistre une augmentation graduelle du courant jusqu'au claquage du milieu gazeux. Le courant de la décharge couronne qui traverse l'espace inter-électrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée V_s . Bien que les décharges recouvrent des phénomènes complexes, une relation empirique simple entre le courant et la tension est généralement utilisée [19] dans le cas de la configuration d'électrode fil cylindre coaxial, s'exprimant par:

$$I = CV(V_s - V_0) \quad (II-2)$$

où : I est le courant de la décharge couronne, C une constante dimensionnelle en fonction du rayon extérieur du cylindre R , du rayon du fil ionisant r_0 et de la mobilité des porteurs de charge dans la zone de migration k . V_0 représente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne et V_s la valeur de la tension appliquée.

Pour la configuration d'électrodes fil-plan utilisée particulièrement pour les applications de précipitation électrostatique, Cooperman a établi une formule similaire [72, 80] :

$$I = \frac{8 \pi \epsilon \cdot k V (V_s - V_0)}{R^2 \ln(R/r_0)} \quad (\text{II-3})$$

où : ϵ est la constante diélectrique absolue du milieu.

La formule II-3 a été justifiée par de nombreuses études analytiques et expérimentales, la plupart l'avaient lié à la conception des alimentations haute tension en DC ou en AC [81, 82]. Les études expérimentales ont permis de clarifier plusieurs questions importantes en pratique, telles que l'amorçage de la décharge couronne, les pertes de puissance, l'influence des conditions ambiantes (humidité, vent, etc...).

II.2.2. Distribution de la densité de courant

L'étude de la répartition de la densité de courant à la surface de l'électrode plane est une méthode approuvée et efficace pour l'évaluation de l'efficacité de chargement par effet couronne dans ces types de configurations d'électrode [83, 84]. La densité de courant dans différentes régions de l'électrode plane reliée à la terre est mesurée à l'aide d'une carte spéciale conçue d'un circuit imprimé (PCB), sous forme d'une plaque contenant sept sondes de courant (70 mm x 2 mm). Les sondes sont électriquement isolées les unes des autres et du reste du circuit imprimé et reliées successivement à la masse par l'intermédiaire d'un électromètre (Keithley Inst., modèle 6514), tel qu'il est présenté sur la figure II-8. Pour une distance inter-électrodes constante D , il a ainsi été possible de déterminer la distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode plane [85]. Les mesures ont été faites pour les trois configurations d'électrodes « duales » avec et sans écran, bandes ou grille) pour la même valeur de la haute tension appliquée V_s .

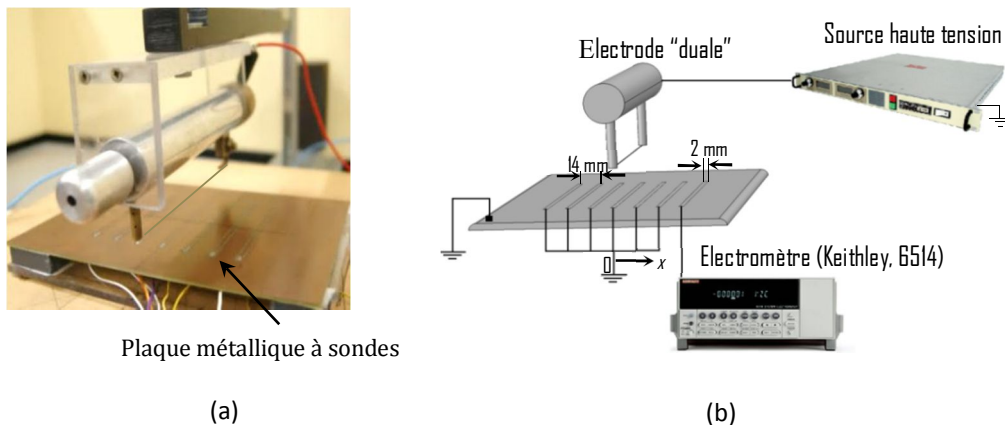


Figure II-8. Photographie (a) et représentation schématisée (b) du banc de mesure de la densité de courant au niveau de l'électrode plane.

II.2.3. Analyse des impulsions de courant de couronne

Une étude expérimentale a été réalisée sur l'analyse du comportement de la décharge couronne produite par la configuration d'électrode duale de type fil, en présence et en absence de l'écran métallique, en examinant la variation de l'allure du courant instantané se propageant sous forme d'impulsions successives au niveau de l'électrode plane. Ces impulsions ont été captées au moyen d'une résistance placée en série, et visualisées à l'aide d'un oscilloscope adéquat [86]. On peut diviser le dispositif expérimental en trois parties : le circuit d'alimentation en énergie électrique, la cellule de la décharge et le dispositif de mesures et d'enregistrement.

La Figure II-9 montre schématiquement les différentes parties constituant le dispositif expérimental. Une source de tension continue négative DC alimentant l'électrode active « duale » située au-dessus d'une électrode plane connecté à une résistance de mesure non-inductive $R = 10\text{ k}\Omega$ reliée à la terre depuis la deuxième borne. L'ensemble des mesures électriques sont réalisées à l'aide d'un oscilloscope approprié (Teledyne Lecroy Inc., Modèle WaveAce 1001 ; bande passante: 40Mhz ; taux d'échantillonnage: 1GS/s).

Les grandeurs électriques mesurées sont : le courant moyen, instantané ainsi que la fréquence du courant de la décharge produit par une électrode duale, dans les deux cas avec et sans écran. Les mesures de courant sont prises entre la sortie du plan et la deuxième borne de la résistance connectée à la terre.

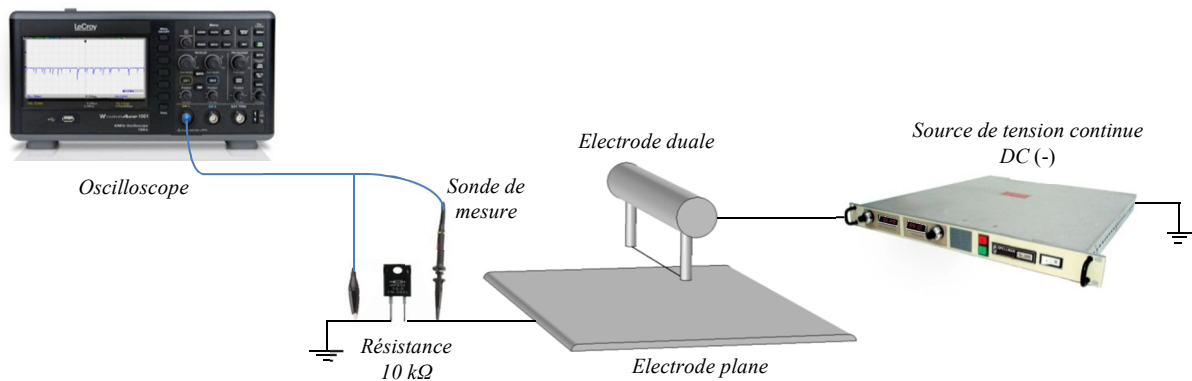


Figure II-9. Schéma global du dispositif expérimental de l'analyse des impulsions de courant produites par la décharge couronne.

La détermination du courant instantané est réalisée par l'intermédiaire de la tension mesurée aux bornes de la résistance de mesure R de $10\text{ k}\Omega$ [86], tel que :

$$i(t) = \frac{U_r(t)}{r} = \frac{U_r(t)}{10} \quad (\text{II-4})$$

II.2.4. Distribution de potentiel électrique

La caractérisation des différents matériaux diélectriques soumis au chargement par décharge couronne, est principalement basée sur la mesure sans contact du

potentiel de surface, l'installation expérimentale (Fig. II-10) utilisée dans le cadre de cette thèse a été réalisée à l'Institut Universitaire de Technologie d'Angoulême (France). Cette technique comprend pour son fonctionnement deux phases : une phase de charge par décharge couronne, en utilisant différentes configurations d'électrodes, et une phase de mesure de potentiel en surface qui se fait sans aucun contact avec le matériau [87]. Les échantillons sont en contact avec une électrode plane reliée à la terre. Une fois qu'ils sont soumis à une décharge couronne, ils sont portés par un chariot qui se déplace dans une direction x pour transférer les échantillons vers le poste de mesure.

Ensuite la sonde électrostatique se déplace dans deux directions orthogonales x - y à une vitesse réglable, afin d'établir des mesures en mode dynamique dans plusieurs points sur la surface libre de l'échantillon. L'ensemble constitue une machine à déplacement tridimensionnel (3D) commandée par un PC (Fig. II-11).

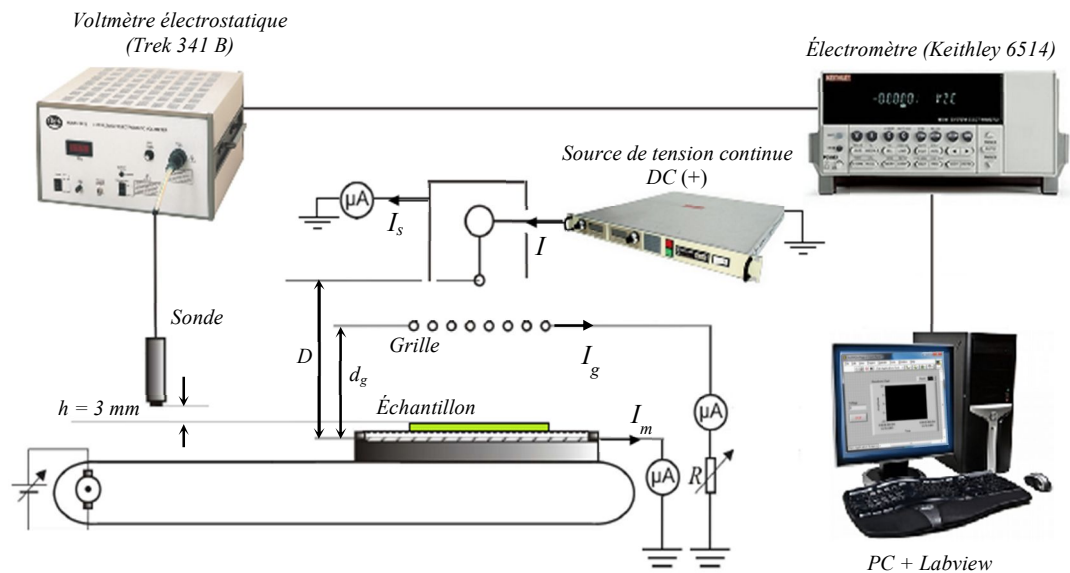


Figure II-10. Schéma du dispositif expérimental de caractérisation des matériaux isolants par la mesure de potentiel de surface.

Le but de notre étude est double : évaluer la répartition des potentiels électriques (profils), et le déclin de potentiel (DPS) sur les surfaces des matériaux isolants préalablement chargés par effet couronne, dans deux arrangements d'électrodes, à savoir l'électrode « duale » et le système d'électrode de type « triode » en présence et en absence de l'écran ou des bandes. Les expériences ont été réalisées sur des plaques en polymères, et des échantillons de médias filtrants non-tissés.

Les principaux paramètres, retenus pour caractériser les différents matériaux diélectriques, sont le niveau du potentiel appliqué, la configuration d'électrode utilisée (duale + écran ou bandes et système d'électrode de type « triode »), effet des dimensions géométriques de la grille et de la distance inter-électrodes, en polarité positive et aussi en polarité négative.

II.2.4.1. Poste de charge

La décharge couronne, utilisée depuis longtemps pour charger des isolants, permet d'effectuer cette opération dans l'air et sans contact. Ce procédé de charge s'effectue en exposant la surface du matériau directement à la décharge couronne générée dans l'une des configurations d'électrodes existantes. Dans le cadre de ce travail, la configuration d'électrode de base utilisée est constituée d'une électrode « duale » de type fil (Fig. II-1 (a)) connectée à une source de haute tension continue DC (Modèle SL40, Spellman Inc.).

Dans une première série d'expériences, la décharge est générée entre une électrode couronne en présence et en absence de l'écran ou des bandes métalliques (Figs. II-2 et II-4) situés au-dessus d'un plan de masse contenant l'échantillon mis à l'étude.

Dans une autre série d'expériences, un système d'électrode de type « triode » a été utilisé avec et sans présence de l'écran métallique à proximité de l'électrode couronne (Fig. II-5). La grille est reliée à la terre à travers une série de résistances d'une valeur totale R variable. De cette manière, pour une intensité I_g fixée par la tension appliquée V_s de la source HT, un potentiel constant bien défini $V_g = RI_g$ sera imposé entre la grille et l'électrode plane. En présence d'un matériau diélectrique posé sur le plan de masse, les charges qui traversent la grille sont attirées vers la masse sous l'action du champ électrique et interceptées par ce diélectrique. Ainsi la surface libre du matériau subit un dépôt de charges sous l'action du champ électrique dû à la différence de potentiel entre la grille et le plan de masse. Le matériau continue à se charger jusqu'à ce que le potentiel de surface de celui-ci soit égal à celui de la grille [59].

Dans toutes les expériences, la surface supérieure de l'échantillon a été exposée à une décharge couronne dans l'air ambiant pendant une durée de $t_s = 10$ s (température: 18 °C à 20 °C, humidité relative : 30 % à 40 %).

II.2.4.2. Poste de mesure de potentiel de surface

Une fois que le média est chargé par décharge couronne, il est transféré vers le deuxième poste dédié à la mesure du potentiel de surface (partie 3 dans la figure II-11). Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un voltmètre électrostatique (Modèle Trek 341B), équipé d'une sonde à induction auto-compensée (Trek Inc., modèle 3450) située à une distance $h = 3$ mm au-dessus de la surface libre de l'échantillon en se déplaçant à différentes distances de l'axe central de l'échantillon (balayage). Les mesures ont été effectuées avec l'échantillon au repos (statique par rapport à la sonde de mesure).

Pour chaque essai, une série de mesures sont effectuées dans des mêmes conditions prédéfinies et à chaque fois après la mesure, l'échantillon a été neutralisé par un neutralisateur commercial (Elcowa Inc., modèle SC 04 B) pour leur utilisation dans des essais ultérieurs, de cette façon, les mêmes conditions d'opération ont été gardé pour l'ensemble d'expériences réalisées.

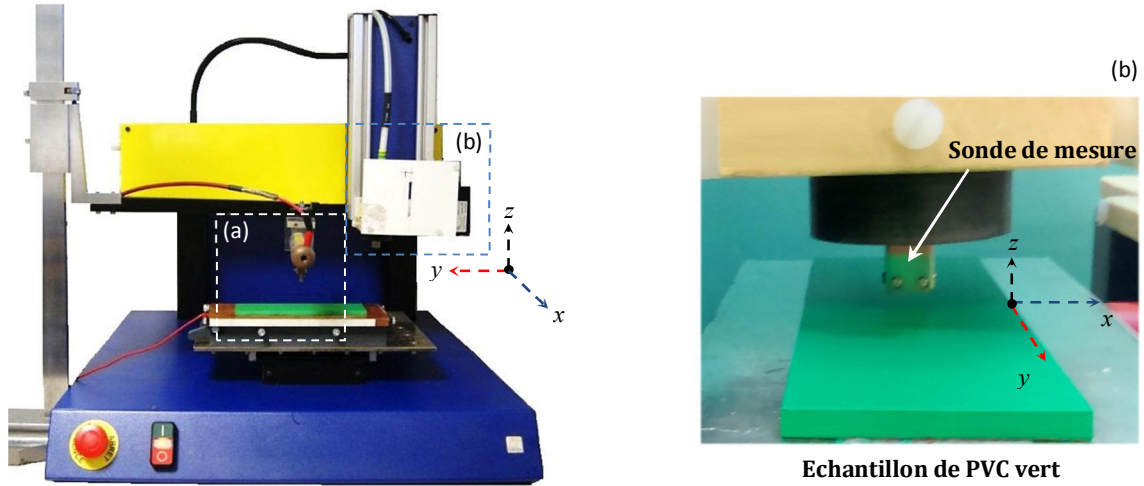


Figure II-11. Photographie de la machine à déplacement tridimensionnel 3D (à gauche) et de la sonde de mesure du potentiel électrique (à droite).

a) Profils de potentiels de surface

Le prélèvement des profils du potentiel électrique à la surface des échantillons préalablement chargés par effet couronne, est réalisé à l'aide d'un système de positionnement x - y - z (Fig. II-11) de la sonde de mesure commandé par un P.C (résolution minimale : 10 μm , vitesse minimale: 1,5 mm.s^{-1} , vitesse maximale: 30 mm.s^{-1}). L'échantillon est étalé sur l'électrode plane, il reste immobile par rapport à la sonde au moment où les mesures ont été prélevées.

Dans la machine à déplacement tridimensionnel (Fig. II-11), un moteur à entraînement pas à pas est programmé de façon à déplacer la sonde dans le mode « statique » ou « point par point », c'est-à-dire, prendre des mesures dans des points différentes dans l'axe central de l'échantillon par un pas bien défini toutes les 2 s. La distance séparant deux points adjacents est de 10 mm.

Lors du mode de mesure « dynamique », c'est-à-dire, prendre une multitude de points de mesure successivement avec une fréquence d'échantillonnage déterminée (F_e) au moment de déplacement transversal de la sonde (balayage) au-dessus de l'échantillon chargé. La fréquence d'échantillonnage est donnée par :

$$F_e = \frac{1}{T} \quad (\text{II-5})$$

où T représente la période séparant deux mesures successives.

V_b représente la vitesse de balayage de la sonde au-dessus de l'échantillon. Différentes fréquences d'échantillonnage ($F_e = 1$ à 64 Hz) et diverses vitesses de balayage ($V_b = 1,5$ à 24 mm.s^{-1}) sont comparées dans la présente étude avec le mode « statique » en terme d'efficacité de mesure. La résolution spatiale k définie par la formule (II-6) peut nous conduire à mieux interpréter ce mode et déterminer la capacité du voltmètre électrostatique à suivre les variations rapides du potentiel réel à la surface d'un échantillon présentant une charge non uniforme [88].

$$k = \frac{V_b}{F_e} \quad (\text{II-6})$$

L'enregistrement des profils de la répartition du potentiel électrique à la surface des échantillons chargés n'a commencé dans nos essais qu'après 200 s suivant la coupure de l'alimentation en haute tension du système d'électrode afin d'éviter les erreurs dues au déclin rapide du potentiel électrique lors des trois premières minutes après le chargement. Pour les mesures effectuées avec les différents types de configurations d'électrodes, le potentiel électrique initial « offset » est ajusté à zéro lorsque la sonde est située face à la plaque métallique mise à la terre.

b) Déclin de potentiel de surface (DPS)

L'approche expérimentale adoptée dans cette étude repose sur une technique très courante qu'on appelle *Déclin de Potentiel de Surface* (DPS), elle présente une méthode d'investigation des propriétés électriques des matériaux isolants. Son intérêt réside essentiellement dans sa simplicité et sa puissance dans la caractérisation de l'aptitude d'un matériau à évacuer une charge électrique déposée sur sa surface. Le principe de la méthode du DPS est de suivre en fonction du temps l'évolution du potentiel de surface dans un point de la surface d'un échantillon préalablement chargé par décharge couronne et se décharge librement [59, 89].

La mesure du DPS à partir d'une sonde électrostatique à condensateur vibrant permet de fournir des informations sur le mode d'écoulement surfacique des charges déposées et sur la mobilité de ces charges. L'acquisition des données de mesures expérimentales a été traitée par un instrument virtuel, développé sous l'environnement LabView. Souvent les courbes de déclin de potentiel sont obtenues sur une durée de 15 minutes. Dans la plupart des cas, des séries de 3 à 5 mesures sont concluantes. Parfois un nombre plus important d'essais a été nécessaire afin de pouvoir ensuite procéder à l'élimination des mesures aberrantes. La figure II-12 présente la face avant de l'instrument virtuel LabView, qui n'est qu'une interface utilisateur graphique. Cette interface permet de contrôler l'acquisition des données des mesures et l'affichage de celles-ci, en sortie, par le programme. La face avant de notre instrument virtuel contient des éléments de commande et un indicateur graphique du déclin de potentiel.

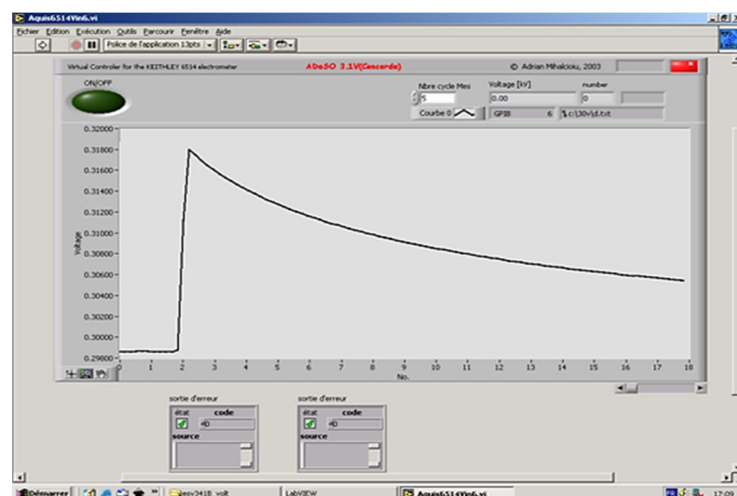


Figure II-12. Courbe de DPS visualisée sur le panneau frontal de l'instrument virtuel.

II.2.4.3. Principe de mesure sans contact de potentiel en surface

Un grand avantage de ce voltmètre électrostatique est sa capacité de mesurer une large gamme des valeurs de potentiel, de 0 à ± 20 kV, sans affecter l'état de charge de l'objet mesuré. Son principe de fonctionnement étant basé sur l'annulation du champ électrique pour la mesure sans contact du potentiel de surface (Fig. II-13), l'instrument se caractérise par une bonne stabilité et une grande précision de mesure même si la distance entre la sonde et l'échantillon n'est pas fixe.

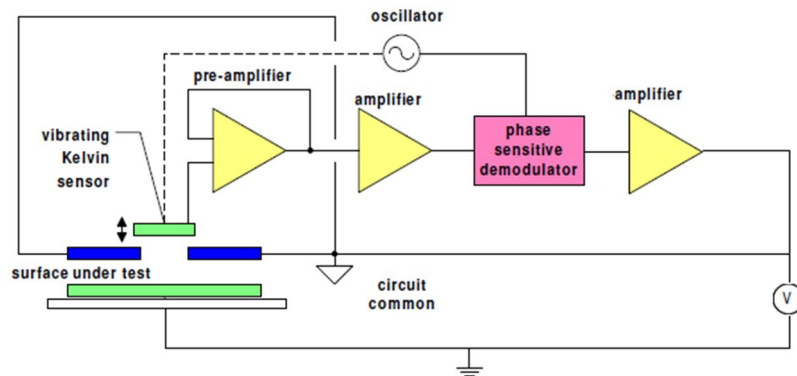


Figure II-13. Principe de mesure sans contact de potentiel de surface [90].

L'annulation du champ est obtenue par asservissement du potentiel de la sonde au potentiel de la surface libre de la cible. En effet la modulation de la position de la lame détectrice de la sonde engendre un courant induit si le champ vu par cette électrode n'est pas nul. Au moyen d'un asservissement, le potentiel de la sonde est varié de manière à annuler ce courant, d'où l'annulation du champ en face d'elle. Le couplage capacitif entre la surface visée et la sonde, la modulation de la distance D entre la lame détectrice et la surface de l'échantillon, ainsi que les différents potentiels sont représentés sur la figure II-14.

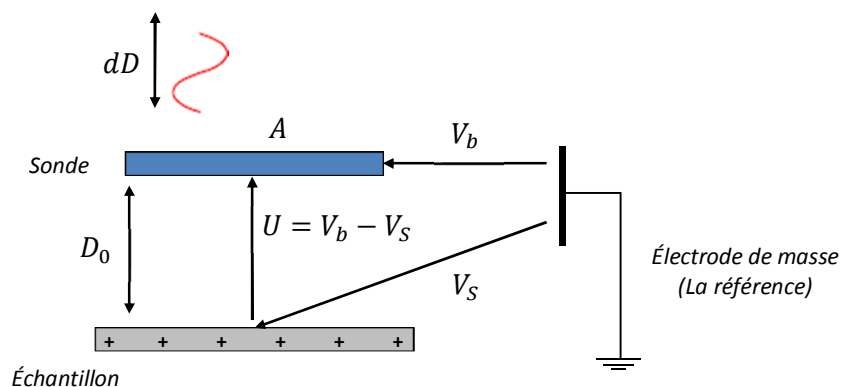


Figure II-14. Couplage capacitif entre la sonde et la surface de l'échantillon.

Le déplacement de l'électrode sonde est perpendiculaire à la surface de l'échantillon. Pour une modulation sinusoïdale autour de la distance D_0 avec une pulsation ω , dont l'amplitude est désignée par D_m , la distance $D(t)$ à tout instant s'écrit par :

$$D(t) = D_m \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II-7})$$

Ainsi la capacité C formée par la sonde et l'échantillon s'exprime en fonction de la permittivité ε , la surface A de l'électrode détectrice et la distance $D(t)$:

$$C = \frac{\varepsilon A}{D(t)} = \frac{\varepsilon A}{D_0 + D_m \cdot \sin(\omega t)} \quad (\text{II-8})$$

Le courant $I(t)$ engendré par la modulation de la distance dépend de la variation de la capacité et de la différence des potentiels entre les surfaces qui définissent cette capacité, désignée par U . L'expression du courant est alors:

$$I(t) = U \cdot \frac{dC}{dt} = U \cdot \left(\frac{\varepsilon A}{D_0 + D_m \cdot \sin(\omega t)} \right) = U \cdot \varepsilon A \frac{D_m \cdot \cos(\omega t)}{(D_0 + D_m \cdot \sin(\omega t))^2} \quad (\text{II-9})$$

Pour que le courant soit nul, à tout instant, il faut que la tension U soit nulle, ce qui conduit à ramener le potentiel de la sonde à celui de la surface de l'échantillon, d'où l'annulation du champ et la possibilité de déterminer le potentiel de surface.

II.3. INSTALLATIONS DE SÉPARATION ÉLECTROSTATIQUE

Bien que la séparation magnétique a été utilisée avec succès pour détecter les matériaux ferreux, la séparation électrostatique, définie comme le tri sélectif des corps électriquement chargés ou polarisés sous l'action des forces de champ électrique [4], représente une solution de choix pour le traitement des particules non ferreux contenues dans les DEEE granulaires (déchets d'équipements électriques et électroniques).

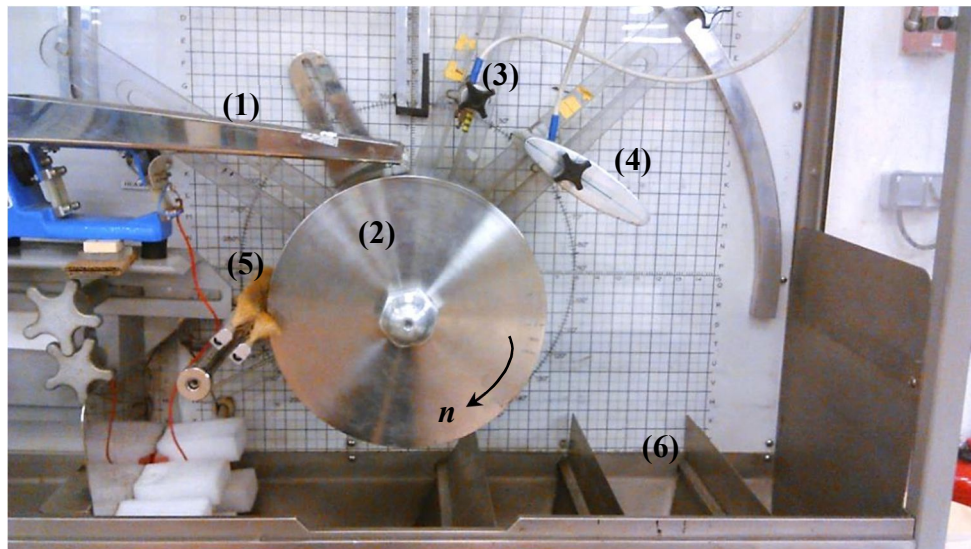
Différents mécanismes physiques (induction électrostatique, décharge couronne et effet triboélectrique) et différents dispositifs (plaque, tambour, chute libre, deux convoyeurs, tapis, etc...) sont utilisés pour la séparation des différents mélanges métalliques et isolants composant les déchets [40, 42, 76, 91].

Des séparateurs électrostatiques à effet couronne, sont utilisés avec succès à l'heure actuelle pour le tri sélectif des matériaux conducteurs et non conducteurs à partir d'une large gamme de DEEE granulaire [92].

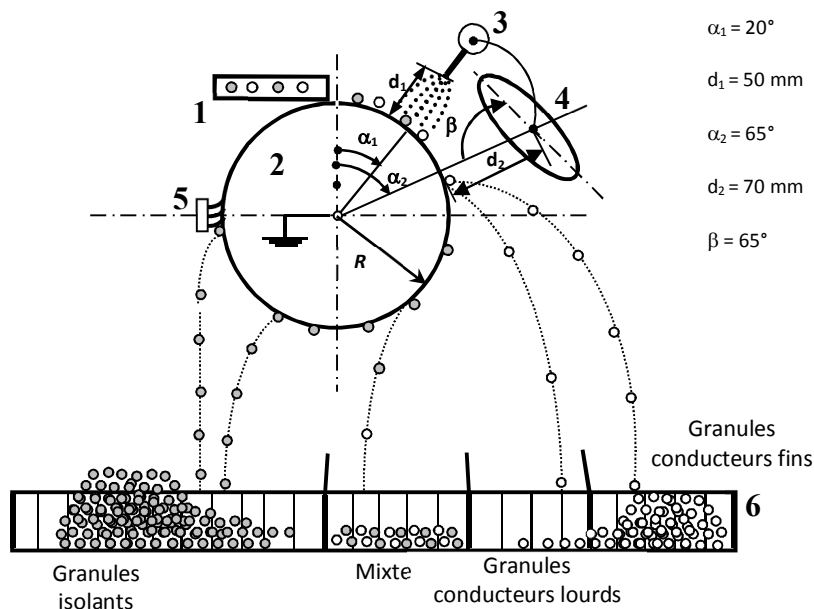
II.3.1. Séparateur électrostatique à cylindre tournant

Dans un séparateur électrostatique à effet couronne de type cylindre tournant, le mélange granulaire à séparer est introduit sur la surface d'un tambour métallique rotatif relié à la terre (partie 2 sur la figure II-15), à travers une goulotte oscillante (1). Un champ électrique est généré entre le cylindre et deux électrodes reliées à une alimentation à haute tension continue.

Le matériau granulaire est chargé par « bombardement ionique » à partir d'une électrode à effet couronne de type « dual » (partie 3 sur la Fig. II-15). Seules les particules non conductrices sont en mesure de préserver leurs charges. Les particules conductrices se déchargent rapidement sur la surface mise à la terre du cylindre tournant, et sont injectées d'elle par un mouvement de projectile dans le côté droite du bac collecteur (6).



(a)



(b)

Figure II-15. (a) Photographie du séparateur électrostatique à cylindre tournant (Modèle « Carpc ») Laboratoire d'Electrostatique Appliquée, IUT d'Angoulême, France), (b) Paramètres et variables dans le processus de séparation électrostatique.

- 1- Vibro-transporteur ;
- 2- Electrode cylindrique reliée à la terre ;
- 3- Electrode couronne reliée à une source de HT continue ;
- 4- Electrode statique reliée à la même source de HT continue ;
- 5- Brosse ;
- 6- Collecteur de particules.

Les particules chargées non conductrices sont collées par la force d'image électrique sur la surface de l'électrode reliée à la terre, et se déplacent avec lui (Fig. II-15 (b)). La loi de décharge exponentielle lente explique la forte adhésion des particules non

conductrices à la surface du tambour, et justifie l'utilisation d'une « brosse » [5] pour récupérer ces particules bien collées, dans le côté gauche du bac collecteur [76].

Le champ électrique produit par l'électrode statique (partie 4 sur la Fig. II-15) charge les particules métalliques par induction électrostatique, de sorte que ces derniers sont repoussés de la surface de l'électrode cylindrique. L'action combinée de chargement par décharge couronne et par induction électrostatique assure un meilleur rendement de la séparation électrostatique. En plus de la configuration du système d'électrode qui génère la décharge couronne et détermine les forces de champ électrique agissant sur les particules, plusieurs autres facteurs physiques influent sur l'efficacité du processus de séparation : la vitesse de rotation, le taux de flux des particules et des conditions ambiantes. Leurs valeurs optimales sont associées à des caractéristiques des matières premières : la nature, la composition, la taille et la forme des granules [93].

Les expériences ont été réalisées sur le séparateur électrostatique à cylindre rotatif (Modèle « *Carpco* ») (Fig. II-15 (a)) du laboratoire d'Electrostatique Appliquée, IUT d'Angoulême, France.

Le but de cette étude est de tester l'efficacité de la séparation électrostatique en présence et en absence de l'écran métallique mis à la terre placé à proximité de l'électrode couronne (Fig. II-2), en vue de caractériser cette configuration d'électrode pour leur utilisation comme un système de chargement des matériaux isolants dans des applications industrielles.

Les variables du processus de séparation ont été fixées comme suit:

- 1) Distance inter-électrodes : $d_1 = 40$ mm.
- 2) Vitesse angulaire du cylindre: $n = 40$ tr/min, rayon du cylindre : $R = 135$ mm.
- 3) Position angulaire de l'électrode couronne : $\alpha_1 = 20^\circ$.
- 4) Position angulaire de l'électrode statique : $\alpha_2 = 65^\circ$.
- 5) Taux d'alimentation des particules : $m = 40$ kg/h
- 6) Inclinaison de l'électrode statique : $\beta = 65^\circ$.
- 7) Distance inter-électrodes de l'électrode statique (forme elliptique) : $d_2 = 70$ mm.

Dans ces expériences, le séparateur a été équipé d'une électrode couronne « duale » de type fil, avec et sans écran. Tous les essais ont été effectués sur le même échantillon (Fig. II-16), à des conditions environnementales stables (18°C – 20°C , 49%–52% d'humidité).

Les matériaux traités sont constituées de 100 g de déchet granulaire des conducteurs électriques fourni par CITF (Conception Industries Technologies Futures, Charente, France). Etant donné que notre étude est focalisée sur l'efficacité de charge par effet couronne dans le séparateur électrostatique, le mélange granulaire est composé de 75 g de matériaux isolants et 25 g de particules de cuivre. Les quantités des produits collectées dans les différents bacs, conducteurs, mixtes et non-conducteurs

sont pesées séparément (les deux bacs des particules conductrices fines et lourdes sont considérés ensemble).

Finalement, les contenus des bacs destinés à récupérer les isolants et les conducteurs ont été évalués dans les deux cas, en présence et en absence de l'écran dans le processus de chargement, afin de comparer l'efficacité de la charge par effet couronne dans le procédé de séparation électrostatique, en utilisant ces deux systèmes d'électrode.

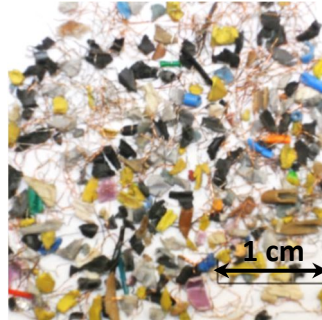


Figure II-16. Constituants des mélanges granulaires soumis à la séparation (taille typique : 2 mm).

II.3.2. Séparateur électrostatique à tapis roulant

Les séparateurs électrostatiques de type cylindre tournant, qui sont actuellement utilisés pour la séparation des métaux et des matières plastiques à partir des mélanges granulaires de taille millimétrique, ne sont pas appropriés pour le traitement des déchets finement broyés. Le séparateur électrostatique à convoyeur métallique pourrait être une solution appropriée pour le tri sélectif des produits conducteurs et non-conducteurs contenus dans les déchets fins et micronisés [94-95].

L'installation conçue par la compagnie CITF (Saint Cybardeaux, France), au profit du laboratoire d'Electrostatique Appliquée, IUT d'Angoulême, est un séparateur électrostatique multifonctionnel à tapis roulant (Fig. II-17).

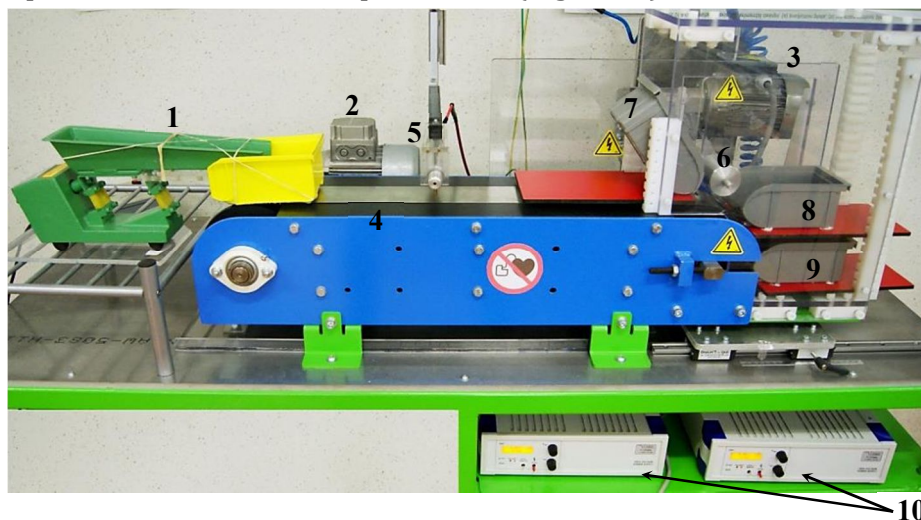


Figure II-17. Photographie du séparateur électrostatique à tapis roulant, (Laboratoire d'Electrostatique Appliquée, IUT d'Angoulême, France).

