Étude expérimentale de la décharge couronne multi-pointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique

Mohamed Sofiane Bendilmi

▶ **To cite this version:**

Mohamed Sofiane Bendilmi. Étude expérimentale de la décharge couronne multi-pointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique. Energie électrique. Université de Poitiers; Université Mentouri (Constantine, Algérie), 2022. Français. NNT : 2022POIT2267 . tel-04048677

HAL Id: tel-04048677
https://theses.hal.science/tel-04048677

Submitted on 28 Mar 2023

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

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

THESE

Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)
(Diplôme National – Arrêté du 25 mai 2016)
Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (Poitiers)

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1
(Faculté des Sciences de la Technologie)
(Diplôme National - Arrêté N° 935 du 31/07/2016)
Ecole Doctorale : Electronique

Présentée par :

Mohamed Sofiane BENDILMI

****

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA DECHARGE COURONNE MULTI-POINTES POUR APPLICATIONS A LA MODIFICATION DE SURFACES DES MATERIAUX DIELECTRIQUES ET A LA SEPARATION ELECTROSTATIQUE

****

Directeurs de Thèse : **Zehira ZIARI**

Lucien DASCALESCU

Co-directeur de Thèse : **Thami ZEGHLOUL**

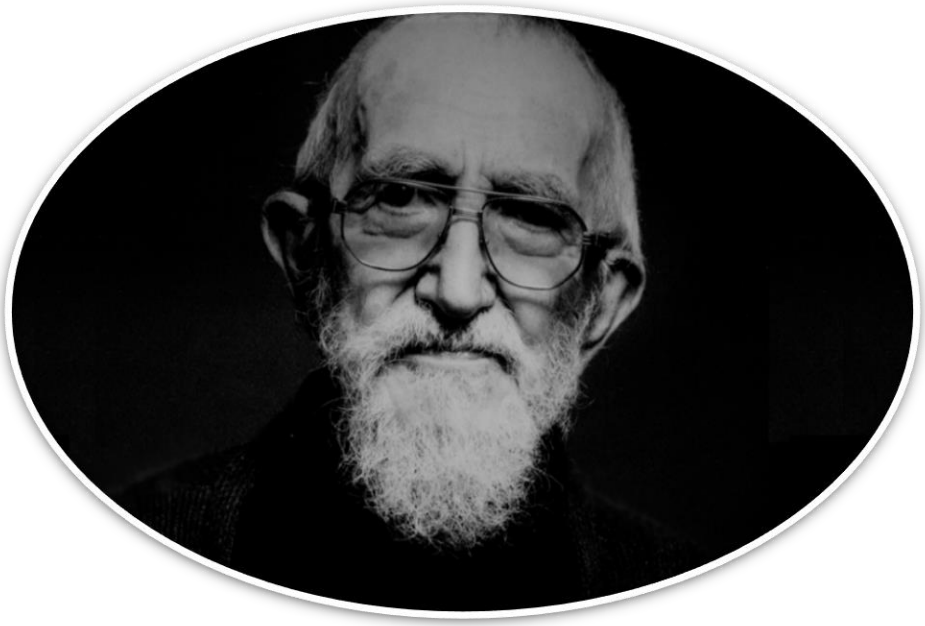
****

Soutenue le 23 / 06 / 2022 devant la Commission d'Examen

****

JURY

Jean-Hugues PAILLOL	Prof.	Université de Pau et des Pays de l'Adour	Rapporteur
Douniazad MEZDOUR	Prof.	Université Mohamed Seddik Benyahia, Jijel, Algérie	Rapporteur
Zehira ZIARI	Prof.	Université Frères Mentouri, Constantine 1, Algérie	Examinateur
Thami ZEGHLOUL	MC-HDR.	Université de Poitiers, France	Examinateur



« Le plus grand échec est de ne pas avoir le courage d'oser »

- Abbé PIERRE (1912-2007)

Remerciements

Je tiens à exprimer tous mes remerciements et ma gratitude à mes chers encadrants de thèses :

Mme Zehira ZIARI, par la présente, je tiens vivement à vous remercier pour la qualité de votre encadrement et pour tous les conseils dont j'ai pu bénéficier au cours de ma thèse que j'ai eu l'opportunité de passer à vos côtés. Merci pour toute l'aide que vous m'avez apportée et pour tout ce que vous avez fait pour moi.

M. Lucian DASCALESCU, je vous remercie énormément de m'avoir permis d'intégrer votre équipe, également de votre grande sympathie, de l'immense confiance que vous m'avez accordée, et surtout un grand MERCI pour vos conseils et remarques toujours constructives qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

M. Thami ZEGHLOUL, je suis honoré d'avoir un encadrant comme vous, je vous remercie pour tout le confort que vous m'avez apporté, vous étiez toujours disponible à mes besoins comme un encadrant, comme un ami ainsi que comme un deuxième père, mes mots ne décrivent pas toute l'estime que je vous porte, alors je vous dis simplement ***MERCI***.

Mes sincères remerciements vont également à ***Smail MOUISSAT, Karim MEDLES***, ***Cedric DELIAS, Julien PAIRIS et Olivier NEGRO*** pour leurs précieuses aides, leur bonne sympathie, leurs conseils et implications dans mes recherches.

Je remercie très vivement ***M. Jean-Hugues PAILLOL*** et ***Mme Douniazad MEZDOUR***, je suis honoré que vous avez bien voulu accepter d'être les rapporteurs de cette thèse.

J'exprime mes remerciements à ***M. Salah SAHLI***, de m'avoir accepté au sein de son laboratoire LMI et de faire part des personnes qui m'ont donné de précieux conseils et appuis.

Je tiens à remercier ***Mme Saida REBIAI***, ***Mme Saida LATRECHE***, ***Mme Farida HOBAR, M. et Mme BOUCHEMAT*** et ***Mr. Azzedine BELLEL*** ainsi que tous les professeurs qui ont pris part à ma formation.

Mes chers ***Collègues***, mes chers ***Amis***, sans citer vos noms, vous vous reconnaissez dans mes mots, je vous dis MERCI de faire part de ma vie en étant un **Doctorant** et de m'avoir soutenu jusqu'au bout pour devenir **Docteur**.

Je remercie également le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique Algérien de m'avoir accordé une bourse dans le cadre du projet d'échange **PROFAS B+**, qui m'as permis de finaliser ma thèse de doctorat en collaboration avec l'Université de Poitiers.

Je dédie ce travail :

A ma famille ; ***Papa (Tayeb BENDILMI), Maman (Hanifa OUARETS), Samy, Skander, Meriem et Imen Maya***

Je ne vous remercierai jamais assez, c'est grâce à vous que j'en suis arrivé là.

Je vous admire autant que je vous aime !

A tous les membres de ma famille

A vous cher lecteur

Table des Matières

TABLE DES MATIÈRES 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE 4

I. CHAPITRE I : ETAT DE L'ART 10

I.1. La décharge couronne 10
I.1.1. Aspects de la décharge couronne 12
I.1.2. Types de décharge couronne 13
I.1.3. Caractéristique courant-tension de la décharge électrique dans l'air 15
I.1.4. Mécanisme de formation d'une décharge couronne 16
I.1.5. Processus physiques responsables du déclin de potentiel de surface 18

I.2. Traitement de surface 21
I.2.1. Effet de la décharge couronne sur les surfaces des polymères 22
I.2.2. Angle de contact et travail d'adhésion 23

I.3. Séparation électrostatique 25
I.3.1. Mode de fonctionnement d'un séparateur multifonctionnel 26
I.3.2. Théorie de chargement électrostatique de particules 27

I.4. Conclusions 29

II. CHAPITRE II : DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX ET MÉTHODES D'ANALYSE DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES 32

II.1. Caractéristiques courant-tension 32

II.2. Traitement de surface du polypropylène 33

II.3. Chargement électrostatique 37

II.4. Uniformité de chargement électrostatique 42

II.5. Conclusions 46

III. CHAPITRE III : CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE DE LA DÉCHARGE COURONNE MULTI-POINTES DANS L'AIR : APPLICATION AU TRAITEMENT DE SURFACE DE PLAQUES ISOLANTES 49

III.1. Caractérisation électrique de la décharge couronne 50
III.1.1. Procédure expérimentale 50
III.1.2. Résultats et discussion 51

III.2. Traitement de surface de plaques de polypropylène 60
III.2.1. Procédure expérimentale 61

III.2.2. Résultats et discussion 62

III.3. Conclusions 67

IV. CHAPITRE IV : UNIFORMITÉ DU CHARGEMENT ÉLECTRIQUE PRODUIT PAR UNE DÉCHARGE COURONNE MULTI-POINTES 70

IV.1. Chargement stationnaire des plaques de PVC 71
IV.1.1. Procédure expérimentale 71
IV.1.2. Facteurs influant le profil du potentiel de surface 72
IV.1.3. Etude de l'uniformité de la charge 75

IV.2. Chargement dynamique des produits laminés 77
IV.2.1. Procédures expérimentales 77
IV.2.2. Effet de la direction du passage sur les profils de potentiel de surface du PVC 78
IV.2.3. Effet de la distance inter-pointes sur les profils du potentiel de surface du PP 80
IV.2.4. Etude de l'uniformité de la charge 82

IV.3. Chargement dynamique de produits granulaires 85
IV.3.1. Procédure expérimentale 85
IV.3.2. Etude de l'uniformité de la charge 85

IV.4. Conclusions 90

CONCLUSIONS GÉNÉRALES 93

TABLE DES FIGURES 98

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 102

Titre : ***Etude expérimentale de la décharge couronne multi-pointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique***

Résumé : La décharge corona est largement utilisée non seulement pour modifier les caractéristiques physiques des surfaces des matériaux diélectriques, mais aussi comme technique de charge pour les mélanges granulaires en vue de leur séparation électrostatique. L'uniformité de la charge électrique déposée à la surface des matériaux isolants est un indice de performance majeur pour toute électrode corona. L'objectif de cette thèse a été d'explorer les limites des techniques de la charge corona, et plus particulièrement l'uniformité de charge atteignable lors de l'utilisation d'électrodes corona multi-pointes, compte tenu de leur utilisation possible pour le traitement de surface des plaques diélectriques ou pour la séparation électrostatique de mélanges granulaires. L'utilisation d'un voltmètre électrostatique sans contact pour mesurer le potentiel électrique de surface après l'exposition à la décharge corona s'est avérée être une méthode pratique pour étudier la distribution et l'évolution de la quantité de charge déposée sur les matériaux isolants. Une étude « statique » réalisée avec des plaques de PVC au repos sous l'action de la décharge corona générée par des électrodes corona multi-pointes a permis d'évaluer l'effet de chaque facteur : la tension appliquée, la hauteur des pointes au-dessus de la surface du diélectrique, et le temps d'exposition. Une étude « dynamique », dans laquelle les échantillons étaient en mouvement relatif par rapport aux électrodes de type multi-pointes, a permis de quantifier ces effets dans des conditions plus proches de celles qui devraient être rencontrées dans les applications industrielles. Ce travail a montré que la non-uniformité de la charge corona peut être réduite à moins de 5 % de la valeur moyenne en choisissant des valeurs appropriées de la distance inter-électrodes et de la hauteur des extrémités des électrodes au-dessus de la surface exposée à la décharge corona.