1: Vibro-transporteur; 2 et 3: Moteurs électriques; 4: Convoyeur métallique; 5: Electrode couronne; 6: Electrode cylindrique tournante; 7: Bac n°1; 8 : Bac n°2; 9 : Bac n°3; 10: Sources de haute tension continue (DC).

L'équipement présenté sur la figure II-17 est destiné aux études de faisabilité de la séparation électrostatique sur des petites quantités de mélanges constitués de particules fines et micronisées.

Une monocouche des matériaux granulaires finement broyés est déposée sur la surface d'un convoyeur métallique en mouvement, à 700 mm de longueur et 70 mm de largeur, qui joue le rôle d'une électrode reliée à la terre. Ce convoyeur est entraîné par un moteur triphasé électrique d'une puissance de 120 W, dont la vitesse est contrôlée par un convertisseur électronique.

II.3.2.1. Tests de chargement par effet couronne

Dans la première série d'expériences, le processus de charge des particules isolantes par effet couronne en présence et en absence de l'écran métallique à proximité de l'électrode « duale » a été étudié en utilisant la configuration du séparateur électrostatique multifonctionnel présenté sur la figure II-18.

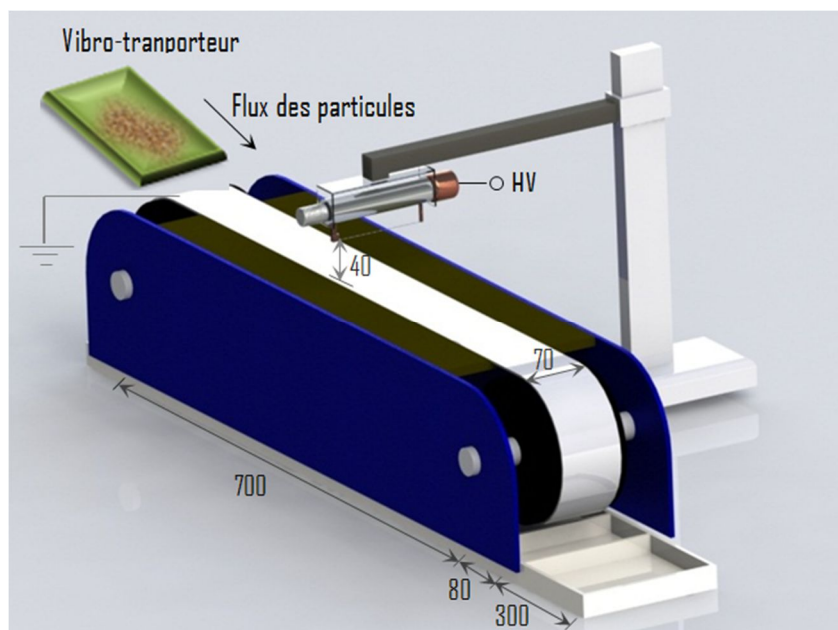


Figure II-18. Système de chargement des granules d'ABS dans le séparateur électrostatique à tapis roulant.

La décharge couronne est générée entre une électrode couronne « duale » de type fil avec et sans écran et la surface du tapis convoyeur à bande métallique relié à la terre, déplaçant à une vitesse constante $n = 3,8$ m/min. La distance entre le fil et le convoyeur a été ajustée à $D = 40$ mm pour permettre aux particules de se charger par effet couronne sans avoir un vent électrique qui les met en mouvement sur la surface du tapis, notamment dans le cas de l'absence de l'écran.

Des particules fines d'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) de masse totale $m = 10$ g ont été introduites dans le séparateur à travers un vibro-transporteur (Fig. II-18). Les trois bacs collecteurs situés au-dessous du séparateur sont destinés à récupérer les particules d'ABS après le processus de chargement, ils sont positionnés comme le montre la figure II-19. Les particules chargées par effet couronne en utilisant les deux

systèmes d'électrodes, avec et sans présence de l'écran, s'attachent à la surface du tapis grâce à la force d'image électrique et se détachent du séparateur à l'aide d'une brosse située dans l'extrémité gauche du bac N°3. Les particules non chargées tombent en chute libre dans le bac N°1, tandis que le bac N°2 est censé contenir les grosses particules mal chargées ou ceux qui perdent leur charge assez rapidement.

Cette installation nous a permis de tester, en premier lieu, l'efficacité de la présence de l'écran sur le processus de chargement des granules non-conductrices dans les installations industriels.

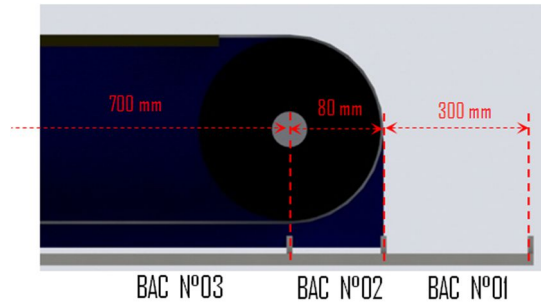


Figure II-19. Représentation schématique des différents bacs collecteurs utilisés.

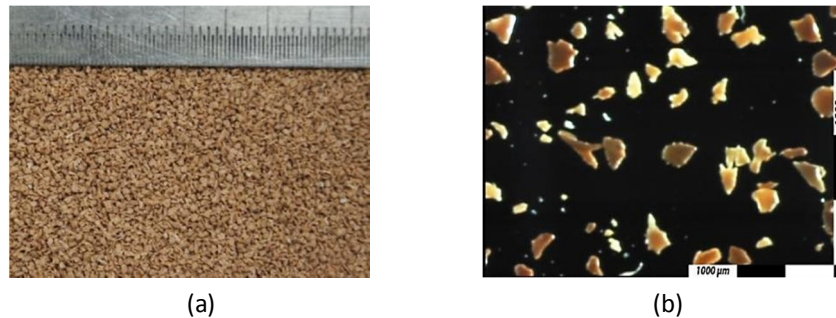


Figure II-20. Particules d'ABS exposées au chargement par effet couronne (taille : $500\ \mu\text{m} < \phi < 1000\ \mu\text{m}$),
(a) Echelle macroscopique, (b) Echelle microscopique.

Un tamiseur vibrant nous a permis d'obtenir des fines particules de trois classes granulométriques différentes (Fig. II-20) :

$500\ \mu\text{m} < \phi < 1000\ \mu\text{m}$; $250\ \mu\text{m} < \phi < 500\ \mu\text{m}$ et $125\ \mu\text{m} < \phi < 250\ \mu\text{m}$.

Les expériences ont été effectuées dans des conditions climatiques relativement stables : humidité relative $RH = 43-45\%$ et température $T = 20-25\ ^\circ\text{C}$.

II.3.2.2. Tests de séparation électrostatique

D'autres expériences de séparation électrostatique ont été effectuées sur le séparateur multifonctionnel à tapis roulant présenté sur la figure II-17. Les échantillons utilisés dans les expériences sont composés d'un mélange de 0,5 g d'aluminium (Al) et 0,5 g de polystyrène (PS) dont la taille granulométrique est de classe 125-250 μm . Les matériaux pulvérulents à séparer sont initialement déposées par une goulotte oscillante (partie 1 sur la Fig. II-17) sous forme d'une monocouche sur la surface d'un convoyeur formé d'une bande métallique (4), qui joue aussi le rôle d'électrode liée à la terre. Le

convoyeur est entraîné par un moteur électrique triphasé (2). Ce convoyeur transporte les particules à travers la zone de la décharge couronne générée par une électrode « duale » de type fil (5), connectée à une alimentation haute tension continue de polarité positive (10), (Modèle SPL 300, 100 kV; 3 mA; SPELLMAN). Les particules vont ainsi être chargées, et conservent leurs charges plus ou moins longtemps en fonction de leur conductivité. Ensuite, le convoyeur les conduit dans la zone de champ électrique intense créé par une électrode cylindrique tournante en acier (6), de diamètre 50 mm et de largeur de 70 mm, fixée à une distance $h = 20$ mm et une position angulaire $\alpha = 15^\circ$ (Fig. II-21). Cette électrode est entraînée par un moteur électrique (partie 3 sur la figure II-17) et connectée à une alimentation haute tension de polarité positive $U = 22$ kV. D'après une étude récente bien détaillée sur ce séparateur [94], ces paramètres ont été définis comme des conditions optimales pour le traitement des mélanges micronisés dans ce type de séparateur électrostatique.

La décharge couronne est générée par une électrode « duale » de type fil connectée à une source de tension continue de polarité positive. Deux bandes parallèles rectangulaires de 10 mm de hauteur et 120 mm de longueur ont été placées, chacune d'entre elles, à une distance fixe $D_b = 40$ mm du fil, et reliées à la terre (Fig. II-4). Le fil et les limites inférieures des bandes sont situés à une distance D de la surface métallique du convoyeur mise à la terre. Cette configuration d'électrode a présenté son efficacité à réduire remarquablement le vent ionique produit par la décharge couronne qui présente un désavantage majeur de la séparation électrostatique de ce type de particules fines ou micronisés.

Deux séries d'expériences ont été menées sur ce séparateur, la première est pour l'étude des taux de pertes de fines particules dues au vent ionique créé par la décharge couronne, en présence et en absence des bandes métalliques, et sans utilisation de l'induction électrostatique. Et la deuxième, concernant la séparation électrostatique par effet de couronne.

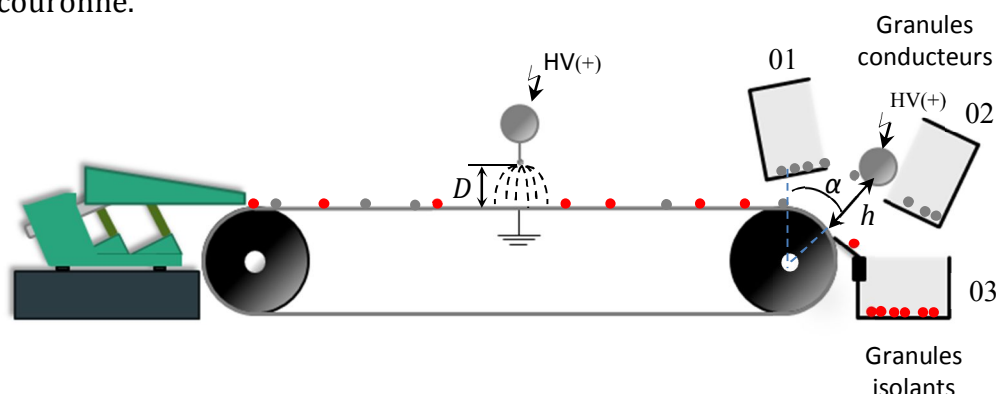


Figure II-21. Principe de fonctionnement du séparateur électrostatique à tapis roulant.

Dans la première série d'expériences, l'effet de la présence des bandes sur le vent ionique produit par la décharge couronne a été étudié en fonction de l'intervalle de la décharge D et de la tension appliquée V_s . Le mélange a été introduit sur la surface du convoyeur par l'intermédiaire d'une goulotte oscillante, pour être chargé par l'électrode

couronne de type « dual », en présence et en absence des bandes reliées à la terre (Fig. II-4). L'électrode cylindrique rotative du séparateur n'a pas été mise sous tension, cela signifie qu'aucune force de champ électrique n'a été exercée sur les particules dans ce compartiment, et devront donc être toutes récupérées dans la boîte n° 3. La masse totale introduite dans le séparateur (M_{int}) a été soustraite de la masse effectivement récupérée dans cette boîte (M_{rec}). De cette façon, le pourcentage de pertes dues au vent ionique P (%) a été calculé selon la formule suivante:

$$P = \frac{M_{int} - M_{rec}}{M_{int}} \times 100 \quad (II-10)$$

Dans la dernière série d'expériences, des essais de séparation électrostatique ont été effectués avec et sans décharge couronne, en alimentant l'électrode cylindrique cette fois-ci, et en étudiant les paramètres précédemment décrits. Les particules non-conductrices chargées par effet couronne collent sur la surface du convoyeur connecté à la terre sous l'action de la force d'image. Le champ électrique produit par l'électrode cylindrique de même polarité que l'électrode couronne n'a pas d'incidence sur leur trajet et pratiquement toutes les particules non-conductrices sont récupérées dans la boîte N°3 du collecteur. D'autre part, les particules conductrices en contact avec le convoyeur relié à la masse, se chargent par induction électrostatique et sont attirés par l'électrode cylindrique. La plupart d'entre elles sont récupérées dans la boîte N°2 du collecteur (Fig. II-21). Certaines particules conductrices font un impact sur l'électrode cylindrique et prennent des charges de même polarité que cette électrode à cause du contact, et sont déviées par une force de répulsion vers la boîte N°1. Les boîtes 1 et 2 sont censées contenir principalement l'aluminium, donc elles sont considérées ensemble pour l'analyse des résultats expérimentaux. Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions ambiantes stables (Température : 24 °C à 27° C, Humidité Relative : 40 % à 50 %).

II.4. ANALYSE NUMERIQUE DU CHAMP ELECTRIQUE PAR COMSOL MULTIPHYSICS

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

- La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
- La définition de sa géométrie.
- La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.
- La résolution du problème à l'aide de l'un des différents solveurs.
- La visualisation des résultats.

II.4.1. Modèle développé

Grâce au calcul, même simplifié, on a pu tester plusieurs configurations d'électrodes pour optimiser le comportement de notre système de charge. Cela évite de

multiplier les prototypes et les essais de tests réels, les supports physiques ne servent plus à chercher une solution. L'interface graphique de *Comsol Multiphysics* nous a permis de définir avec aisance notre système.

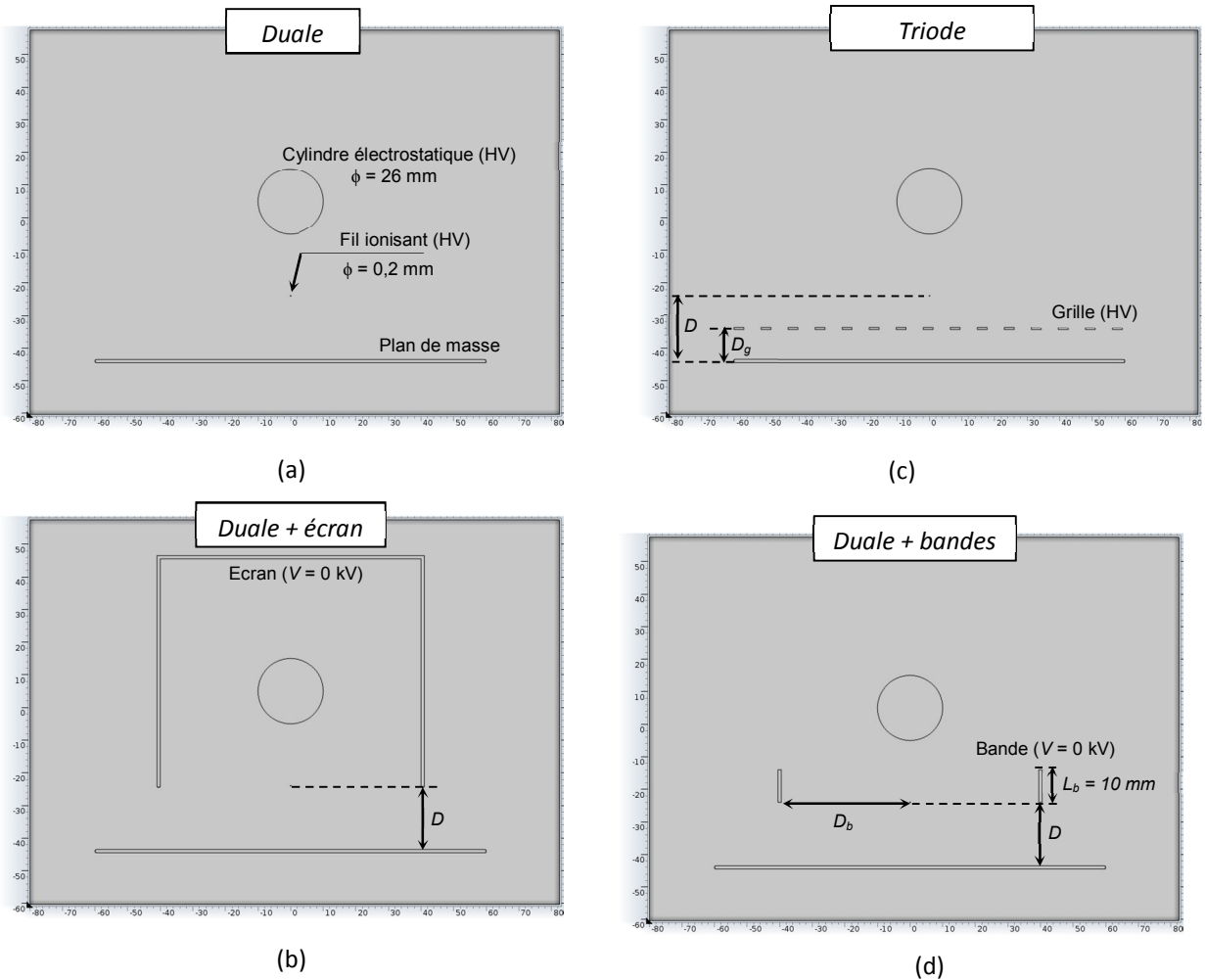


Figure II-22. Représentation des modèles de simulation de différents types de configurations d'électrodes. Duale fil-plan (a) Duale + écran (b) Système d'électrode de type « triode » (c) et Duale + 02 bandes (d).

Le modèle numérique 2D de la configuration d'électrodes « duale » fil-plan est décrit à l'aide de deux cercles représentant le fil ionisant et le cylindre électrostatique, ainsi qu'un plan horizontal présentant une électrode de masse, comme l'indique la figure II-22(a). Un écran sous forme d'un rectangle coupé en bas est inséré à proximité de l'électrode « duale » pour les configurations écrantées (Fig. II-22(b)), ainsi qu'une autre configuration à deux bandes parallèles a été testée dans le même contexte (Fig. II-22(d)). Dans le cas du système d'électrode de type « triode », la grille intercalée entre le fil et le plan est représentée par des petits rectangles de dimension (2 x 0,5 mm), décalés horizontalement par une distance de 7 mm (Fig. II-22(c)).

En utilisant la bibliothèque des matériaux, on peut créer de nouveaux matériaux pour construire le système. Par exemple, dans notre cas, nous avons introduit le cuivre à la fois pour le fil, le cylindre électrostatique ainsi que le plan de masse. L'Aluminium est

utilisé pour la grille du système d'électrode de type « triode », l'écran ou les bandes parallèles pour les deux autres configurations.

Après avoir préparé les différents éléments constituant les diverses géométries à étudier, il est indispensable de caractériser avant de lancer les calculs, les matériaux composant les configurations d'électrodes développées, en assignant à travers le module électrostatique les données électriques et les conditions aux limites imposées.

II.4.2. Maillage

Les différentes procédures suivies pour discrétiser la géométrie sont :

- Création d'un système de discrétisation.
- Discrétisation des différents éléments composants la géométrie (on impose la méthode utilisée par le logiciel pour le découpage).
- Maillage des différentes faces, on a spécifié pour notre étude les dimensions des éléments les plus fines possibles (extrêmement fin).
- Les différentes surfaces ainsi délimitées, sont ensuite découpées en éléments finis et constituent le maillage du problème. Les figures II-23 (a-d) donnent les formes de maillage pour toutes les configurations d'électrodes étudiées.

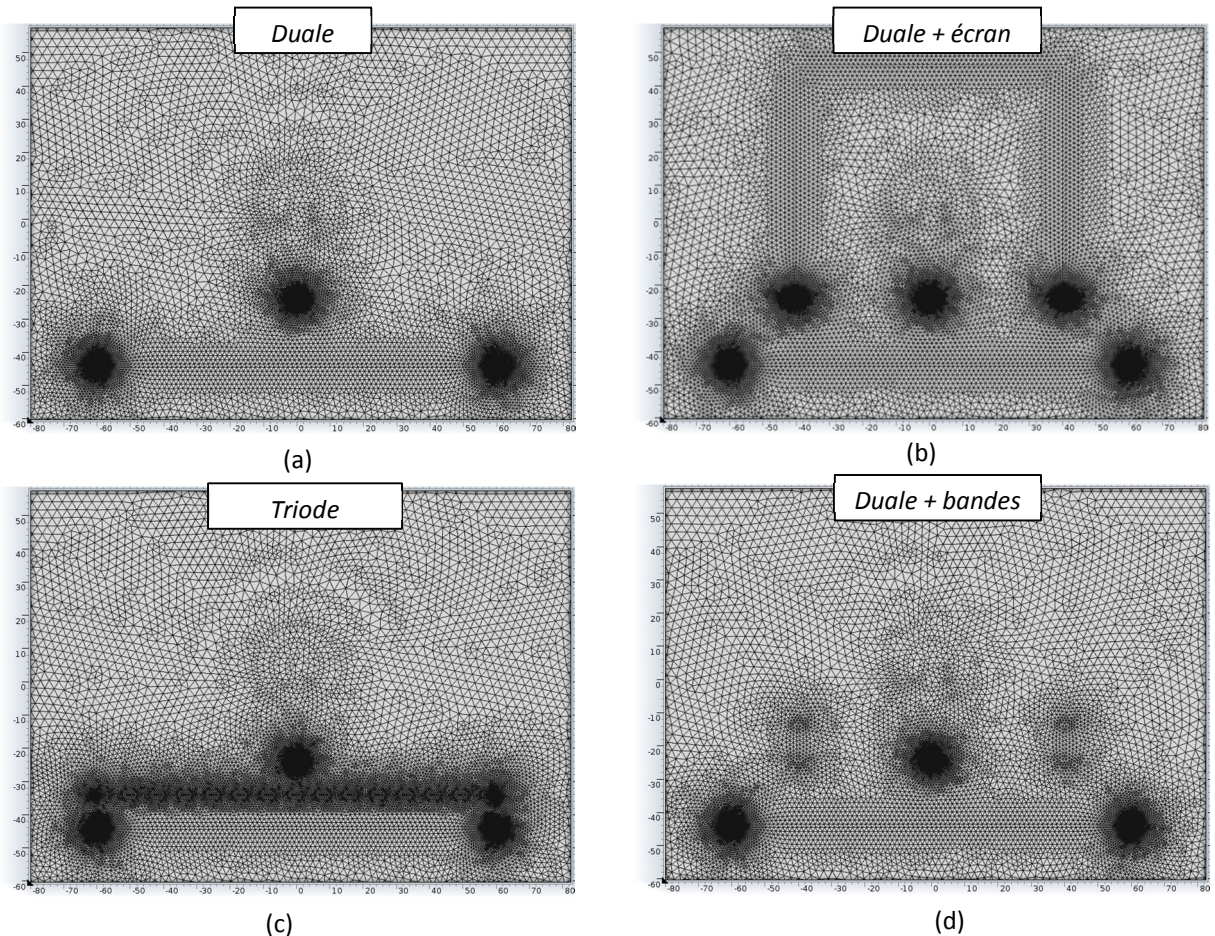


Figure II-23. Représentation des maillages de différents types de configurations d'électrodes : Duale fil-plan (a) Duale + écran (b) Système d'électrode de type « triode » (c) et Duale + 02 bandes (d).

Après avoir dessiner les différentes géométries d'électrodes, assigner les paramètres physiques et électriques aux éléments constituant la configuration dessinée et lancer les calculs par le logiciel en régime stationnaire, dans le cas électrostatique c'est-à-dire sans présence des charges d'espace dans l'espace inter-électrodes, on obtiendra la valeur du champ électrique sur la surface du fil ionisant pour différents arrangements d'électrodes et dans plusieurs situations, cette valeur influe sur la tension seuil d'amorçage couronne et détermine donc l'influence de certains paramètres opératoires sur le processus de développement de la décharge [1].

II.5. CONCLUSIONS

La partie expérimentale est la base de toute investigation car, elle constitue la source des données nécessaires pour le déroulement et le prélèvement des résultats obtenus. Pour cette importance, une description détaillée a été donnée au dispositif expérimental, en présentant :

1. Les arrangements d'électrodes produisant la décharge couronne qui sont soit de nouvelles configurations développées dans le cadre de cette thèse (duale + écran ou bandes) ou des configurations couramment utilisées tel que les systèmes d'électrode de type « triode ».
2. Les dispositifs nécessaires pour la caractérisation de ces configurations tels que : (a) le relevé des caractéristiques courant-tension, (b) la distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode plane, (c) la technique du DPS ou l'étude de l'évolution dans le temps du potentiel de surface présentant une technique simple mais riche en résultats et (d) l'analyse des profils de potentiels de surface qui reste une source d'informations sur les caractéristiques électriques des isolants chargés dans les différentes configurations d'électrodes.
3. Les deux séparateurs du laboratoire : à cylindre tournant et à tapis roulant faisant l'objet des tests de séparation électrostatique permettant de confirmer les essais de caractérisations expérimentales menés sur l'ensemble des configurations d'électrode étudiées.

Le relevé des caractéristiques courant-tension et la distribution de la densité de courant, sont deux facteurs qui déterminent la valeur de la charge d'un diélectrique en champ ionisé, ils dépendent de la configuration d'électrode ionisante utilisée. Dans le chapitre qui va suivre, nous présenterons les résultats expérimentaux relatifs à ces deux aspects dans différentes configurations d'électrodes, en plus, de l'analyse de la forme des impulsions de courant générées dans le cas d'une électrode « duale » muni d'un écran, et comparé avec le cas d'une configuration classique sans écran. Finalement, les résultats expérimentaux seront discutés en rapport avec l'analyse numérique du champ électrique calculé dans les différentes configurations d'électrodes.

CHAPITRE III

ETUDE DES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES ELECTRODES COURONNE

Nous abordons dans le présent chapitre une étude électrique de la décharge couronne dans une configuration d'électrode « duale », cette étude sera divisée en trois parties. Le premier volet traite la caractérisation du phénomène de la décharge couronne dans plusieurs configurations, à savoir l'arrangement « dual » avec ou sans écran ou bandes, en traçant les caractéristiques courant-tension pour différents paramètres (type de configuration, polarité, distances inter-électrodes, etc...), ainsi que des calculs numériques du champ électrique sur la surface du fil ionisant seront discutés en rapport avec les résultats obtenus expérimentalement. L'objectif principal est d'étudier l'influence des différents paramètres opératoires sur le développement de la décharge couronne dans différentes configurations d'électrodes.

Le deuxième volet concerne la distribution de la densité de courant en fonction de la position de la sonde par rapport au fil, pour la même distance inter-électrodes, la même tension appliquée et pour des situations spécifiques : avec et sans écran ou des bandes, à différentes dimensions relatifs à ces nouvelles configurations d'électrodes étudiées. Dans cette partie, nous présenterons des distributions des lignes équipotentiels ainsi que des lignes de champs électriques pour confirmer les résultats expérimentaux de la distribution de la densité de courant mesurée au niveau de l'électrode plane.

Bien que tous ces résultats soient donnés en polarité positive de la tension appliquée, la caractérisation des impulsions Trichel formées en polarité négative feront l'objet d'une étude détaillée dans la troisième partie de ce chapitre.

III.1. CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION (I - V)

Diverses configurations ont été décrites dans la littérature, accompagnées de courbes de courant-tension permettant leur comparaison, sous certaines conditions bien définies (distance à l'électrode reliée à la terre, polarité de l'électrode haute tension, etc...) [75, 77]. Beaucoup de travail a déjà été fait afin de caractériser les différents types d'électrodes couronne et de calculer l'intensité du champ électrique, ainsi que la densité de charge ionique qu'ils génèrent [72, 85].

En effet, l'efficacité d'un processus électrostatique telle que la séparation électrostatique dépend de la valeur maximale, mais aussi de la répartition spatiale du champ électrique et de la densité de la charge ionique créée lors des décharges couronne [96]. La charge acquise par les particules isolantes dépend du courant délivré par effet couronne, d'où l'intérêt de connaître la caractéristique du courant en fonction de la tension appliquée $I(V)$ [76].

Afin de caractériser les différentes configurations d'électrodes, en raison de leur utilisation dans les divers processus électrostatiques, nous allons étudier l'aspect des caractéristiques courant-tension pour une nouvelle classe de configurations d'électrode couronne à savoir l'arrangement « dual » associé à des éléments métalliques tels que l'écran, les bandes ou la grille.

III.1.1. Rôle du cylindre électrostatique

Dans les électrodes de type « dual », le cylindre électrostatique joue le rôle d'un support mécanique pour le fil ionisant (Fig. III-1), ainsi, il possède une influence significative sur la tension seuil et par conséquent sur le développement de la décharge couronne [97].

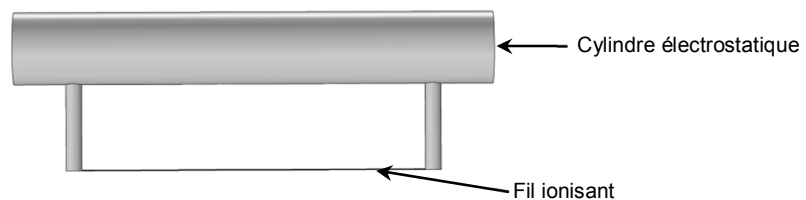


Figure III-1. Electrode couronne duale de type fil.

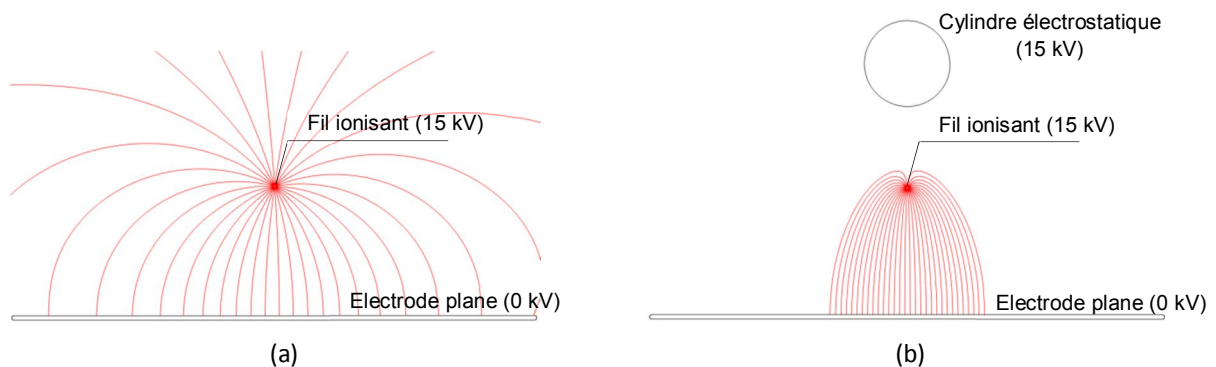


Figure III-2. Orientation des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant (a) configuration d'électrodes fil-plan (b) configuration d'électrode « duale » de type fil ($V = 15$ kV, $D = 30$ mm).

L'analyse numérique du champ a montré que l'électrode couronne « duale » (avec cylindre métallique) réoriente toutes les lignes de champ électrique émises par le fil ionisant vers l'électrode plane reliée à la terre, de ce fait, la décharge devient plus concentrée dans une zone limitée en comparaison avec une électrode couronne sans cylindre électrostatique (Fig. III-2). Bien que l'absence du cylindre a un effet considérable sur la distribution du champ électrique au voisinage du fil, les calculs numériques présentés sur la figure III-3 montrent qu'en l'enlevant, l'intensité maximale du champ électrique sur la surface du fil ionisant croît de 133 kV/cm à 216 kV/cm. Ceci est en bon accord avec les résultats trouvés par D. Rafiroiu [97, 98], qui a démontré que la présence du cylindre électrostatique diminue remarquablement l'intensité du courant produit par la décharge couronne.

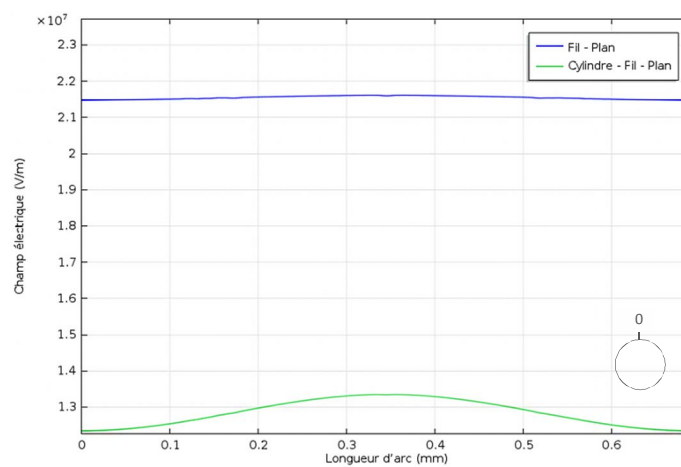


Figure III-3. Distribution de champ électrique sur la surface du fil ionisant, en fonction de la présence du cylindre électrostatique ($D = 30$ mm et $V = 15$ kV).

Dans le cas des séparateurs électrostatiques, d'autres électrodes électrostatiques (tubulaires) sont placées à proximité des électrodes couronne « duales », qui à leurs tour diminuent aussi bien la caractéristique courant-tension par rapport à la configuration fil-plan (Fig. III-4).

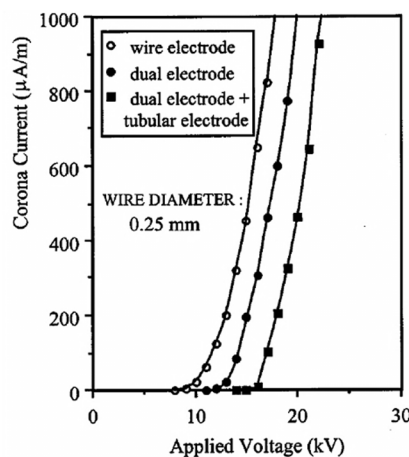


Figure III-4. Caractéristiques courant-tension pour les trois configurations d'électrodes fil-plan, duale, et duale + électrode tubulaire, diamètre du fil $\phi = 0.25$ mm et $D = 25$ mm [97].

Malgré la distribution spatiale restreinte du champ électrique, l'effet de l'élément cylindrique de l'électrode ionisante ne peut pas être négligé. D'un autre côté, la présence du support électrostatique fait focaliser la décharge dans une zone limitée où les particules isolantes font leurs passages dans les séparateurs électrostatiques, et en même temps assurer le processus de charge sans avoir des fuites voir même des étincelles avec d'autres éléments situés à proximité de l'électrode couronne et reliés à la terre tel que le vibreur transporteur [76].

III.1.2. Effet de la polarité de la tension appliquée

La figure III-5 montre l'allure de la caractéristique courant-tension de la configuration fil-plan de type « dual » pour les deux polarités.

Les courbes expérimentales obtenues nous permettent de déduire les courbes de tendances pour les deux polarités à l'aide de la loi (II-2) précitée dans le chapitre précédent [99]. Les paramètres d'ajustement de l'équation II-2 pour notre modèle sont comme suit :

- Polarité positive : $C = 0.29 \mu\text{A}/\text{kV}^2$ et $V_0 = 12.3 \text{ kV}$
- Polarité négative : $C = 0.306 \mu\text{A}/\text{kV}^2$ et $V_0 = 14.3 \text{ kV}$

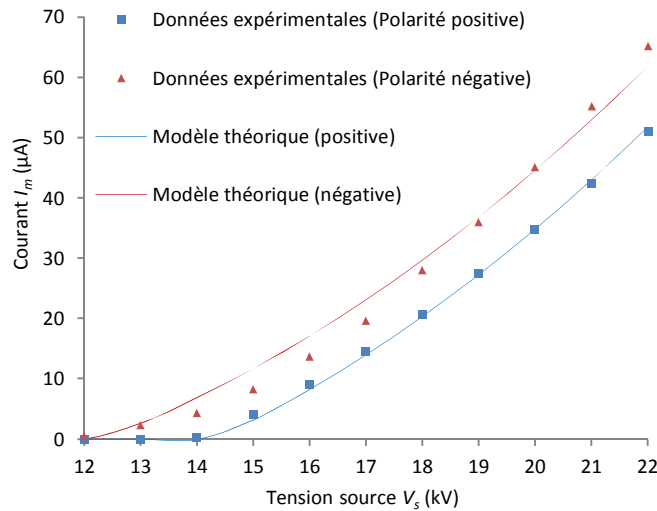


Figure III-5. Caractéristiques courant-tension pour les deux polarités positive et négative pour $D = 40 \text{ mm}$.

La tension d'apparition de la décharge couronne négative est généralement plus faible comparée à la décharge positive ($V_0^- < V_0^+$). De plus, le courant I_m de polarité négative est supérieur à celui généré en polarité positive, cela est dû à une mobilité des porteurs de charge plus importante en polarité négative ($C^- > C^+$). C'est l'une des raisons majeures qui explique l'emploi de la polarité négative dans l'industrie de la séparation et dans la plupart des applications de précipitation électrostatique [76, 100]. Toutefois, la plupart des caractéristiques I - V présentées dans ce chapitre ont été réalisées en polarité positive, avec laquelle la décharge couronne est plus stable (lueur continue), facilitant ainsi les mesures des courants de couronne à l'aide d'un simple micro-ampèremètre. La difficulté rencontrée en polarité négative, est que le courant produit par la décharge

couronne est sous forme d'impulsions « Trichel », fortement variables en amplitude et en fréquence en fonction du temps [14, 35].

Par ailleurs, l'apparence visuelle des deux décharges est complètement différente. La décharge couronne négative génère des spots lumineux discrets irrégulièrement répartis le long des fils appelés « Tufts » [16, 101], ces spots sont visuellement stables et produisent un sifflement aigu. Leurs nombre et leur luminosité augmentent avec le courant et la tension. Tandis que la décharge positive se développe sous forme d'une gaine lumineuse uniforme autour du fil comme le montre la figure III-6.



Figure III-6. Photographies de l'aspect lumineux de la décharge couronne ; (a) Polarité positive, (b) Polarité négative ($V = 20 \text{ kV}$, $D = 30 \text{ mm}$).

D'autre part, la quantité d'ozone dégagée par la décharge couronne est plus élevée en polarité négative par rapport à la polarité positive [102]. A ce sujet, dans certaines situations, le dégagement d'ozone est indésirable, à cause de l'effet intense d'oxydation sur l'installation ainsi que l'impact physiologique sur l'opérateur. En même temps, ce phénomène peut être pris en compte et même avantageux dans le cas de traitement des grains d'orge et d'autres applications, car l'ozone a un fort effet de stérilisation. L'ozone qui est un oxydant tue les bactéries se trouvant sur la surface des grains [76].

Tableau III-1. Comparaison entre la décharge en polarité positive et celle en polarité négative.

Polarité positive	Polarité négative
Décharge silencieuse	Décharge sonore
Moins de production d'ozone	Production d'ozone élevée
Courant de décharge plus faible	Courant de décharge plus élevé
Vent ionique plus fort	Moins de vent ionique
Courant plus stable (steady state)	Courant moins stable (Trichel pulses)
Effet lumineux sous forme de « glow continu » contournant le fil	Spots lumineux répartis sur la surface du fil
Pertes moins élevées	Pertes par effet couronne plus élevées

Toutefois, les streamers qui caractérisent l'effet couronne positif causent un vent ionique plus fort. D'après Bérard et al. [101], la vitesse de déplacement des ions obtenus en polarité positive est toujours supérieure par environ 40 % par rapport à celle obtenue avec la polarité négative. Pour la décharge négative, la vitesse de déplacement est tracée en fonction du courant moyen, c'est-à-dire une moyenne des composantes continues et pulsées. Cependant, il a été démontré que le vent ionique produit pendant les pics de courant est significativement inférieur à celui produit entre les impulsions. Par conséquent, la vitesse doit être inférieure lors d'une couronne négative par rapport au cas de la couronne positive. En même temps, dans les mêmes conditions et pour la même tension appliquée, les pertes d'énergie électrique due à l'effet couronne négative sont supérieures à celle due à la couronne positive [103]. Le tableau III-1 réunit quelques détails permettant de distinguer et de comparer les deux polarités positive et négative.

III.1.3. Différents types d'électrodes couronne « duales »

Parmi plusieurs systèmes d'électrodes produisant la décharge couronne dans des applications industrielles telles que la séparation électrostatique, on distingue la configuration « duale » qui est largement utilisée dans ce domaine. Ceci est dû à leur efficacité remarquable de dépôt de charge, une forte résistance aux chocs mécaniques et électriques, une facilité d'entretien et un coût de fabrication réduit [11]. L'électrode couronne de type « dual » est un dispositif constitué d'un ou de plusieurs éléments ionisants (fils, aiguilles, lames) attachés à un support métallique (Fig. II-1).

Les effets de plusieurs paramètres sur les caractéristiques courant-tension seront investigués ci-dessous, tels que : la hauteur h et la largeur l de l'électrode « duale », la présence des objets métalliques à proximité de l'électrode couronne, ainsi que le système d'électrode de type « triode ».

III.1.3.1. Effet de la hauteur des électrodes couronne h

Les caractéristiques courant-tension des électrodes couronne « duales » des deux types lame et segments de fil sont montrées respectivement sur la figure III-7 (a) et (b), pour une hauteur de l'élément ionisant h variable.

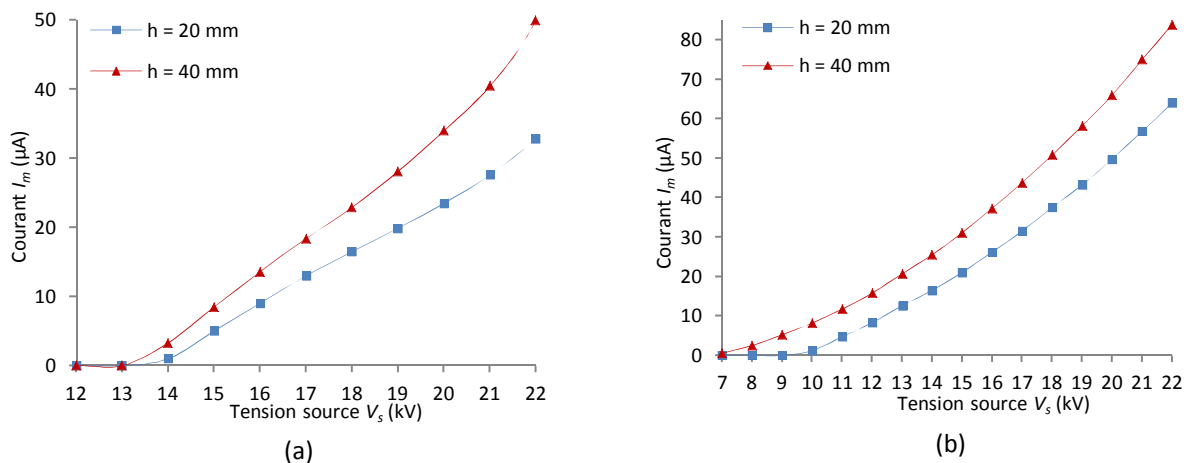


Figure III-7. Caractéristiques courant-tension pour deux hauteurs h de l'électrode « duale » de type lame (a) et de type segments de fil (b) Longueur $l = 100$ mm, distance inter-électrodes $D = 40$ mm.

L'analyse des résultats des expériences présentées sur la figure III-7 montre que la tension de seuil couronne (V_{onset}) et le courant I_m dépend de la hauteur h de l'électrode couronne. Pour une hauteur de lame ou de segment de fil émetteur h plus grande, V_{onset} est plus petite pour la même distance inter-électrodes $D = 40$ mm. A une tension appliquée, le courant de couronne I_m est plus élevé pour une électrode avec une hauteur h plus grande.

Le paramètre de la hauteur h influe remarquablement sur la décharge couronne. Lorsque la partie ionisante d'une électrode « duale » est située à une distance plus loin du cylindre électrostatique, le courant augmente considérablement (à 15 kV, le courant augmente avec environ 50 % lorsque h passe de 20 mm à 40 mm). En effet, le cylindre métallique qui est alimenté avec la même haute tension réduit l'intensité du champ électrique sur la surface de l'élément ionisant (Fig. III-3), de ce fait, l'injection de la charge diminue lorsque le fil est proche du cylindre. Ces données sont en bon accord avec les résultats reportés par Dumitran et al. [104]. Ceci prouve qu'il est possible d'obtenir un courant plus élevé sans changer l'intervalle D et la tension appliquée.

III.1.3.2. Effet de la largeur de l'électrode couronne l

En variant la longueur de la lame en dents de scie l de l'électrode de type « dual », les caractéristiques courant-tension obtenues pour la même distance inter-électrodes $D = 40$ mm, peuvent être examinées sur la figure III-8. ($T = 16,8$ °C et $H = 48$ %).

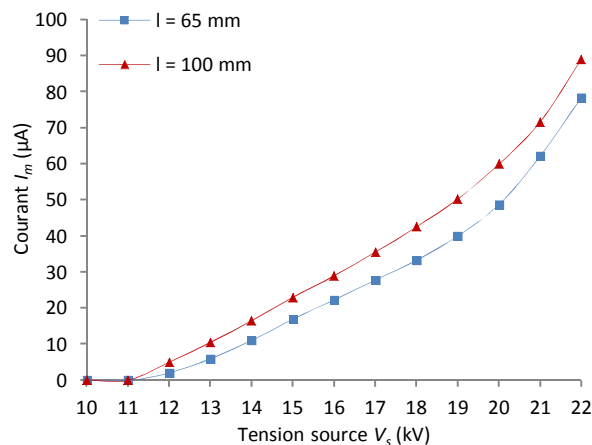


Figure III-8. Caractéristiques courant-tension pour deux longueurs l de l'électrode « duale » de type lame en dents de scie, distance inter-électrodes $D = 40$ mm.

Pour les électrodes « duales » étudiées dans ce travail, la longueur de la lame en dents de scie l est un paramètre très important. Avec des lames de grande longueur, et à la même tension appliquée, le courant total I_m est plus important. Cependant, aucune différence significative n'a été reportée pour la tension seuil d'amorçage couronne V_{onset} en fonction de la longueur de l'électrode.

En ce qui concerne les électrodes à pointes, qu'elle soit à aiguilles ou à segments de fil, d'après Tilmatine [76], ainsi que Dascalescu et ses collaborateurs [105], la réduction excessive du nombre d'éléments émetteurs peut affecter l'uniformité de la distribution

de la charge d'espace produite par l'électrode couronne. En outre, leurs expériences ont permis de montrer que le courant obtenu croît lorsque le nombre de rangées d'aiguilles augmente aussi.

III.1.3.3. Comparaison entre différentes électrodes couronne

Les caractéristiques courant-tension présentées sur la figure III-9 ont été obtenues pour l'ensemble des électrodes utilisées dans notre travail, à savoir les types suivants : fil, lame, segments de fil et lame en dents de scie, pour les mêmes paramètres de hauteur $h = 20$ mm et de longueur $l = 100$ mm et dans les mêmes conditions climatiques ($T = 16,8$ °C et $HR = 48$ %).

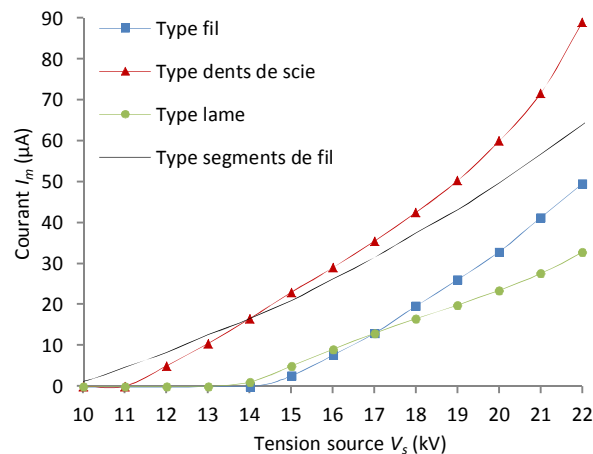


Figure III-9. Caractéristiques courant-tension pour comparaison entre les différentes électrodes couronne de type « dual », $h = 20$ mm et $l = 100$ mm avec la distance inter-électrodes $D = 40$ mm.

Les résultats montrent qu'à partir d'une tension $V_s = 15$ kV, l'intensité du courant I_m est bien supérieure lors de l'utilisation de l'électrode à dents de scie par rapport à tous les autres types d'électrodes, contrairement au type lame qui présente les caractéristiques I - V les plus faibles. Le type segments de fil produit un courant aussi important, grâce à ces pointes ionisantes, en comparaison avec l'électrode de type fil.

Cependant, la tension seuil d'amorçage d'effet couronne V_{onset} est plus basse pour l'électrode à segments de fil et reste moins élevée pour le type dents de scie par rapport aux deux autres (types lame et fil). Ceci peut être expliqué par le champ électrique plus intense au niveau des pointes de la lame de scie ou des segments de fil émetteurs, que sur la surface lisse du fil ionisant ou de la lame métallique.

Tilmatine [76] a signalé que dans les applications telles que la séparation électrostatique isolant-métal, la présence du produit métallique réduit la rigidité diélectrique de l'espace inter-électrodes. Dans ces conditions, l'électrode la plus adéquate est celle qui est capable de charger les particules à des tensions qui ne sont pas excessivement grandes. De ce point de vue, l'électrode à segments de fil et l'électrode à aiguilles sont meilleures que l'électrode classique à fil fin, avec une préférence pour l'électrode à segments de fil compte tenu de la facilité de maintenance. De plus, le relevé des caractéristiques $Q(V)$, exprimant la charge acquise par les particules en fonction de

la tension appliquée, a confirmé l'infériorité relative de l'électrode à fil fin par rapport aux deux autres [96].

III.1.3.4. Choix de l'électrode couronne

Le choix de l'électrode pour leur utilisation dans les applications électrostatiques dépend de plusieurs paramètres :

- La caractéristique courant-tension ($I-V$) délivrée par chaque type d'électrode ;
- La résistance mécanique aux chocs, aux vibrations et aux décharges en étincelle ;
- La facilité de leur entretien.

La connaissance de la caractéristique ($I-V$), est importante car la charge acquise par les particules est proportionnelle au courant. La charge est d'autant plus grande que le courant généré par effet couronne est plus élevé [76].

Le tableau III-2 résume certains avantages et inconvénients des différents types de l'électrode couronne reportés par Iuga et al. [75].

Tableau III-2. Avantages et inconvénients des différents types d'électrodes couronne [75-76]

CRITERE DE COMPARAISON	TYPE DE L'ELECTRODE COURONNE			
	à fil fin	à lame	à aiguilles	à segments de fil
Résistance mécanique	faible	très bonne	très bonne	bonne
Courant par unité de longueur (pour une même tension)	faible	faible	moyen	très élevé
Tension critique d'amorçage de la décharge couronne	élevée	élevée	moyenne	faible
Fabrication	facile	facile	moyenne	difficile
Coût de revient	pas cher	pas cher	moyen	cher
Maintenance	difficile	difficile	difficile	facile
Génération d'ozone	faible	moyenne	moyenne	élevée
Puissance max de la décharge	moyenne	élevée	élevée	élevée

III.1.4. Electrode couronne de type « dual » munie d'un écran métallique

III.1.4.1. Effet de la présence de l'écran

Pour la même distance inter-électrodes D , les caractéristiques courant-tension obtenues dans le cas d'une configuration « duale » standard de type fil ont été comparées avec celles obtenues en présence d'un écran métallique relié à la terre et situé à proximité de l'électrode couronne. Ces résultats sont présentés sur la figure III-10(a) pour une distance $D = 40$ mm, et sur la figure III-10(b) pour une distance $D = 20$ mm.

mm. Le courant de fuite passant à travers l'écran I_f a été mesuré et présenté également pour ce type de configuration d'électrodes, ($T = 21,4\text{ °C}$ et $HR = 62,5\%$).

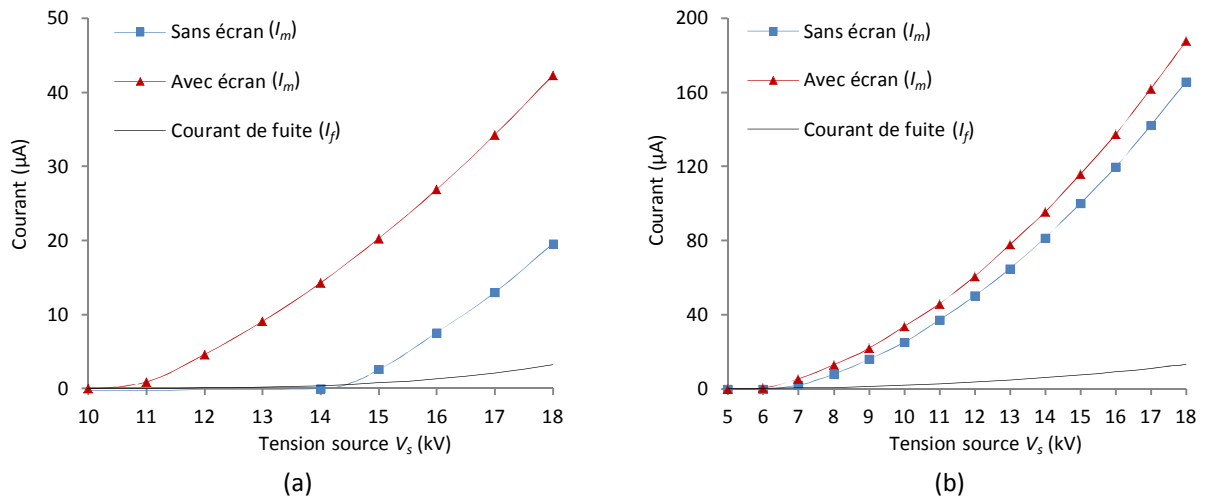


Figure III-10. Caractéristiques courant-tension pour l'électrode « duale » de type fil en présence et en absence de l'écran pour $D = 40\text{ mm}$ (a) et $D = 20\text{ mm}$ (b)

Pour le même espacement inter-électrodes D , l'intensité du courant I_m est plus élevée en présence de l'écran métallique relié à la terre et inséré à proximité de l'électrode couronne. Ainsi, la tension seuil d'amorçage couronne (V_{onset}) est plus basse en utilisant cet arrangement d'électrode, ceci est dû à la modification du champ électrique à la surface du fil ionisant démontrée par le calcul numérique illustré sur les deux figures III-11(a) et (b) respectivement pour les deux distances inter-électrodes $D = 40\text{ mm}$ et $D = 20\text{ mm}$.

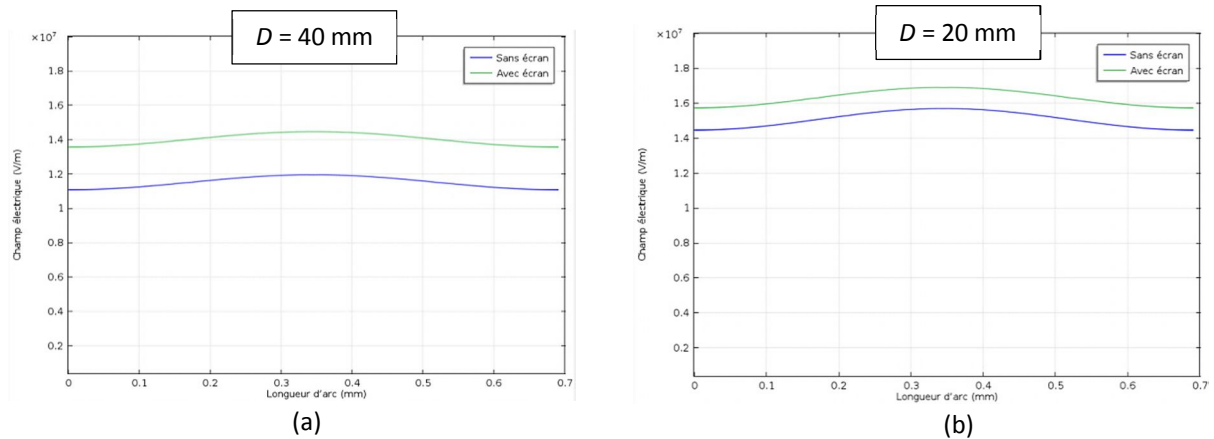


Figure III-11. Distribution du champ électrique sur la surface du fil ionisant, en fonction de la présence de l'écran, pour $D = 40\text{ mm}$ (a) et $D = 20\text{ mm}$ (b) ($V = 15\text{ kV}$).

Le champ électrique sur la surface du fil est plus élevé en présence de l'écran par rapport à la configuration « duale » classique. D'autre part, nous pouvons constater que le pourcentage d'augmentation du courant de couronne I_m ainsi que le champ électrique calculé sur la surface du fil sont d'autant plus élevés dans les grandes distances D en comparaison avec les faibles distances inter-électrodes [106]. Nous avons également noté que le courant de fuite I_f est très faible par rapport au courant total produit par la

décharge couronne, ceci est dû à l'effet du cylindre électrostatique situé au-dessus du fil ionisant, jouant un rôle très important à canaliser le champ électrique dans une zone plus étroite (Fig. III-2(b)) et par conséquent, le processus d'ionisation s'intensifie et produit plus de charges électriques dans le milieu de la décharge, d'où l'avantage majeur de l'utilisation d'une telle configuration dans les différentes applications électrostatiques.

III.1.4.2. Effet du potentiel de l'écran V_b

La figure III-12 illustre les caractéristiques courant-tension obtenues dans le cas de l'arrangement « dual » avec écran, en appliquant des potentiels V_b variables à l'écran métallique situé à proximité de l'électrode couronne.

Pour une distance inter-électrodes fixe ($D = 20$ mm), la tension d'amorçage couronne (V_{onset}) est plus basse et le courant I_m est plus élevé lorsque l'écran est relié à la terre ($V_b = 0$ V). D'autre part, le courant de la décharge I_m diminue remarquablement en augmentant le potentiel de l'écran V_b par rapport à la configuration « duale » classique [106]. Dès qu'un certain potentiel est imposé à l'écran, ce dernier devient un empêchement pour le développement de la décharge couronne, notamment pour le cas d'un potentiel flottant. Ceci est justifié par la diminution du champ électrique total au niveau de la région active du fil ionisant.

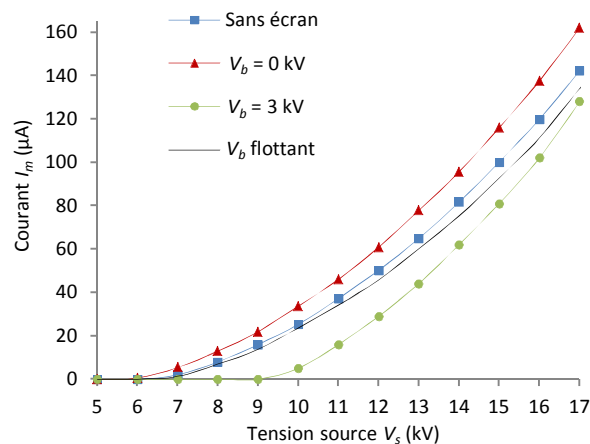


Figure III-12. Caractéristiques courant-tension pour l'électrode « duale » de type fil avec écran à différents potentiels V_b , avec la distance inter-électrodes $D = 20$ mm ($T = 22$ °C; $HR = 66\%$).

III.1.4.3. Effet de la largeur L et de la hauteur H de l'écran

Les figures III-13(a) et (b) montrent l'effet des dimensions géométriques de l'écran sur le courant I_m lors de la décharge couronne. La figure III-13(a) donne les résultats du courant I_m pour les variations de la largeur L en maintenant une hauteur H fixe ($H = 80$ mm), tandis que la figure III-13(b) montre les résultats expérimentaux de la variation de la hauteur H pour une largeur L fixée à 80 mm (dans les mêmes conditions de température et d'humidité relative : $T = 22,6$ °C et $HR = 44$ %).

Pour une tension V_s donnée, le courant généré par l'électrode couronne en présence d'un écran avec une largeur réduite ($L = 80$ mm) est plus élevé que celui

obtenu en présence des écrans plus larges ($L = 100$ mm et 120 mm). L'explication c'est que le champ électrique au niveau de la surface du fil ionisant devient plus intense en rapprochant l'écran relié à la terre de ce fil, produisant ainsi plus de charges électriques dans le milieu de la décharge en conséquent de l'ionisation de l'air environnant [107].

D'autre part, les résultats montrent que la modification de la hauteur de l'écran a peu d'influence sur la caractéristique courant-tension. En effet, le courant de couronne I_m mesuré au niveau de l'électrode plane est plus élevé en présence des écrans avec des hauteurs $H = 80$ mm et $H = 100$ mm, les limites basses du premier écran ont été fixées dans le même niveau que le plan horizontal du fil ionisant (Fig. II-3(b)). Si ces limites dépassent le niveau horizontal du fil (comme pour le cas pour le deuxième écran), une diminution du courant apparaît à partir des tensions approximativement supérieures à 15 kV. Ceci est justifié par la concentration des charges créées dans une zone plus réduite au milieu de la décharge en comparaison avec le premier écran ($H = 80$ mm) qui assure le courant I_m le plus élevé quel que soit la tension appliquée. Par contre, en réduisant les parois latérales de l'écran (comme le cas pour $H = 60$ mm), le courant I_m diminue à cause de l'éloignement de l'écran du fil ionisant, mais ceci reste toujours un courant plus élevé par rapport à celui enregistré lors d'une configuration « duale » standard (sans écran) [107].

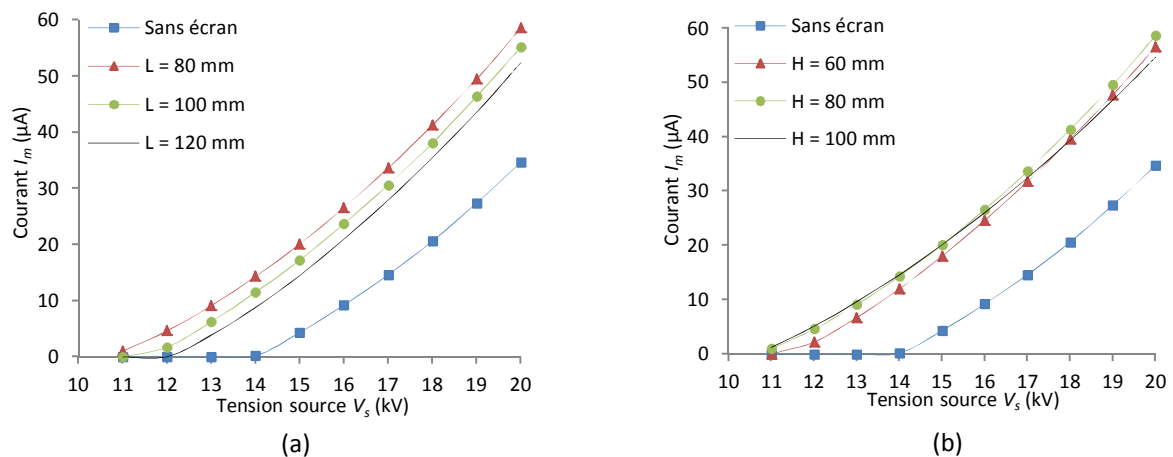


Figure III-13. Caractéristiques courant-tension pour l'électrode « duale » de type fil avec écran à différentes largeurs L pour $H = 80$ mm (a) et à différentes hauteurs H pour $L = 80$ mm (b), avec $D = 40$ mm.

III.1.4.4. Effet de la présence des matériaux isolants sur la surface de l'électrode collectrice

Nous avons constaté que la présence d'un matériau isolant (plaque en PVC d'une épaisseur de 5 mm) sur la surface de l'électrode plane (Fig. IV-3 (b)) modifie l'allure de la caractéristique courant-tension, même en présence d'un écran métallique. La figure III-14 montre que l'utilisation de l'écran a une influence significative sur le courant dans les deux cas de la présence et de l'absence de l'échantillon de pvc. L'effet de la présence du matériau se manifeste surtout sur le courant I_m collecté au niveau du plan de masse. Pour la même tension V_s , le courant I_m est moins important en présence du polymère sur

la surface de l'électrode plane. Ainsi, un isolant empêche les ions de pénétrer en profondeur pour arriver au plan de masse. Par contre, la présence de l'écran permet d'accélérer la décharge, même en présence de l'échantillon, afin d'avoir le même courant pour des tensions V_s plus basses.

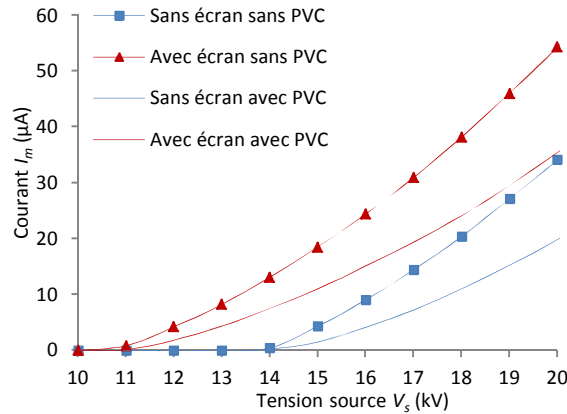


Figure III-14. Caractéristiques courant-tension pour l'électrode « duale » de type fil en absence et en présence d'une plaque de PVC, avec et sans écran pour une distance de $D = 40$ mm ($T = 21^\circ\text{C}$, $HR = 59,3\%$).

III.1.5. Association électrode-bandes

III.1.5.1. Effet de la présence des bandes

L'étude précédente a bien démontré que la présence d'un écran métallique à proximité de l'électrode couronne est plus avantageuse en terme de courant total généré par la décharge couronne et peut aussi servir à diminuer la valeur de la tension seuil d'apparition de l'effet couronne (V_{onset}). Le travail abordé dans cette partie vise à analyser l'effet de la présence des deux bandes métalliques reliées à la terre et placées parallèlement avec le fil ionisant (Fig. II-4), et ainsi, comparé cette association fil-bandes avec la configuration précédente dotée d'un écran métallique, ($T = 16^\circ\text{C}$ et $HR = 40\%$).

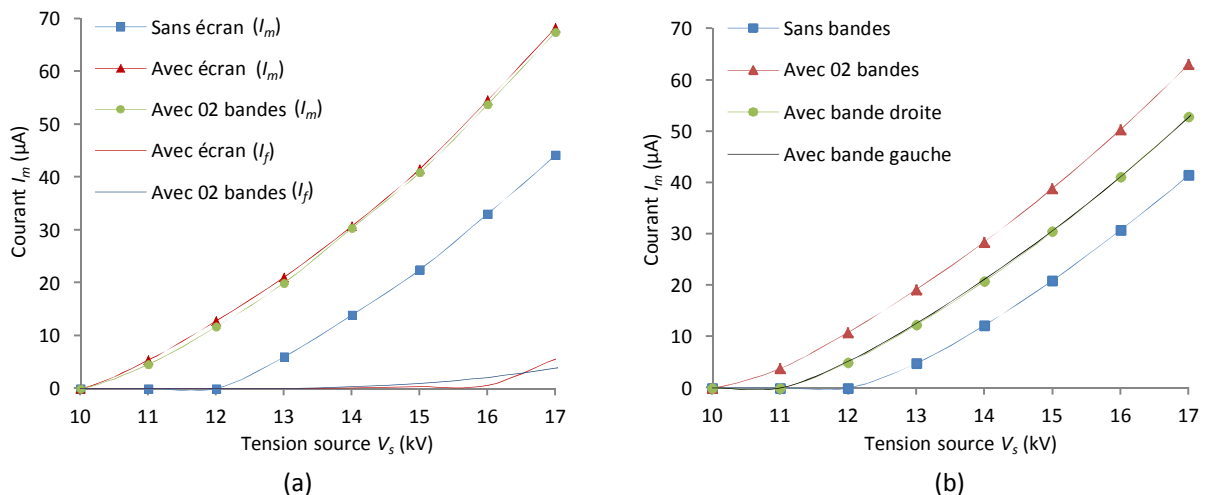


Figure III-15. Caractéristiques courant-tension pour l'électrode « duale » de type fil en présence et en absence des bandes ou de l'écran (a) et en fonction du nombre des bandes utilisées (b).

Les caractéristiques courant-tension obtenues pour ces expériences peuvent être examinées sur la figure III-15(a), pour une configuration d'électrode « duale » avec et sans présence de l'écran ou des bandes, pour les mêmes distances : inter-électrodes $D = 30$ mm, et fil-bandes $D_b = 40$ mm, (pour l'écran : $L = H = 80$ mm), tandis que la figure III-15(b) montre l'effet de la présence d'une seule bande, que ce soit à gauche ou à droite du fil et les 2 bandes à la fois, en comparaison avec l'arrangement « dual » standard.

Le courant I_m enregistré en présence de l'écran ou des bandes situées dans la même distance du fil $D_b = 40$ mm, est nettement supérieur à celui obtenu pour la configuration « duale » standard, sans présence d'aucun objet métallique à proximité. Dans le cas de la présence de l'écran, le courant est légèrement supérieur par rapport à l'association électrode-bandes, en raison de la concentration du champ électrique provoquée par les parois enfermées de l'écran [108]. Les valeurs du champ électrique calculées sur la surface du fil ionisant et présentées sur la figure III-16(a) démontrent une augmentation remarquable dans le cas de l'utilisation de l'écran comparé à l'association fil-bandes, cependant nous pourrions avoir une meilleure approche en injectant une charge d'espace lors de ce genre de modélisation numérique.

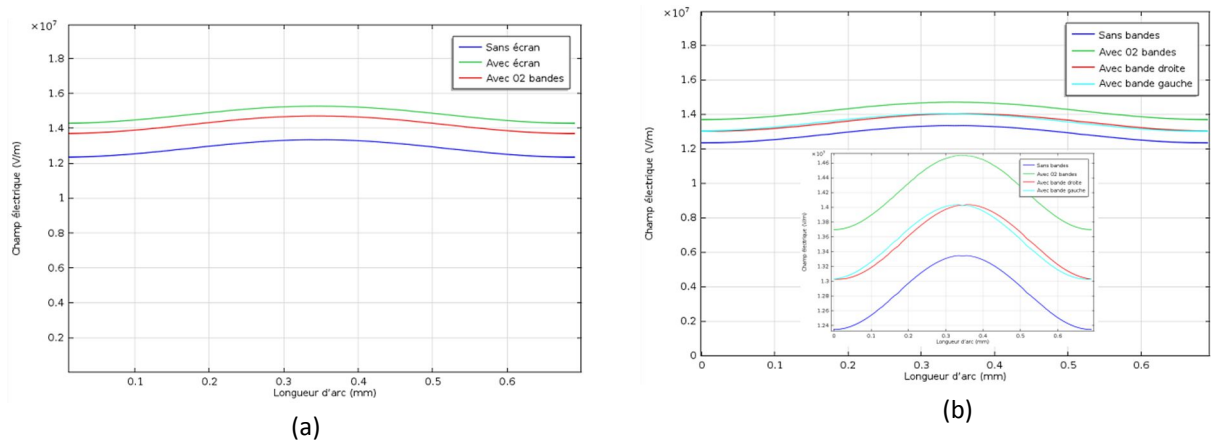


Figure III-16. Distribution du champ électrique sur la surface du fil ionisant en présence et en absence des bandes ou de l'écran (a) et en fonction du nombre des bandes utilisées (b), pour $D = 30$ mm, $D_b = 40$ mm et $V = 15$ kV.

Les courants de fuite I_f traversant l'écran ou les bandes sont bien négligeables par rapport au courant total de la décharge I_m .

D'autre part, pour le même espacement $D = 30$ mm et en comparaison avec une configuration « duale » standard, l'intensité du courant I_m est identiquement élevée dans le cas de la présence d'une seule bande, que ce soit dans le côté droit ou dans le côté gauche du fil. Par contre, dans le cas de l'utilisation des deux bandes à la fois, le courant de couronne augmente fortement [108].

La tension seuil d'amorçage couronne (V_{onset}) diminue par un ordre de 1 kV en utilisant une seule bande et de 2 kV quand il s'agit de deux bandes à la fois, ceci est dû à la modification du champ électrique sur la surface entière du fil, comme c'est présenté sur la figure III-16 (b). En effet, en présence d'une seule bande dans le côté gauche ou dans

le côté droit, les valeurs du champ électrique sont identiques en amplitude mais leur distribution est légèrement décalée selon la position de la bande placée, ceci peut être détecté par un zoom présenté sur la figure III-16(b).

III.1.5.2. Variation de la distance fil-bandes D_b

La figure III-17 illustre l'effet de la distance fil-bandes D_b sur le courant total I_m lors de la décharge couronne. Il ressort de ces résultats expérimentaux que pour la même distance inter-électrodes $D = 30$ mm, la tension seuil d'amorçage couronne (V_{onset}) est plus basse et le courant de couronne I_m est plus élevé pour des distances D_b plus faibles [108]. En effet, le courant de décharge diminue rapidement en augmentant la distance fil-bandes D_b . D'autre part, il est important de noter que la réduction de la distance D_b diminue la tension critique d'apparition des étincelles (V_c), elles apparaissent plutôt principalement dans l'espace situé entre le fil ionisant et les bandes reliées à la terre.

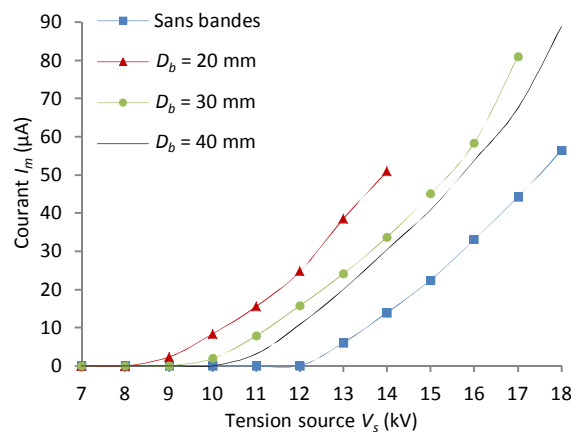


Figure III-17. Caractéristiques courant-tension pour l'électrode « duale » de type fil en fonction de la distance fil-bandes D_b , distance inter-électrodes $D = 30$ mm, ($T = 16^\circ\text{C}$, $HR = 40\%$).

Les résultats expérimentaux sont confirmés par les calculs numériques illustrés sur la figure III-18 pour différentes distances D_b . La diminution de la distance fil-bandes D_b augmente la valeur du champ électrique sur la surface du fil ionisant produisant ainsi un courant de décharge plus élevé pour des tensions V_s plus faibles.