Mots-clés : Décharge couronne, film de PP, particules de PP, plaque de PVC, potentiel de surface électrique, séparation électrostatique, traitement de surfaces.

Title : ***Using experimental study of multi-tip corona discharge for applications to surface modification of dielectric materials and to electrostatic separation***

Abstract: Corona discharge is widely used not only to modify the physical characteristics of dielectric materials surfaces, but also as a charging technique for the granular mixtures in view of their electrostatic separation. Uniformity of the electric charge deposited at the surface of insulating materials is a major performance index for any corona electrode. The aim of the present thesis was to explore the limits of the corona charging techniques, and more specifically the charge uniformity attainable when using multi-tip-type corona electrodes, in view of their possible utilization for the surface treatment of dielectric plates or for the electrostatic separation of granular mixtures. Using a non-contact electrostatic voltmeter to measure the surface electric potential after corona discharge exposure has proven to be a convenient method to investigate the distribution and the evolution of the amount of charge deposited on insulating materials. A "static" study carried out with PVC plates at rest under the action of the corona discharge generated by such electrode arrangements enabled the evaluation of the effect of each factor: the applied voltage, the height of needles above the surface of the dielectric, and the exposure time. A "dynamic" study, in which the samples were in relative motion with respect to multi-tip-type electrodes, made possible the quantification of these effects in conditions closer to those that are expected to be encountered in industrial applications. It was found that the non-uniformity of the corona charging can be reduced to less than 5 % of the average value by choosing the appropriate inter-electrodes distance and the height of the tips of the electrodes above the surface exposed to the corona discharge.

Keywords: Corona discharge, PP film, PP particles, PVC plate, surface electric potential, electrostatic separation, surface treatment.

Introduction générale

Du fait de leurs propriétés physiques et chimiques intéressantes, les polymères ont une large gamme d'applications industrielles dans divers domaines tels que la microélectronique, l'aérospatiale, l'optique, le biomédical et l'industrie alimentaire [1]. Certains polymères, dans leur forme naturelle, sont particulièrement difficiles à utiliser dans quelques applications qui impliquent de peindre ou d'imprimer sur leurs surfaces, car ils sont chimiquement inertes, non poreux et hydrophobes [2]. Pour compenser ces inconvénients et obtenir une adhésion satisfaisante, il est souvent nécessaire d'utiliser des traitements chimiques ou physiques pour modifier leurs propriétés de surface, tout en préservant les bonnes propriétés volumiques de base [3], [4]. Ainsi, plusieurs techniques ont été développées pour traiter les surfaces des matériaux diélectriques, en les soumettant aux rayonnements UV, à l'ozone, aux décharges électriques, ou à une combinaison de ces éléments [3]–[7]. Les traitements par décharge couronne [3], [8], [9] et par décharge à barrière diélectrique [10], [11] sont relativement récents et comptent parmi les techniques les plus fiables. Par exemple, des études récentes ont confirmé le fait que l'exposition aux décharges couronnes peut améliorer à la fois l'adhérence métal/polymère [12] et polymère/polymère [13]. Il a été démontré que le traitement par décharge couronne de la surface du polyacrylonitrile (PAN) améliore l'efficacité de la séparation des émulsions d'huile dans l'eau [14], et il a été prouvé que l'exposition au plasma froid avait un impact significatif sur la composition chimique et la mouillabilité du polychlorure de vinyle (PVC) de qualité médicale [15].

Les modifications des caractéristiques physiques et chimiques des polymères soumis aux décharges couronne doivent être uniformes à la surface des corps. Les modifications de la mouillabilité, de la durabilité ou des propriétés d'adhérence des surfaces doivent être les mêmes en tout point, pour que le traitement soit considéré comme réussi [2], [12], [15]. L'uniformité est également un enjeu majeur dans l'utilisation de l'effet couronne pour charger les constituants d'un mélange granulaire en vue de leur séparation électrostatique sous champ électrique intense. Le tri sélectif des constituants ne peut être atteint que si les particules sont relativement homogènes en tailles et ont des charges électriques de polarités opposées, de manière à avoir des trajectoires distinctes dans le champ électrique d'un séparateur électrostatique [16], [17]. Ce séparateur électrostatique a prouvé son efficacité dans le tri sélectif des particules conductrices et non-conductrices de tailles millimétriques [18]–[20], notamment dans le domaine du recyclage des déchets de câbles électriques [21]–[23].

Dans le cas de l'exposition à la décharge couronne, la densité des charges électriques déposées à la surface des matériaux polymères est une indication importante de l'intensité et de l'uniformité du traitement. La distribution des charges électriques est directement corrélée à la géométrie de l'électrode couronne [24], [25]. Elle dépend également de nombreux autres paramètres tels que la nature, la taille et l'état de surface des polymères, le type, le niveau et la polarité de la haute tension appliquée, ainsi que le temps d'exposition de la décharge [3], [8], [9], [24], [25].

Pour étudier la distribution et l'évolution de la quantité de charge déposée sur les matériaux isolants après exposition à la décharge couronne, la mesure du potentiel électrique de surface utilisant un voltmètre électrostatique sans contact s'est avérée être la méthode la plus pratique [26], [27]. Par conséquent, cette méthode a été utilisée par de nombreux groupes de recherche pour étudier les phénomènes fondamentaux liés aux processus de charge et de décharge électrique à la surface des matériaux [26]–[28].

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont déjà été réalisées sur la décharge couronne car elle peut être appliquée non seulement pour modifier la structure chimique de surface des polymères, mais également comme technique efficace de génération d'ozone et de charge électrique pour la pulvérisation de poudre, la peinture électrostatique, la décontamination et la séparation électrostatique [9], [16], [29]–[32].

Les électrodes couronne sont généralement composées de pointes, de fils ou de lames connectés à une alimentation haute tension [32]–[35]. L'uniformité de la charge électrique déposée sur la surface des matériaux isolants exposés à la décharge couronne dépend de l'uniformité du champ électrique généré par ces électrodes. Par conséquent, l'uniformité du champ électrique qu'elle génère est un indicateur de qualité important pour toute électrode couronne [24], [25], [36].

Les électrodes filaires et lames génèrent des décharges couronne assez uniformément réparties le long de l'élément émetteur. Les électrodes de type pointes génèrent une décharge moins uniforme [37]. Cependant, elles se caractérisent par des tensions d'apparition de l’effet couronne plus faibles, ce qui justifie l'effort d'optimisation de leur géométrie en vue de minimiser le degré de non-uniformité des décharges générées par ces électrodes, en relation avec les exigences des applications envisagées, telles que le chargement par décharge couronne de mélanges granulaires en vue de la séparation électrostatique de leurs constituants.

L'objectif principal de cette thèse est d'explorer les limites des techniques de décharge couronne, et plus particulièrement l'uniformité de charge obtenue lors de l'utilisation d'électrodes couronne multi-pointes, compte tenu de leur application possible au traitement de surface des plaques diélectriques ou à la séparation électrostatique de mélanges granulaires. Le challenge était de concevoir l'électrode de type pointe de manière à générer un effet de charge aussi uniforme que possible à la surface des corps exposés à la décharge. Une étude "statique", réalisée avec des plaques de PVC au repos et soumises à l'action de la décharge générée par des électrodes couronne multi-pointes a permis d'évaluer l'effet de chaque facteur : la tension appliquée, la hauteur des pointes au-dessus de la surface du diélectrique, la distance inter-pointes et le temps d'exposition. Une étude "dynamique" utilisant l'électrode couronne à trois pointes et réalisée avec des plaques, des films et des particules de PP, dans laquelle les échantillons étaient en mouvement relatif par rapport aux électrodes de type multi-pointes, a permis de quantifier ces effets dans des conditions plus proches de celles qui devraient être rencontrées dans les applications industrielles, telles que le chargement par effet couronne de matériaux granulaires en vue d'une séparation électrostatique ou dans le traitement de surface. Cette étude est évaluée par la mesure directe de la charge déposée sur les particules de PP, en les collectant dans une cage de Faraday reliée à un électromètre.

Cette thèse est structurée en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré dans un premier temps à la présentation de la décharge couronne comme moyen de chargement électrostatique de polymères, en mettant l'accent sur les différents types de décharge couronne, la caractéristique courant tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique et le mécanisme de formation d'une décharge couronne. Nous présenterons dans un second temps quelques techniques de traitement de surface de polymères et plus particulièrement le procédé utilisé dans ce travail et qui fait appel à la décharge couronne. Quelques moyens de caractérisation des propriétés de surfaces des matériaux diélectriques ont été également décrits. Enfin nous présenterons les procédés de séparation électrostatique qui se basent sur le chargement des particules par « bombardement ionique » et par « induction électrostatique ».

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de l'ensemble de dispositifs expérimentaux mis en œuvre pour le chargement électrique et le traitement des matériaux diélectriques par décharge couronne. Les méthodes de caractérisation des effets de la décharge couronne seront abordées dans ce travail de thèse. Nous commençons par la description de la configuration expérimentale multi-pointes utilisée pour déposer des charges électriques sur des

surfaces de films de polypropylène (PP) d'épaisseur 20 µm. Ensuite, nous présentons le banc expérimental pour l'étude de l'exposition des plaques de PP à l'action de la décharge couronne, en mode statique. Cela étant, nous décrivons les différents bancs expérimentaux utilisés pour caractériser les divers effets de la décharge couronne, tels que le banc pour la mesure de la densité de courant, le banc pour la mesure du potentiel électrique de surface, le banc pour la mesure de l'angle de contact et le banc de spectroscopie à réflexion interne multiple FTIR-ATR. Enfin, nous présenterons les différents bancs expérimentaux de chargement électrique des films, des plaques et des particules de PP en utilisant la décharge couronne produite par une électrode couronne multi-pointes.