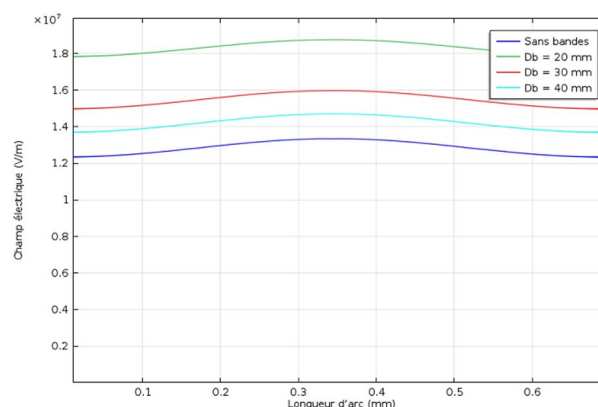


Figure III-18. Distribution du champ électrique sur la surface du fil ionisant en fonction de la distance fil-bandes D_b , pour $D = 30$ mm et $V = 15$ kV.

III.1.5.3. Effet de la hauteur des bandes

Les caractéristiques (I - V) présentées sur la figure III-19 illustrent l'effet de la hauteur des bandes L_b sur le courant total I_m , pour une distance $D = D_b = 30$ mm.

Pour la même tension appliquée, l'augmentation de la hauteur des bandes L_b de 10 mm jusqu'à 30 mm n'a provoqué aucune modification significative sur le courant de couronne I_m [108]. La génération d'espèces chargées par décharge couronne dans un tel arrangement ne dépend en aucun cas des dimensions géométriques des bandes.

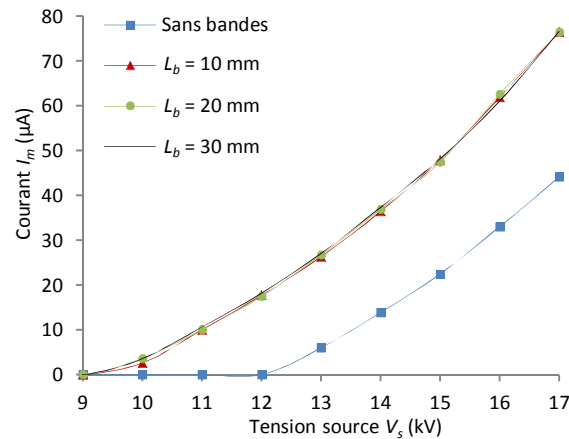


Figure III-19. Caractéristiques courant-tension pour l'électrode « duale » de type fil en fonction de la hauteur des bandes L_b , distances inter-électrodes $D = 30$ mm et $D_b = 30$ mm, ($T = 16^\circ\text{C}$, $HR = 40\%$).

III.1.6. Système d'électrode de type « triode »

III.1.6.1. Effet de la présence de la grille et de l'écran

La figure III-20 présente les caractéristiques courant-tension relevées dans deux situations du système d'électrode de type « triode », en absence et en présence de l'écran.

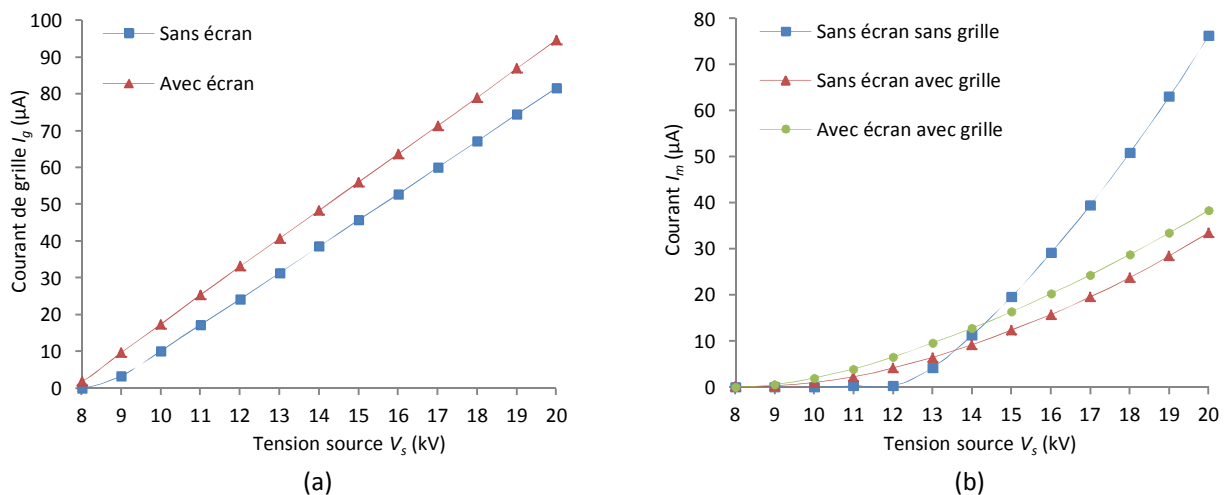


Figure III-20. Caractéristiques courant-tension du système d'électrode de type « triode », distances inter-électrodes $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm, ($R = 100\text{ M}\Omega$).

Comme nous pouvons le constater à partir de ces mesures, on observe une évolution des courants : courant de grille I_g (Fig. III-20(a)) et le courant de l'électrode plane I_m (Fig. III-20(b)) en fonction de la tension appliquée.

La grille N°2 est celle utilisée dans notre étude expérimentale et insérée entre le fil et le plan (Fig. II-7(b)). Les conditions climatiques de température et d'humidité relative: $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $HR = 59,3\text{ }\%$.

En présence de l'écran, les caractéristiques du système d'électrode de type « triode » montrent clairement une augmentation importante du courant de grille I_g (Fig. III-20(a)) par rapport au système d'électrode de type « triode » sans écran [109]. Les résultats de la figure III-20(b) montrent qu'en présence de la grille et pour la même distance entre le fil et le plan de masse D , la décharge couronne débute à un niveau de tension V_s plus faible comparé à la configuration duale fil-plan sans grille. Jusqu'à une tension de 13,6 kV, le courant I_m collecté au plan de masse pour le système d'électrode de type « triode » est supérieur à celui enregistré en configuration fil-plan, la tendance s'inverse pour les tensions élevées supérieures à 13,6 kV.

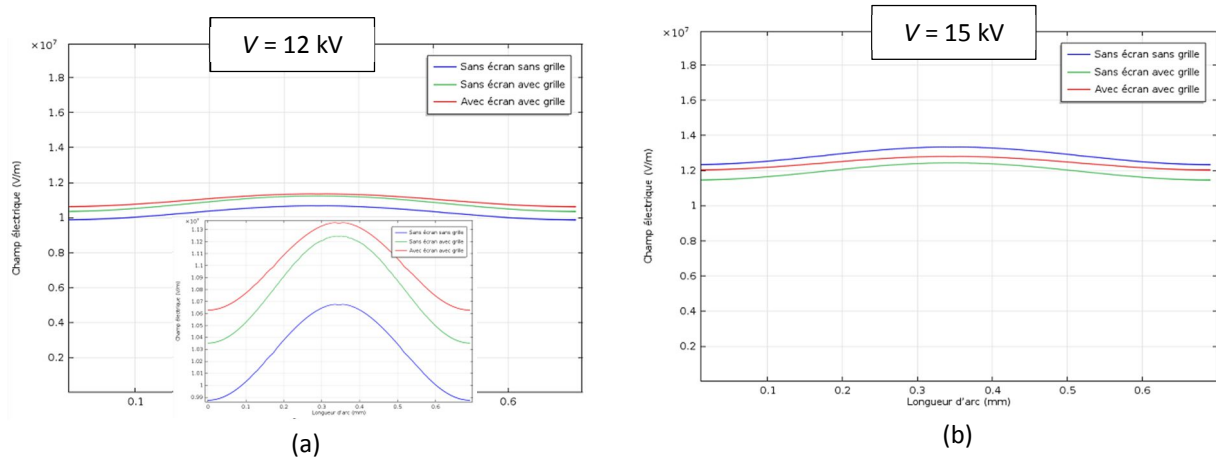


Figure III-21. Distribution du champ électrique sur la surface du fil ionisant dans le système d'électrode de type « triode » en présence et en absence de l'écran ou de la grille, pour $V = 12\text{ kV}$ (a) et $V = 15\text{ kV}$ (b) distances inter-électrodes $D = 30\text{ mm}$ et $D_g = 15\text{ mm}$.

Le calcul numérique du champ électrique à la surface du fil ionisant dans le cas du système d'électrode de type « triode » est présenté sur la figure III-21(a) pour une tension appliquée $V_s = 12\text{ kV}$ et sur la figure III-21(b) pour $V_s = 15\text{ kV}$, en présence et en absence de l'écran ou de la grille. Les potentiels de grille utilisés pour les deux tensions étudiées ont été déduits des caractéristiques (I - V) présentées sur la figure III-20(a). De ce fait, nous avons introduit des potentiels $V_g = 2,43\text{ kV}$ et $V_g = 4,58\text{ kV}$ pour le cas sans écran ainsi que $V_g = 3,32\text{ kV}$ et $V_g = 5,61\text{ kV}$ dans le cas de la présence de l'écran, respectivement pour les tensions $V_s = 12\text{ kV}$ et $V_s = 15\text{ kV}$. En analysant ces résultats, nous pouvons constater que pour une faible tension $V_s = 12\text{ kV}$, la présence de la grille à une distance réduite du fil ionisant produit un champ électrique plus élevé sur la surface de celui-ci comparé à la configuration « duale » classique sans grille. Ceci provoque une diminution remarquable de la tension seuil V_{onset} lors de l'utilisation du système

d'électrode de type « triode ». Par contre, en augmentant le potentiel V_g , tel que dans le cas de $V_s = 15$ kV (Fig. III-21(b)), la grille devient un obstacle empêchant le développement de la décharge couronne, réduisant ainsi le champ électrique sur la surface du fil ionisant en comparaison avec la configuration « duale » fil-plan. La présence de l'écran intensifie le champ électrique pour les deux tensions étudiées, comme c'est illustré dans l'agrandissement présenté sur la figure III-21(a).

III.1.6.2. Variation des distances inter-électrodes D_g et D

La figure III-22(a) montre l'effet de la variation du potentiel de grille V_g sur le courant total I_m enregistré au niveau du plan de masse pour différentes distances grille - plan D_g . Il a été déduit de ces résultats que l'augmentation du potentiel de grille V_g provoque une augmentation rapide du courant de couronne I_m notamment dans le cas des faibles distances D_g . D'autre part, pour le même potentiel V_g , le courant I_m enregistré dans le système d'électrode de type « triode » est plus élevé dans les faibles distances D_g , ceci est justifié par l'augmentation du champ électrique moyen E_{moy} dans l'espace situé entre la grille et le plan de masse.

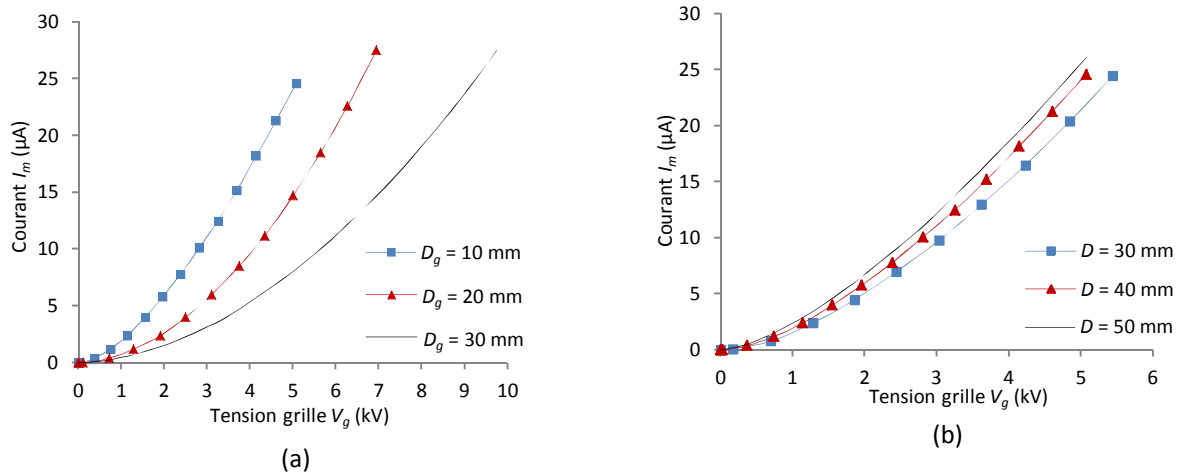


Figure III-22. Caractéristiques courant-tension du système d'électrode de type « triode » en fonction de la distance grille-plan D_g pour $D = 40$ mm (a) et en fonction de la distance fil-plan D pour $D_g = 10$ mm (b) (avec $R = 100$ MΩ, $T = 21^\circ\text{C}$, $HR = 59,3$ %).

En maintenant une distance D_g constante, l'effet de la variation de la distance fil-plan D en fonction du potentiel de grille V_g est présenté sur la figure III-22(b). Les résultats montrent que pour le même potentiel de grille V_g , le courant I_m est plus élevé dans les grandes distances D . En effet, afin de maintenir un potentiel V_g constant dans les trois situations ($D = 30, 40$ et 50 mm), il faut faire appel à un courant plus élevé de la source haute tension, notamment dans les grandes distances D , cette augmentation du courant de source I_s se traduit par une génération d'une quantité d'ions plus importante dans le milieu de la décharge, provoquant par la suite une augmentation remarquable du courant I_m même dans le cas d'un potentiel V_g constant.

III.1.6.3. Effet de la géométrie de la grille

La figure III-23(a) montre une comparaison de trois grilles de dimensions géométriques différentes influant sur le courant de grille I_g . Ainsi, la variation du courant I_m a été évoluée en fonction de la tension de grille V_g et peut être examinée sur la figure III-23(b). Les trois grilles métalliques utilisées sont formées de mailles sous forme de losange de tailles différentes (Fig. II-7(a)-(c)).

Les résultats montrent que le courant de couronne I_m dépend des dimensions des mailles de la grille utilisée. Pour les mêmes distances inter-électrodes D et D_g , le courant I_m mesuré est plus élevé dans le cas de l'utilisation de la grille N°3, formée des mailles plus larges. En diminuant la surface de ces mailles, comme le cas pour la grille N°1, le courant capté par la grille I_g augmente à cause de l'augmentation de la surface du corps métallique de la grille, et par conséquent, le courant mesuré au niveau du plan de masse I_m diminue.

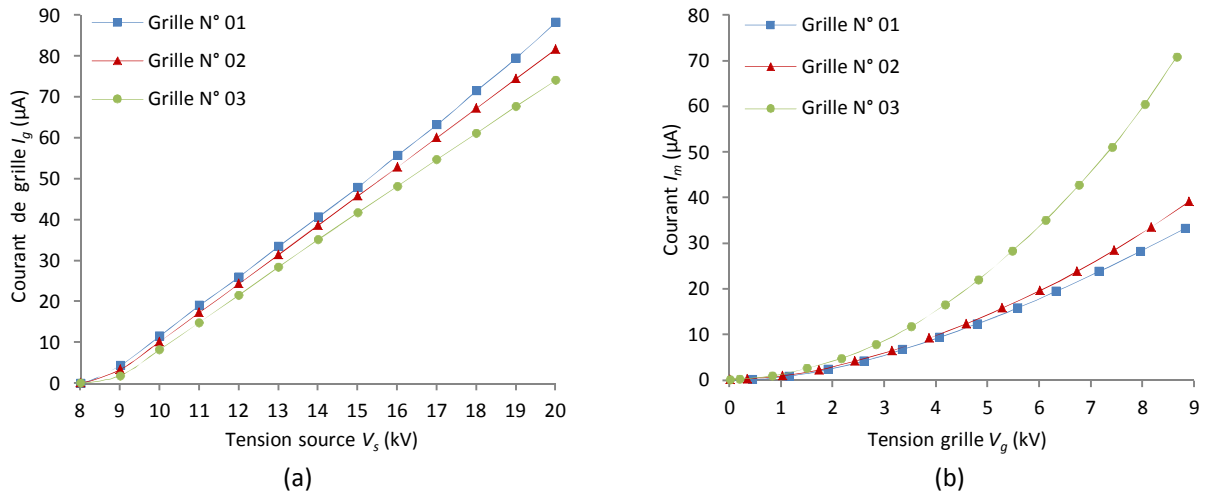


Figure III-23. Courant de grille I_g en fonction de la tension source V_s (a) et courant I_m en fonction de la tension de grille V_g (b) pour différentes dimensions des mailles de la grille, distances inter-électrodes : $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm ($R = 100$ MΩ, $T = 21^\circ\text{C}$, $HR = 59,3$ %).

Nous allons maintenant nous intéresser à la distribution du courant J_m , en étudiant l'effet de la polarité, de la présence de l'écran, des bandes ou de la grille, avec d'autres paramètres relatifs aux dimensions de l'écran et des distances D_b dans la configurations à bandes métalliques. Les distributions des lignes de champ électrique présentées par le logiciel de calcul montre une bonne concordance entre les résultats obtenus expérimentalement et ceux calculés numériquement.

III.2. DISTRIBUTION DE LA DENSITE DE COURANT

A l'aide d'une plaque métallique à sondes (Fig. II-8), nous avons mesuré la distribution du courant I_m suivant la position x de la sonde de mesure, nous nous intéressons principalement à la densité de courant J_m qui est donnée par la relation :

$$J_m = \frac{I_m}{S} \quad (\text{III-1})$$

Avec I_m : le courant mesuré par la sonde ;

S : la surface de la sonde de mesure (70 mm × 2 mm).

Nous réalisons ces mesures afin d'analyser l'uniformité de la distribution de la charge d'espace selon la configuration d'électrodes étudiée (duale avec ou sans écran ou bandes et système d'électrode de type « triode »), la polarité de la tension appliquée, la présence et la géométrie de la grille métallique insérée.

III.2.1. Effet de la polarité de la tension appliquée

La figure III-24 montre une comparaison des deux polarités sur la distribution du courant suivant l'axe des x , l'étude de la caractéristique courant-tension montre un appel fort du courant en polarité négative, ce résultat se confirme sur le profil de la distribution de courant, ($T = 22,6\text{ °C}$ et $HR = 44\text{ \%}$).

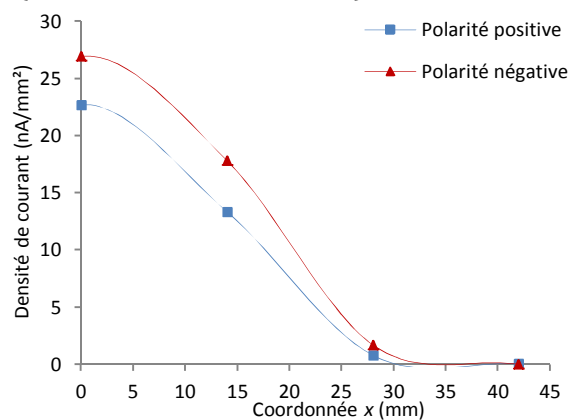


Figure III-24. Distribution de la densité de courant en fonction de la polarité de la tension appliquée, pour $D = 30\text{ mm}$ et $V_s = 18\text{ kV}$.

III.2.2. Electrode couronne de type « dual » munie d'un écran

III.2.2.1. Effet de la présence de l'écran métallique

Les résultats de la distribution de la densité de courant sans et avec présence de l'écran sont présentés sur la figure III-25, en polarité positive et dans les mêmes conditions de température et d'humidité relative : ($T = 22,6\text{ °C}$ et $HR = 44\text{ \%}$).

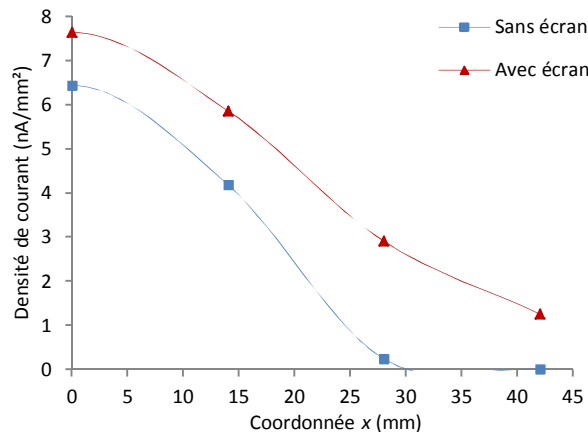


Figure III-25. Distribution de la densité de courant en fonction de la présence de l'écran pour $D = 40\text{ mm}$.

La distribution de courant le long de l'axe x à la surface de l'électrode collectrice, pour la même distance inter-électrodes $D = 40$ mm et la même tension appliqué $V_s = 17$ kV, prouve que la présence de l'écran relié à la terre provoque une modification importante de la répartition de la densité de courant, sa présence augmente l'intensité du courant mesurée par les différentes sondes.

Le champ électrique créé entre le fil et les parois latérales de l'écran joue un rôle très important dans l'élargissement de la zone de la décharge [107]. Les figures III-26(a-d) illustrent les répartitions des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant et l'aspect des lignes équipotentielles, dans une configuration « duale » sans écran (Fig. III-26(a)) et avec écran (Fig. III-26(b)) pour $D = 30$ mm, ainsi que pour une distance $D = 40$ mm également pour les cas de l'absence de l'écran (Fig. III-26(c)) et de la présence de l'écran (Fig. III-26(d)). L'étude numérique présentée montre que la zone couverte par la décharge est plus large dans le cas des distances D plus grandes, ainsi qu'en présence de l'écran par rapport à la configuration sans écran. L'effet de l'écran est plus important dans le cas des grandes distances D , ceci confirme les résultats expérimentaux des caractéristiques (I - V) présentées sur les figures III-10 (a) et (b).

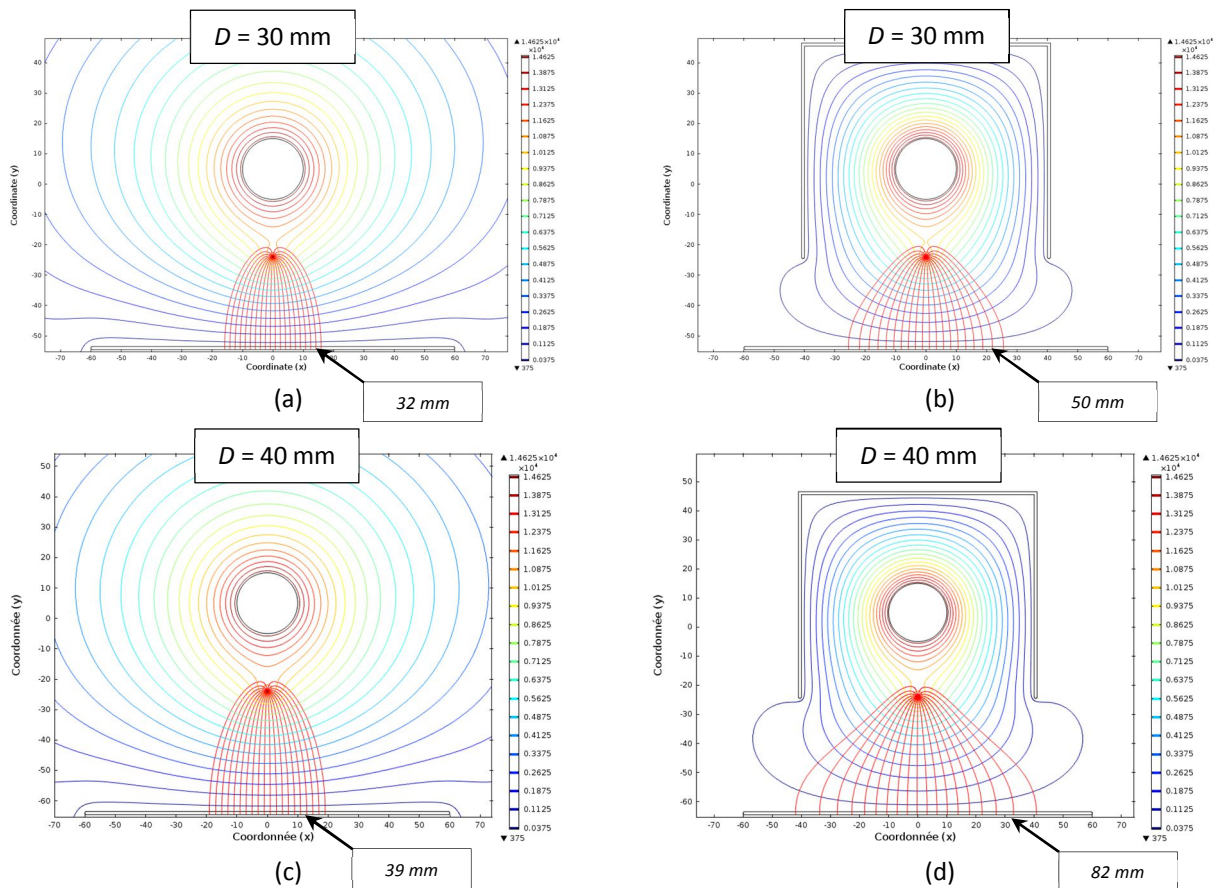


Figure III-26. Distribution des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant, pour $D = 30$ mm dans une configuration d'électrodes « duale » sans écran (a); avec écran (b), pour $D = 40$ mm en absence de l'écran (c) et en présence de l'écran (d).

III.2.2.2. Effet de la largeur L et de la hauteur H de l'écran

La figure III-27(a) illustre la distribution du courant en absence et en présence de l'écran pour des largeurs L différentes en maintenant une hauteur $H = 80$ mm constante, et pour des hauteurs H différentes avec une largeur $L = 80$ mm fixée tel qu'il est montré sur la figure III-27(b). Pour la même tension appliquée $V_s = 17$ kV, en réduisant la largeur de l'écran, la densité de courant devient plus élevée dans chaque point à la surface de l'électrode de terre [107]. Ceci permet de confirmer l'augmentation du courant total produit par la décharge couronne dans le cas de la présence des écrans avec des faibles largeurs L , montrée dans les caractéristiques courant-tension.

En augmentant la hauteur de l'écran H jusqu'à où ses limites inférieures dépassent le plan horizontal du fil, la densité de courant mesurée sur la surface de l'électrode plane augmente dans la zone centrale située face à l'électrode couronne, à cause de la concentration du champ électrique dans cette zone, mais en éloignant la sonde de mesure suivant l'axe x , la densité de courant diminue, suite à la limitation de la décharge provoquée par les parois de l'écran, plus longues pour le cas ($H = 100$ mm) par rapport aux deux autres ($H = 80$ mm et $H = 60$ mm) [107].

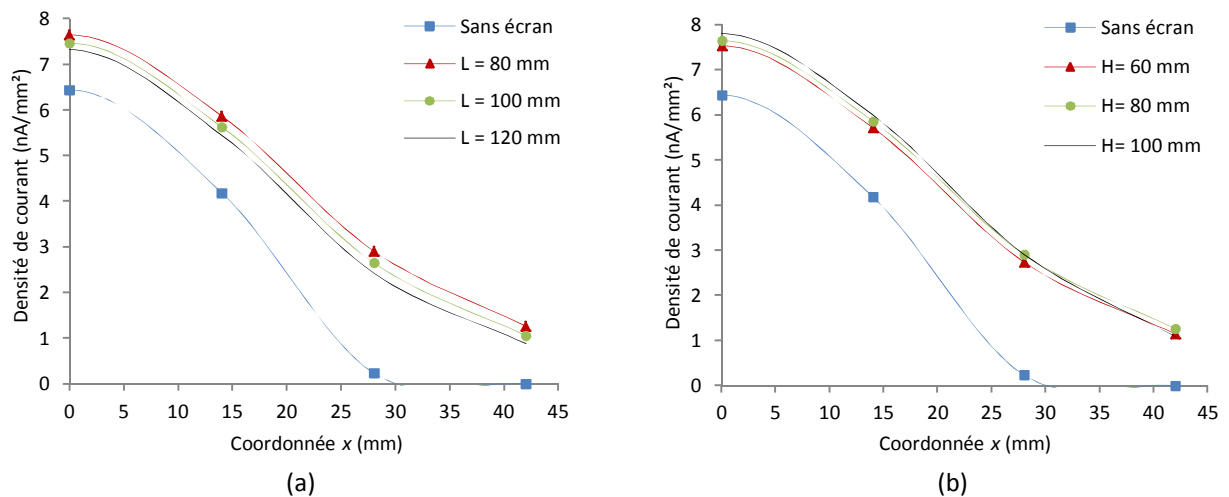


Figure III-27. Distribution de la densité de courant en fonction de la largeur de l'écran L pour $H = 80$ mm (a) et en fonction de la hauteur de l'écran H pour $L = 80$ mm (b), $D = 40$ mm ($T = 22,8$ °C et $HR = 44$ %).

III.2.3. Association électrode-bandes

III.2.3.1. Effet de la présence des bandes

D'autres mesures ont été effectuées à un espacement inter-électrodes donné $D = 30$ mm et pour la même tension appliquée $V_s = 18$ kV, afin d'établir une comparaison entre les trois configurations d'électrodes étudiées (duales avec et sans écran ou bandes), puis pour différentes distances fil-bandes D_b .

Les répartitions de la densité de courant sur la surface de l'électrode plane présentées sur la figure III-28(a) indiquent que la zone couverte par la décharge couronne est plus importante pour une configuration d'électrode à deux bandes ($D_b = 40$ mm) que pour l'électrode « duale » sans bandes. La présence de l'écran avec $D_b = 40$ mm, produit un courant très légèrement supérieur dans la zone de la surface de la plaque

opposée à l'électrode fil [108]. D'autre part, tel qu'il est montré sur la figure III-28(b), la présence d'une seule bande dans l'un des deux côtés (gauche ou droite) du fil ionisant ($D_b = 40$ mm) crée une distribution plus importante sur toute la surface de l'électrode plane, cette distribution est encore plus élevée dans le côté où la bande est placée. La configuration à deux bandes intensifie davantage la densité de courant au niveau de l'électrode plane, notamment dans la zone centrale de la décharge [108].

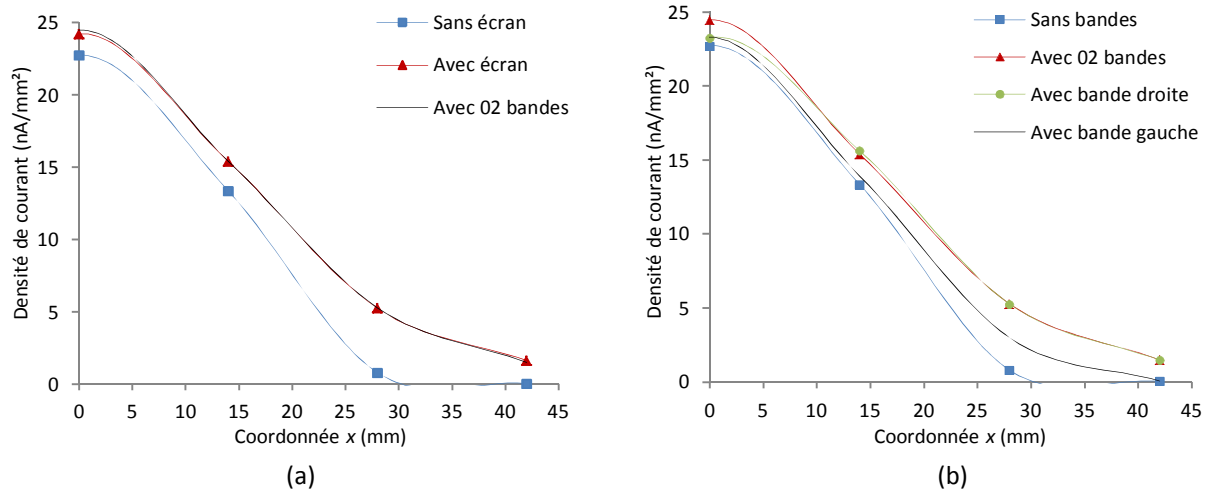


Figure III-28. Distribution de la densité de courant en fonction de la présence des bandes ou de l'écran (a) et de la position et du nombre des bandes (b) pour $D = 30$ mm et $D_b = 40$ mm, ($T = 16^\circ\text{C}$, $HR = 40\%$).

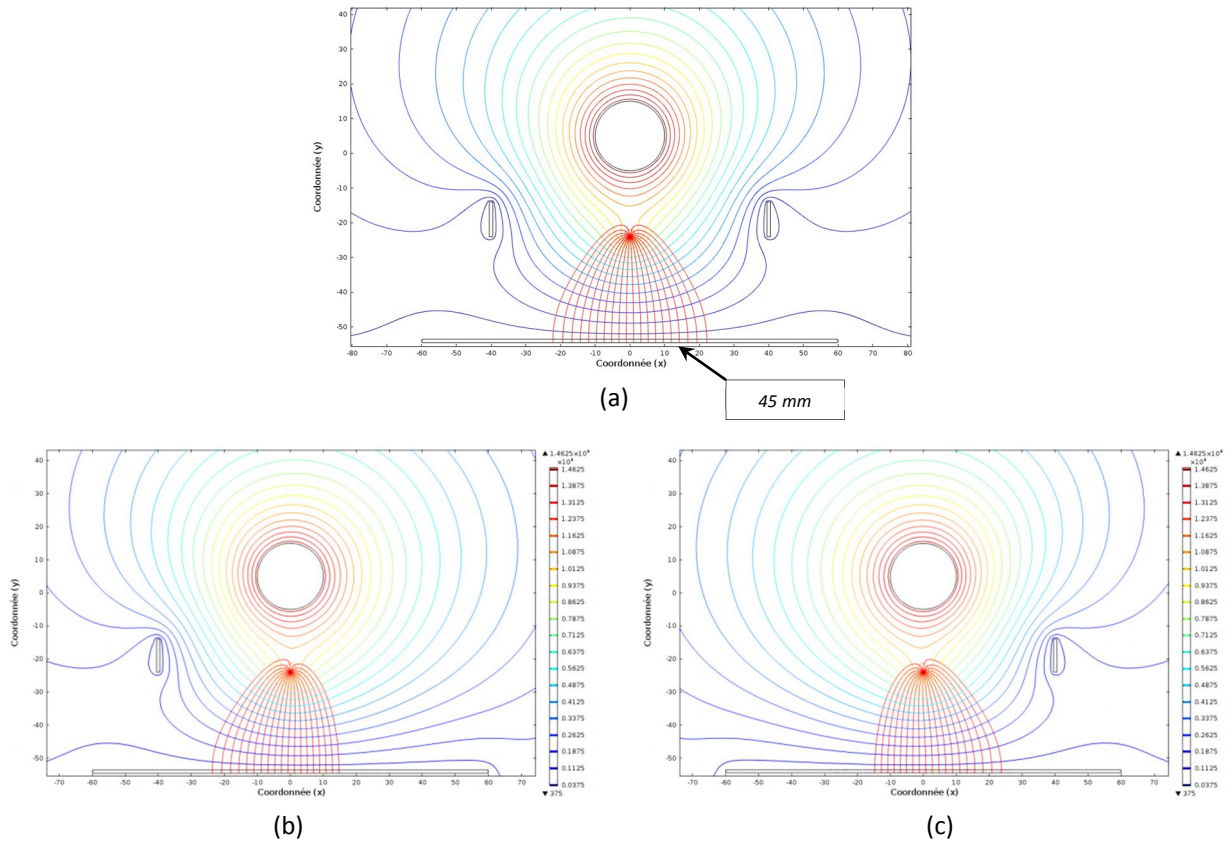


Figure III-29. Distribution des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant, dans une configuration d'électrodes « duale » avec 02 bandes parallèles (a); avec une bande gauche (b) et une bande droite (c) pour $D = 30$ mm et $D_b = 40$ mm.

D'après la représentation illustrée sur la figure III-29(a) pour la distribution des lignes de champ électrique dans la configuration « duale » associée à deux bandes parallèles, il s'est avéré que pour la même distance inter-électrodes $D = 30$ mm, la largeur de la zone couverte par la décharge est plus étroite dans une configuration à deux bandes (45 mm) comparée à la configuration munie d'un écran métallique (50 mm) qui est présentée à la figure III-26(b). Cependant la présence de deux bandes à la fois élargie davantage la répartition des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant par rapport à la configuration « duale » sans bandes (Fig. III-26(a)). D'autre part, les deux figures III-29(b) et (c) montrent que lors de la présence d'une seule bande, à gauche ou à droite de la configuration « duale » respectivement, les lignes de champ électrique sont d'autant plus orientées vers la zone où la bande est placée. Ceci confirme les résultats trouvés expérimentalement pour la distribution de la densité de courant sur la surface de l'électrode plane et présentés sur la figure III-28(b).

III.2.3.2. Variation de la distance fil-bandes D_b

Les distributions de la densité de courant sur le plan pour différentes distances fil-bandes D_b présentées sur la figure III-30 ont été tracées en faisant déplacer les deux bandes horizontalement pour obtenir trois distances différentes ($D_b = 20$ mm, 30 et 40 mm) et en réduisant la tension appliquée à $V_s = 14$ kV afin de préserver toute étincelle possible entre le fil et les bandes [108].

Les résultats expérimentaux montrent que la distribution de la densité de courant décroît à chaque fois que les deux bandes s'éloignent du fil, ce qui corrobore avec ce qu'on a trouvé dans le volet des caractéristiques (I - V) présentées sur la figure III-17.

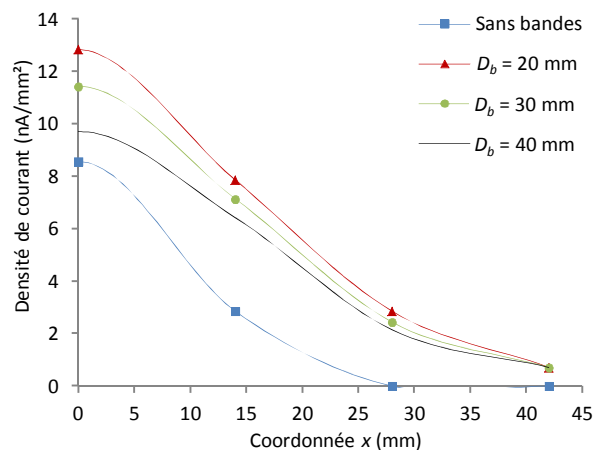


Figure III-30. Distribution de la densité de courant pour différentes distances fil-bandes D_b , distance inter-électrodes $D = 30$ mm, ($T = 16^\circ\text{C}$, $HR = 40\%$).

La distribution des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant présentée sur la figure III-31 montre une augmentation importante de la largeur de la zone couverte par la décharge (70 mm) pour une distance réduite de $D_b = 30$ mm, en comparaison avec la distribution présentée sur la figure III-29(a) pour $D_b = 40$ mm ou la

largeur de la zone été d'environ 45 mm. Ce calcul numérique confirme les distributions de la densité de courant obtenues expérimentalement et illustrées sur la figure III-30.

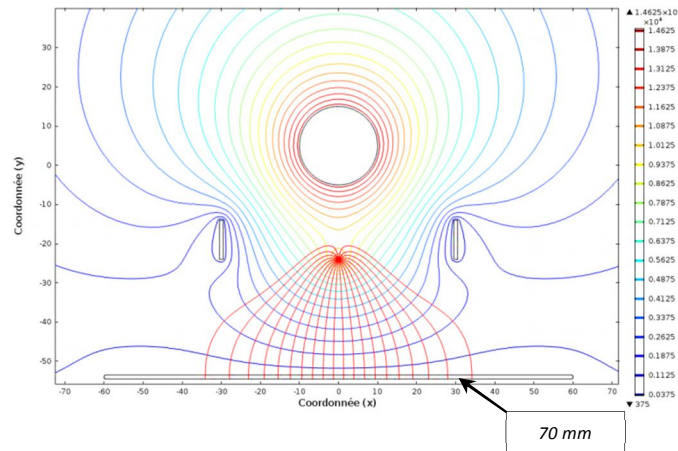


Figure III-31. Distribution des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant dans une configuration « duale » avec 02 bandes parallèles, pour $D = 30$ mm et $D_b = 30$ mm.

III.2.4. Système d'électrode de type « triode »

Afin de voir à quelle mesure l'insertion d'une grille métallique entre l'électrode haute tension et le plan va changer la distribution de la densité de courant sur le plan de masse, nous avons effectué quelques essais de mesure de la densité de courant en procédant de la même façon que précédemment à l'effet de la présence de la grille et ainsi de l'écran dans le système d'électrode de type « triode » et par la suite de la géométrie de la grille insérée. Les résultats expérimentaux sont discutés en rapport avec l'aspect numérique du champ électrique dans le système d'électrode de type « triode » en présence et en absence de l'écran. Les potentiels de grille dans les deux configurations sont introduits selon les valeurs obtenues expérimentalement et présentés dans la figure III-20(a), ($T = 21$ °C et $HR = 59,3$ %).

III.2.4.1. Effet de la présence de la grille et de l'écran

En analysant les courbes de la figure III-32, on peut constater que la configuration « duale fil-plan » offre une meilleure distribution de courant en termes d'intensité par rapport au système d'électrode de type « triode », pour les espacements inter-électrodes ($D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm) et la tension appliquée $V_s = 18$ kV. Donc l'absence de la grille provoque une décharge couronne plus intense au niveau de l'électrode plane.

Par ailleurs nous remarquons que le niveau de la densité de courant est plus important dans le cas de la présence de l'écran métallique dans le système d'électrode de type « triode ». Il a été prouvé par les caractéristiques courant-tension ($I-V$) présentées précédemment que la présence de l'écran augmente le courant traversant la grille I_g , et donc le potentiel de la grille V_g , imposant en conséquence une densité de courant plus élevée sur l'électrode plane. On conclue que la décharge couronne diminue en intensité avec l'insertion de la grille métallique dans le dispositif « dual » fil-plan même en présence de l'écran.

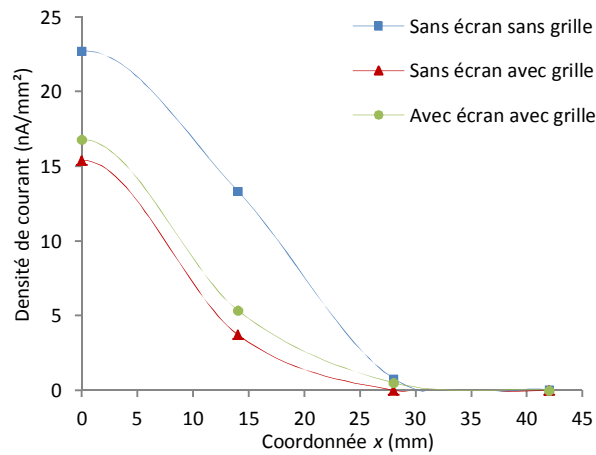


Figure III-32. Distribution de la densité de courant en fonction de la présence de l'écran et de la grille, distances inter-électrodes $D = 30$ mm, $D_g = 15$ mm et $R = 100$ M Ω .

D'autre part et d'après les modèles numériques présentés sur les figures III-33(a) et (b) pour le système d'électrode de type « triode » respectivement en présence et en absence de l'écran, on voit que les lignes équipotentielles sont plus uniformes dans l'espace grille-plan dans les deux arrangements ainsi, l'effet de l'écran à élargir la zone couverte par la décharge est obtenu également dans le système d'électrode de type « triode ». Nous pouvons conclure donc que l'écran peut être bénéfique pour l'ensemble des processus électrostatiques utilisant différentes configurations d'électrodes couronne.

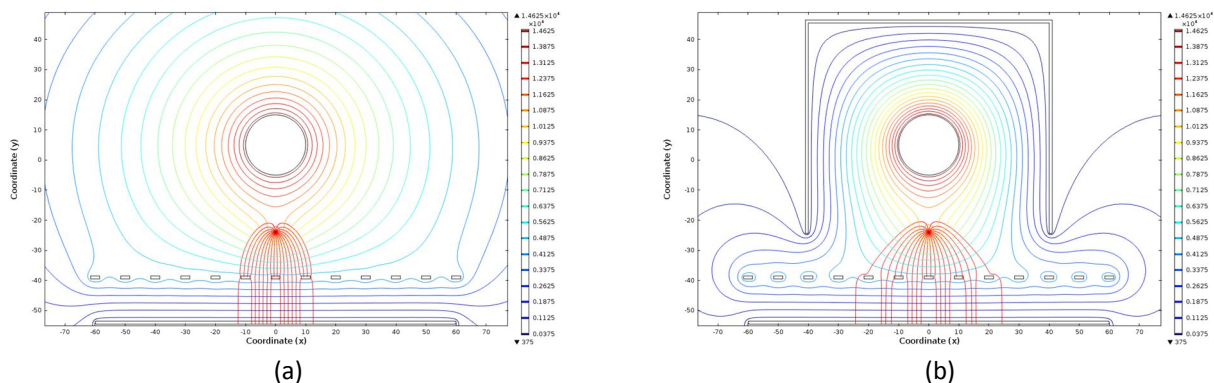


Figure III-33. Distribution des lignes de champ électrique émises par le fil ionisant dans le système d'électrode de type « triode » en absence (a) et en présence de l'écran (b) pour $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm.

III.2.4.2. Effet de la géométrie de la grille

Concernant l'influence de la géométrie de la grille, nous constatons sur la figure III-34 que pour la même tension appliquée $V_s = 18$ kV, la distribution de la densité de courant est plus intense dans le cas où les mailles de la grille sont plus larges (cas de la grille N°3), ceci est dû au passage d'une quantité importante de charges dans le gap de la décharge. En réduisant la surface de ces mailles, les valeurs de la densité de courant diminuent remarquablement.

Enfin, les résultats expérimentaux de la répartition des densités de courant à la surface de la plaque collectrice peuvent être très utiles, si l'on veut charger par le phénomène de la décharge couronne, un média non tissé par exemple pour poser un

film ou pour faire un traitement de surface, etc... à l'aide de différentes configurations d'électrodes existantes.

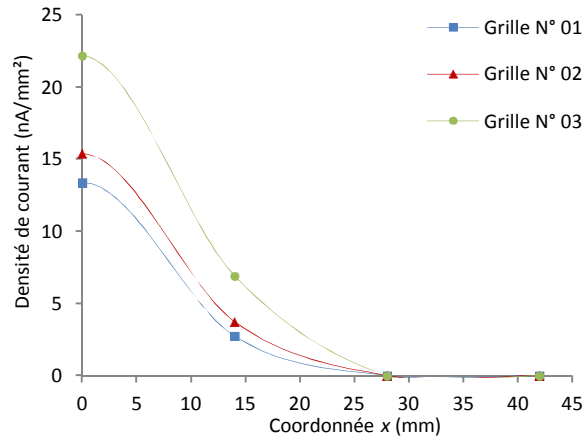


Figure III-34. Distribution de la densité de courant en fonction de la géométrie de la grille, distance inter-électrodes $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm, ($R = 100$ M Ω).

III.3. EVOLUTION DES TENSIONS SEUIL D'AMORÇAGE COURONNE V_{ONSET} ET DE CLAQUAGE V_c EN FONCTION DE LA DISTANCE D

III.3.1. Tension seuil d'amorçage couronne V_{onset}

La tension d'apparition de l'effet couronne, appelée aussi tension seuil V_{onset} , est la tension dans laquelle le courant de couronne I_m commence à apparaître tout en augmentant progressivement la tension appliquée V_s [97].

Comparée à la configuration « duale » classique, la tension seuil d'amorçage couronne est plus basse en présence de l'écran métallique relié à la terre, quel que soit la distance inter-électrodes D . La figure III-35 montre que la différence de la tension seuil V_{onset} en présence et en absence de l'écran augmente avec la distance D .

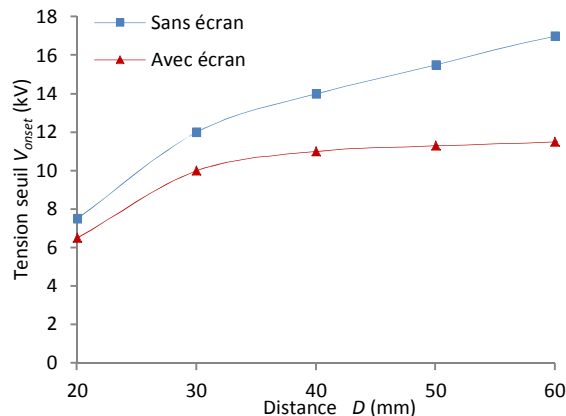


Figure III-35. Tension seuil d'amorçage couronne V_{onset} en fonction de la distance D en présence et en absence de l'écran, ($T = 21,4^\circ\text{C}$, $HR = 62,5$ %).

III.3.2. Tension de claquage V_c

Les tensions critiques de claquage V_c pour différentes distances inter-électrodes D (de 20 mm à 80 mm) avec les deux polarités positive et négative, ainsi qu'en présence et en absence de l'écran métallique ($L = H = 80$ mm) sont données dans le tableau III-3.

Bien que les étincelles apparaissent pour une tension plus élevée dans le cas de la décharge négative notamment lors de l'utilisation de la configuration « duale » classique, la présence de l'écran réduit fortement la tension critique de claquage V_c , apparu principalement entre le fil et l'écran. Ceci reste l'inconvénient majeur de ce type de configurations d'électrodes limitant en conséquence leurs performances lors des applications exigeant un fort appel de courant et des tensions de fonctionnement plus élevées, tel que les processus de séparation électrostatique industrielle.

Tableau III-3. Tensions de claquage en fonction de la polarité avec et sans présence de l'écran métallique.

Distance (mm)	Sans écran		Avec écran	
	Polarité positive (kV)	Polarité négative (kV)	Polarité positive (kV)	Polarité négative (kV)
20	25	26	24	24
30	33	35	24,3	24,5
40	35	40	24,5	25
50	42	> 50	24,2	25
60	48	> 50	24,3	24
70	49	> 50	24	25
80	> 50	> 50	25,7	26

III.4. ANALYSE EXPERIMENTALE DU COURANT DE LA DECHARGE COURONNE NEGATIVE

L'ensemble des résultats présentés précédemment ont été obtenus avec une polarité positive de la tension appliquée, vue la facilité des mesures des courants relativement stables (leur continue) lors des décharges « glow » positives. Nous procédons maintenant à l'analyse des résultats expérimentaux des caractéristiques électriques des impulsions de Trichel formées lors des décharges couronne négatives, par l'intermédiaire d'un oscilloscope sensible et d'une résistance de mesure $R = 10 \text{ k}\Omega$. Les paramètres étudiés sont : le courant moyen, le courant maximal, ainsi que la fréquence des impulsions, dans les deux configurations d'électrodes « duales » avec et sans présence de l'écran.

Les figures III-36 (a) et (b), montrent les formes d'ondes du courant instantané affichés sur l'oscilloscope sous forme de graphe pour les deux configurations sans et avec écran respectivement. Ces valeurs ont été enregistrées aussi sous forme de données numériques exploitées ultérieurement dans le calcul d'identification.

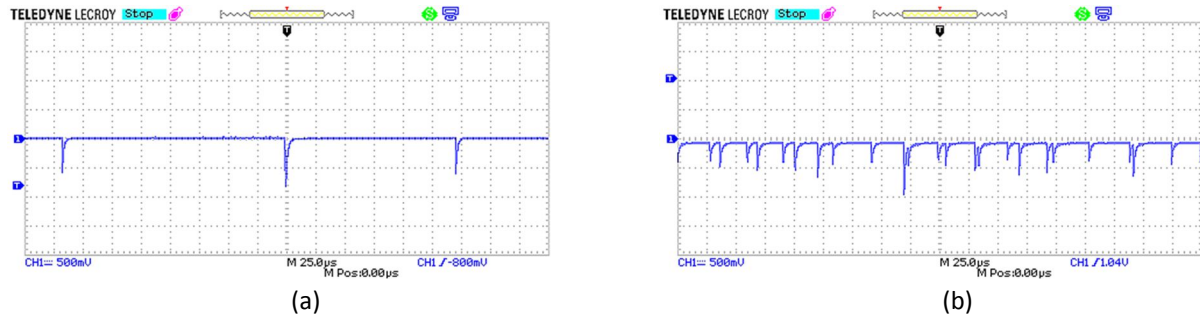


Figure III-36. Trains d'impulsions générés par l'électrode « duale » de type fil pour : $V_s = -12$ kV sans écran (a) et avec écran (b), ($T = 25,3^\circ\text{C}$, $HR = 47,5\%$).

La figure III-37 présente les valeurs moyennes ainsi que les valeurs crêtes du courant de la décharge couronne dans une période d'enregistrement de 45 ms. Les résultats présentent la moyenne d'une série de 5 mesures, dans une distance inter-électrodes donnée $D = 30$ mm, en présence et en absence de l'écran.

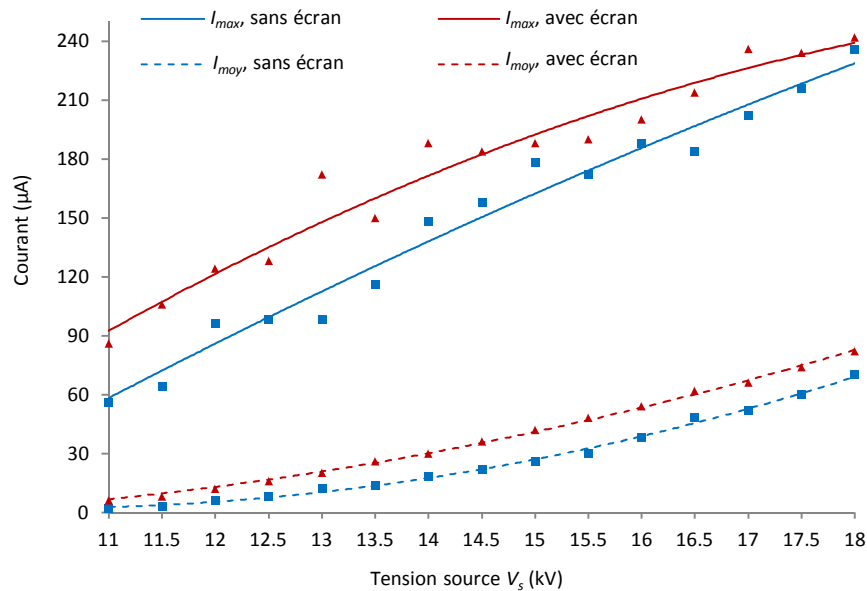


Figure III-37. Courants moyen (I_{moy}) et courant maximum (I_{max}) de la décharge couronne négative en fonction de la tension appliquée, en présence et en absence de l'écran pour $D = 30$ mm.

Il ressort de ces résultats que les courants moyens I_{moy} et maximums I_{max} de la décharge couronne croissent lors de la présence de l'écran grâce à l'augmentation de l'efficacité d'ionisation et de formation des avalanches électroniques causées par l'intensification du champ électrique appliqué dans la région de la décharge, ceci entraîne une augmentation rapide du courant de la décharge couronne au niveau de l'électrode plane.

D'autre part, nous avons constaté une augmentation rapide de la fréquence des impulsions en fonction de la tension appliquée et ainsi, en présence de l'écran par rapport à la configuration duale classique (Fig. III-38). La fréquence du courant de couronne est de l'ordre kHz et croît rapidement dès le déclenchement de la décharge couronne tel qu'il est montré sur l'agrandissement présenté sur la figure III-38 pour les

faibles tensions appliquées et dans les deux configurations duales avec et sans présence de l'écran. Cette croissance devient plus importante à partir d'une tension de 14 kV et allant jusqu'à 150 kHz pour une tension de 18 kV notamment pour les configurations avec écrans.

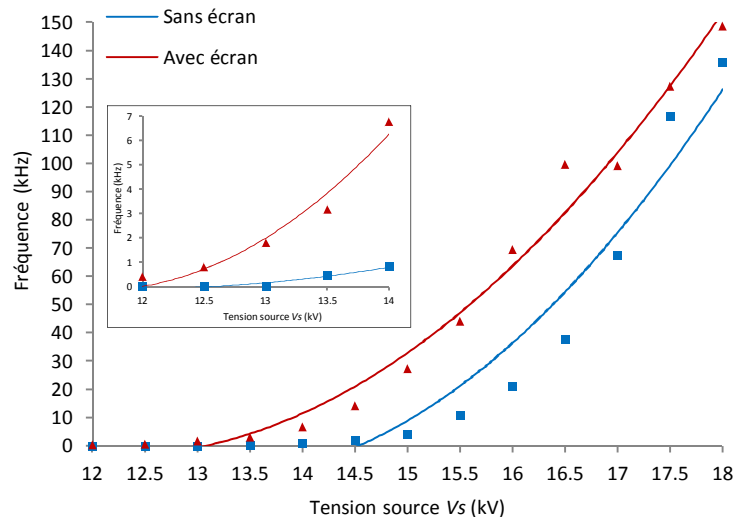


Figure III-38. Fréquence des impulsions de la décharge couronne en fonction de la tension appliquée V_s , en présence et en absence de l'écran pour $D = 30$ mm.

III.5. CONCLUSIONS

Les mesures expérimentales des caractéristiques courant-tension, des distributions de la densité de courant et les paramètres relatifs aux formes d'ondes des impulsions Trichel formées par la décharge négative mettent en lumière les particularités d'une nouvelle classe de configurations d'électrodes couronne, ainsi, nous pouvons faire les conclusions suivantes :

1. L'agrandissement des dimensions de la configuration d'électrode couronne utilisée provoque une augmentation remarquable de l'intensité du courant électrique au niveau de l'électrode plane.
2. L'électrode « duale » munie d'un écran ou de bandes métalliques reliés à la terre avec des dimensions bien déterminées présente des caractéristiques électriques plus avantageuses pour les applications électrostatiques par rapport aux électrodes « standard ».
3. Pour les mêmes dimensions du système d'électrode, le courant total produit par la décharge couronne et la distribution spatiale de la densité de courant sont plus importants en présence des objets métalliques reliés à la terre à des dimensions réduites de l'électrode couronne, assurant ainsi une meilleure charge des matériaux isolants.

4. Une grille métallique du système d'électrode de type « triode » contenant des mailles plus larges permet le passage d'une quantité plus importante de charges au niveau de l'électrode collectrice.
5. Le champ électrique sur la surface du fil ionisant, les lignes équipotentiels et l'orientation des lignes de champ électrique obtenus par le logiciel de calcul numérique confirment l'aspect avantageux de ce type de configurations d'électrodes sur le développement de la décharge couronne.

Les résultats de la distribution spatiale du potentiel électrique et des courbes de déclin de potentiel de surface sur des plaques de polymères et des medias filtrants non-tissés seront présentés dans le chapitre suivant, en chargeant les différents matériaux à partir des configurations d'électrodes étudiées et présentées dans ce chapitre.

CHAPITRE IV

DISTRIBUTION SPATIALE ET DECLIN DU POTENTIEL ELECTRIQUE A LA SURFACE DES MATERIAUX ISOLANTS

Des études de laboratoire et des observations pratiques [109, 110] ont montré que les caractéristiques de la distribution spatiale du potentiel de surface et la diminution de la charge des matériaux isolants posés à la surface d'une électrode collectrice ont une influence significative sur le résultat de plusieurs processus électrostatiques tels que la séparation des matériaux granulaires et la charge des medias fibreux non-tissés pour la fabrication des filtres d'air pour les habitacles d'automobiles.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons caractériser la sonde de mesure du potentiel électrique de surface pour apporter une lumière sur les deux méthodes utilisées, à savoir le mode statique et le mode dynamique. Les matériaux utilisés pour réaliser ces études expérimentales sont décrits dans la deuxième partie.

En ce qui concerne l'étude de la répartition du potentiel de surface, plusieurs paramètres opératoires ont été testés sur deux types de matériaux isolants, le premier est une plaque de PVC présentant une surface plus homogène et le deuxième est un media fibreux non-tissé. Les effets de la présence de l'écran et de la distance inter-électrodes ont été étudiés dans une configuration fil-plan de type « duale » et également dans le système d'électrode de type triode. L'influence de la présence des bandes et de la géométrie de la grille a été investiguée dans le cadre de cette deuxième partie de l'étude.

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons réalisé la caractérisation du comportement de charge/décharge des deux matériaux isolants présentés précédemment, ainsi que de certaines particules isolantes millimétriques. Ces matériaux ont été posés sur la surface d'une électrode reliée à la terre et chargées par plusieurs configurations d'électrodes, avant de les examiner en utilisant la technique de déclin de potentiel de surface [74]. Celle-ci est un outil largement utilisé dans la caractérisation des matériaux isolants. Son intérêt réside essentiellement dans sa simplicité, et dans la possibilité de bien caractériser les propriétés de surface sans être en contact physique

avec le matériau étudié. Le potentiel de surface étant aussi une mesure de la charge portée par les matériaux isolants, sa mesure pourrait donner d'importantes informations pour les études de faisabilité des procédés aussi divers que la séparation électrostatique des matières plastiques contenues dans les déchets industriels [111] et la charge électrostatique des medias fibreux non-tissés pour les filtres d'air.

IV.1. MODES DE MESURE DE POTENTIEL DE SURFACE

Dans cette partie nous allons décrire les procédures permettant d'établir une quantification précise de l'état de charge électrique des plaques polymériques, des medias filtrants non tissés, et des couches de matériaux isolants granulaires ou pulvérulents, préalablement chargés par effet couronne. Ceci passe par la caractérisation de la sonde de mesure du potentiel de surface pour apporter une lumière sur la signification des valeurs affichées par le voltmètre électrostatique. Cette étude permettra d'établir un protocole fiable pour la mesure du potentiel de surface en mode statique et en mode dynamique.

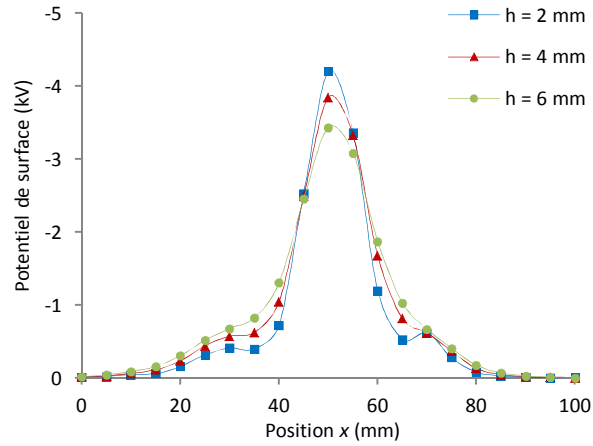
IV.1.1. Régime « statique »

Les mesures effectuées en mode statique dites aussi « point-par-point » sont des prises de mesures dans des points différents sur l'axe central de la surface de l'échantillon chargé, avec la sonde immobile par rapport à l'échantillon. L'ordinateur qui contrôle le système de déplacement du banc expérimental est programmé pour déplacer la sonde électrostatique toutes les 2 s de 10 mm en partant de $x = 0$ mm à $x = 100$ mm (position relative de la sonde à la surface de l'échantillon).

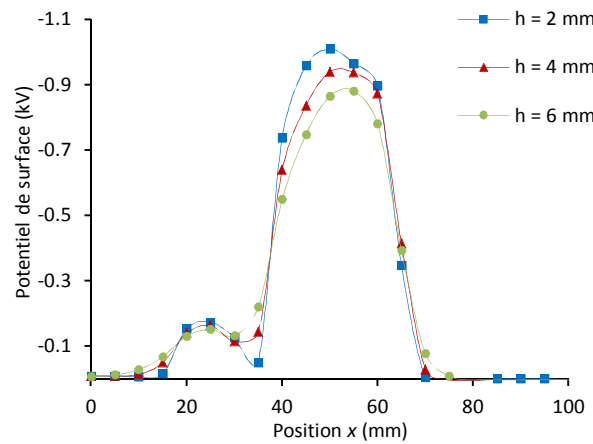
La figure IV-1 illustre les résultats expérimentaux de la caractérisation de la sonde de mesure en mode statique. Lors de notre étude, nous avons varié la hauteur h : qui représente la distance « sonde-échantillon ». La sonde a été placée successivement à une distance $h = 2$ mm, 4 mm et 6 mm au-dessus de l'échantillon chargé. Deux matériaux ont été utilisés pour notre étude, le premier était d'une plaque de polypropylène PP (180 mm $\times$ 50 mm $\times$ 5 mm) et le deuxième un media filtrant non-tissé fabriqué en fibres de PP également avec les mêmes dimensions. Dans les deux cas, chaque échantillon a été exposé pendant 10 s à une décharge couronne générée par une électrode « duale » de type fil située à une distance $D = 10$ mm de l'électrode de masse contenant l'échantillon et alimentée par une source de haute tension négative $V_s = -11$ kV. Le potentiel de surface a été mesuré 20 minutes après le chargement afin d'éviter la phase de déclin rapide du potentiel qui suit l'interruption de la décharge.

L'augmentation de l'espacement entre la sonde et l'échantillon h influence de façon significative le potentiel mesuré par le voltmètre électrostatique. En augmentant la distance h , le potentiel mesuré par le voltmètre reflétera une charge répartie sur une zone plus large sur la surface des deux échantillons testés (plaque en PVC et media filtrant) avec un potentiel de surface réduit au centre des deux échantillons. La charge étant répartie de manière non uniforme à la surface des échantillons, notamment pour le

cas des medias filtrants, le potentiel lu par la sonde n'est pas le même pour les diverses valeurs de h [112]. Cela signifie que le maintien d'une distance rigoureusement constante entre la sonde et l'échantillon est une condition préalable pour toute étude concernant la répartition du potentiel à la surface des matériaux isolants. D'autre part, il est connu que la distance sonde-échantillon standard recommandée par le fabricant est de 3 mm, et c'est la distance pour laquelle nous avons travaillé dans l'ensemble des expériences réalisées dans le cadre de cette thèse.



(a)



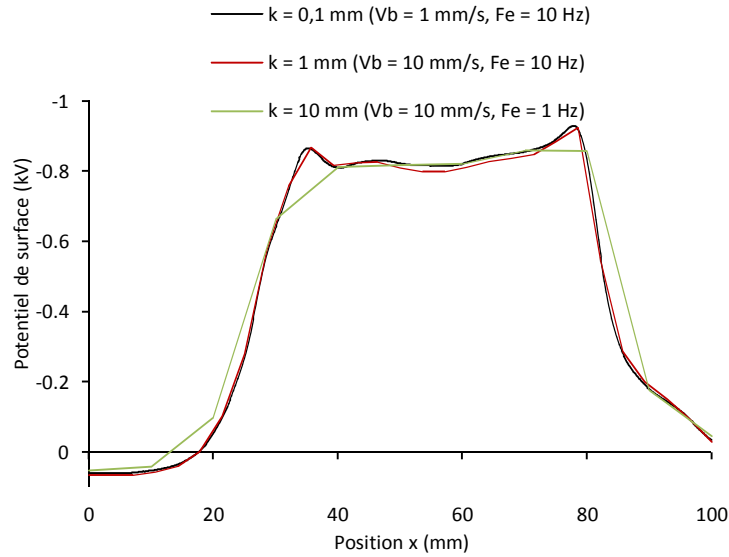
(b)

Figure IV-1. Evolution du potentiel électrique sur la surface d'une plaque de PP (a) et d'un media filtrant (b) en fonction de la position x de la sonde, pour différentes hauteurs h et pour $D = 10$ mm.

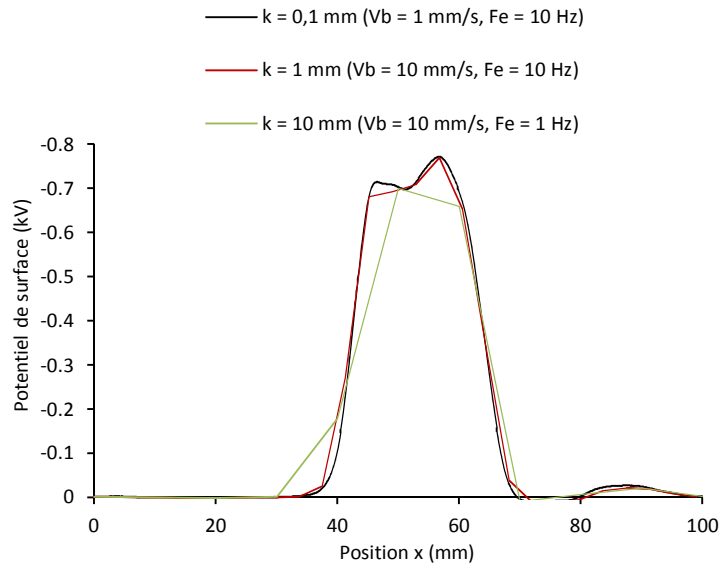
IV.1.2. Régime « dynamique »

Dans cette section, nous allons analyser l'influence de la vitesse relative entre la sonde et la surface de mesure V_b ainsi que la fréquence d'échantillonnage F_e sur la qualité de la mesure du potentiel de surface en régime dynamique (acquisition des données avec la sonde en mouvement). Ceci est dans le but de déterminer la valeur adéquate de la résolution spatiale k déterminée par le rapport V_b/F_e permettant d'optimiser le signal mesuré.

Les figures IV-2 (a) et (b) montre respectivement l'influence de la résolution spatiale k sur le potentiel de surface d'une plaque de PP et du media filtrant, les deux matériaux sont chargés par effet couronne obtenu avec une configuration d'électrodes fil-plan et dans les mêmes conditions expérimentales : distance inter-électrodes $D = 30$ mm, tension appliquée $V_s = -14$ kV et temps de charge $T_c = 10$ s.



(a)



(b)

Figure IV-2. Comparaison du potentiel de surface d'une plaque de PP (a) et d'un media filtrant (b) en fonction de la position x de la sonde, en mode dynamique, pour différentes résolutions spatiales k . avec : $D = 30$ mm, $V_s = -14$ kV et $h = 3$ mm.

On compare ici les courbes obtenues pour trois résolutions spatiales k différentes : 0,1 mm, 1 mm et 10 mm. Pour les deux premiers cas, la fréquence F_e a été fixée à 10 Hz tandis que la vitesse V_b a été variée respectivement de 1 à 10 mm/s. Pour le troisième cas, où $k = 10$ mm, la vitesse et la fréquence ont été fixées à : $V_b = 10$ mm/s et $F_e = 1$ Hz.

En analysant le profil de distribution du potentiel enregistré en mode dynamique, il apparaît évident que la diminution de la vitesse de balayage permet de mieux se rapprocher de la courbe réelle, obtenue en mode « statique ». L'inconvénient est le temps nécessaire pour faire toute l'acquisition. En effet, plus la vitesse de balayage diminue, plus le temps nécessaire pour faire l'acquisition est long. La durée d'acquisition peut avoir des conséquences importantes sur les résultats de cartographie du potentiel de surface dans le cas des échantillons caractérisé par un déclin de potentiel assez rapide.

Les résultats montrent que l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage permet d'améliorer la précision des mesures. Étant donné que la fréquence d'échantillonnage est inversement proportionnelle à la période équivalente T séparant deux mesures consécutives, son augmentation permet de réduire la durée du processus de mesure et de réduire les erreurs dues au déclin du potentiel de surface. Par conséquent, la variation de la fréquence d'échantillonnage F_e permettra d'améliorer plus facilement la qualité du signal mesuré comparée à la variation de V_b .

En fixant la vitesse de balayage, la variation de la fréquence d'échantillonnage modifie la résolution spatiale. Ainsi, la réduction de la fréquence d'échantillonnage fait croître la valeur de k , ce qui conduit à une dégradation significative de la qualité du signal obtenu.

En analysant les formes des signaux obtenus pour les deux cas étudiés (Fig. IV-2(a) et (b)), on peut noter que c'est bien le paramètre k qui permet de contrôler le rapprochement entre la distribution réelle du potentiel à la surface de l'échantillon et celle mesuré par la sonde.

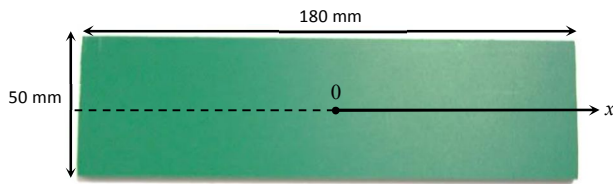
Par analogie au principe de Shannon [113], la représentation d'un signal continu par des échantillons régulièrement espacés, exige une fréquence d'échantillonnage supérieur au double de la fréquence maximale du signal à échantillonner. Un signal échantillonné est plus proche de la forme du signal d'origine lorsque le rapport entre sa fréquence maximale F_{max} et la fréquence d'échantillonnage F_e est largement inférieur à 0,5. Lorsque ce rapport tend vers 0, on obtient un signal quasi-continu.

Par rapport aux résultats obtenus, on peut choisir une résolution maximale de 0,1 mm, ainsi pour un déplacement de l'échantillon à la vitesse maximale du support (30 mm/s), on fixera la fréquence d'échantillonnage à 300 Hz.

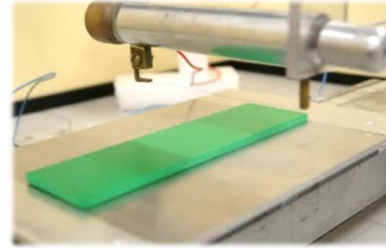
IV.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX ISOLANTS UTILISES

Les expériences décrites dans ce chapitre ont été réalisées sur plusieurs matériaux isolants disponibles au sein du laboratoire d'Electrostatique Appliquée sur le site de l'IUT d'Angoulême. Le choix de ces matériaux a rendu possible l'étude de plusieurs paramètres opératoires sur des échantillons présentant des structures géométriques différentes. Le premier matériau testé a été une plaque en PVC (180 mm × 50 mm × 5 mm), ayant une structure plus homogène par rapport aux autres (Fig. IV-3), facilitant

ainsi l'analyse des résultats de la distribution du potentiel de surface lors de l'étude des diverses conditions expérimentales.

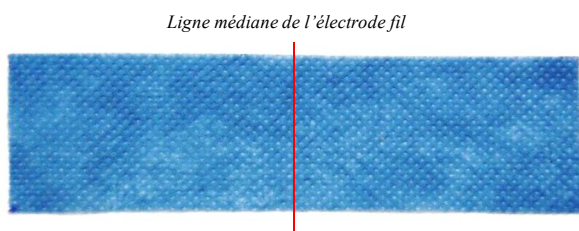


(a)

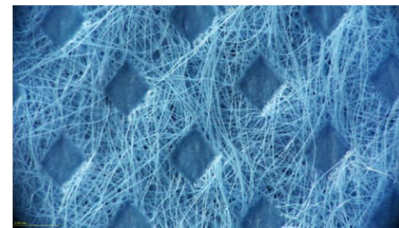


(b)

Figure IV-3. Photographie de la plaque de PVC (a) et du système de chargement fil-plan (b)



(a)



(b)

Figure IV-4. Photographie du media non-tissé en polypropylène (a) et leur structure fibreuse en vue microscopique (b)

D'autres essais ont été effectués sur des medias filtrants non-tissés utilisés pour la filtration de l'air (Fig. IV-4). Le principal inconvénient de ces médias est la non-uniformité de la porosité, ce qui peut entraîner une variation de la charge totale injectée. Cette non-uniformité, à laquelle s'ajoutent l'humidité relative (HR) et la température (T) sont des facteurs influents sur les mesures du déclin de potentiel de surface réalisées avec ce type de matériaux. Le tableau IV-1 nous donne les caractéristiques générales du media non-tissé.