Deux types d'expériences de chargement qualifiées de "statique" et "dynamique", ont été réalisés et deux méthodes de caractérisation employés afin d'estimer l'uniformité de la charge déposée tels que la cartographie du potentiel électrique de surface sur les plaques de PVC et de PP et les films de PP, à l'aide d'un voltmètre électrostatique, et la mesure directe de la charge acquise par les particules de PP après leur passage sous le système d'électrodes, par une cage de Faraday connectée à un électromètre.

Au troisième chapitre, nous avons présenté dans une première partie les résultats expérimentaux concernant la caractérisation électrique de la décharge couronne produite par une électrode multi-pointes. Ainsi, nous avons effectué l'étude de l'effet de la présence de l'échantillon, du nombre de pointes et de la distance inter-électrodes sur les caractéristiques courant-tension $I(V)$ de la décharge couronne multi-pointes appliquée sur des films minces de PP. Dans une seconde partie, nous avons présenté les résultats expérimentaux concernant l'étude de la modification des caractéristiques chimiques des surfaces de plaques de PP soumises à une décharge couronne sous différentes durées d'exposition. Cette étude a été faite par la mesure de l'angle de contact pour la caractérisation de la mouillabilité des plaques de PP et par la spectroscopie infrarouge FTIR-ATR pour la caractérisation physico-chimique de la surface de ces plaques. L'uniformité des modifications de surface a été comparée à celle des charges déposées sur les échantillons de PP.

Le quatrième chapitre est consacré à la mise en évidence de l'uniformité du chargement électrique produit par une décharge couronne générée par des électrodes de plusieurs types : une pointe, trois pointes et sept pointes sur deux rangées. Deux méthodes de charge différentes ont été étudiées : "statique" et "dynamique". L'étude statique réalisée avec des plaques de PVC soumises à l'action de la décharge couronne générée par des électrodes couronne à une ou à trois pointes a permis d'évaluer l'influence de quelques facteurs : le niveau de la tension

appliquée, la hauteur des pointes au-dessus de la surface du diélectrique et la durée d'exposition à la décharge couronne sur le niveau et l'uniformité de la répartition des charges déposées. L'étude dynamique a été réalisée avec des plaques et des films de PVC ainsi que des particules de PP. Pour des plaques de PVC, le chargement dynamique a été effectué avec l'électrode couronne à deux, trois et à sept pointes réparties sur deux rangées, afin de quantifier l'effet de la direction du mouvement et de la tension appliquée. L'uniformité de la charge déposée sur des plaques de PVC par le calcul du taux d'uniformité a été également étudiée. Pour des films de PP, le chargement dynamique avec des électrodes de trois pointes nous a permis d'étudier l'effet de la distance entre les pointes sur l'uniformité du chargement, afin de confirmer la reproductibilité des résultats obtenues sur les plaques de PVC. Dans le cas des particules de PP, les effets de la distance entre les pointes, de l'amplitude de la tension appliquée, de la vitesse de la bande, et de la hauteur séparant les pointes et les particules ont été évalués.

Une conclusion générale synthétisant les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude et des perspectives à ce travail seront présentés à la fin de ce manuscrit.

Chapitre I

Etat de l’art

Charles-Augustin Coulomb (1736-1806)

Charles-Augustin Coulomb est un ingénieur et physicien français né à Angoulême. Toutes ses recherches expérimentales ont été sanctionnées favorablement et intégrées sans grandes modifications à la physique classique et à l’ingénierie mécanique. Son nom a été donné à l’unité de charge électrique dans le système international « le Coulomb ».

Chapitre I : Etat de l'art

La décharge couronne est un phénomène physique ayant une grande diversité d'applications industrielles, parmi les plus récentes nous avons la séparation de déchets finement broyés ou de matériaux en poudre [38]–[41]. En effet, cette décharge électrique, connue pour son aptitude à modifier les caractéristiques physiques des surfaces des matériaux diélectriques [42]–[44], peut également être utilisée comme mécanisme de charge des particules isolantes avant leur séparation dans un champ électrique de haute intensité [16], [29], [45].

La quantité de charge déposée sur un diélectrique dépend directement de sa nature [46], [38] et de ses dimensions, des paramètres géométriques du système d'électrodes, ainsi que du type, du niveau et du signe de la tension appliquée [25], [29]. L'utilisation d'un voltmètre électrostatique sans contact pour mesurer le potentiel électrique de surface après exposition à une décharge couronne s'est avérée être une méthode pratique pour étudier la distribution et l'évolution de la quantité de charge déposée sur des matériaux isolants [26], [27]. Cette méthode a été utilisée par de nombreux groupes de recherche pour étudier les phénomènes fondamentaux liés aux processus de charge et de décharge électrique de ces matériaux [26]–[28].

Dans ce chapitre nous présentons les différentes techniques de chargement des polymères par décharge couronne. Nous décrivons les différents types de décharge couronne, la caractéristique courant tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique et le mécanisme de formation d'une décharge couronne. Les phénomènes physiques responsables du déclin de potentiel de surface sont également exposés. Ensuite, nous présentons l'effet de la décharge couronne comme moyen de traitement de surface, en mettant en évidence l'énergie de surface et sa caractérisation par mesure de l'angle de contact. Finalement nous décrivons un séparateur électrostatique multifonctionnel, en exposant brièvement les bases théoriques du chargement des particules par bombardement ionique et par induction électrostatique.

I.1. La décharge couronne

La décharge couronne est l'une des méthodes les plus utilisées pour générer du plasma à pression atmosphérique. Elle se produit entre deux électrodes asymétriques par l'application d'un fort champ électrique. C'est une technique qui permet de modifier l'état chimique et physique (rugosité, mouillabilité) des surfaces des matériaux, élargissant ainsi leur champ d'utilisation. Il est également connu que la décharge couronne est le moyen le plus fiable et le plus efficace pour déposer à la surface de ces matériaux des charges électriques aussi bien

positives que négatives, en fonction de la polarité de la tension appliquée aux systèmes d'électrodes utilisés. Ainsi, la décharge couronne présente un intérêt toujours croissant en raison de la nécessité de charger électriquement des matériaux polymères pour diverses applications.

Les modifications des caractéristiques chimiques et physiques des polymères exposés à des décharges couronne doivent être uniformes sur la surface des corps. Les changements dans les propriétés de mouillabilité ou d'adhésion des surfaces doivent être les mêmes en tout point, pour que le traitement soit considéré comme réussi [2], [12]–[15]. L'uniformité est également un problème majeur dans l'utilisation de l'effet corona pour charger les constituants d'un mélange granulaire en vue de leur séparation dans un champ électrique. Le tri sélectif des constituants métalliques et isolants des déchets granulaires de câbles électriques ne peut être réalisé que si les particules sont caractérisés par des faibles distributions en termes de tailles et de charges électriques de polarités opposées, afin d'avoir des trajectoires distinctes dans le champ électrique du séparateur électrostatique [16], [17].

Dans le cas d'une exposition à une décharge couronne, la densité des charges électriques déposées à la surface des polymères est une indication importante de l'intensité et de l'uniformité du traitement. La distribution des charges électriques est directement corrélée à la géométrie de l'électrode couronne [24], [25]. Elle dépend également de nombreux autres paramètres tels que la nature et l'état de surface des polymères, le niveau et la polarité de la haute tension appliquée, ainsi que le temps d'exposition à la décharge [9], [25].

Pour étudier la distribution et l'évolution de la quantité de charge déposée sur les matériaux isolants après exposition à la décharge couronne, la mesure du potentiel électrique de surface s'est avérée être la méthode la plus pratique [26], [27]. Par conséquent, cette méthode a été utilisée par de nombreux groupes de recherche pour étudier les phénomènes fondamentaux liés aux processus de charge et de décharge électrique à la surface des matériaux [26]–[28].

De nombreuses études théoriques et expérimentales ont déjà été réalisées sur la décharge couronne car elle peut être appliquée non seulement pour modifier la structure chimique de surface des polymères mais aussi comme une technique efficace de génération d'ozone et de charge électrique pour la pulvérisation de poudre, la peinture électrostatique, la décontamination et la séparation [9], [16], [29]–[32].

Les électrodes couronne sont généralement composées de pointes, de fils ou de lames connectés à une alimentation haute tension [33]–[35]. L'uniformité de la charge électrique déposée sur la surface des matériaux isolants exposés à la décharge couronne dépend du champ

électrique généré par ces électrodes [24], [25], [36]. Les électrodes de type fil et lame génèrent des décharges couronne assez uniformément distribuées le long de l'élément émetteur. Les électrodes de type pointe ont une meilleure résistance mécanique que les électrodes de type fil, par exemple [47], par contre le champ généré est moins uniforme que celui généré par les électrodes fil ou lame [37]. Le fait que ces électrodes nécessitent des tensions d'amorçage de la décharge couronne plus faibles que les autres justifie l'effort d'optimisation de leur géométrie en vue d'augmenter le degré d'uniformité de la charge d'espace générée, en relation avec les exigences des applications envisagées, telles que le chargement des mélanges granulaires en vue de leur séparation électrostatique.

La caractérisation expérimentale des électrodes couronne de type pointe est une question importante qui a fait l'objet de recherches antérieures [47], [48]. Ainsi, il a déjà été démontré que la proximité des pointes optimise l'uniformité du champ électrique près de leurs pointes et donc augmente la tension d'amorçage corona.

I.1.1. Aspects de la décharge couronne

Plusieurs travaux ont été réalisés théoriquement et expérimentalement sur la décharge couronne du fait de sa grande utilité dans différents domaines tels que la séparation électrostatique de matières conductrices et non-conductrices, les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs, les photocopieurs et les électrets, la modification des propriétés de surfaces des polymères et la neutralisation et la charge des médias non tissés, en raison de sa simplicité, sa reproductibilité et son faible coût. Townsend a mené les premières études sur les décharges couronne au début du 20^{e} siècle. Cette technique est pratique car elle permet de déposer de manière contrôlée une quantité de charges sur la surface des matériaux diélectriques [49]–[51].

La décharge couronne est une décharge électrique auto-entretenue non destructive ; elle fait partie des plasmas froids (non-thermiques) [52]. Elle se génère en appliquant un potentiel électrique élevé entre deux électrodes non symétriques dont l'une d'elles a un faible rayon de courbure par rapport à l'autre. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique fortement inhomogène et suffisamment élevé dans l'espace inter-électrodes.