Tableau IV-1. Caractéristiques physiques et mécaniques du media non-tissés [59]

Propriétés	Données
Matière	Polypropylène (PP)
Type de tissage	Non-tissé
Grammage surfacique (g.m^{-2})	42,44
Absorption d'eau (équilibre en %)	0,03
Taille des échantillons ($\text{mm} \times \text{mm}$)	180 $\times$ 50
Epaisseur (mm)	0,3
Diamètre moyen des fibres (μm)	20
Résistance diélectrique (kV.mm^{-1})	30 à 40
Résistivité surfacique des fibres ($\Omega.\text{cm}^{-2}$)	10^{13}
Résistivité volumique des fibres ($\Omega.\text{cm}^{-3}$)	10^{16} à 10^{18}

Enfin d'autres expériences ont été réalisées sur des matériaux granulaires (Fig. IV-5). Il s'agit de granules de PVC, de taille millimétrique, récupérés par le procédé de séparation électrostatique dans les usines de recyclage des déchets des câbles électriques. Le système de charge élaboré pour ces expériences a été ajusté pour simuler les conditions rencontrées dans les deux séparateurs électrostatiques de type convoyeur et de type cylindre tournant qui seront étudiés dans le chapitre suivant.

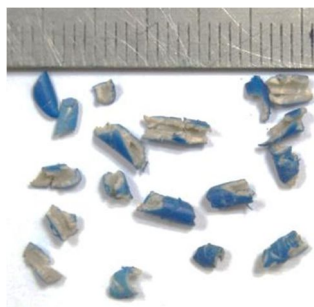


Figure IV-5. Constituants des particules de PVC soumises au chargement par effet couronne (taille typique : 4 mm)

Un niveau de charge plus élevé avec une distribution plus uniforme sur la surface des matériaux isolants préalablement chargés par effet couronne augmente l'efficacité des différents processus électrostatiques telle que la séparation électrostatique et la charge des medias filtrants utilisés dans le domaine industriel. De ce fait, nous avons abordé dans ce qui suit, en premier temps, l'état de charge électrostatique des matériaux isolants en utilisant la technique de la mesure du profil de potentiel de surface et par la suite, des mesures de déclin du potentiel de surface (DPS).

Au départ, lors du chargement par l'électrode couronne « duale », le centre de l'échantillon est placé dans le plan vertical de la ligne médiane du fil de l'électrode (Fig. IV-4(a)). La distance séparant la position de charge et la position de la sonde est de 110 mm. A une vitesse du système de déplacement de 20 mm/s, l'échantillon met 6 s pour arriver à la position de mesure. La fréquence d'échantillonnage F_e est adaptée en fonction du type de mesure à effectuer. Ainsi, une fréquence d'échantillonnage de 10 Hz est choisie pour les mesures du déclin de potentiel de surface. Pour les mesures de profil de distribution de la charge, la fréquence d'échantillonnage est fixée à 200 Hz, pour avoir une résolution spatiale de 0,1 mm entre deux points acquis. Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions ambiantes stables (Température : 18 °C à 20° C, Humidité Relative : 30 % à 40 %).

IV.3. DISTRIBUTION SPATIALE DU POTENTIEL DE SURFACE

Le but de ce travail est d'analyser l'effet des différentes configurations d'électrodes sur la distribution spatiale du potentiel de surface. Les configurations d'électrodes étudiées sont de type « duale », avec et sans présence de l'écran ou des bandes métalliques à proximité de l'électrode couronne, ainsi que le système d'électrode de type « triode ». L'idée de base consiste à mesurer le potentiel électrique sur la surface de plusieurs matériaux isolants tel que les plaques de PVC et les medias filtrants après une

période de 200 s suivant leur exposition à la décharge couronne, dans les différentes configurations d'électrodes préalablement citées. Une durée de charge normalisée a été fixée à 10 s pour le chargement des différents matériaux isolants. La position $x = 0$ correspond à l'alignement de la sonde au centre de l'échantillon.

IV.3.1. Effet de la présence de l'écran

Dans cette partie, nous avons évalué l'effet de la présence de l'écran métallique à proximité de l'électrode « duale » sur la distribution spatiale du potentiel de surface des plaques de PVC chargées dans la configuration fil-plan (Fig. IV-6(a)) et aussi dans le système d'électrode de type « triode ». (Fig. IV-6(b)).

Dans une configuration fil-plan, pour la même tension appliquée en polarité négative $V_s = -14$ kV et la même distance inter-électrodes $D = 50$ mm, la présence de l'écran à proximité de l'électrode « duale » augmente le potentiel électrique sur la surface de l'échantillon exposé à la décharge couronne à des valeurs très importantes par rapport à la même configuration sans écran, comme le montre la figure IV-7(a) [109].

Une observation similaire est faite dans le cas du système d'électrode de type triode (Fig. IV-6(b)), le niveau de la tension appliquée est fixé à une valeur constante $V_s = -14$ kV, afin d'avoir un potentiel de grille égal à -1 kV sans présence de l'écran. L'insertion de l'écran mis à la terre provoque une augmentation du courant de grille, passant de $I_g = -25$ mA à $I_g = -38$ mA, imposant donc un potentiel de grille plus élevé d'environ $V_g = -1,52$ kV pour la même valeur de tension appliquée dans la configuration sans écran [109].

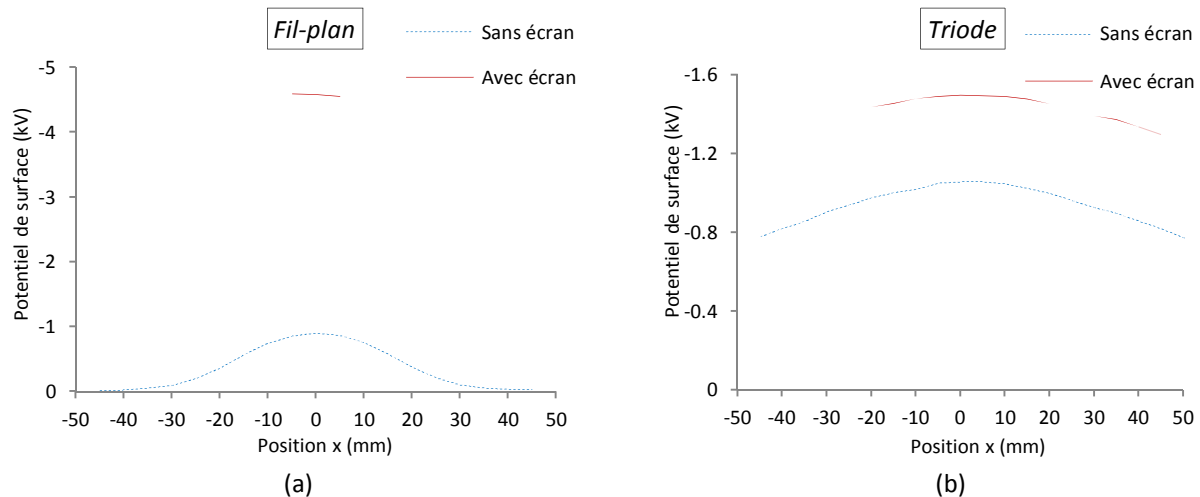


Figure IV-6. Répartition du potentiel de surface sur l'axe des x d'une plaque de PVC en présence et en absence de l'écran, dans une configuration fil plan (a) et dans le système d'électrode de type « triode » (b). (avec les conditions expérimentales : $D = 50$ mm, $D_g = 25$ mm, $V_s = -14$ kV et $R = 40$ M Ω).

IV.3.2. Effet de la présence des bandes métalliques

La figure IV-7(a) illustre les profils de potentiel de surface d'une plaque de PVC chargée par effet couronne en utilisant la même tension appliquée de polarité positive

$V_s = 14$ kV et pour une durée de chargement $T_c = 10$ s, ceci est effectué dans les trois configurations d'électrodes étudiées à savoir, l'électrode « duale » fil-plan avec et sans présence de l'écran ou des bandes métalliques.

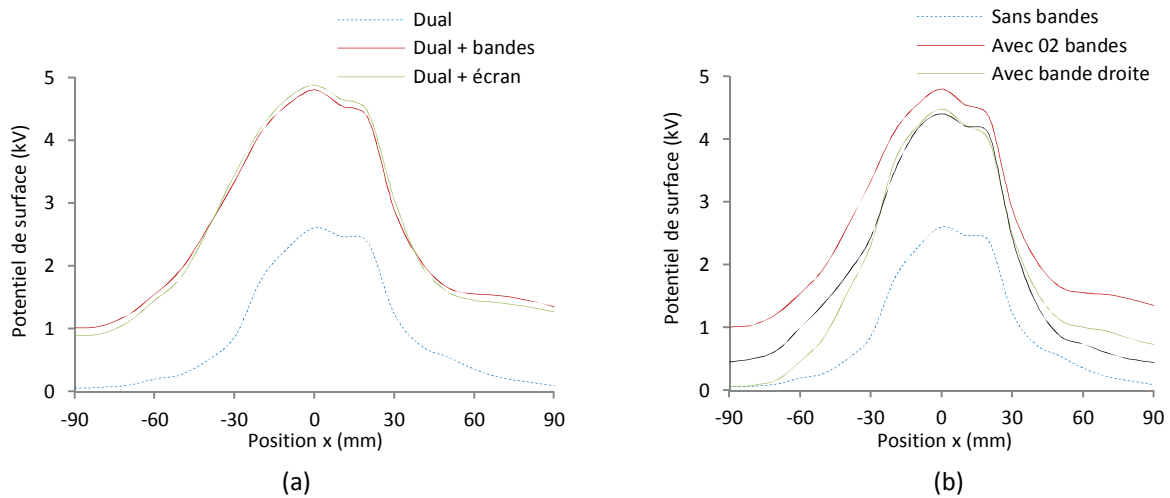


Figure IV-7. Répartition du potentiel de surface sur l'axe des x d'une plaque en PVC, en présence et en absence de l'écran ou des bandes (a) et en fonction du nombre et position des bandes placées (b). Conditions expérimentales : $D = 30$ mm, $D_b = 40$ mm et $V_s = 14$ kV.

Il ressort de ces résultats que la présence de l'écran ou des bandes métalliques reliées à la terre augmente d'une façon significative et identique l'amplitude et la répartition spatiale du potentiel de surface par rapport à l'électrode « duale » standard sans présence d'objets métalliques à proximité [108].

Les courbes présentées sur la figure IV-7(b) sont obtenues en utilisant l'électrode « duale » en présence d'une seule bande dans le côté droit ou dans le côté gauche et en présence des deux bandes en même temps aussi. Ces distributions du potentiel de surface peuvent être facilement expliquées à la lumière des résultats expérimentaux présentés dans le chapitre précédent concernant l'influence du nombre des bandes sur le courant de couronne (Fig. III-23(b)). Le potentiel électrique est d'autant plus élevé dans le côté où la bande est placée, et il est beaucoup plus élevé dans le cas de la présence des deux bandes à la fois.

En diminuant la distance fil-bandes D_b , le potentiel électrique mesuré par le voltmètre sur la surface de l'échantillon augmente de façon importante (Fig. IV-8) ainsi, la zone chargée par effet couronne devient plus large par rapport à la configuration « duale » standard. Les valeurs du potentiel électrique sur la surface de l'échantillon sont plus élevées dans le cas des faibles distances D_b en raison de l'intensification locale du champ électrique dans la région du fil ionisant créant ainsi, des densités de charge d'espace plus importantes [108].

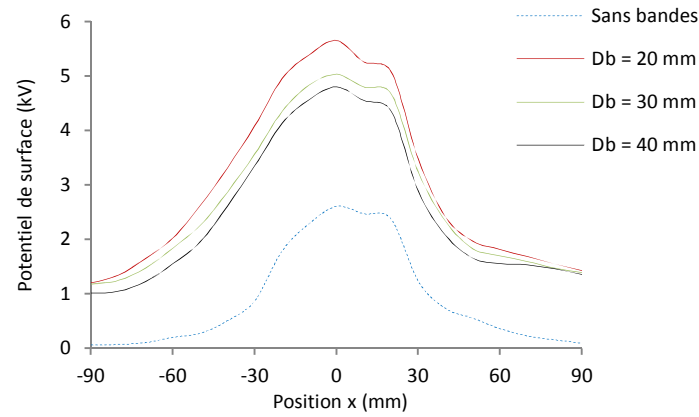


Figure IV-8. Répartition du potentiel de surface sur l'axe des x d'une plaque en PVC, en fonction de la distance fil-bandes D_b (conditions expérimentales : $D = 30$ mm et $V_s = 14$ kV).

IV.3.3. Effet de la distance inter-électrodes D

a) Configuration fil-plan

Les distributions du potentiel électrique à la surface d'une plaque de PVC, chargée par une électrode couronne « duale » de type fil, en absence de l'écran, sont montrées sur la figure IV-9(a) pour différentes distances inter-électrodes D , puis pour la même configuration en présence de l'écran sur la figure IV-9(b), et pour la même valeur de la tension négative appliquée $V_s = -14$ kV.

Les résultats montrent que le potentiel de surface diminue en augmentant la distance inter-électrodes D dans les deux configurations avec et sans présence de l'écran. Ceci est expliqué par la diminution du champ électrique moyen E_{moy} dans l'espace fil-plan en augmentant la distance inter-électrodes. L'effet de la distance D est moins important dans le cas de la configuration écranée que dans la configuration « duale » classique, étant donné que pour cette dernière et pour une distance $D = 50$ mm, on est dans les alentours de la tension seuil V_{onset} [109].

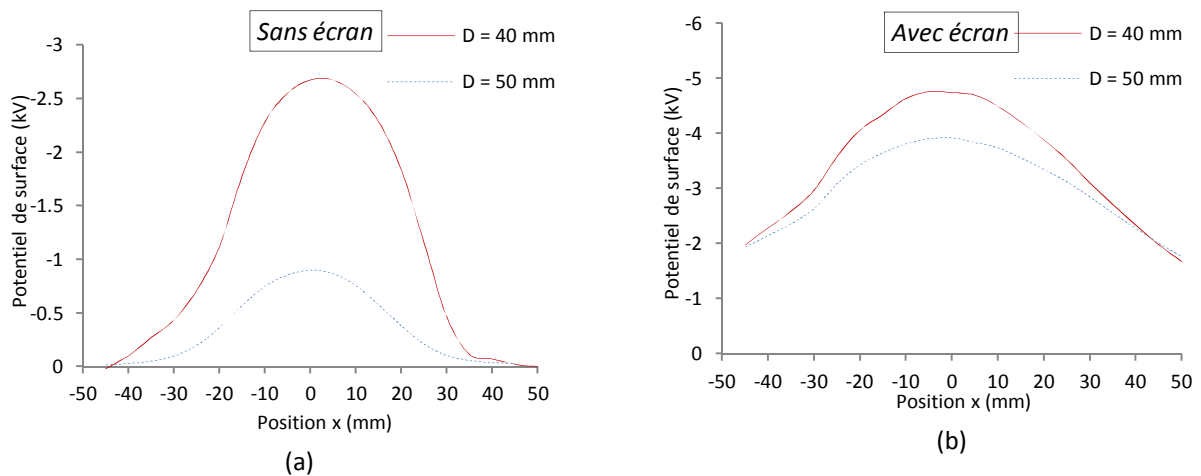


Figure IV-9. Répartition du potentiel de surface sur l'axe des x d'une plaque de PVC pour différentes distances inter-électrodes D , dans une configuration fil-plan en absence (a) et en présence (b) de l'écran, pour $V_s = -14$ kV.

b) Système d'électrode de type « triode »

Afin d'étudier l'effet de la distance inter-électrodes D dans le système d'électrode de type « triode », pour la même distance grille-plan $D_g = 25$ mm, le tableau IV-2 illustre les valeurs de la haute tension appliquée V_s et le courant de grille I_g imposés dans les deux cas, en absence et en présence de l'écran.

Tableau IV-2. Tension et courant du système d'électrode de type « triode » sans et avec écran.

	Sans écran		Avec écran	
Distance D (mm)	40	50	40	50
Tension source V_s (kV)	-11	-14	-11	-14
Courant de grille I_g (μ A)	-25	-25	-38	-38
Résistance R (M Ω)	40	40	40	40

En augmentant la distance D , la haute tension appliquée V_s a été fixée à un niveau supérieur afin d'obtenir le même potentiel de grille $V_g = -1$ kV dans le cas de l'absence de l'écran pour les deux distances ($D = 40$ mm et 50 mm). Pour le deuxième cas de la présence de l'écran et en utilisant les mêmes valeurs de la haute tension appliquée précédemment V_s , le courant de grille I_g augmente en raison de l'effet de l'écran [109] et par conséquent, le potentiel de grille V_g devient plus élevé.

Selon les résultats expérimentaux obtenus avec le système d'électrode de type « triode » sans écran (Fig. IV-10(a)) et avec écran (Fig. IV-10(b)), les valeurs du potentiel électrique sur la surface de l'échantillon sont plus élevées dans le cas des grandes distances D . Ceci peut être expliqué par l'augmentation du courant total I_s dans le système d'électrodes suite à l'augmentation de la tension appliquée V_s , cela produit plus d'ions dans l'espace de la décharge et affecte significativement le processus de charge, même si le potentiel de grille V_g est quasiment constant dans les deux distances D [109].

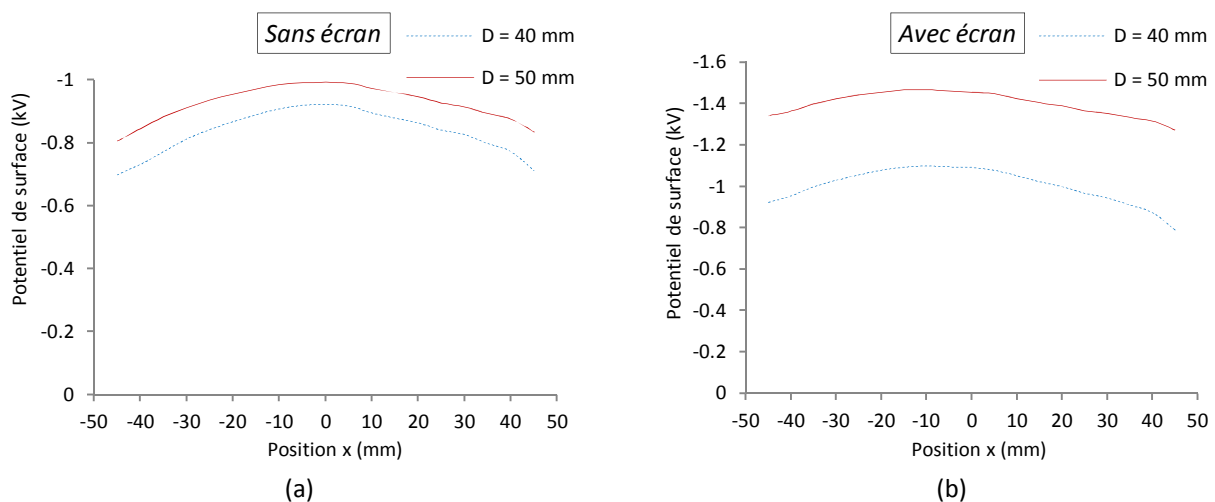


Figure IV-10. Répartition du potentiel de surface sur l'axe des x d'une plaque en PVC pour différentes distances inter-électrodes D , dans le système d'électrode de type « triode » en absence(a) et en présence (b) de l'écran, pour $D_g = 25$ mm.

IV.3.4. Effet de la géométrie de la grille

Le chargement par effet couronne des matériaux non-tissés utilisés comme des medias filtrants améliore leur efficacité de collecte de poussière par le mécanisme de capture électrostatique des particules et donc améliore la filtration mécanique classique.

Dans la plupart des cas, le chargement des medias filtrants se fait dans un système d'électrode de type « triode », présentant l'avantage de contrôler et d'améliorer l'uniformité de la distribution spatiale du potentiel de surface. La figure IV-11 illustre l'effet de la géométrie de la grille dans le système d'électrode de type « triode », en changeant les dimensions des mailles de la grille tel qu'il a été montré sur la figure II-7 et en maintenant tous les paramètres opératoires constants : distances inter-électrodes $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm, potentiel de grille $V_g = 1$ kV, temps de charge $T_c = 10$ s.

D'après ces résultats, on constate que les dimensions de la grille influent sur la distribution spatiale du potentiel de surface. L'augmentation de la taille des mailles de la grille provoque une augmentation significative du potentiel de surface, ainsi, l'extension de la zone chargée progresse encore suite au passage d'une quantité plus élevée des espèces chargées dans le milieu de la décharge, notamment dans l'espace grille-plan où le media est posé.

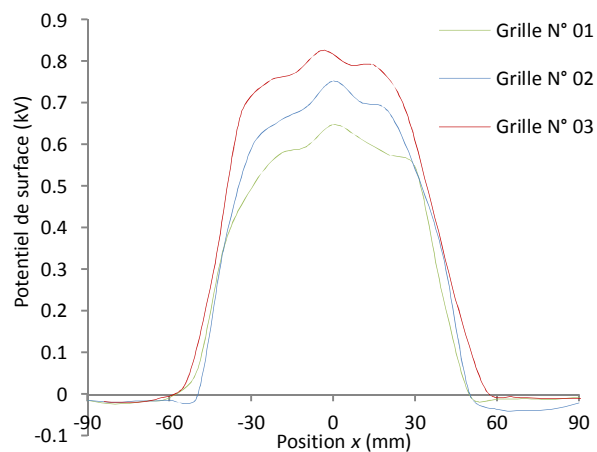


Figure IV-11. Répartition du potentiel de surface sur l'axe des x du media filtrant chargé par le système d'électrode de type « triode » pour différentes dimensions des mailles de la grille avec :

$D = 30$ mm, $D_g = 15$ mm et $V_g = 1$ kV.

IV.4. DECLIN DE POTENTIEL A LA SURFACE DES MATERIAUX ISOLANTS

Les mesures du déclin de potentiel de surface (DPS) présentées dans cette partie, sont effectuées sur différents matériaux isolants à savoir : les plaques en PVC, les medias fibreux composés d'une structure très aléatoire et constitués de fibres en polypropylène (PP) de même taille et ainsi sur des granules isolantes de type PVC provenant de la séparation électrostatique des déchets industriels.

La mesure de DPS est l'outil approprié pour évaluer l'amplitude de la charge et sa stabilité dans le temps. Même si ces mesures ne nous permettent pas de connaître la

valeur exacte de la charge déposée, elles facilitent l'estimation du taux de diminution de celle-ci dans le temps.

Les mesures réalisées sont présentées et discutées en fonction de plusieurs conditions de charge par décharge couronne, notamment le type de la configuration d'électrode utilisée. Ainsi, l'effet de l'écran a été étudié sur les trois matériaux isolants présentés précédemment.

Évidemment, le potentiel électrique appliqué au système d'électrode est un facteur influant sur l'état de charge d'un matériau isolant quelconque, ce paramètre important fera par la suite, l'objet d'une étude détaillée avant d'analyser finalement, l'influence du temps de charge T_c sur les courbes du déclin de potentiel (DPS).

IV.4.1. Effet de la présence de l'écran

a) Cas des plaques en polymères

Dans un premier temps, les mesures du déclin de potentiel ont été réalisées sur des plaques en PVC chargées par décharge couronne dans la configuration fil-plan. Les courbes de DPS, en absence et en présence de l'écran, sont présentées sur la figure IV-12 pour la même tension négative appliquée $V_s = -14$ kV et la distance inter-électrodes $D = 20$ mm. Le potentiel de surface diminue assez rapidement pendant les 2 premières minutes et beaucoup plus lentement après cela. Le potentiel initial à la surface de l'échantillon est plus élevé quand il s'agit d'un chargement par l'électrode « duale » avec écran et diminue légèrement plus vite par rapport à la configuration « duale » sans écran [109].

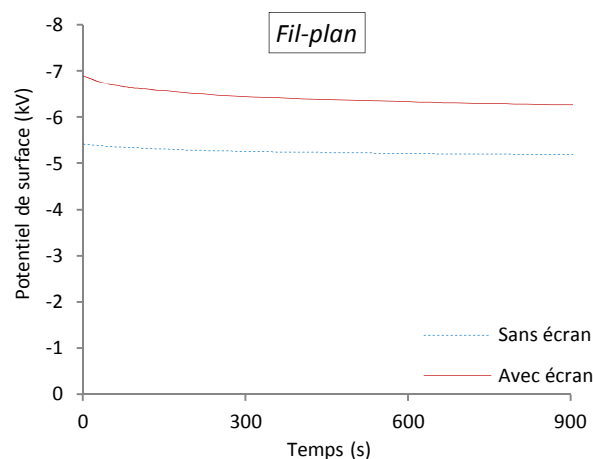


Figure IV-12. Déclin du potentiel de surface d'une plaque en PVC chargée dans une configuration fil-plan, en absence et en présence de l'écran, pour $D = 20$ mm et $V_s = -14$ kV.

Dans un deuxième temps, l'effet de l'écran a été étudié sur le système d'électrode de type « triode ». La figure IV-13 montre le déclin du potentiel électrique dans le point central ($x = 0$) de l'échantillon préalablement chargé en utilisant le système d'électrode de type « triode » avec et sans présence de l'écran, pour la même tension appliquée de polarité positive $V_s = 14$ kV.

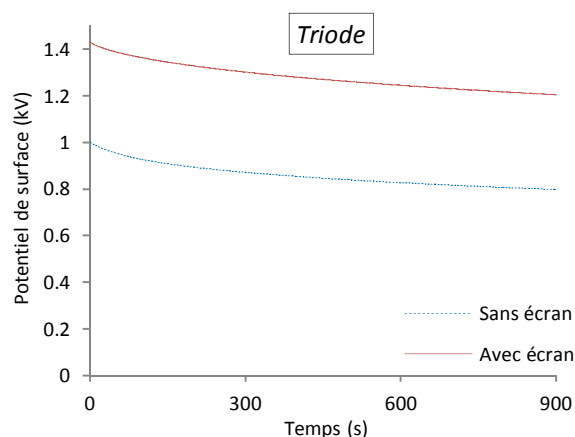


Figure IV-13. Déclin du potentiel de surface d'une plaque de PVC chargée dans le système d'électrode de type « triode », en absence et en présence de l'écran, pour $D = 30$ mm, $D_g = 15$ mm et $V_s = 14$ kV

Le profil du potentiel de surface tel qu'il a été présenté sur la figure IV-6(b), est d'autant plus élevé lors de l'utilisation de l'écran, cette différence reste constamment supérieure en fonction du temps de décharge comme le montre la figure IV-13, en conséquence de l'intensification des densités de charge d'espace conduisant à un courant et donc à un potentiel de grille V_g plus élevé.

b) Cas des médias filtrants

Les courbes de DPS montrées sur la figure IV-14 représentent le cas du chargement des médias filtrants en fonction de la présence de l'écran. Ces courbes de DPS sont obtenues en utilisant le système d'électrode de type « triode », pour des distances inter-électrodes constantes $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm et pour la même tension appliquée $V_s = 11,5$ kV de polarité positive.

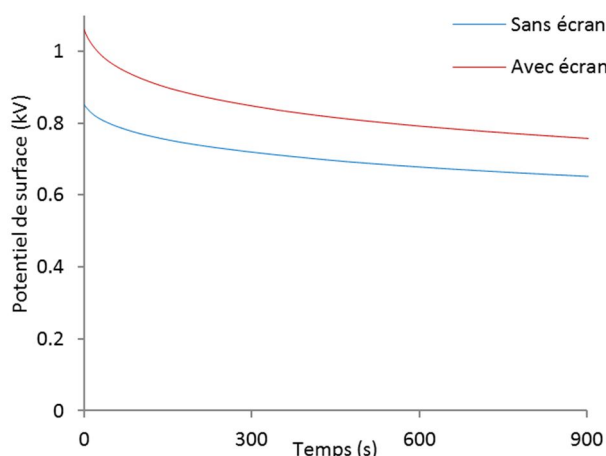


Figure IV-14. Déclin du potentiel de surface du média filtrant chargé par le système d'électrode de type « triode » en absence et en présence de l'écran ($D = 30$ mm, $D_g = 15$ mm et $V_s = 11,5$ kV).

Dans le cas des médias filtrants, nous avons constaté que le potentiel initial est inférieur par rapport au potentiel appliqué dans le cas de l'absence de l'écran $V_g = 1$ kV, ceci est dû à la dispersion des mesures causée par la structure fibreuse aléatoire de la voile et la sensibilité de la décharge couronne en présence de ces médias. Par contre,

l'effet de l'écran est similaire à celui observé dans le cas précédent : une augmentation remarquable du potentiel initial dans le cas de la présence de l'écran lors du chargement et qui se poursuit en fonction du temps.

c) Cas des matériaux granulaires

La figure IV-15 présente le déclin de potentiel sur la surface des granules de PVC chargées dans la configuration « duale » en présence et en absence de l'écran. Le potentiel initial acquis par les particules est légèrement plus élevé pour le cas de la présence de l'écran. Cependant, cette différence de potentiel est d'autant plus élevée en fonction du temps de décharge conduisant à un écart plus important des deux courbes de DPS obtenues dans les deux configurations.

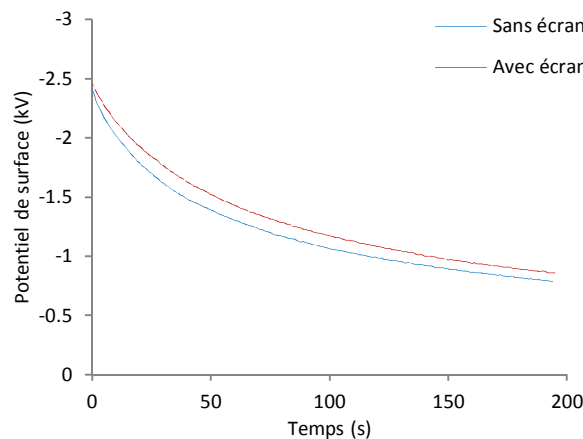


Figure IV-15. Déclin du potentiel de surface des granules de PVC chargés dans la configuration fil-plan, en absence et en présence de l'écran, pour $D = 40$ mm et $V_s = -16$ kV.

IV.4.2. Effet du niveau de la tension appliquée

a) Cas des plaques en polymères

La figure IV-16 présente les courbes du déclin de potentiel de surface enregistrées dans le point central ($x = 0$) d'une plaque en PVC chargée par une décharge couronne positive, pour des niveaux différents de tension de dépôt (tension de grille V_g).

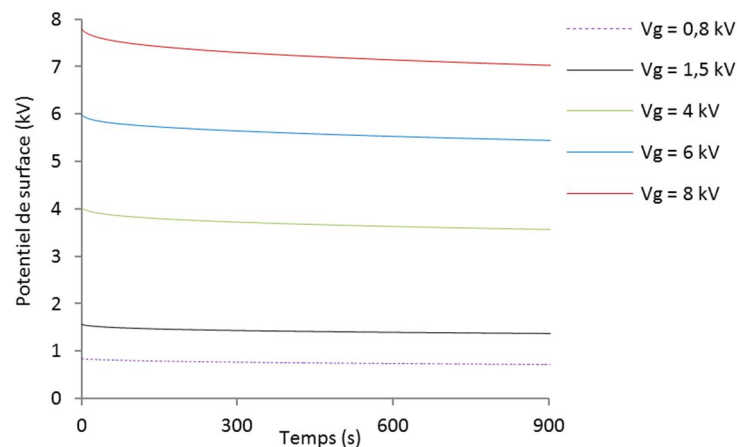


Figure IV-16. Déclin du potentiel de surface d'une plaque en PVC chargée par le système d'électrode de type « triode » pour différents potentiel de grille V_g avec $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm.

Les résultats de la figure IV-16 montrent que le potentiel initial dépend de la quantité de la charge déposée sur la surface de l'échantillon. Pour les plaques de PVC et grâce à leur volume consistant et leur structure homogène, le potentiel initial peut atteindre jusqu'à environ 8 kV d'amplitude. Cependant, les résultats du déclin de potentiel de surface dans ce cas, ne présentent aucun croisement entre les différentes courbes même pour des potentiels de grille V_g relativement élevés. Cela conduit à montrer que l'effet de la densité de charge n'agit pas vraiment sur la cinétique des porteurs de charges et plus précisément sur la conduction volumique dans le cas des plaques en polymère et donc sur la vitesse de déchargement.

b) Cas des médias filtrants

Les mesures de déclin du potentiel de surface présentées dans cette partie ont été réalisées sur des échantillons neufs de la même voile chargés à l'air ambiant et dans les mêmes conditions. La décharge couronne positive, utilisée pour charger les échantillons, est générée dans un système d'électrode de type « triode », à des distances inter-électrodes constantes $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm. Le potentiel de grille V_g est ajusté par la tension source V_s en contrôlant le courant de grille I_g .

La présentation des courbes de DPS est répartie en fonction du potentiel de la grille sur les figures IV-17(a) et (b) respectivement pour les potentiels V_g faibles et élevés. Cinq mesures ont été réalisées pour chaque essai, défini par le niveau de potentiel V_g de la grille. Les courbes de DPS de la figure IV-17(a) sont obtenues pour des valeurs du potentiel de grille comprises entre 0,8 kV et 1,5 kV. Le potentiel de surface mesuré augmente au fur et à mesure que le potentiel V_g est élevé. Bien que les courbes au potentiel de surface initial élevé, imposé par celui de la grille, déclinent plus vite, elles ne présentent aucun croisement. Par contre pour des valeurs du potentiel de grille V_g supérieures à 1,5 kV, les courbes de déclin de potentiel sont caractérisées par la présence d'un phénomène appelé le « Cross over » (Fig. IV-17(b)). Ces résultats sont en bon accord avec ceux reportés par Tabti et al. [74].

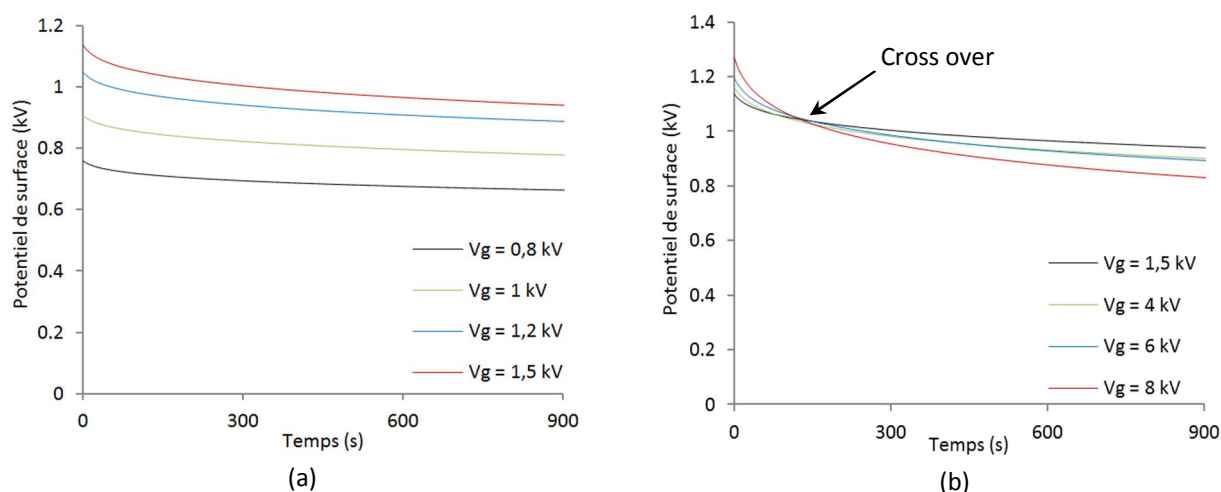


Figure IV-17. Déclin du potentiel de surface du media filtrant chargé dans le système d'électrode de type « triode » pour les faibles potentiels de grille V_g (a) et les grands potentiels V_g (b) avec $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm.

L'apparition du « Cross over » est généralement significative d'une injection de charges dans le volume du matériau. La charge injectée dépend du niveau de chargement. Une fois les charges injectées, elles peuvent dériver vers l'autre face de l'électrode sous l'influence de leur propre champ.

c) Cas des matériaux granulaires

Pour simuler la situation rencontrée dans un séparateur électrostatique, une couche de particules isolantes de type PVC de 10 g a été déposée sur une électrode collectrice reliée à la terre et les granules sont chargées par effet couronne dans la configuration fil-plan de type « duale » pour différentes tensions appliquées V_s de polarité négative.

Les résultats obtenus concernant la mesure du déclin de potentiel de surface, sur les granules de PVC, en fonction de la tension appliquée V_s sont illustrés sur la figure IV-18. La valeur du potentiel électrique à la surface de la couche de particules isolantes dépend directement de la tension appliquée. En effet, à chaque fois que les échantillons soient soumis à des décharges couronne produites par des tensions relativement élevées, la vitesse de déclin de potentiel devient de plus en plus importante. Cette différence de vitesse engendre souvent le croisement des courbes de déclin de potentiel, ou le « Cross over ». Ainsi, au bout d'un certain temps, un échantillon initialement plus chargé qu'un autre peut atteindre un potentiel de surface inférieur.

Par conséquent, les résultats obtenus montrent que le déclin du potentiel de surface est en fonction de la valeur de la tension appliquée V_s . Ces résultats contribuent à confirmer l'hypothèse d'une injection de charges dans le volume du matériau conduisant au phénomène du « Cross over ».

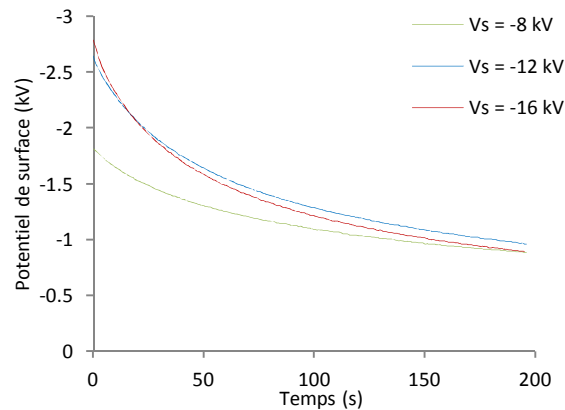


Figure IV-18. Déclin du potentiel de surface des granules de PVC chargés dans la configuration fil-plan, pour plusieurs tensions de source V_s , pour $D = 30$ mm.

IV.4.3. Effet du temps de chargement T_c

a) Cas des plaques en polymères

La figure IV-19 présente les courbes de déclin de potentiel de surface sur une plaque de PVC chargée par une tension positive $V_g = 1$ kV dans le système d'électrode de type « triode », pour des durées de charge T_c différentes.

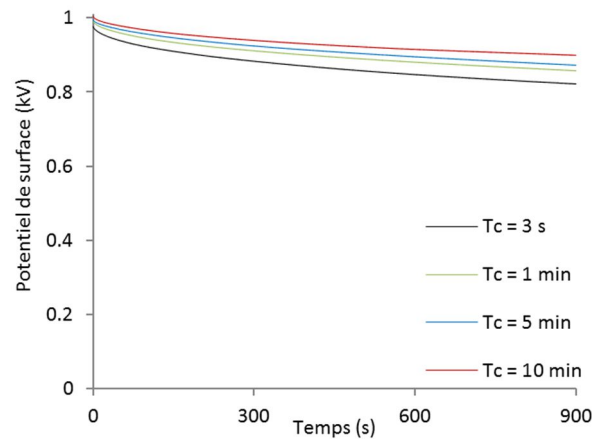


Figure IV-19. Déclin du potentiel de surface d'une plaque de PVC chargée dans le système d'électrode de type « triode » pour plusieurs temps de chargement T_c avec $D = 30$ mm, $D_g = 15$ mm et $V_g = 1$ kV.

Pour les mêmes distances inter-électrodes $D = 30$ mm et $D_g = 15$ mm, nous avons constaté que le niveau du potentiel de surface initial augmente légèrement en augmentant la durée de chargement T_c . Les résultats nous montrent qu'au fur et à mesure qu'on augmente la durée de chargement, le déclin se ralentit. Suite à la durée accordée, la densité de charge aura plus de temps pour s'installer sur toute la surface et ainsi dans le volume du matériau lors des durées T_c importantes.

b) Cas des médias filtrants

La figure IV-20 illustre les résultats de l'évolution du DPS dans le point central du media filtrant, pour différents temps de chargement T_c .

Les courbes de déclin de potentiel de surface montrent un taux de déclin plus important dans le cas des faibles durées de chargement. Ces résultats confirment les données présentées précédemment et illustrent à quel point la durée de charge T_c influe sur l'allure du DPS.

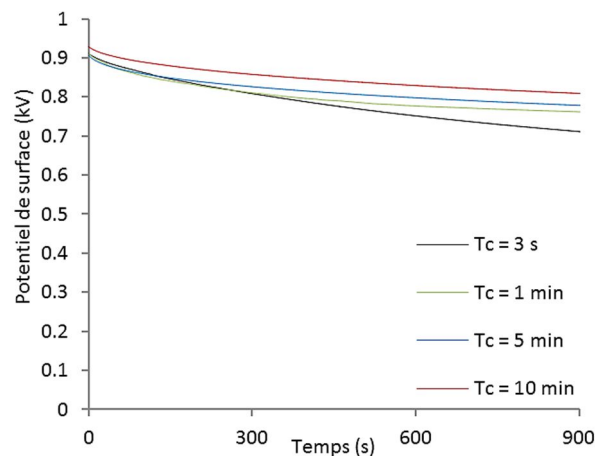


Figure IV-20. Déclin du potentiel de surface du media filtrant chargé dans le système d'électrode de type « triode » pour plusieurs temps de chargement T_c avec $D = 30$ mm, $D_g = 15$ mm et $V_g = 1$ kV.

IV.5. CONCLUSIONS

Dans ce chapitre nous avons étudié les conditions expérimentales acceptables pour la mesure du potentiel de surface en régime « statique » et « dynamique ». Une

caractérisation des deux régimes nous a permis d'optimiser l'acquisition des données. Cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. La mesure du potentiel de surface est influencée par la hauteur h séparant la sonde et l'échantillon en mode « statique ». Cependant, les mesures du potentiel en mode « dynamique » permettent d'avoir des cartographies du profil du potentiel de surface des plaques en polymères ainsi que des medias fibreux non-tissés d'une façon plus précise. L'un des paramètres les plus importants pour ce type de mesure est la résolution spatiale k définie comme étant le rapport entre la vitesse relative entre la sonde et l'échantillon V_b et la fréquence d'échantillonnage F_e . La variation de V_b et de F_e a permis de démontrer l'importance de respecter une résolution spatiale maximum, qui est de 0,1 mm pour un espacement h de 3 mm.
2. La détermination de l'intégralité du profil du potentiel de surface dans différentes situations nous a permis d'investiguer l'influence de plusieurs paramètres sur la répartition du potentiel de surface. Un élargissement important de la zone chargée par effet couronne a été démontré dans le cas de chargement dans les configurations d'électrodes munies d'un écran ou de bandes métalliques.
3. La diminution de la distance inter-électrode D ou de la distance fil-bandes D_b , permet d'augmenter davantage les valeurs du potentiel électrique mesuré sur la surface des matériaux isolants.
4. Les dimensions des mailles de la grille dans le système d'électrode de type « triode » influent remarquablement sur les profils du potentiel de surface.
5. Les mesures du déclin de potentiel de surface (DPS) montrent que la présence de l'écran augmente le potentiel initial mesuré sur la surface des plaques de PVC, des échantillons fibreux ainsi que sur des granules isolants ainsi, il permet ainsi aux échantillons de retenir mieux la charge déposée en surface en fonction du temps, ceci présente un avantage majeur pour les processus de fabrication des medias fibreux non-tissés.
6. Mis à part les plaques en polymères présentant un volume assez important, l'intensité de la décharge couronne est un facteur d'activation important pour les medias fibreux et les matériaux granulaires, elle provoque une chute du potentiel de surface assez notable pour des intensités importantes conduisant au phénomène du « Cross over ».
7. Finalement, il a été démontré que le temps de dépôt de charge joue un rôle très important dans la cinétique des porteurs de charges, un temps de charge assez réduit favorise la conduction des charges vers les bords de l'échantillon et intensifie le déclin du potentiel de surface.

Les résultats de séparation électrostatique des matériaux granulaires obtenus dans deux séparateurs différents seront données dans le chapitre suivant, en utilisant les différentes configurations d'électrodes développées, à savoir les associations électrode-écran et électrode-bandes.

CHAPITRE V

APPLICATION A LA SEPARATION

ELECTROSTATIQUE DES MATERIAUX

GRANULAIRES

Le présent chapitre traite principalement l'effet de la présence de l'écran ou des bandes métalliques à proximité de l'électrode couronne dans deux types de séparateurs électrostatiques, à savoir le séparateur à cylindre tournant et le séparateur multifonctionnel à tapis roulant. Ceci est afin d'étudier l'efficacité du système d'électrode couronne dans les différents procédés de séparation électrostatique. Ainsi, la performance de ce type de configurations d'électrodes dans un tel processus d'application est assurée en mesurant tout d'abord la charge acquise par une monocouche de particules isolantes chargée par effet couronne dans une configuration classique de type « dual » fil-plan, en présence et en absence de l'écran.

D'autre part, il est bien connu que le vent ionique généré par la décharge couronne et la poussière qui collent sur la surface de l'électrode ionisante sont deux problèmes majeurs pour la séparation électrostatique de particules fines, ces deux phénomènes sont également abordés dans le présent travail. Il est largement possible de résoudre ce genre de difficultés rencontrées dans les processus de séparation électrostatique en mettant en place cette nouvelle classe de configurations d'électrodes couronne.

V.1. CHARGE ACQUISE PAR LES PARTICULES ISOLANTES

La figure V-1 montre les résultats des expériences de chargement par effet couronne de trois échantillons de PEHD blanc (taille moyenne : $\phi = 3$ mm) de masse totale $m = 40$ g, en utilisant l'électrode « duale » de type fil avec et sans écran (dimensions de l'écran : $L = H = 80$ mm). L'électrode active est alimentée sous une tension continue $V_s = 12$ kV et située à une distance $D = 30$ mm au-dessus de l'électrode collectrice disposant les granules soumis au chargement. Tous les échantillons sont chargés par une décharge couronne pour une durée de 10 s. Il a été déduit d'après ces résultats qu'à chaque fois, la charge acquise en présence de l'écran est deux fois plus

élevée par rapport à la configuration classique, ceci est dû à l'augmentation du courant électrique et de l'intensification du champ électrique de la décharge couronne en présence de l'écran.

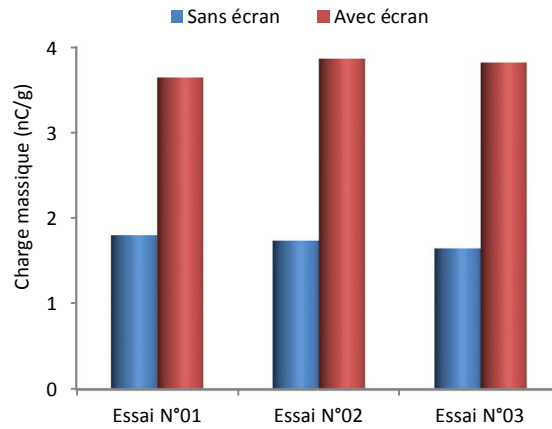


Figure V-1. Charge massique acquise par les granules de PEHD blanc (Taille moyenne : $\phi = 3 \text{ mm}$) après chargement par effet couronne dans une configuration « duale » de type fil avec et sans écran, pour $D = 30 \text{ mm}$ et $V_s = 12 \text{ kV}$.

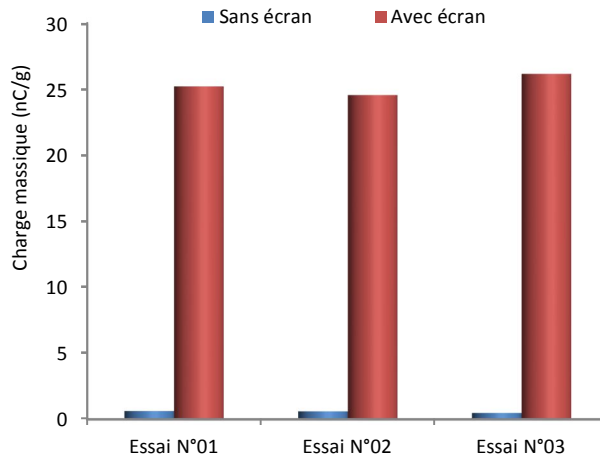


Figure V-2. Charge massique acquise par les granules d'ABS ($500 \mu\text{m} < \phi < 1000 \mu\text{m}$) après chargement par effet couronne dans une configuration « duale » de type fil avec et sans écran, pour $D = 40 \text{ mm}$ et $V_s = 12 \text{ kV}$.

Cependant, les résultats présentés sur la figure V-2 sont obtenues en utilisant trois échantillons de particules fines d'ABS (classe granulométrique : $500 \mu\text{m} < \phi < 1000 \mu\text{m}$) dans la même configuration d'électrodes « duale », pour une distance $D = 40 \text{ mm}$. En absence de l'écran, et à une tension appliquée $V_s = 12 \text{ kV}$, il n'y avait aucun courant circulant vers l'électrode plane, de ce fait, une charge très faible est acquise par les granules suite à l'effet triboélectrique dû à la manipulation des expériences. Par contre, en utilisant l'écran, la valeur seuil V_{onset} a diminué, créant ainsi pour la même tension appliquée $V_s = 12 \text{ kV}$ un courant de couronne permettant de charger les particules à des valeurs plus élevées (d'environ 25 nC/g). Ce résultat confirme l'aspect avantageux de ce

type d'arrangement muni d'un écran métallique pour son utilisation dans les différentes applications de séparation électrostatique.

V.2. SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE A CYLINDRE TOURNANT

Dans la zone de décharge couronne du séparateur électrostatique à cylindre tournant, les particules du mélange granulaire à séparer sont exposées à un bombardement ionique. Seules les particules isolantes sont aptes à conserver la charge électrique acquise dans cette zone. La quantité de la charge acquise à un instant t par une particule de forme sphérique peut être évaluée par la relation (V-1).

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(Q - Q_m)}{\tau \cdot Q} \quad (V-1)$$

$$\tau = 4 \frac{\varepsilon_0}{\sigma_0} \quad (V-2)$$

où ε_0 est la permittivité de l'air ; $\sigma_0 = J/E$ la densité de la décharge couronne dans le point considéré, exprimée en fonction de la densité du courant de décharge J et de l'intensité du champ électrostatique E ; Q et Q_m représentent respectivement la charge instantanée et la charge maximale acquises par la particule dans la zone de la décharge couronne ; T : la constante du temps liée à l'évolution de la charge acquise par la particule.

Dascalescu et ses collaborateurs ont démontré que dans l'électro-séparateur, la charge maximale Q_m acquise par une particule isolante sphérique de rayon a et d'une permittivité relative ε_r , placée dans un champ électrique mono-ionisé E , est légèrement supérieure à la valeur donnée par l'équation théorique (V-3) [96].

$$Q_m = 12\pi\varepsilon_0 a^2 \left[\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \right] E \quad (V-3)$$

Par ailleurs, leurs expériences ont démontré que Q_m croît linéairement avec la tension appliquée jusqu'à une valeur limite de saturation, au-delà de laquelle la charge du granule s'auto-régule car celui-ci commence à perdre une partie de sa charge par effet couronne. La valeur de la charge de saturation est pratiquement la même quel que soit l'intervalle inter-électrodes. Cependant, cette valeur est atteinte avec une tension plus faible lorsque l'intervalle est réduit. Ceci est important car ça définit en quelque sorte la limite supérieure de la haute tension du générateur utilisé dans l'électro-séparateur [76].

L'étude d'un séparateur à cylindre tournant utilisé pour le traitement des DEEE montre l'existence d'un nombre important de facteurs liés aux paramètres géométriques et électriques de l'installation [40, 76]. Ces facteurs exercent une influence significative sur l'ensemble des performances de l'installation.

Dans notre étude, le processus de séparation est modélisé en fonction de trois facteurs. Ces facteurs sont : la valeur de la haute tension appliquée à l'électrode couronne « V [kV] », la distance séparant l'électrode couronne de la surface du cylindre tournant « d_1 [mm] » et la vitesse de rotation du cylindre tournant « n [tr/min] ».

Pour quantifier la qualité de la séparation électrostatique nous avons calculé le taux de récupération des produits isolants et conducteurs respectivement à l'aide de l'équation suivante :

$$Réc (\%) = \frac{M_{ic}}{M_{it}} \times 100 \quad (V-4)$$

- M_{ic} : masse du produit "i" collecté dans la partie qui lui est réservé ;
- M_{it} : masse totale du produit "i" introduit dans le séparateur.

Les pourcentages de récupération des granules soumis à la séparation par le séparateur électrostatique à cylindre tournant, en utilisant une électrode couronne de type « dual » avec et sans présence de l'écran ($L = H = 80$ mm), sont présentés sur la figure V-3, pour une tension appliquée de polarité négative $V_s = -18$ kV et à une distance $d_1 = 50$ mm.

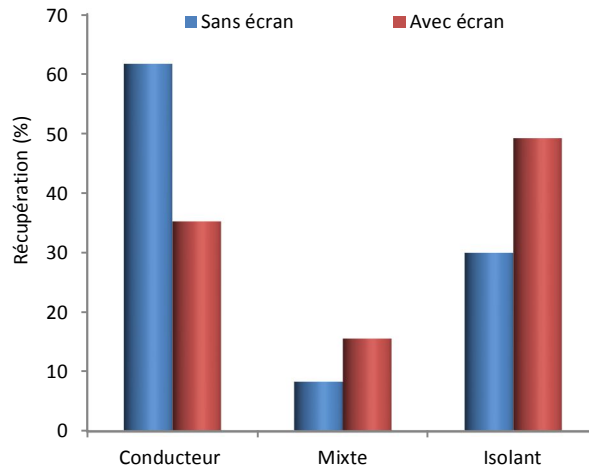


Figure V-3. Pourcentage de récupération obtenu dans les trois bacs collecteurs après séparation dans le séparateur à cylindre tournant, en présence et en absence de l'écran pour $V_s = -18$ kV et $d_1 = 50$ mm.

La quantité récupérée du matériau isolant est nettement plus élevée dans le cas de la présence de l'écran relié à la terre. Cette amélioration est due à l'élargissement de la zone de la décharge couronne sur la surface du cylindre portant les granules soumis au chargement par effet couronne, ce résultat est très utile pour les applications industrielles traitant les déchets pour récupérer davantage les matériaux isolants.

D'un autre côté, le fait de canaliser le champ électrique généré par l'électrode couronne en utilisant l'écran métallique, le champ électrique au niveau du cylindre tournant est fortement réduit dans la zone située face à l'électrode statique, cette diminution se traduit par une réduction remarquable de la récupération des granules conducteurs dans le séparateur électrostatique à cylindre tournant lors de l'utilisation de l'écran.

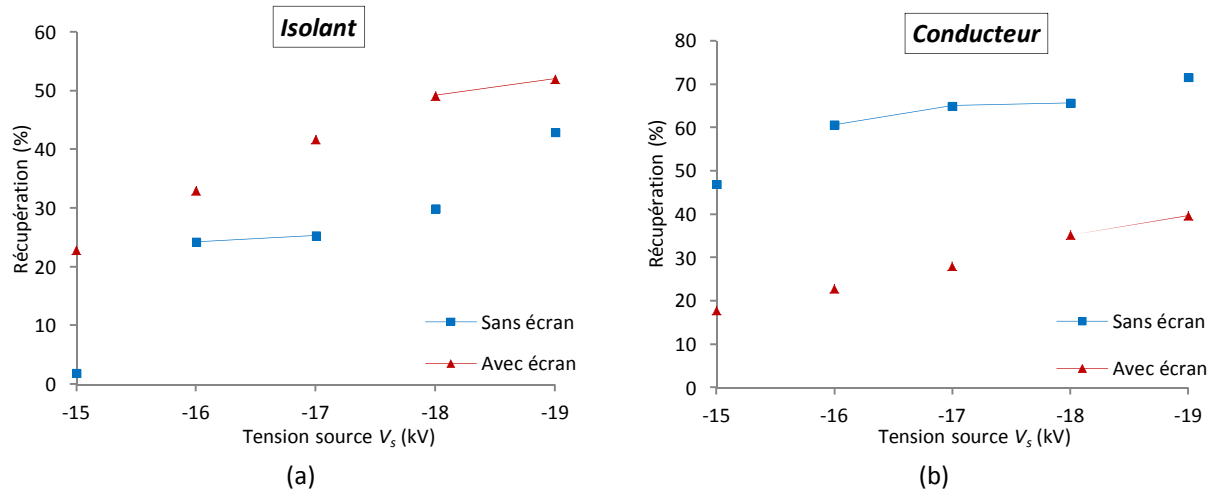


Figure V-4. Pourcentage de récupération des granules isolants (a) et des granules conducteurs (b) dans le séparateur électrostatique à cylindre tournant en fonction de la tension appliquée, en présence et en absence de l'écran pour $d_1 = 50$ mm et $n = 40$ tr/min.

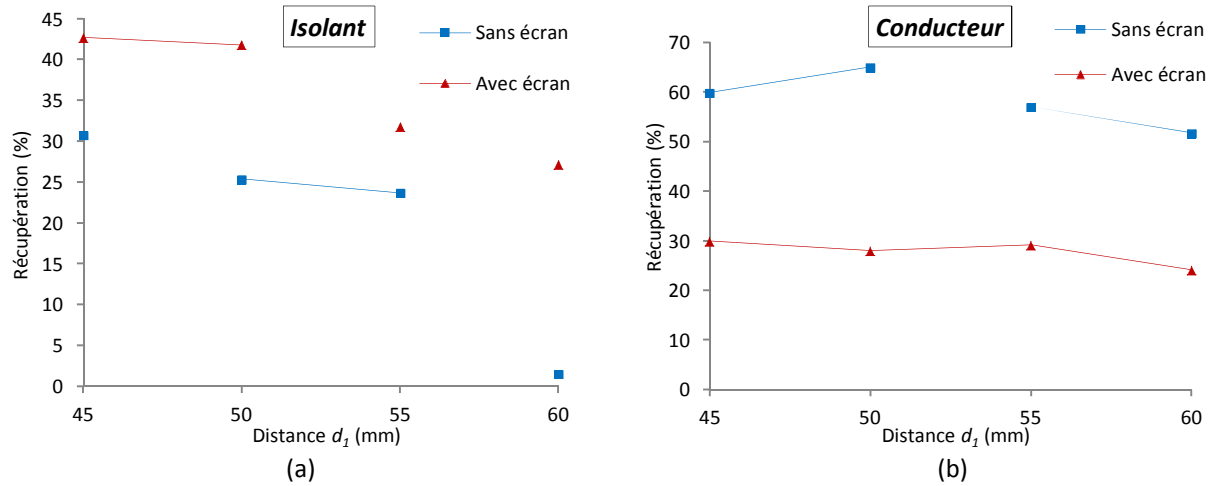


Figure V-5. Pourcentage de récupération des granules isolants (a) et des granules conducteurs (b) dans le séparateur électrostatique à cylindre tournant en fonction de la distance inter-électrodes d_1 , en présence et en absence de l'écran pour $V = -17$ kV et $n = 40$ tr/min.

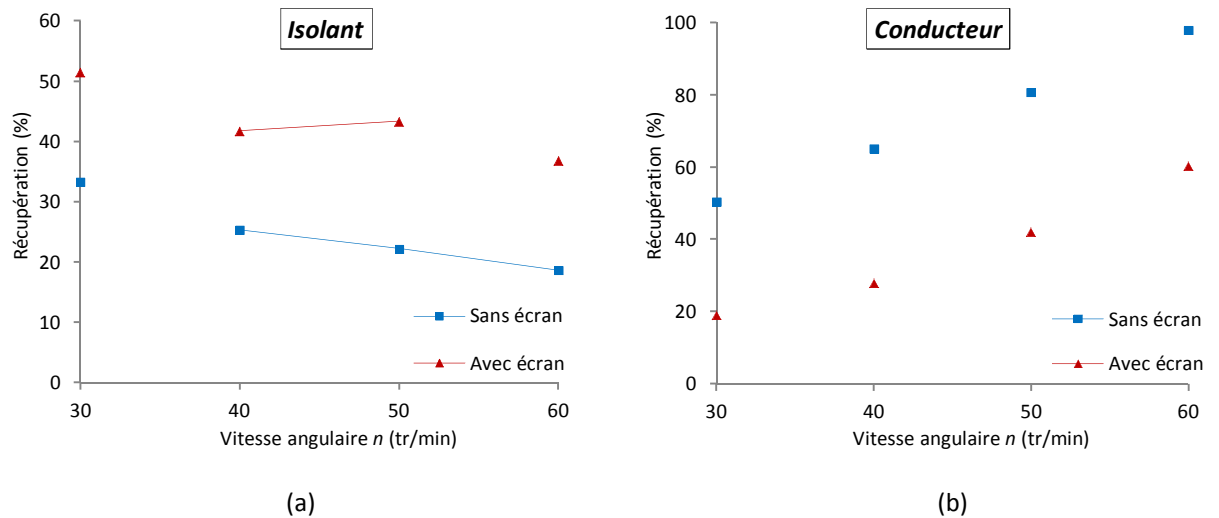


Figure V-6. Pourcentage de récupération des granules isolants (a) et des granules conducteurs (b) dans le séparateur électrostatique à cylindre tournant en fonction de la vitesse angulaire du cylindre n , en présence et en absence de l'écran pour $d_1 = 50$ mm et $V = -17$ kV.

Par la suite, des essais de séparation électrostatique supplémentaires ont été réalisés en fonction de plusieurs facteurs. Les figures V-4(a) et (b) illustrent les pourcentages de récupération des granules isolants et conducteurs respectivement dans le séparateur électrostatique à cylindre tournant en fonction de la tension appliquée, avec et sans insertion de l'écran. Les résultats présentés sur les figures V-5(a) et (b) ont été obtenus en variant la distance inter-électrodes d_1 dans les deux cas de la présence et de l'absence de l'écran, tandis que les résultats présentés sur les figures V-6(a) et (b) montrent les taux de récupération des matériaux isolants et conducteurs respectivement, en fonction de la vitesse angulaire du cylindre tournant n .

Tel qu'il a été démontré précédemment, la présence de l'écran intensifie la décharge couronne par rapport à la configuration classique sans écran, ce qui provoque une augmentation de la charge acquise par les particules isolantes dans ce type de configuration d'électrodes pour les mêmes conditions opératoires. Ceci se traduit par une augmentation remarquable de la récupération des particules isolantes en présence de l'écran [109].

D'autre part, l'augmentation de la distance inter-électrodes d_1 réduit le champ électrique généré par la décharge couronne, réduisant par conséquent la récupération des particules isolantes, en raison de leur faible niveau de charge dans les grandes distances. Cependant, nous avons remarqué que la charge acquise est reliée à la vitesse de rotation du cylindre : plus grande est la vitesse, plus petite est la charge, à cause du temps de transit de la particule isolante qui est plus court. En outre, les résultats montrent que la récupération des granules conducteurs augmente en fonction de la vitesse n tant dit qu'elle est légèrement affectée par la variation de la distance inter-électrodes d_1 .

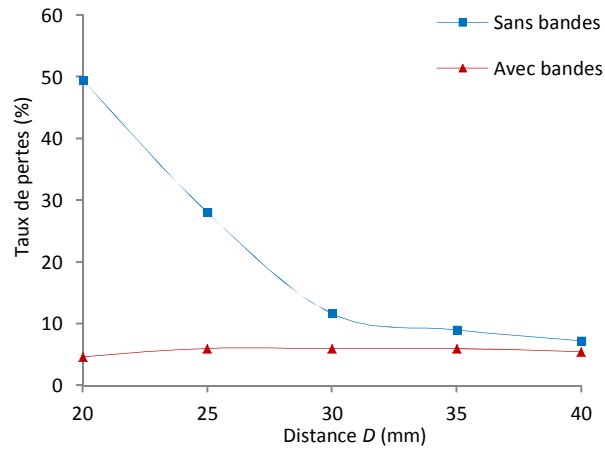
D'un autre côté, l'ensemble des résultats présentés montrent une forte diminution de la récupération des granules conducteurs dans l'électro-séparateur, en présence de l'écran. On conclut donc que dans des situations imposant l'utilisation de plusieurs électrodes en même temps et dans la même zone, comme le cas du séparateur électrostatique à cylindre tournant, l'insertion de l'écran devient moins bénéfique et diminue remarquablement le rendement global de l'électro-séparateur notamment lors des applications industrielles de séparation des mélanges granulaires de type isolants/conducteurs.

V.3. SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE A TAPIS ROULANT

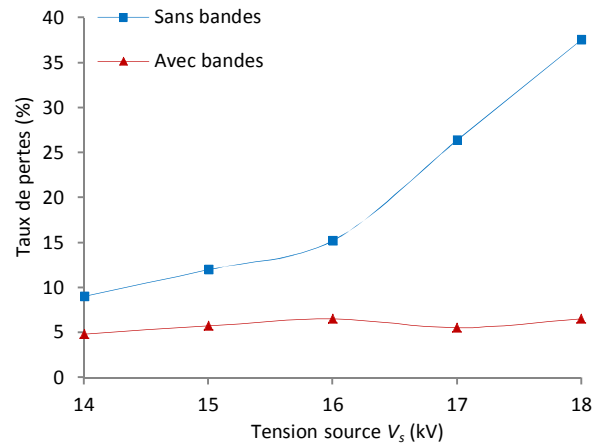
V.3.1. Pertes dues au vent ionique

Des séries d'expériences ont été réalisées sur le séparateur électrostatique à tapis roulant afin d'évaluer dans une première étape les taux de pertes de masse des mélanges granulaires introduites dans le séparateur et causées par le vent ionique créé par la décharge couronne. Le mélange est composé de 0,5 g d'aluminium (Al) et 0,5 g de polystyrène (PS) dont la taille granulométrique est de classe $125 \mu\text{m} < \phi < 250 \mu\text{m}$.

Une étude comparative a été établie dans les deux cas : en présence et en absence des bandes métalliques à proximité de l'électrode couronne (distance fil-bandes $D_b = 40$ mm), sans alimentation de l'électrode cylindrique.



(a)



(b)

Figure V-7. Taux de pertes dues au vent ionique causées par l'effet couronne dans le séparateur électrostatique à tapis roulant, en fonction de la distance inter-électrodes D pour $V_s = 15$ kV (a) et en fonction de la tension appliquée pour $D = 30$ mm (b)

Lors de la première série d'expériences, la distance inter-électrodes D a été ajustée pour différentes valeurs comprises entre 20 et 40 mm, tandis que la tension appliquée a été maintenue constante et égale à $V_s = 15$ kV.

Les résultats présentés sur la figure V-7(a) montre que sans présence des bandes à proximité de l'électrode couronne, à $D = 20$ mm, seulement 50 % de la masse totale des particules introduites initialement dans le séparateur est récupérée dans le bac N°3 (Fig. II-21), à cause du fort vent ionique causé par la décharge couronne. En présence des bandes, la zone affectée par la décharge couronne est plus large [109], affaiblissant ainsi l'effet du vent ionique. Au même temps, les particules non conductrices se chargent mieux et sont fixées plus fortement à la surface du convoyeur. Donc, la présence des bandes présente un moyen efficace à réduire les pertes dues au vent ionique même à un espacement réduit $D = 20$ mm [114].

Pour la deuxième série d'expériences, l'électrode couronne a été alimentée par une alimentation haute tension continue variée progressivement de $V_s = 14$ kV à 18 kV. Afin d'éviter toute étincelle possible, cette électrode est maintenue à une distance $D = 30$ mm au-dessus de la surface de l'électrode convoyeur reliée à la terre. Tel qu'il est montré sur la figure V-4(b), en absence des bandes et à des tensions V_s plus élevées, le taux des pertes de masse augmente, suite à l'intensification du vent ionique dans l'espace de la décharge. Par contre en présence des bandes, le taux des pertes est quasi constant (d'environ $5 \pm 2\%$) pour des tensions V_s allant jusqu'à 18 kV. Ces données confirment les résultats reportés sur la figure V-5(a) et confirment principalement l'avantage majeur de l'utilisation de ce type d'électrodes « duales » accompagnées par des bandes métalliques mises à la terre, dans les processus de séparation électrostatique.

V.3.2. Tests de chargement par effet couronne

V.3.2.1. Effet de la présence de l'écran

Les pourcentages de récupération des particules isolantes fines de type ABS (classe granulométrique : $500 \mu\text{m} < \phi < 1000 \mu\text{m}$) chargées par effet couronne dans le séparateur électrostatique à tapis roulant, sont présentés sur la figure V-8, pour des valeurs de la distance inter-électrodes $D = 40$ mm et de la tension appliquée $V_s = 14$ kV, en présence et en absence de l'écran. Les dimensions de l'écran ($L = 80$ mm et $H = 80$ mm) ont été choisies selon les valeurs de courant I_m les plus élevées, en reposant sur les caractéristiques ($I-V$) et la distribution de la densité de courant présentées précédemment.

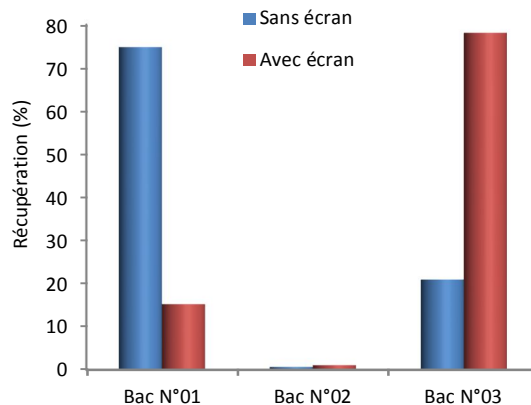


Figure V-8. Pourcentage de récupération des granules d'ABS après chargement par effet couronne dans le séparateur électrostatique à tapis roulant, avec et sans écran pour $V_s = 14$ kV et $D = 40$ mm.

Comme le montre la figure V-8, dans une configuration « duale » sans écran et pour une tension $V_s = 14$ kV, les particules ne se chargent pas assez et la plupart d'entre eux tombent en chute libre dans le bac N°1. La présence de l'écran augmente la masse des particules d'ABS, collées sur la surface du tapis et récupérées dans le bac N°3 à l'aide d'un racleur (Figs II-18 et II-19). Donc, on en déduit que pour la même tension appliquée, la présence de l'écran permet de mieux charger les particules isolantes en

comparaison avec la même configuration sans écran, ce qui s'explique par la diminution de la valeur seuil de la décharge couronne V_{onset} due à la modification du champ électrique dans la région de la décharge.

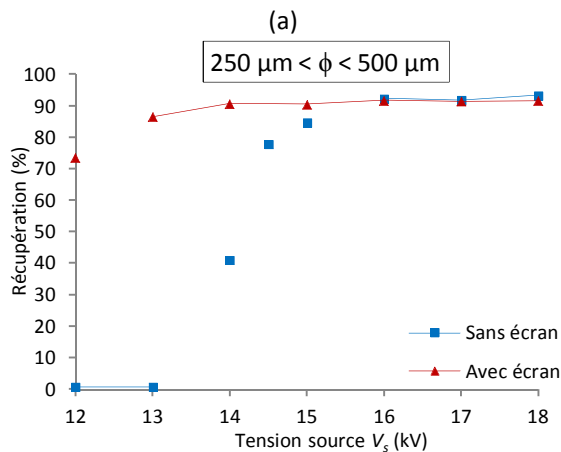
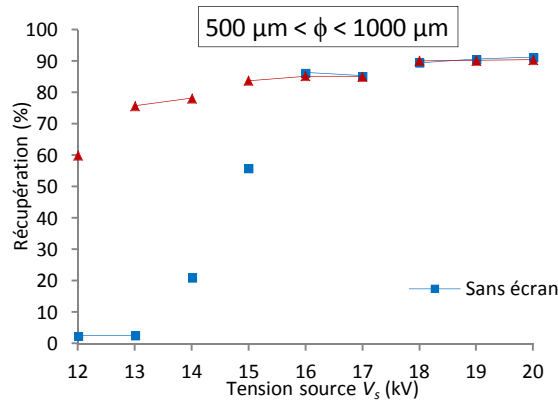
V.3.2.2. Effet de la taille des matériaux granulaires

Après avoir reporté que la présence de l'écran augmente la récupération des particules d'ABS, collées sur la surface du tapis et récupérées dans le bac N°3, d'autres essais de chargement ont été menés sur le séparateur électrostatique en utilisant le même matériau mais pour trois classes granulométriques différentes :

- ✓ $500 \mu\text{m} < \phi < 1000 \mu\text{m}$
- ✓ $250 \mu\text{m} < \phi < 500 \mu\text{m}$
- ✓ $125 \mu\text{m} < \phi < 250 \mu\text{m}$

En variant la tension appliquée V_s , les résultats de récupération des granules dans le bac N°3 (Figs II-18 et II-19) sont présentés sur les figures V-9(a)-(c) respectivement pour les 3 classes granulométriques citées ci-dessus.

L'efficacité de la charge dépend considérablement de la tension appliquée sur les particules traitées, la grande quantité de récupération d'environ 90% est atteinte pour des tensions inférieures pour des tailles de particules réduites. En présence de l'écran, les pourcentages de récupération sont plus élevés pour les trois tailles des particules.



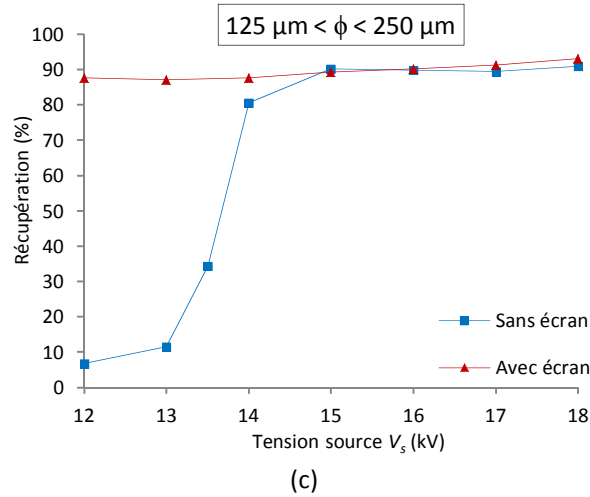


Figure V-9. Pourcentage de récupération des granules d'ABS dans le bac n°3 du séparateur à tapis après chargement par effet couronne, avec et sans écran pour différentes tailles : (a) $500 \mu\text{m} < \phi < 1000 \mu\text{m}$, (b) $250 \mu\text{m} < \phi < 500 \mu\text{m}$, (c) $125 \mu\text{m} < \phi < 250 \mu\text{m}$

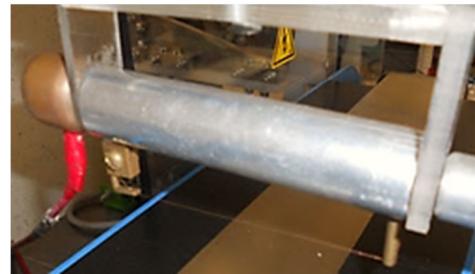
La force d'image F_i donnée par l'équation (V-5) est celle créée par une particule isolante ayant une charge Q obtenue après chargement par effet couronne, cette force permet de retenir les particules chargées sur la surface du tapis [107], et de coller plus efficacement les granules les plus fins à cause de leurs rayons r réduit. Ceci justifie les quantités de récupération pesées sur le bac N°3, plus élevées dans le cas des granules plus fins (Fig. V-9(c)).

$$F_i = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(2r)^2} \quad (\text{V-5})$$

La présence de l'écran permet de réduire d'une façon importante le vent ionique causé par la décharge couronne au niveau de la surface du tapis, et préserve l'électrode couronne des poussières pouvant se coller sur sa surface après le processus de chargement, comme le montre les figures V-10(a) et (b) pour les deux configurations, sans et avec présence de l'écran respectivement. Ceci peut être très utile pour des processus de séparation industriels fonctionnant à des périodes plus longues par rapport à des essais menés au laboratoire.