La décharge couronne existe sous différentes formes et dépend de la configuration géométrique des électrodes. Les configurations les plus courantes pour obtenir la décharge couronne sont le fil-plan, pointe-plan, couteau/cylindre et fil/cylindre (Figure I.1).

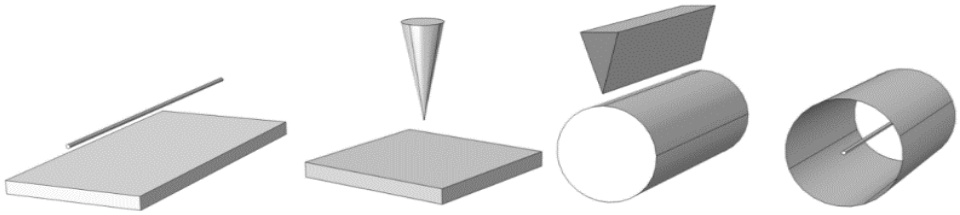


Figure I.1 : *Configuration d'électrodes pour la génération de la décharge couronne [52].*

La Figure I.2 montre une décharge couronne typique pointe/plan. Cette configuration est caractérisée par une zone de fort champ autour de la pointe où sont créées les espèces chargées (zone d'ionisation) et d'une zone de dérive ou de diffusion où se déplacent les particules chargées qui ont le même signe que l'électrode active [53].

La difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge par rapport à d'autres comme la décharge à barrière diélectrique est la transition rapide à l'arc. Cette transition est accompagnée par une forte augmentation du courant de décharge [54].

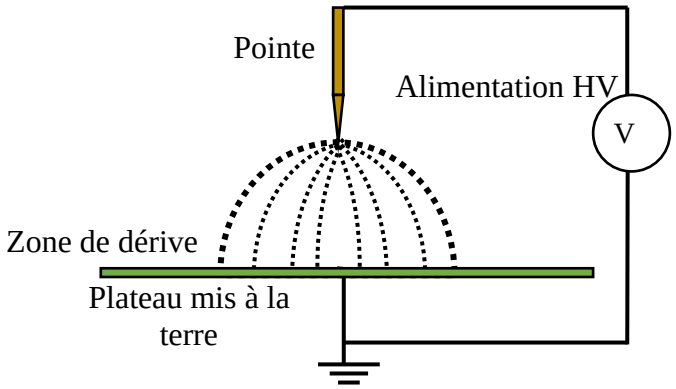


Figure I.2 : *Zone de dérive dans la décharge couronne configuration pointe-plan.*

I.1.2. Types de décharge couronne

La décharge couronne est une technique avantageuse dans le sens où il est possible de déposer des charges positives ou négatives selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure (pointe), appelée « électrode active ». Si elle est positive, on parle d'une décharge couronne positive, sinon, d'une décharge couronne négative. Du fait de la différence de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est radicalement différente [52], [55].

Le champ électrique autour de la pointe est suffisamment élevé pour provoquer une ionisation du gaz dans la zone qui l'entoure (Figure I.3 (a)). Dans le cas d'une électrode active de polarité positive, les électrons germes situés au voisinage sont accélérés vers celle-ci. Autour de l'électrode active, se développe une région de forte ionisation, en pointillé sur la Figure I.3. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode sous l'effet des forces de Coulomb et se déplacent vers la région à faible champ électrique, appelée zone de dérive [56]. Puisqu'il n'y a que des ions positifs dans cette zone, la décharge est donc unipolaire.

Dans l'air ambiant les espèces dominantes en décharge positive sont des ions hydratés de formule générale $(H_2O)_nH^+$, où *n* est un entier qui augmente avec le taux d'humidité relative. À faible taux d'humidité d'autres ions deviennent dominant, tels que $(H_2O)_nNO^+$ et $(H_2O)_n(NO_2)^+$ [49], [51].

Lorsque l'électrode est portée à un haut potentiel négatif, dans la zone d'ionisation ainsi créée, les ions positifs produits se déplacent dans le sens du champ électrique et se précipitent sur la pointe (Figure I.3 (b)). Des électrons sont extraits de la cathode par choc, chaque électron ainsi libéré produit une nouvelle avalanche. Les électrons et les ions négatifs sont repoussés par la pointe vers la zone où le champ électrique est faible (zone de dérive) [57]. En présence d'un gaz électronégatif (cas de l'air), lors de leur mouvement, les électrons s'attachent aux molécules électronégatives et des ions négatifs sont formés dans la zone de dérive. L'avalanche électronique se développe de l'électrode vers le plan de masse, elle s'arrête à une distance où le champ n'est plus suffisant pour assurer l'ionisation du gaz [58].

En décharge couronne négative, les ions les plus déposés sont : CO_3^-, CO_4^-, O_2^- et O_3^- ainsi que d'autres ions hydratés $(H_2O)_nCO_3^-$ à 50 % d'humidité relative [51].

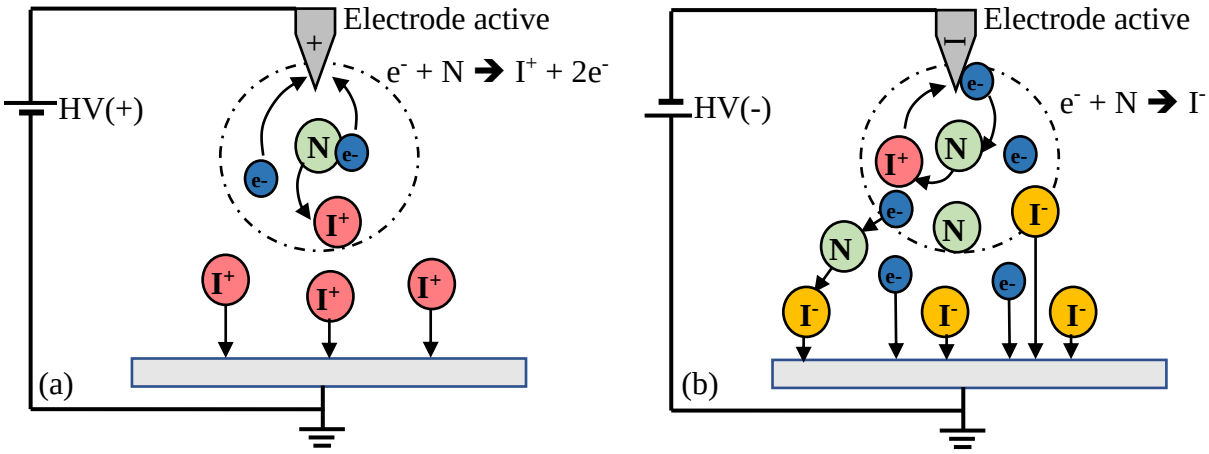


Figure I.3 : *Décharge couronne négative pour une configuration pointe-plan, (a) cas de décharge couronne positive et (b) cas de décharge couronne négative.*

I.1.3. Caractéristique courant-tension de la décharge électrique dans l'air

En appliquant un champ électrique entre deux électrodes dans l'air, toutes les charges électriques créées vont se déplacer dans l'espace inter-électrodes et génèrent un courant électrique (courant de décharge). La Figure I.4 montre le comportement du courant de décharge en fonction de l'augmentation de la tension appliquée. La courbe de cette figure permet de distinguer quatre régimes régissant la décharge électrique dans l'air [56].

a. ***Régime I*** **:** la décharge n'est pas auto-entretenue. Le courant est très faible ($\leq 10^{-12} A/cm^{-2}$), dû à la collection des espèces chargées présentes naturellement dans le milieu. Ces espèces sont produites par l'impact de rayons cosmiques ou de particules issues de la désintégration spontanée de certains atomes (radioactivité naturelle) sur le gaz présent dans l'espace inter-électrode. Dans ce cas, le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique.

b. ***Régime II*** **:** lorsque le potentiel extérieur appliqué atteint une valeur de seuil V_o, le champ électrique est suffisamment important pour générer des avalanches électroniques. Le courant électrique mesuré augmente très fortement pour une très faible variation de la tension appliquée. Cependant, ce courant reste toujours faible ($\leq 10^{-6} A/cm^{-2}$) et on parle d'une décharge non auto-entretenue.

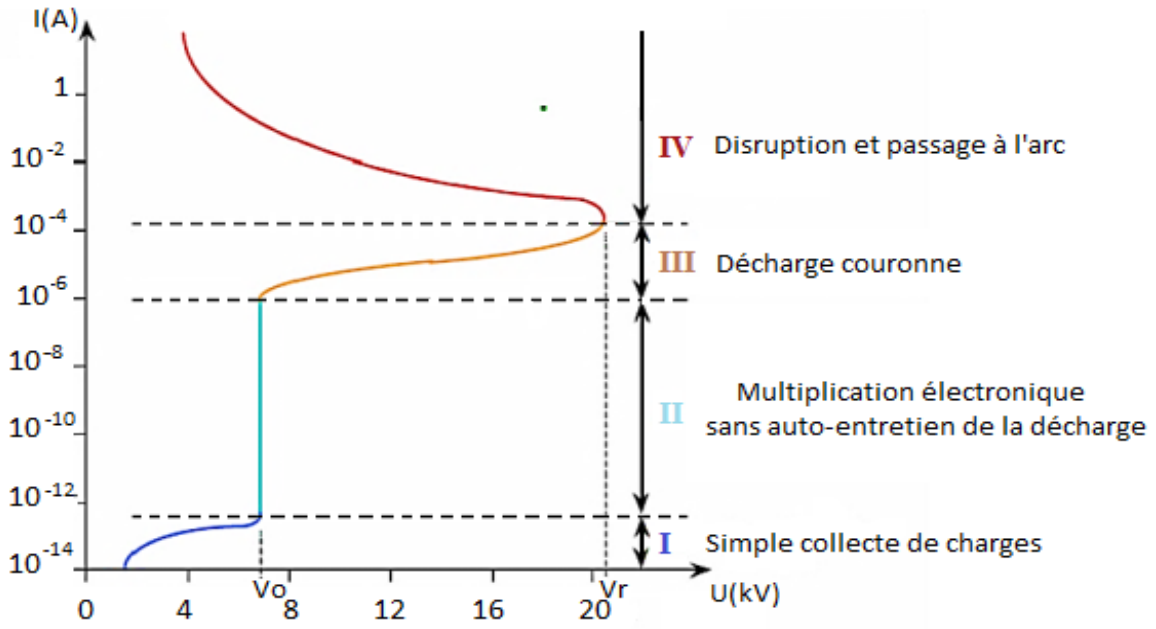


Figure I.4 : *Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique [49].*

c. ***Régime III*** **:** ce régime correspond à une décharge couronne auto-entretenue. A partir d'un certain potentiel appliqué à l'électrode, les streamers apparaissent, ce qui correspond au seuil de la décharge couronne.

d. ***Régime IV*** **:** ce régime correspond à un régime de l'arc au-delà d'une tension appliquée V_r. Le courant de décharge devient très important et la tension aux bornes des électrodes chute rapidement.

I.1.4. Mécanisme de formation d'une décharge couronne

Les processus microscopiques présents dans la décharge couronne sont variés et très complexes. Ils conduisent à un étalage de régimes distincts du comportement de la décharge. Le comportement d'une décharge dépend de plusieurs paramètres pouvant influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne [59], [60] :

a. Paramètres électriques telles que la nature et la polarité de la tension appliquée à l'électrode active (tension continue ou alternative) ;

b. Paramètres géométriques telles que la forme et les dimensions des électrodes ainsi que la distance inter-électrodes ;

c. Paramètres physiques, liés à la nature du gaz inter-électrodes, à sa densité, à sa pression, à sa température et à sa teneur en vapeur d'eau et impureté. Les matériaux constituants les électrodes jouent également un rôle non négligeable.

L'existence d'une décharge électrique dépend de la possibilité de créer des particules chargées à partir des atomes ou molécules neutres constituant ces gaz.

I.1.4.1. Processus de production des espèces chargées

L'amorçage de la décharge couronne dans un espace gazeux commence par une série d'avalanches électroniques au voisinage de la pointe. La condition d'existence d'une décharge est la présence des particules chargées (électrons germes) dans le gaz et l'application d'une tension suffisamment élevée entre les électrodes. Ces électrons germes présents dans le milieu gazeux sont générés principalement par l'irradiation par rayonnements cosmiques ou par les processus de radioactivité naturelle (7 à 20 électrons par cm^3/s sont produits dans l'air à la pression atmosphérique) [61]. En absence de champ électrique, les électrons créés sont consommés par attachement ou recombinaison dans le gaz. Les densités d'électrons restent donc très faibles du fait du nombre important de collisions à la pression atmosphérique [62].

La présence des particules chargées au sein d'un espace gazeux entraine une augmentation des interactions que peut subir une particule. Lors de leur mouvement, qu'il soit à leur agitation thermique ou à un phénomène de transport tel que la convection ou la dérive dans un champ électrique, les interactions peuvent les amener à collisionner avec des particules avoisinantes. Deux types de collisions sont distingués : élastiques ou inélastiques. Dans les chocs élastiques, les particules sont simplement déviées avec échange de quantité de mouvement et d'énergie cinétique. Par contre, dans les chocs inélastiques ou plastiques, l'énergie interne des particules change. L'énergie de la particule incidente, dans ce cas, est suffisante pour que la particule heurtée passe à un niveau excité plus haut ou soit ionisée. Les chocs inélastiques sont donc la source d'un nombre important de réactions physico-chimiques qui vont alors modifier les propriétés macroscopiques du gaz [53], [56].

Les principaux mécanismes régissant la génération des porteuses de charge dans les gaz sont l'ionisation qui tend à augmenter leur densité et l'attachement et la recombinaison qui tend à la réduire [60].

Ionisation : Dans leur état normal, les gaz sont des isolants électriques. En effet, ils ne contiennent que des molécules neutres. Cependant, lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique assez fort, ils deviennent conducteurs. Il se produit des décharges électriques, avec apparition d'électrons et d'ions libres. L'ionisation d'un atome peut se produire selon plusieurs processus :

- Collision inélastique
- Photo ionisation à partir de l'UV profond
- Effet Penning par collision des métastables

Attachement d'électrons : Le phénomène d'attachement se produit quand un électron entre en collision avec un atome ou une molécule neutre du gaz pour former un ion négatif. L'attachement électronique est d'autant plus important que la molécule présente une plus grande affinité électronique.

Recombinaison : C'est la neutralisation d'un ion positif par capture d'un ion négatif.

I.1.4.2. Passage à l'arc électrique

Le streamer laisse derrière lui un canal conducteur formant un pont entre les deux électrodes lorsqu'il atteint le plan. Le champ réduit est faible dans le canal, l'attachement est

dominant en comparaison de l'ionisation ce qui provoque une diminution du courant. Lorsqu'on augmente la tension, les électrons résiduels non combinés gagnent de l'énergie et peuvent ioniser les neutres dans le canal de micro-décharge et par conséquent, la densité en électrons et le courant augmentent. Lorsque l'on augmente encore la tension (c'est-à-dire la valeur du champ réduit dépasse le champ critique, champ pour lequel les coefficients d'ionisation α et d'attachement électroniques η sont égaux), les streamers se développent à des vitesses très élevées vers la cathode. Lorsque la zone cathodique est atteinte, le champ électrique s'intensifie, ce qui provoque l'extraction forte d'électrons et le passage à l'arc [61].

I.1.4.3. Seuil de déclenchement d'une couronne dans l'air

Les décharges couronnes ne peuvent s'établir que si le champ électrique E_o créé par le dispositif est suffisant près de l'électrode active. Au-delà d'une certaine valeur critique du potentiel appliqué, la décharge ne se produit pas. En 1929, Peek a découvert la formule empirique (I.1) donnant la valeur seuil du champ électrique permettant le déclenchement d'une couronne dans l'air [55] :

$$E_o = 31\delta\left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}\right)\ kV/cm \qquad \text{(I.1)}$$

où δ est le rapport de la masse volumique de l'air par rapport à celle obtenue dans les conditions $P = 760$ Torr et $T = 300$ K, r est le rayon de courbure de l'électrode active exprimé en cm.

I.1.5. Processus physiques responsables du déclin de potentiel de surface

Les études du déclin de potentiel de surface trouvent leurs importances dans de nombreuses applications électriques notamment dans la détermination des propriétés électriques des matériaux diélectriques, la conductivité surfacique des isolants et la caractérisation de l'aptitude d'un matériau isolant à évacuer une charge électrique déposée sur sa surface. Le déclin de potentiel de surface est un facteur clé lors de l'examen du type d'isolant pouvant être utilisé dans les équipements de haute tension [54].

Le déclin de potentiel de surface dans un échantillon chargé implique un certain nombre de processus physiques. Ces mécanismes peuvent exister séparément ou coexister avec un ou plusieurs autres mécanismes avec une prédominance de l'un par rapport aux autres. D'après les résultats rapportés dans la littérature, les principaux mécanismes responsables de la décroissance du potentiel de surface des matériaux isolants sont :

- Polarisation de l'échantillon ;

- Conduction de surface ;
- Neutralisation par le gaz ;
- Phénomène piézoélectrique ;
- Injection de charges.

La Figure I.5 résume schématiquement les différents processus pouvant participer au déclin du potentiel de surface.

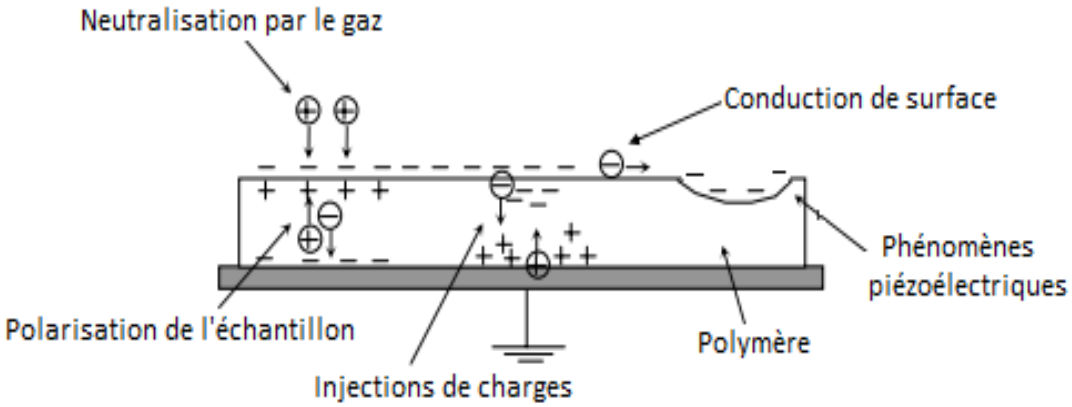


Figure I.5 : *Différents mécanismes pouvant contribuer au déclin du potentiel de surface.*

I.1.5.1. Polarisation de l'échantillon

Plusieurs études ont montré que les phénomènes de polarisation sont responsables du déclin de potentiel de surface [63].

La charge déposée sur la surface de l'isolant modifie le champ existant dans le matériau. Sous l'action du champ électrique créé par ces charges surfaciques, des dipôles s'orientent sous ce champ ; 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.

Selon Llovera et *al.* [28], deux phénomènes physiques peuvent être théoriquement responsables du retour de potentiel : l'injection de charges et la polarisation dipolaire lente. La comparaison entre le déclin et le retour de potentiel de surface permettra de vérifier la contribution du phénomène de relaxation dipolaire dans le processus du déclin de potentiel.

I.1.5.2. Conduction de surface

Dans certaines conditions, la décroissance du potentiel de surface peut être expliquée par la dominance de la conduction de surface dans les matériaux diélectriques. Cette conduction est liée aux propriétés de la surface et à la valeur du champ électrique tangentiel. Elle est observée surtout dans les cas d'échantillons épais vieillis par décharges couronnes. Les charges se déplacent sur les couches primaires de la surface. Lorsque la surface d'un isolant est soumise à la décharge couronne pendant un certain temps, il apparaît une modification rapide et importante des propriétés de la surface [49], [51], [64]. Les relevés de profils de potentiel de surface et/ou de cartographies du potentiel de surface de l'isolant permettront la détection d'une éventuelle conduction ou diffusion dans la surface. Dans le cas de films de polyéthylène téréphtalate (PET), les charges déposées sur la surface du PET s'étalent latéralement par un processus de diffusion de la charge le long de la surface du film [65].

I.1.5.3. Neutralisation par le gaz

La neutralisation des charges déposées sur la surface de l'isolant par les charges libres qui proviennent directement de l'atmosphère environnant le matériau isolant est un autre processus pouvant contribuer au déclin de potentiel de surface. Lors du dépôt de charges électriques, le champ électrique environnant la surface de l'isolant est complètement modifié. Les atomes et les molécules subissent alors l'effet du champ et s'orientent de manière à créer une charge opposée à celle de la surface [64]. Il en résulte alors une réduction du potentiel de surface. Das Gupta et *al*. ont étudié les profils de potentiels de surface enregistrés sur des films de polymères. La conservation de la forme des profils de potentiels de surface et de la largeur de la zone de dépôt pendant tout le temps de mesure [66] indiquent que la neutralisation de la charge par les ions atmosphériques ne contribue pas au processus du déclin de potentiel de surface.