(a)



(b)

Figure V-10. Photographies de l'électrode couronne après le processus de chargement dans le séparateur électrostatique à tapis roulant sans écran (a) et avec écran (b).

V.3.3. Tests de séparation électrostatique

Les résultats présentés sur la figure V-11 sont obtenus pour des expériences de séparation électrostatique réalisées sur le séparateur multifonctionnel à tapis roulant, en utilisant l'électrode couronne de type « dual » associée à des bandes métalliques mises à la terre ($D_b = 40$ mm), en comparaison avec ceux obtenus lorsque le mélange granulaire est traité sans utilisation de la décharge couronne (électrode électrostatique seulement). Les paramètres opératoires sont respectivement : la distance inter-électrodes $D = 20$ mm et les tensions appliquées à l'électrode couronne $V_s = 18$ kV et l'électrode cylindrique $U = 22$ kV. D'un côté, ces paramètres ont été ajustés afin de prévenir des taux de pertes dues au vent électrique supérieur à 7% de la masse totale introduite et de l'autre côté, avoir un champ électrique suffisamment fort pour fournir une charge efficace des particules non conductrices par effet couronne.

L'utilisation de la nouvelle configuration d'électrode fil-bandes, dans les conditions optimales, permet d'augmenter la masse finale du produit collecté dans le bac N°3 dédié aux particules isolantes, augmentant donc le taux de récupération de moins de 35% à plus de 51% de la masse totale introduite. Certaines particules conductrices ont pollué le produit non-conducteur, dont la pureté était environ 90% [114].

La masse totale des particules conductrices récupérées dans les bacs N°1 et 2 a diminué de 53% dans le cas de la séparation purement électrostatique (le produit conducteur était pollué de près de 20% de particules non conductrices) à 38% de la masse totale du mélange introduite. Lors de la séparation en présence de la décharge couronne, la pureté du produit conducteur était supérieure à 99%.

La présence des particules non conductrices dans le produit d'aluminium collecté dans les bacs N°1 et 2 en absence de la décharge couronne peut s'expliquer par le fait qu'une partie des particules de polystyrène (PS) portaient une charge négative résiduelle acquise par effet triboélectrique pendant la manipulation et elles étaient attirées par l'électrode cylindrique connecté à la haute tension positive. La décharge couronne élimine cette charge résiduelle, de sorte que toutes les particules de PS étaient plus ou moins fixées à la surface de l'électrode convoyeur et collectées dans le bac N°3.

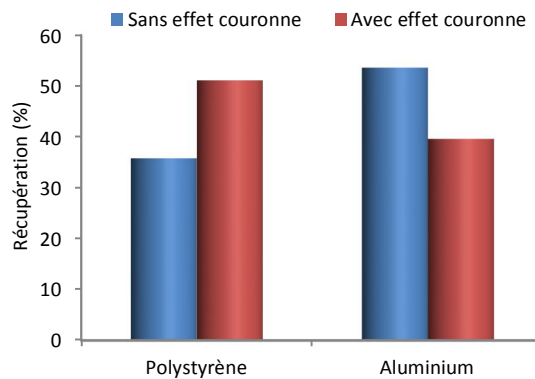


Figure V-11. Pourcentage de récupération des granules de polystyrène et d'Aluminium après séparation dans le séparateur électrostatique à tapis, avec et sans effet couronne pour : $D = 20$ mm, $U = 22$ kV et $V_s = 18$ kV.

V.4. CONCLUSIONS

Les résultats expérimentaux de chargement par effet couronne dans deux types de séparateurs électrostatiques, à savoir le séparateur à cylindre tournant et le séparateur multifonctionnel à tapis roulant, montrent clairement l'influence que la géométrie d'électrode pourrait avoir sur l'efficacité du processus de charge des couches granulaires des particules isolantes.

La présence de l'écran ou des bandes métalliques reliées à la terre à proximité de l'électrode couronne assurent ainsi : (1) une meilleure charge des particules isolantes, (2) moins de vent ionique et (3) pratiquement un processus de charge sans poussières. Ces nouvelles configurations conduisent à une meilleure séparation électrostatique, notamment dans le cas où l'électrode couronne soit placée à une distance suffisamment éloignée par rapport à d'autres électrodes utilisées, tel que le séparateur à bande convoyeur, contrairement au séparateur à cylindre tournant où l'utilisation de l'écran peut présenter un désavantage majeur pour la récupération des particules conductrices.

CONCLUSION GENERALE



Ibn Khaldoun

(1332 – 1406)

« Geometry enlightens the intellect and sets one's mind right »

CONCLUSION GENERALE

De nombreuses études ont montré qu'en déposant une charge électrique à la surface des médias textiles non-tissés, utilisés le plus souvent pour la collecte des particules polluantes, augmente d'une façon significative l'efficacité de filtration de ces médias, grâce aux forces électriques agissant sur les particules chargées ou polarisées. D'autre part, le mécanisme de charge par effet couronne assurant une distribution plus uniforme et plus élevée sur la surface des matériaux granulaires ou pulvérulents augmente l'efficacité des différents procédés de séparation couronne-électrostatique. Les travaux présentés dans cette thèse ont été menés dans l'objectif d'améliorer les performances de dépôt de charges électriques sur les matériaux isolants, en utilisant la décharge couronne produite par différents types de configurations d'électrodes, en vue d'augmenter le rendement des différents procédés électrostatiques et industriels.

La conclusion générale de ces travaux de recherche peut être formulée ainsi : l'efficacité de n'importe quel processus électrostatique basé sur l'utilisation de l'effet couronne dépend à la fois de la géométrie des systèmes d'électrodes utilisés pour le dépôt de charge électrique et des conditions d'application de la haute tension qui génère la décharge couronne.

La démarche expérimentale qui a conduit à cette conclusion s'est organisé selon les quatre phases suivantes :

- 1) Mise au point des dispositifs expérimentaux;
- 2) Caractérisation des différents types d'arrangements produisant la décharge couronne : électrode duale, duale + écran, duale + bandes et duale + grille (triode) ;
- 3) Caractérisation de l'état de charge des matériaux isolants par décharge couronne générée par les différents arrangements d'électrodes étudiés ;
- 4) Etude du rendement des deux séparateurs électrostatiques, à cylindre tournant et à tapis roulant, en présence des différentes configurations d'électrodes couronne.

Les bancs d'essais ont été réalisés au laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbès et au laboratoire d'Electrostatique appliquée de l'Université de Poitiers. Ces bancs d'essais ont permis de mesurer le courant électrique, le potentiel de surface des matériaux isolants et ainsi que le rendement de la séparation électrostatique, tout en contrôlant les variations de certains paramètres électriques (tension source, tension de grille, polarité, etc...) et géométriques (fil-écran, fil-bandes, triode, etc...).

❖ Les principales contributions originales sont les suivantes :

- 1) Approfondissement des connaissances sur les phénomènes physiques spécifiques de la décharge couronne, par l'étude expérimentale des caractéristiques courant-

tension des systèmes d'électrodes, en polarité positive, et par l'analyse des impulsions Trichel négatives.

- 2) Mise au point d'un système d'électrodes permettant d'étudier plusieurs configurations, notamment celles développées dans le cadre de cette thèse telles que les électrodes à écran, à bandes métalliques ou de type « triode ».
 - 3) Réalisation d'un banc de caractérisation de l'état de charge des matériaux isolants par mesure sans contact du potentiel de surface. Le banc de mesure réalisé permet le monitoring du déclin de potentiel de surface à l'aide d'une sonde à condensateur vibrant (sonde de Kelvin), pour plusieurs situations et en faisant varier des paramètres expérimentaux. Il donne la possibilité de relever le profil du potentiel électrique sur l'axe central longitudinal des échantillons chargés.
 - 4) Etude paramétrique de plusieurs types de configurations d'électrodes (à écran, à bandes, etc...) en termes de courant produit, de potentiel de surface déposé ainsi que d'efficacité dans les différents séparateurs électrostatiques.
 - 5) Identification des facteurs principaux qui affectent l'état de charge des matériaux isolants avec l'évaluation de la persistance des charges en fonction du temps. Ainsi, nous avons montré que le comportement des différents matériaux isolants étudiés à savoir : les médias filtrants, les plaques en polymères et les matériaux granulaires, est influencé par le niveau du potentiel de la grille contrôlant le dépôt de charges, par l'intensité de la décharge couronne, par le type de la configuration d'électrodes utilisée, ainsi que par le temps consacré à la charge de ces matériaux isolants.
 - 6) Mise en évidence de la forte influence du système de charge des matériaux isolants sur l'étalement de la décharge couronne. L'insertion d'un écran, des bandes ou d'une grille métallique à proximité de l'électrode couronne, provoque une décharge couronne plus étendue.
- ❖ Ce travail a permis de mettre en évidence aussi plusieurs **perspectives** de recherches prometteuses pour le progrès de la méthodologie de charge et de caractérisation des propriétés électrostatiques des matériaux diélectriques. Suite à l'expérience gagnée après l'achèvement de cette étude, le travail futur devrait se concentrer sur les questions suivantes :
- 1) Optimiser le dispositif de charge pour avoir une réponse plus rapide des matériaux isolants exposés à la décharge couronne.
 - 2) Evaluer d'autres facteurs qui pourraient influencer la distribution ainsi que le déclin de la charge électrique à la surface des matériaux isolants.
 - 3) Développer un model numérique permettant l'analyse du champ électrique généré en présence de la charge d'espace, dans différentes configurations d'électrodes couronne.

- 4) D'autres techniques de charge plus énergétiques pourraient aussi être étudiées pour augmenter la persistance des charges électrostatiques sur les matériaux isolants, comme par exemple la décharge couronne pulsée, sinusoïdale ou rectangulaire superposées sur la tension continue, etc...

BIBLIOGRAPHIE



Charles-Augustin Coulomb

(1736 – 1806)

« On graduating from school, a studious young man who would withstand the tedium and monotony of his duties has no choice but to lose himself in some branch of science or literature completely irrelevant to his assignment »

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. W. Peek, "*Dielectric phenomena in high voltage engineering*", New York: McGraw-Hill Book company, Inc., 1915.
- [2] L. Dascalescu, "*An introduction to ionized gases, theory and applications*", Toyohashi University of Technology, 1993.
- [3] R. Morrow, "*The theory of positive glow corona*", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 30, pp. 3099-3114, 1997.
- [4] A. D. Moore, "*Electrostatics and Its Applications*", New York : Wiley, 1973.
- [5] J. A. Giacometti and O. N. Oliveira Jr., "*Corona Charging of Polymers*", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 27, N° 05, pp. 924-943, 1992.
- [6] M. Morvova, "*The influence of water vapour and temperature on depletion of carbon monoxide in D.C. corona discharge*", Czechoslovak Journal of Phys., Vol. 49, N° 12, pp. 1703, 1999.
- [7] M. Yousfi, N. Merbahi, J. P. Sarrette, O. Eichwald, A. Ricard, J. P. Gardou, O. Ducasse and M. Benhenni, "*Non-thermal plasma Non Thermal Plasma Sources of Production of Active Species for Biomedical Uses : Analyses, Optimization and Prospect*", In "*Biomedical Engineering - Frontiers and Challenges*", (Reza Fazel-Rezai), Rijeka, Croatia: Intech, August 2011.
- [8] N. Zouzou, E. Moreau et G. Touchard, "*Précipitation électrostatique dans une configuration pointe-plan*", J. Electrostat., Vol. 64, pp. 537-542, 2006.
- [9] G. Xiao, X. Wang, J. Zhang and M. Ni "*Current analysis of DC negative corona discharge in a wire-cylinder configuration at high ambient temperatures*", J. Electrostat., Vol. 72, N° 02, pp. 107-119, 2014.
- [10] B. Khaddour, P. Atten and J. Coulomb, "*Numerical solution and experimental test for corona discharge between blade and plate*", IEEE Trans. Mag., Vol. 43, N° 04, pp. 1193-1196, 2007.
- [11] A. Bendaoud, A Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, and L. Dascalescu, "*Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications*", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, N° 03, pp. 692-698, 2008.
- [12] J. S. Chang, P. A. Lawless and T. Yamamoto, "*Corona discharge processes*", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 19, N° 06, pp. 1152-1166, December 1991.
- [13] M. L. Coulibaly, "*Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale*", Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, Juillet 2007.
- [14] G. W. Trichel, "*The mechanism of the negative point to plane corona near onset*", Phys. Rev., Vol. 54, N° 12, pp. 1078, 1938.
- [15] Y. S. Akishev, M. E. Grushin, I. V. Kochetov, V. B. Karal'nik and A. P. Napartovich, "*Negative corona, glow and spark discharges in ambient air and transitions between them*", Plasma Sources Sci. & Tech., Vol. 14, N° 02, pp. 18-25, 2005.
- [16] J. Chen and J. H. Davidson, "*Model of the negative dc corona plasma: comparison to the positive dc corona plasma*", Plasma Chem. and Plasma Process., Vol. 23, pp. 83-102, March 2003.
- [17] P. Sattari, "*FEM-FCT Based dynamic simulation of Trichel pulse corona discharge in point-plane configuration*", PhD thesis, University of Western Ontario, USA, 2011.
- [18] A. Carsimamovic, A. Mujezinovic, S. Carsimamovic, Z. Bajramovic, M. Kosarac and K. Stankovic, "*Analyzing of AC Corona Discharge Parameters of Atmospheric Air*", in Proc. Comp. Sci., Vol. 83, pp. 766-773, 2016.
- [19] L. B. Loeb, "*Electrical Coronas, Their basic physical mechanisms*", University of California press, Berkeley and Los Angeles, 1965.

- [20] J. F. Loiseau, J. Batina, F. Noël and R. Peyrous, "*Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor*", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 35, pp. 1020–1031, April 2002.
- [21] S. Kacem, "*Modélisation Electro-hydrodynamique des décharges couronne dans l'air à la pression atmosphérique pour application aux actionneurs plasmas*", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, Septembre 2011.
- [22] E. Moreau, "*Airflow control by non-thermal plasma actuators*", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 40, pp. 605–636, January 2007.
- [23] F. Koliatene, "*Contribution à l'étude de l'existence des décharges Dans les systèmes de l'avionique*", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, Janvier 2009.
- [24] T. Huiskamp, A. J. M. Pemen, W. F. L. M. Hoebe, F. J. C. M. Beckers and E. J. M. van Heesch, "*Temperature and pressure effects on positive streamers in air*", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 46, N° 16, (165202), March 2013.
- [25] E. Kuffel, "*Electron attachment coefficients in oxygen, dry air, humid air and water vapour*", in Proc. Phys. Soc., Vol. 74, N° 3, pp. 297–308, 1959.
- [26] C. F. Gallo, J. E. Germanos, J. E. Courtney, "*The effect of humidity and temperature variations on the behavior of wire-to-plane coronas*", Appl. Opt., Vol. 8, pp. 111–119, 1969.
- [27] M. Abdel-Salam, "*Influence of humidity on charge density and electric field in electrostatic precipitators*", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 25, pp. 1318–1322, 1992.
- [28] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu and Y. Zebboudj, "*Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator*", J. Electrostat., Vol. 70, pp. 20–24, 2012.
- [29] H. Kadi, "*Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension*", Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2010.
- [30] J. Schmid, "*Influence of absolute humidity on the electrical breakdown in air*", ETEP, Vol. 02, N° 05, pp. 327–331, September 1992.
- [31] R. Mestiri, R. Hadaji and S. B. Nasrallah, "*Humidity effect Experimental Investigation of the Electric Discharge Stability: Behavior with the Air Relative Humidity*", Int. J. of Energ. Eng. (IJEE), Vol. 3, N° 05, pp. 158–162, 2013.
- [32] L. B. Loeb, A. F. Kip, G. G. Hudson and W. H. Bennet, "*Pulses in negative point-to plane corona*", Phys. Rev., Vol. 60, N° 10, pp. 714, 1941.
- [33] G. L. Weissler, "*Positive and negative point-to-plane corona in pure and impure hydrogen, nitrogen, and argon*", Phys. Rev., Vol. 63, N° 03-04, pp. 96–107, 1943.
- [34] Y. S. Akishev, M. E. Grushin, V. B. Karal'nik and N. I. Trushkin, "*Pulsed mode of a negative corona in nitrogen: I. Experiment Plasma*", Phys. Reports, Vol. 27, N° 06, pp. 520–531, 2001.
- [35] K. J. Nygaard, "*Frequency of corona discharge Trichel pulses in air flows*", J. Appl. Phys., Vol. 37, N° 07, pp. 2850–2852, 1966.
- [36] F. Deng, L. Ye and K. Song, "*Numerical studies of Trichel pulses in airflows*", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 46, N° 42, (425202), 2013.
- [37] G. S. P. Castle, "*Industrial applications of electrostatics: the past, present and future*", J. Electrostat., Vol. 51–52, pp. 1–7, 2001.
- [38] J. Bohm, "*Electrostatic Precipitators*", Amsterdam, Elsevier, 1982.
- [39] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Suarasan, A. Samuila, and D. Rafiroiu, "*Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators*", J. Electrostat., Vol. 29, pp. 211–225, 1993.
- [40] L. Dascalescu, T. Zeghloul and A. Iuga, "*Electrostatic separation of metals and plastics from WEEE*." In WEEE Recycling. Reserch, Development, and Policies, (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Amsterdam: Elsevier, pp. 53–74, 2016.

- [41] B. Dramane, "*Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge à barrière diélectrique - étude électrique, granulométrique et aérodynamique*", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2009.
- [42] J. Ruan and Z. Xu, "*Constructing environment-friendly return road of metals from e-waste: Combination of physical separation technologies*", *Renew. and Sustain. Energ. Rev.*, Vol. 54, pp. 745-760, 2016.
- [43] J. H. Dessauer and H. E. Clark, "*Xerography and Related Processes*," London, U.K.: Focal Press, 1965.
- [44] J. Q. Feng, "*Electrohydrodynamic flow associated with unipolar charge current due to corona discharge from a wire enclosed in a rectangular shield*", *J. Appl. Phys.*, Vol. 86, N° 05, pp. 2412-2418, September 1999.
- [45] J. Chen and J. H. Davidson, "*Ozone production in the positive DC corona discharge: Model and comparison to experiments*", *Plasma Chem. and Plasma Process.*, Vol. 22, N° 04, pp. 495-522, 2002.
- [46] G. Dinelli, L. Civitano and M. Rea, "*Industrial experiments on pulse corona simultaneous removal of NO_x and SO₂ from flue gas*", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 26, N° 03, pp. 535-541, 1990.
- [47] Z. Mokhtari, S. Hole and J. Lewiner, "*Smoke triggered corona discharge sensor*", *J. Electrostat.*, Vol. 71, N° 04, pp. 769-772, 2013.
- [48] F. Deng, L. Ye and K. Song "*Respiratory Monitoring by a Field Ionization Sensor Based on Trichel Pulses*", *Sensors (Basel)*, Vol. 14, N° 06, pp. 10381-10394, 2014.
- [49] R. E. J. Sladek, E. Stoffels, R. Walraven, P. J. A. Tielbeek and R. A. Koolhoven, "*Plasma treatment of dental cavities : a feasibility study*", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 32, N° 04, pp. 1540-1543, 2004.
- [50] Z. Kovalova, M. Zahoran, A. Zahoranova and Z. Machala, "*Streptococci biofilm decontamination on teeth by low-temperature air plasma of DC corona discharges*", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 47, N°22, (224014), 2014.
- [51] T. Oda and J. Ochiai, "*Charging characteristics of a non-woven sheet air filter*," in *Proc. 6th International Symposium on Electrets*, pp. 515-519, 1-3 September 1988.
- [52] A. Jaworek, A. Sobczyk, T. Czech and A. Krupa, "*Corona discharge in electrospraying*", *J. Electrostat.*, Vol. 72, N° 02, pp. 166-178, 2014.
- [53] R. Thyen, A. Weber and C. P. Klages, "*Plasma-enhanced chemical-vapour deposition of thin films by corona discharge at atmospheric pressure Surface and Coatings*", *Tech.*, Vol. 97, pp. 426-434, 1997.
- [54] H. Wang, J. Li and X. Quan, "*Decoloration of azo dye by a multi-needle-to-plate high-voltage pulsed corona discharge system in water*", *J. Electrostat.*, Vol. 64, N° 06, pp. 416-421, 2006.
- [55] M. A. Malik, A. Ghaffar and S. A. Malik, "*Water purification by electrical discharges*", *Plasma Sources Sci. Tech.*, Vol. 10, pp. 82-91, 2001.
- [56] S. Djedjiga, "*Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques*", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Décembre 2011.
- [57] B. Pinte, "*Power Grid Operation*", University of Illinois Board of Trustees, September 2013. https://tcipg.org/sites/default/files/rgroup/TCIPG-Reading-Group-Fall_2013_09-06.pdf
- [58] P. Molinié, "*Recherches en électrostatique. Actualité d'une science ancienne et applications à la caractérisation des matériaux*", Mémoire Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris-Sud XI, Juillet 2010.
- [59] B. Tabti, "*Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface*", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2011.
- [60] M. Remadnia, M. Nemamcha et L. Herous, "*Etude du Déclin de Potentiel d'une Surface Chargée par une Décharge Electrique de Type Couronne*", 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, Sétif, 03-04 Novembre 2007.

- [61] J. Lowell, "Surface conduction and absorption currents in polymers", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 15, pp. 109-117, 1982.
- [62] Z. Ziari, "Etude de l'effet d'un traitement par plasma froid sur les propriétés de surface d'un film de polymère", Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, Mars 2008.
- [63] M. Ieda, G. Sawa and U. Shinohara, "A decay process of surface electric charges across polyethylene film", J. Appl. Phys., Vol. 6, pp. 793-794, 1967.
- [64] I. P. Batra, K.D. Kanazawa and H. Seki, "Discharge characteristics of photoconducting insulators", J. Appl. Phys., Vol. 41, pp. 3416-3422, 1970.
- [65] T. J. Sonnonstine and M. M. Perlman, "Surface potential decay in insulators with field dependent mobility and injection efficiency", J. Appl. Phys., Vol. 46, N° 9, pp. 3975-3981, 1975.
- [66] H. Von Berlepsch, "Interpretation of surface potential kinetics in HDPE by a trapping model", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 18, pp. 1155-1170, 1985.
- [67] E. A. Baum, T. J. Lewis and R. Toomer, "Decay of electrical charge on polyethylene films", J. Phys. D., Vol. 10, pp. 487-497, 1977.
- [68] M. M. Perlman, K. J. Kao and S. Bamji, "The effect of corona generated excited molecules on surface potential decay in polyethylene", in Proc. Int. Workshop on Electric Charges in Dielectrics, Kyoto, pp. 3-9, 1978.
- [69] B. Khaddour, "Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée", Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, Novembre 2006.
- [70] A. M. Benselama, "Modélisation numérique du comportement d'une particule sous champ électrique dans les microsystèmes : de la déformation au déplacement", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 25 Novembre 2005.
- [71] E. Potrymai and I. Perstnov, "Time Dependent Modelling and Simulation of the Corona Discharge in Electrostatic Precipitators", Degree project, Department of Pysics and Elec. Eng., Linnaeus University, Sweden, 2014.
- [72] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Plopeanu and L. Dascalescu, "Experimental and numerical characterization of corona discharge generated by a triode electrode system", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 51, N° 03, pp. 2513-2519, 2015.
- [73] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, M. Blajan, and L. Dascalescu, "Experimental Study of Corona Discharge Generated in a Modified Wire-Plate Electrode Configuration for Electrostatic Process Applications", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, N° 02, pp. 666-671, March/April 2010.
- [74] B. Tabti, M. R. Mekideche, M. C. Plopeanu, L. M. Dumitran, L. Herous, and L. Dascalescu, "Corona-charging and charge-decay characteristics of nonwoven filter media", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, pp. 634-640, 2010.
- [75] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Blajan, M. Rahli et L. Dascalescu, "Caractérisation expérimentale des électrodes couronne de type dual", J. Electrostat., Vol. 64, pp. 431-436, Juillet 2006.
- [76] A. Tilmatine, "Etude et réalisation d'un séparateur électrostatique des mélanges granulaires", Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel-Abbès, 2004.
- [77] M. C. Plopeanu, L. Dascalescu, B. Neagoe, A. Bendaoud and P. V. Notingher, "Characterization of two electrode systems for corona-charging of non-woven filter media", J. Electrostat., Vol. 71, N° 03, pp. 517-523, June 2013.
- [78] J. F. Hughes, "Electrostatic Particle Charging", New York: Wiley, 1997.
- [79] M. Rezouga, "Modélisation expérimentale de la décharge électrique dans l'air. Application de la méthode des plans d'expériences", Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel-Abbès, 2008.
- [80] G. Cooperman, "A new current-voltage relation for duct precipitators valid for low and high current densities", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 17, pp. 236-239, March/April 1981.

- [81] V. L. Chartier, S. H. Sarkinen, R. D. Stearns, and A. L. Burns, "Investigation of corona and field effects of ac/dc hybrid transmission lines", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-100, N° 01, pp. 72–80, January 1981.
- [82] T. Guillod, M. Pfeiffer, and C. M. Franck, "Improved coupled ion-flow field calculation method for ac/dc hybrid overhead power lines", IEEE Trans. Power Del., Vol. 29, N° 06, pp. 2493-2501, December 2014.
- [83] A. Bendaoud, "Modélisation du champ électrique et de l'effet couronne dans les installations de haute tension", Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel-Abbès, Décembre 2004.
- [84] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Fatihou, A. F. Chiritescu, R. R. Rodrigues and L. Dascalescu, "Study of the transient regime of the corona discharge generated by a triode electrode arrangement", IEEE Trans. Dielect. & Elec. Ins., Vol. 23, N° 02, pp. 692–698, April 2016.
- [85] M. Kachi, and L. Dascalescu, "Corona discharges in asymmetric electrode configurations", J. Electrostat., Vol. 72, pp. 6-12, February 2014.
- [86] D. Raouti, S. Flazi, and D. Benyoucef, "Modeling and Identification of Electrical Parameters of Positive DC Point-to-Plane Corona Discharge in Dry Air Using RLS Method", IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 44, N° 07, pp. 1144–1149, June 2016.
- [87] A. Bendaoud, L. Dascalescu, M. Blajan, A. Samuila, A. Stochita and P. V. Notinghamer "Corona Charging of Granular Layers of Insulating Particles at the Surface of a Grounded Electrode", J. Electrostat., Vol. 63, pp. 643-647, June 2005.
- [88] A. Fatihou, N. Zouzou, G. Iuga and L. Dascalescu "Measurement of the electric potential at the surface of nonuniformly charged polypropylene nonwoven media", Journal of Physics: Conference Series., Vol. 646, (012035), 2015.
- [89] M. Remadnia, "Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants", Thèse de Doctorat, Université de Guelma, Janvier 2012.
- [90] M. A. Noras, "Non-contact surface charge/voltage measurements : Capacitive probe - principle of operation", Trek Application Note, N° 3001, 2002.
- [91] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology", Particulate Sci. Technol., Vol. 16, N° 01, pp. 77–90, October 2007.
- [92] A. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvassy and V. Neamtu "Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals", J. Electrostat., Vol. 23, pp. 235–243, April 1989.
- [93] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli and L. Dascalescu, "Set point identification and robustness testing of electrostatic separation processes", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 43, N° 03, pp. 618-626, Mai 2007.
- [94] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef and L. Dascalescu "Sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type corona-electrostatic separator", IEEE-IAS Annu. Meeting, Dallas, Texas, USA, 18-22 October 2015.
- [95] S. Messal, A. Mekhalef, C. Mayer-Laigle, X. Rouau et L. Dascalescu, "Séparation électrostatique de matières végétales finement divisées", 10^{ème} conférence de la société Française de l'Electrostatique (SFE), Poitiers, 29-31 Août 2016.
- [96] L. Dascalescu, D. Rafiroiu, A. Samuila and R. Tobazéon, "Charging of insulating spheres on the surface of an electrode affected by monopolar ions", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 34, N° 01, pp. 35-42, Jan/Feb 1998.
- [97] D. Rafiroiu, I. Suarasan, R. Morar, P. Atten and L. Dascalescu, "Corona inception in typical electrode configurations for electrostatic processes applications", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 37, N° 03, pp. 766-771, May/June 2001.
- [98] D. Rafiroiu, R. Morar, P. Atten and L. Dascalescu, "Premises for the mathematical modeling of the combined corona-electrostatic field of roll-type separators", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 36, N° 05, pp. 1260-1266, Sep/Oct 2000.

- [99] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu and Y. Zebboudj “*Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator*”, J. Electrostat., Vol. 70, pp. 20–24, 2012.
- [100] L. Dascalescu, “*Comportement de granules conducteurs en champ électrique mono-ionisé dans l’air atmosphérique*”, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 1994.
- [101] P. Bérard, D. A. Lacoste, and C. O. Laux, “*Corona discharges in atmospheric air between a wire and two plates*”, IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 39, N° 11, pp. 2248–2249, November 2011.
- [102] J. Chen and J. H. Davidson, “*Ozone production in the negative dc corona: the dependence of discharge polarity*”, Plasma Chem. and Plasma Process., Vol. 23, N° 03, pp. 501–518, 2003.
- [103] N. M. Ijumba, M.J. Lekganyane and A.C. Britten “*Comparative studies of AC and DC corona power losses in an indoor corona cage*”, Presented at the 16th International Symposium on High Voltage Engineering, Cape Town, South Africa, 24–28 August 2009.
- [104] L. M. Dumitran, L. V. Badicu, M. C. Ploeanu and L. Dascalescu, “*Efficiency of dual wire-cylinder electrodes used in electrostatic separators*”, Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg., Vol. 55, N° 02, pp. 171–180, 2010.
- [105] L. Dascalescu, A. Samuila, D. Rafiroiu, A. Iuga and R. Morar, “*Multiple-needle corona electrodes for electrostatic processes application*”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 35, N°3, pp. 543–548, May/June 1999.
- [106] **A. Reguig**, A. Bendaoud, A. Bouteffaha, H. Boudraa, A. Tilmatine and L. Dascalescu, “*Ground-shielded dual-type high-voltage electrode for corona charging applications*”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 53, N°2, pp. 1439–1445, March/April 2017.
- [107] **A. Reguig**, A. Bendaoud, K. Medles, A. Tilmatine et L. Dascalescu, “*Effet des dimensions de l’écran placé à proximité d’une électrode couronne de type dual*”, présenté à la 10^{ème} conférence de la société française de l’électrostatique (SFE), Poitiers, France, 29–31 août 2016.
- [108] **A. Reguig**, A. Bendaoud, P. Dordizadeh and L. Dascalescu, “*Experimental and numerical study of corona discharge generated by a wire-type dual electrode located between parallel grounded strips*”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 53, N°2, pp. 1459–1465, March/April 2017.
- [109] **A. Reguig**, A. Bendaoud, B. Neagoe, Y. Prawatya and L. Dascalescu, “*Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations*”, J. Electrostat., Vol. 82, pp. 55–62, August 2016.
- [110] L. Dascalescu, A. Mihalcioiu, A. Stochita, and P. V. Notingher, “*Charge-decay characteristics of granular materials forming monolayers at the surface of grounded electrodes*”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, pp. 20–24, 2008.
- [111] A. Urs, A. Samuila, A. Mihalcioiu and L. Dascalescu, “*Charging and discharging of insulating particles on the surface of a grounded electrode*”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 40, pp. 437–441, 2004.
- [112] A. Fatihou, L. Dascalescu, N. Zouzou, M-B. Neagoe, **A. Reguig** and L-M. Dumitran, “*Measurement of surface potential of non-uniformly charged insulating materials using a non-contact electrostatic voltmeter*”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 23, N° 04, pp. 2377–2384, August 2016.
- [113] C. E. Shannon, “*Communication in the presence of noise*”, in Proc. of the Institute of Radio Engineers, Vol. 37, N° 01, pp. 10–21, January 1949.
- [114] **A. Reguig**, A. Bendaoud, P. Dordizadeh, A. R. Salama, S. Messal and L. Dascalescu, “*Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications*”, J. Electrostat., J. Electrostat., Vol. 88, pp. 232–235, August 2017.

Titre : "Contribution à l'étude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans différents types de configurations d'électrodes"

Résumé : L'objectif principal de cette thèse est de caractériser expérimentalement et numériquement différents types de configurations d'électrodes de type « dual » (un fil métallique attaché à un cylindre conducteur). Les recherches se sont focalisées sur quatre configurations où l'électrode « duale » placée à une distance de plusieurs centimètres au-dessus d'une électrode plane horizontale liée à la terre, est seule ou associée soit à un écran, soit à deux bandes, soit à une grille métalliques. L'étude s'est déroulée en trois phases : (1) mise au point des dispositifs expérimentaux pour générer la décharge couronne et mesurer le potentiel électrique à la surface des échantillons chargés (2) caractérisation de l'état de charge des matériaux isolants (3) séparation couronne-électrostatique en présence des différents types de configurations d'électrodes. Pour les mêmes paramètres opératoires du système d'électrodes, le courant total produit par la décharge et la distribution spatiale de la densité de courant sont plus élevés en présence d'un écran ou de bandes métalliques reliées à la terre, à des distances relativement faibles par rapport au fil ionisant, ceci en comparaison avec la configuration « duale » classique. Ces nouvelles configurations assurent ainsi une meilleure répartition du potentiel électrique à la surface des matériaux isolants et une meilleure charge des granules dans les processus de séparation électrostatique.

Mots clés : Décharge couronne, Caractéristiques courant-tension, Champ électrique, Densité de courant, Charge électrique, Séparation électrostatique, Etude numérique.

Title : "Contribution to the experimental and numerical study of corona discharge in different types of electrodes configurations"

Abstract : The main objective of the thesis is to characterize experimentally and numerically different dual-type electrode configurations. The dual-type electrode consists in an ionizing wire attached to a metallic cylinder and located at a distance of several centimeters above a grounded plate electrode. The research was focused on four configurations where the « dual » electrodes were either alone, or associated with metallic shields, strips or grids. The study was carried out in three phases: (1) development of experimental devices to generate corona discharge and measure the electrical potential at the surface of the charged samples; (2) characterization of the charge state of insulating materials; (3) corona-electrostatic separation of granular mixtures in the presence of different types of electrode configurations. For the same operating parameters of the electrode system, the total current produced by the discharge is higher and the spatial distribution of the current density is larger in the presence of the shield or metallic strips connected to the ground, as compared with the conventional « dual » configuration. Thus, these new electrode systems ensure better repartition of the electric potential on the surface of insulating materials and better charging of granules in electrostatic separation processes.

Keywords: Corona discharge, Current-voltage characteristics, Electric field, Current density, Electrical charge, Electrostatic separation, Numerical study.

عنوان : "مساهمة في الدراسة العملية والرقمية للتفريغ الكوروني لأنواع مختلفة من تركيبات المساري"

ملخص : الهدف الرئيسي من هذه الرسالة هو تمييز عمليا ورقميا أنواع مختلفة من تركيبات المساري المرتكزة أساسا على القطب "المزدوج". ركزت الدراسة على أربعة تركيبات أقطاب من نوع سلك-سطح، وهي: قطب-سطح، قطب-درع-سطح أو اشتراك قطب-شرايح-سطح وكذلك نظام الأقطاب الثلاثي (قطب-شباك-سطح). أجريت الدراسة على ثلاثة مراحل: (1) تطوير أجهزة عملية لتوليد التفريغ الكوروني مع قياس الجهد الكهربائي على سطح العينات المشحونة (2) تمييز حالة شحن المواد العازلة (3) فرز كهرساكني في وجود أنواع مختلفة من تركيبات أقطاب التفريغ. بنفس معايير التشغيل لنظام الأقطاب، التيار الكلي الذي ينتجه التفريغ الكوروني والتوزيع السطحي لكثافة التيار هما أعلى في وجود الدرع أو الشرايح المعدنية المتصلة بالأرض على بعد مسافات صغيرة من سلك التأين، مقارنة مع تركيبة "المزدوج" التقليدية. وهكذا، مكنت هذه الأنظمة الكهربية الجديدة من ضمان توزيع أفضل للجهد الكهربائي على سطح المواد العازلة بالإضافة الى شحنة أفضل للمواد الجزيئية في الفرازات كهرساكنة.

الكلمات المفتاحية : كورونا التفريغ، خصائص تيار-توتر، الحقل الكهربائي، كثافة التيار، الشحنة الكهربية، الفرز الكهرساكني، الدراسة الرقمية.