I.1.5.4. Phénomène piézoélectrique

L'effet piézoélectrique est un processus physique qui peut participer au déclin de potentiel d'un matériau. Les polymères ont une structure moléculaire désordonnée, ils contiennent des zones cristallines et des zones amorphes. La piézo-électricité est un phénomène propre à certains types de cristaux. L'application d'un champ électrique élevé à un diélectrique peut générer dans le matériau une pression électrostatique. Cette dernière conduit à une contraction mécanique du volume du matériau qui peut avoir une influence sur le potentiel de surface [67].

I.1.5.5. Injection de charges

Le phénomène d'injection de charges à partir de la surface du matériau diélectrique dans le volume est une injection des porteurs de charges déposés sur la surface de l'isolant à travers le volume. Ainsi, une partie du volume de l'isolant change de propriétés électriques et devient chargée. Par ailleurs, la conduction en volume correspond à un déplacement de charges dans le volume, alors que le matériau reste plutôt neutre.

Le phénomène d'injection de charges est le processus qui domine les mécanismes observés dans la littérature sur les mesures du déclin de potentiel de surface [68]. C'est un phénomène assez complexe qui dépend de plusieurs paramètres. L'état de surface ou son contact avec un autre matériau joue un rôle important sur le processus de l'injection de charges. L'énergie de la décharge couronne, le temps de chargement, la température et l'humidité sont des facteurs pouvant jouer un rôle important dans l'injection de charges. De manière générale, la conduction volumique est surtout présente dans le cas des échantillons minces (épaisseur de l'ordre du micron) et certains échantillons épais. L'injection de charges dans les matériaux isolants a été beaucoup invoquée dans l'étude du déclin de potentiel, et elle est mise en cause dans l'apparition du phénomène dit de "cross-over" ; les courbes de déclin de potentiel obtenues à différents niveaux de tension de chargement par décharge couronne se croisaient [69].

I.2. Traitement de surface

Le traitement par décharge couronne est l'une des techniques largement utilisées dans l'industrie pour modifier la structure chimique et la réactivité de surface des polymères (augmentation de l'énergie de surface (hydrophilie)) et particulièrement les Polyoléfines (polypropylène et polyéthylène) et les Polystères (polyéthylène téréphtalate) afin d'améliorer leurs propriétés d'adhésion, de mouillabilité ainsi que d'autres caractéristiques technologiques importantes. En effet, l'interaction de la décharge couronne avec la surface des films polymères change leur propriétés physiques et chimiques. Ces modifications peuvent être dues à l'introduction de fonctions polaires par création de radicaux libres. La génération de ces radicaux libres est le commencement du processus des réactions qui se produisent à la surface du polymère [4], [8], [51], [70], [71].

Dans cette partie nous présenterons la décharge couronne comme un moyen de traitement, en passant par l'énergie de surface et le travail d'adhésion.

I.2.1. Effet de la décharge couronne sur les surfaces des polymères

En actionnant la décharge couronne le champ électrique généré excite les molécules d'oxygène présentes dans l'air et ainsi, l'oxygène élémentaire (O), la molécule d'oxygène activée (O_2*) et/ou l'ozone (O_3) sont créés [8]. En même temps, des radicaux libres sont immédiatement créés en surface par la dissociation des molécules du matériau exposé. Après une période très courte, l'oxygène activé (O2*) présent dans l'espace inter électrode réagit avec la surface activée pour former une surface oxydée et induit par conséquent une augmentation de l'énergie de surface (Figure I.6). Ces groupements carbonyles et hydroxyles sont responsables de la mouillabilité du polymère traité [8], [70], [71].

En effet, l'augmentation de la tension induit une augmentation des espèces actives réagissant avec la surface et ainsi, une augmentation des groupements carbonyles et hydroxyles dus à l'oxydation de la surface traité par décharge couronne. La corrélation entre la mesure de l'angle de contact et par l'analyse FTIR-ATR montre que l'introduction de groupements polaires (groupements carbonyles C=O et hydroxyles OH) sur la surface traitée par décharge couronne sont responsables de l'augmentation de l'énergie de surface et par conséquent de l'amélioration de la mouillabilité de la surface. Plusieurs études antérieurs publiées dans la littérature montrent que la modification de la surface des films de polymères par décharge couronne [8], [9], [51], [70]–[73], par plasma [2], [7] ou par ozone [6], [74] induit une amélioration de la mouillabilité de la surface. Cette dernière a été attribuée à la formation des fonctions hydroxyles, carbonyles et carboxyles.

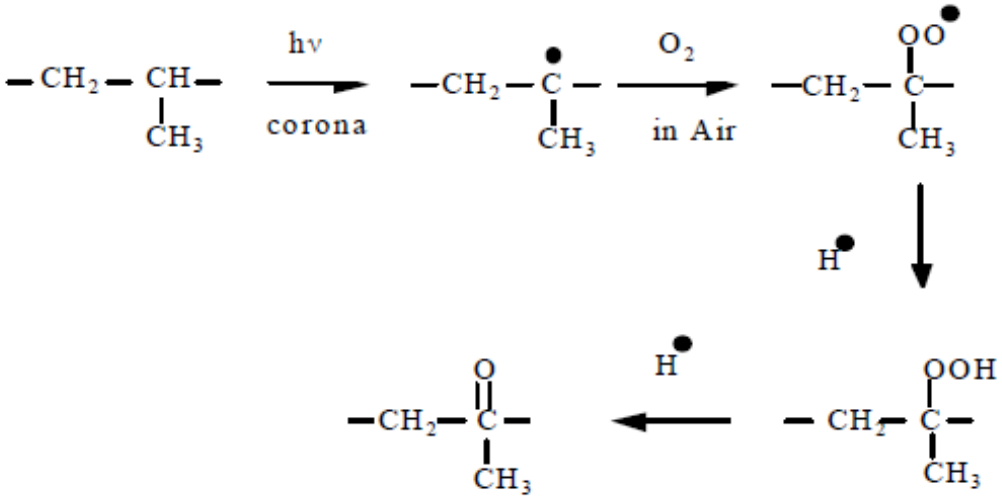


Figure I.6 : *Mécanisme de formation du groupement carbonyle.*

I.2.2. Angle de contact et travail d'adhésion

La caractérisation de la mouillabilité par la mesure de l'angle de contact est le diagnostic le plus facile à mettre en œuvre pour obtenir des informations sur les transformations physiques et chimiques des premières couches atomiques de la surface, c'est à dire sur des épaisseurs de quelques angströms [75]. L'angle de contact entre le liquide et le solide est, par définition, l'angle formé par la tangente à l'extrémité de la goutte d'un liquide avec la surface plane du solide sur laquelle elle a été déposée (Figure I.7). Une mesure de l'angle de contact permet de déterminer la tension interfaciale solide-liquide appelée énergie de surface.

A l'équilibre thermodynamique, l'angle de contact pour un liquide test peut être relié à l'énergie libre de surface (γ_s) par l'équation de Young Dupré (valable dans le cas d'un solide homogène, indéformable, plan et horizontale) donnée par [76] :

$$\gamma_l cos\theta = \gamma_s - \gamma_{sl} - \pi_e \quad \text{(I.2)}$$

où :

γ_l : énergie libre de surface du liquide ;

θ : angle de contact ;

γ_{ls} : énergie interfaciale entre le liquide et le solide ;

π_e : pression d'étalement du liquide. Celle-ci est négligeable dans le cas de surfaces de polymères compte tenu de leur faible énergie de surface [4], [77].

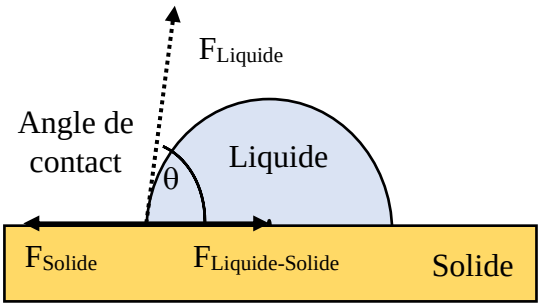


Figure I.7 : *Schéma des forces superficielles présentes à l'interface solide-liquide.*

A partir de l'équation I.2, il est possible de déterminer le degré de mouillabilité d'une surface. L'angle de contact, mesuré expérimentalement, décrit le caractère mouillant (hydrophile) pour $\theta < 90°$ et non-mouillant (hydrophobe) pour $\theta > 90°$ du système solide-liquide [76], [77]. Des exemples de divers angles de contact possibles sont représentés sur la Figure I.8.

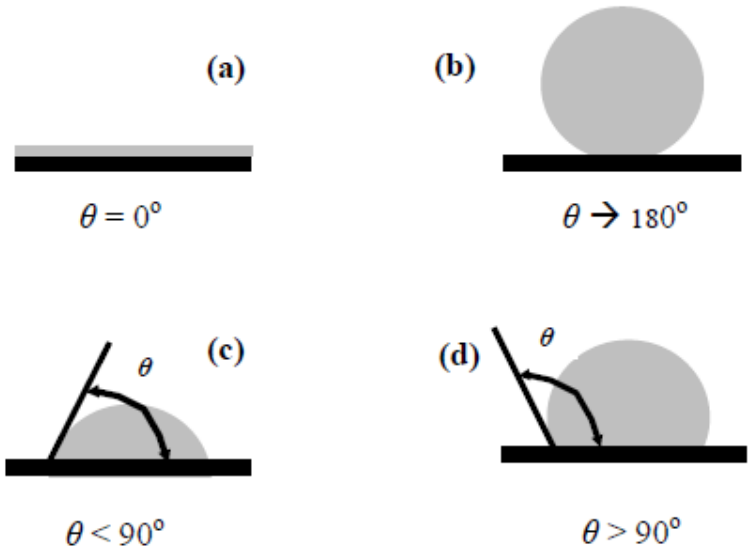


Figure I.8 : *Exemples de divers angles de contact possibles [3].*
(a) : surface complètement hydrophile, (b) : surface complètement hydrophobe,
(c) : surface hydrophile, (d) : surface hydrophobe.

Au cours de l'étalement d'un liquide sur un solide, la création d'une unité d'interface solide-liquide provoque la disparition d'une unité d'interface solide-vapeur et d'une unité d'interface liquide-vapeur lorsque les phases sont en équilibre.

Le travail d'adhésion, ou l'énergie d'adhésion de Dupré, entre un liquide et un solide (W_{sl}) est défini par :

$$W_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - \gamma_{sl} \quad \text{(I.3)}$$

Cette énergie représente en fait la différence entre la somme des énergies superficielles des deux constituants et l'énergie interfaciale [2]. D'une façon générale, comme le montre la Figure I.9, le travail d'adhésion entre deux phases distinctes α et β en contact est égal au travail nécessaire pour les séparer sur une surface de 1 cm^2.

$$W_{adhésion\alpha\beta l} = \gamma_{\alpha v} + \gamma_{\beta v} - \gamma_{\alpha\beta} \quad \text{(I.4)}$$

En utilisant l'équation de Young équation I.2, le travail d'adhésion (W_{sl} ou W_a) peut s'exprimer de la manière suivante :

$$W_{sl} = \gamma_l(1 + cos\theta) \quad \text{(I.5)}$$

Cette expression donne donc une relation directe entre l'angle de contact et l'énergie d'adhésion. Une mouillabilité totale correspond au maximum du travail d'adhésion.

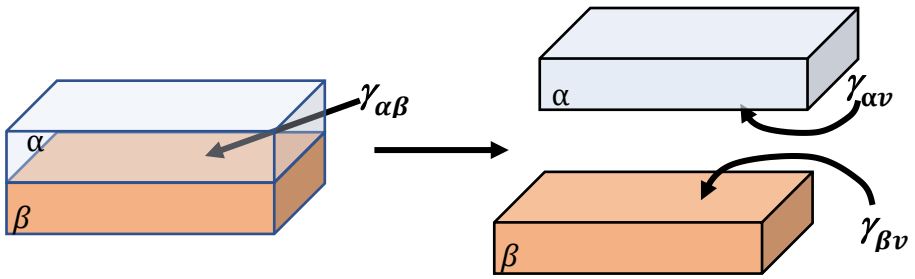


Figure I.9 : *Illustration du travail d'adhésion.*

I.3. Séparation électrostatique

Aujourd'hui la séparation électrostatique des matériaux granulaires présente un domaine d'application industrielle pluridisciplinaire important [78]–[81]. Le principe fondamental de la séparation électrostatique est de soumettre les matériaux à des lois fondamentales d'électricité, en plaçant les particules chargées dans un champ électrique [82]–[84]. Les particules prennent des trajectoires différentes lors de leurs séparations pour cause des caractéristiques physiques différentes constituant leurs matières, leurs tailles et d'autres paramètres physiques et géométriques [85], [86].

Plusieurs procédés de séparation électrostatique sont actuellement utilisés pour le conditionnement de produits agricoles, l'extraction de minerais, le recyclage des matériaux [87], [88]. L'intérêt de développement de ces applications à l'échelle industrielle justifie l'étude des phénomènes physiques déterminant le comportement des granules isolants en présence d'un champ électrique intense, notamment les processus de chargement par décharge couronne et par effet triboélectrique [89], [90]. Intéressées par l'optimisation de la séparation électrostatique, plusieurs équipes de recherche à l'échelle internationale déploient des activités scientifiques et technologiques intenses [22], [86], [87], [91].

Parmi les domaines d'application de la séparation électrostatique, le plus connu est le tri du cuivre des déchets des câbles électriques. Cependant, la diversité des caractéristiques de ces déchets comme la quantité de cuivre, les types des plastiques, les dimensions, empêchent l'élaboration d'un procédé qui peut atteindre tous les objectifs, dans toutes les circonstances. Parmi les difficultés rencontrées même pour le personnel qui dispose des compétences poussées dans le domaine de la séparation électrostatique et qui peut s'accompagner d'échecs ou de couts très élevés, est d'effectuer des ajustements à des processus de séparation électrostatique afin de varier les performances directement sur les installations industrielles. Le passage de l'étape recherche et développement vers l'industrialisation est indispensable pour le développement de

nouvelles technologies et l'optimisation des procédés existants dans le cadre de la séparation électrostatique car cela ne pourrait se concevoir sans une maîtrise totale.

I.3.1. Mode de fonctionnement d'un séparateur multifonctionnel

Le séparateur électrostatique multifonctionnel (Figure I.10), se compose essentiellement d'un convoyeur à bande métallique mis à la terre, d'une électrode couronne et d'une électrode cylindrique reliées à des alimentations haute tension. Le champ électrique créé entre les deux électrodes (électrode statique et la bande métallique mise à la terre) permet de dévier sélectivement les particules chargées ou polarisées vers des bacs de récupération.

Ce séparateur est dédié au traitement de toutes les classes de mélanges binaires (isolant/isolant, isolant/conducteur ou conducteur/conducteur), car il permet la mise en œuvre de trois mécanismes de charge électrique distincts : induction électrostatique, décharge couronne et effet triboélectrique.

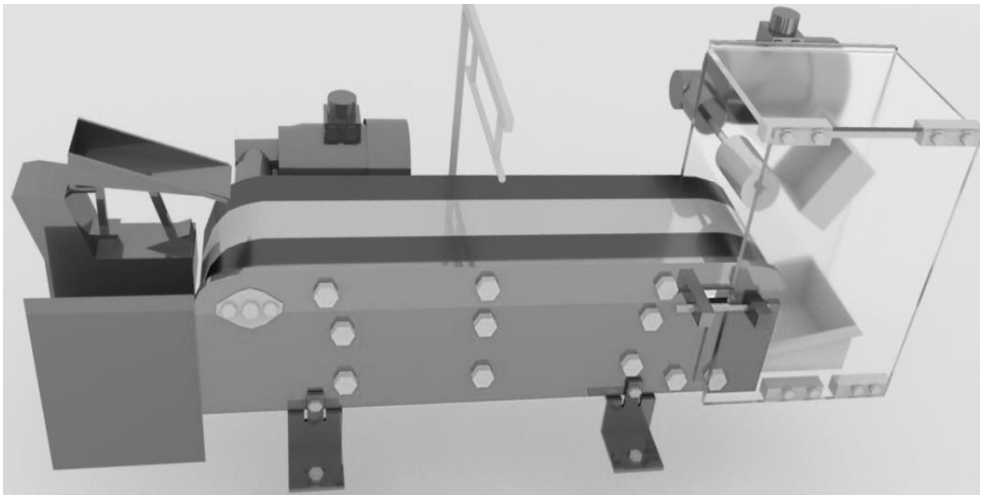


Figure I.10 : *Séparateur électrostatique multifonctionnel à bande métallique*.

La Figure I.11, illustre un schéma représentatif d'un processus de séparation avec le séparateur multifonctionnel à bande transporteuse avec un mélange binaire (isolant/conducteur). Les particules non chargées sont représentées avec des points noirs sur le tapis du convoyeur mis à la terre. Deux mécanismes de charge sont simultanément employés sur ces particules « le bombardement ionique » et « l'induction électrostatique », le premier est destiné aux particules isolantes et le deuxième aux particules conductrices [92], [93]. Après passage sous l'électrode couronne, les particules isolantes vont être chargées selon la polarité de l'électrode couronne et ils vont être collées à la bande transporteuse via la force de l'image électrique [85], [86] ; quand la résultante des force de l'image et force de pesanteur s'annulent,

les particules isolantes finissent par tomber dans le bac de récupération (a). Par contre, en contact avec la bande métallique liée à la terre, les particules conductrices vont perdre rapidement leur charge juste après leur passage sous l'électrode couronne. Au niveau de l'électrode statique ils vont acquérir par une induction électrostatique une charge opposée au potentiel de l'électrode statique, alors ils vont être attiré par celle-ci et vont atterrir dans le bac de récupération (b).

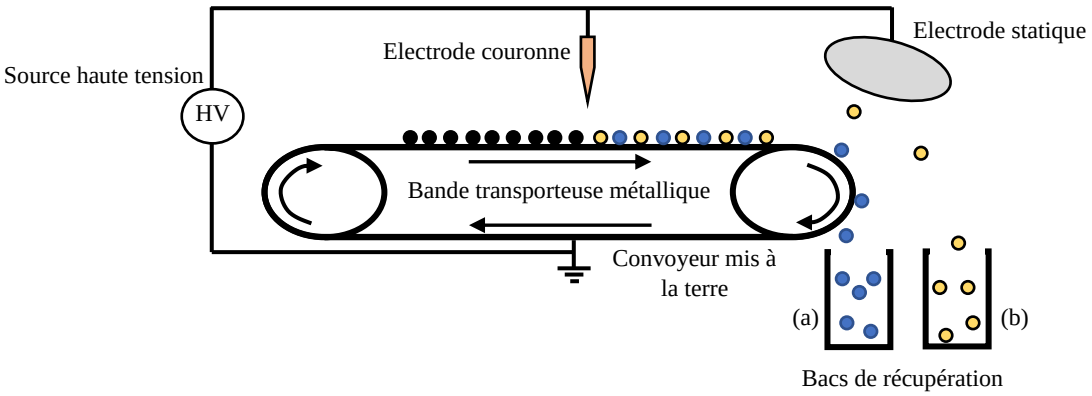


Figure I.11 : *Schéma représentatif d'un séparateur électrostatique multi-fonctions.*

I.3.2. Théorie de chargement électrostatique de particules

Les particules chargées ou polarisées sont soumises à une force électrostatique due à l'action du champ électrique intense dans la zone inter-électrodes. Le champ électrique généré est donné par l'équation suivante :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \tag{I.6}$$

où E représente le champ électrique et V la différence de potentiel entre les électrodes.

En traversant une zone de décharge couronne, une particule sphérique de rayon R acquiert une charge Q selon sa nature [94] :

- Charge Q pour une particule conductrice :

$$Q = 12\pi\varepsilon_o E_o R^2 \tag{I.7}$$

- Charge Q pour une particule isolante :

$$Q = 12\pi\varepsilon_o \left[\frac{\varepsilon_r}{(\varepsilon_r+2)}\right] E_o R^2 \tag{I.8}$$

ε_o = 8,854187 × 10^{-12} F/m est la constante diélectrique de l'air, ε_r la constante diélectrique du matériau isolant et E_o est l'intensité du champ électrique.

Les particules transportées par le convoyeur sont exposées à un champ électrostatique intense généré entre l'électrode statique et le convoyeur métallique relié à la terre. Les particules isolantes conservent leurs charges tandis que les particules conductrices perdent leurs charges, mais elles se rechargent à nouveau par induction électrostatique selon [95] :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)\pi^3 \varepsilon_o E_o R^2 \tag{I.9}$$

Le mouvement d'une particule chargée dans le champ électrique E du séparateur se produit sous l'action de la somme des forces *F* qui agissent sur elle [96]–[99] :

$$m\vec{a} = \sum \vec{F} \tag{I.10}$$

où *m* et *a* représentent respectivement la masse et l'accélération de la particule.

a) Force de gravité : La gravitation est la force exercée sur tout corps de masse *m* dans le champ de pesanteur terrestre.

$$\overrightarrow{F_g} = (0, -mg) \tag{I.11}$$

avec g = 9.81 m/s².

b) Force electrostatique : évaluée à partir de la loi de Couloumb dans le séparateur électrostatique, cette force exerce une attraction ou une répulsion de la particule par rapport à l'electrode reliée à la haute tension.

Dans le cas d'une particule isolante sphérique, la force électrique avant et après le décollage est :

$$\overrightarrow{F_{el}} = Q\vec{E} \tag{I.12}$$

Q est la charge électrique acquise par la particule, *E* represente le champ electrostatique créé entre les deux electrodes dans la zone de séparation [99], [100].

Selon Felici [95], la force électrostatique exercée sur une particule conductrice sphérique avant le décollage est :

$$\overrightarrow{F_{el}} = 0.832Q\vec{E} \tag{I.13}$$

Cette formule représente la combinaison de la force électrostatique qui tend à détacher la particule du convoyeur et de la force d'image qui la maintient attachée au convoyeur. Une fois

la particule détachée, la force d'image disparaît, et la force électrique sera à nouveau calculée à partir de l'equation (I.12).

c) Force centrifuge : cette force tend à détacher la particule de la surface du convoyeur, ainsi que de la surface de l'électrode cylindrique rotative à haute tension, comme le montre la relation suivante :

$$\overrightarrow{F_{CJ}} = m{\omega_j}^2 r_j \overrightarrow{n_j} \tag{I.14}$$

avec *j* = *c* pour le convoyeur, ou *j* = *e* pour l'électrode cylindrique, *m* est la masse de la particule, ω est la vitesse de rotation, *r* est le rayon du cylindre du convoyeur et $\vec{n}$ la normale unitaire extérieure à la surface. Lorsque la particule se détache, cette force disparait.

d) Force d'image électrique : Sous l'action de cette force, les particules isolantes chargées sont " attachées " au convoyeur. Cette force représente l'attraction de Coulomb entre la charge electrique d'une particule isolante et son image (-*Q*) située à une distance $2r_p$.

$$\vec{F_i} = \frac{-(Q^2)}{4\pi\varepsilon_o(2r_p)^2}\vec{n} \tag{I.15}$$

e) Force de résistance de l'air : La force aérodynamique appliquée à une particule sphérique homogène peut être exprimée par la relation suivante [101] :

$$\overrightarrow{F_{ad}} = -\left(\frac{1}{2}C_f \rho S \overrightarrow{v_r^2}(x,y)\right)\vec{u} \tag{I.16}$$

où *S* représente la surface perpendiculaire au flux d'air (m^2) ; v_r vitesse relative de la particule (m/s) ; $\vec{u} = \overrightarrow{v_r}/\|\overrightarrow{v_r}\|$ est le vecteur unitaire dans la direction de déplacement de la particule; ρ = 1,204 kg/m^3 est la densité de l'air ambiant à 20 °C ; C_f = 0,5 est le coefficient de frottement pour une forme sphérique.

I.4. Conclusions

Dans ce chapitre, en s'appuyant sur l'étude de l'état de l'art, nous avons présenté les aspects essentiels de la décharge couronne comme technique de chargement électrostatique des polymères.

1) En fonction de la polarité de l'électrode portée à un potentiel électrique de valeur absolue élevée, des mécanismes physiques différents expliquent l'apparition de la décharge couronne.

2) Divers phénomènes physiques sont responsables du déclin de potentiel de surface tels que la conduction de surface, la polarisation de l'échantillon, la neutralisation par le gaz, l'injection de charges, etc....

3) La décharge couronne est un moyen de modifier les propriétés chimiques et physiques de surface des polymères.

4) Le séparateur multifonctionnel à bande métallique liée à la terre permettra l'étude du phénomène de chargement des granules conductrices ou non-conductrices exposés à l'action de la décharge couronne, ainsi que de son application au tri des mélanges de tels matériaux en champ électrique intense.

Chapitre II

Dispositifs expérimentaux et méthodes d'analyse des données expérimentales

Astrolabe

Instrument dont on s'est servi autrefois pour relever la position des astres et déterminer leur hauteur au-dessus de l'horizon. Les Chinois avaient des ASTROLABES et des sphères avant que nous sussions lire.

- Larousse en 7 volumes 1905

Chapitre II : Dispositifs expérimentaux et méthodes d'analyse des données expérimentales

La décharge couronne est un phénomène physique mis en œuvre dans de multiples procédés industriels, et dépend de plusieurs paramètres, principalement la géométrie des électrodes, la forme d'onde, l'amplitude et la fréquence de la tension appliquée, ainsi que des conditions environnantes. Dans notre travail, nous avons essayé d'approfondir l'étude de certaines caractéristiques de cette décharge. Ce phénomène est généré par l'application d'un champ électrique intense entre deux électrodes, dont une a un faible rayon de courbure. Notre étude s'est focalisée sur la décharge couronne produite dans des systèmes d'électrodes de type pointe-plan et multi-pointes-plan. Les dispositifs expérimentaux utilisés pour les diverses parties de cette étude sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

II.1. Caractéristiques courant-tension

Un premier objectif de l'étude expérimentale est de relever les caractéristiques courant-tension d'un système d'électrodes multi-pointes utilisé pour déposer des charges sur des surfaces de films de polypropylène (PP) d'épaisseur 20 µm. L'électrode couronne comporte une, deux ou trois pointes. Les expériences ont été réalisées dans une chambre climatique à une température *T* de 27 ± 1 °C et une humidité relative *HR* de 22 ± 2 %, dont les valeurs ont été régulièrement contrôlées à l'aide d'un hygromètre Testo 635. Ce contrôle fréquent est indispensable car les conditions environnantes affectent le processus de décharge couronne. La Figure II.1 montre le diagramme schématique du dispositif expérimental utilisé.

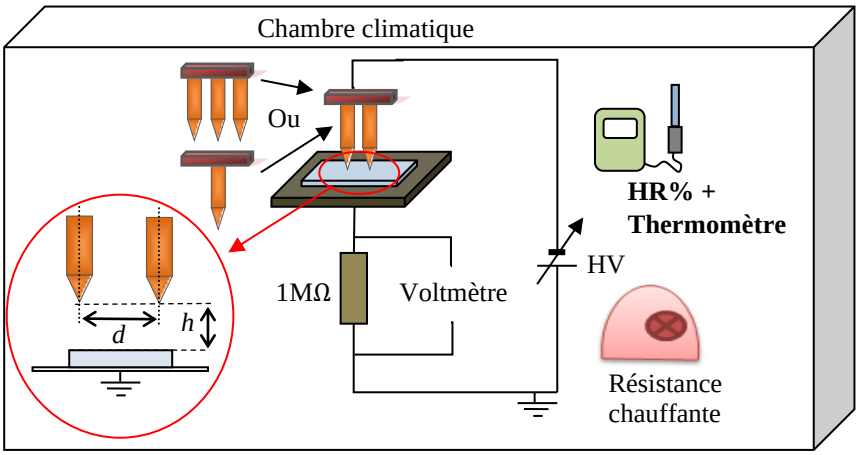


Figure II.1 : *Schéma de la configuration expérimentale.*

La décharge couronne négative est obtenue à l'aide d'un générateur de courant continu à haute tension variable jusqu'à - 10 kV avec un courant maximal de 2 mA. Des pointes en tungstène avec un angle de pointe de 20° (Figure II.2) ont été utilisées comme électrodes actives. L'angle de la pointe est mesuré avec un microscope. Pour la mesure du courant, la plaque est mise à la terre via une résistance non inductive de 1 MΩ. La tension aux bornes de cette résistance est mesurée à l'aide d'un voltmètre et les valeurs de courant sont obtenues en appliquant la loi d'Ohm. La tension a été augmentée progressivement par paliers de 0,1 kV. La valeur du courant enregistrée pour une tension donnée est celle qui avait été obtenue après la stabilisation de la décharge couronne. L'espacement entre les électrodes a été ajusté de 2 mm à 30 mm en utilisant un régulateur de distance micrométrique.

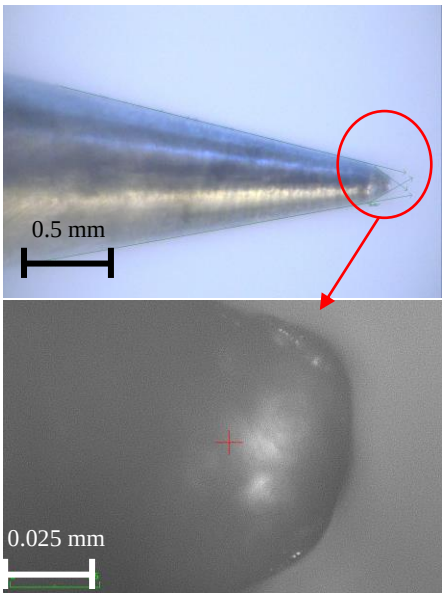


Figure II.2 : *Extrémité des pointes utilisées (r = 50 µm).*

Toutes les mesures se font manuellement dans des conditions climatiques bien contrôlées. Un nouvel échantillon de PP est utilisé pour chaque caractéristique courant-tension.

II.2. Traitement de surface du polypropylène

Un deuxiéme groupe d'expériences a eu comme objectif l'étude de la modification des caractéristiques chimiques des surfaces de plaques de polypropylene (PP) exposées à l'action de la décharge couronne. Les échantillons de forme carrée (100 mm x 100 mm) et d'épaisseur 5 mm (Figure II.3) ont été chargés en utilisant une décharge couronne négative générée par un système d'électrodes multi-pointes-plaque. L'électrode couronne était constituée de trois pointes de tungstène disposées aux sommets d'un triangle équilatéral. La distance *d* entre deux pointes

a été fixée à 40 mm. Les pointes des aiguilles étaient situées à une hauteur h = 30 mm au-dessus de la surface de l'échantillon (Figure II.4). L'électrode reliée à la terre était une plaque métallique de dimensions 150 mm x 150 mm.

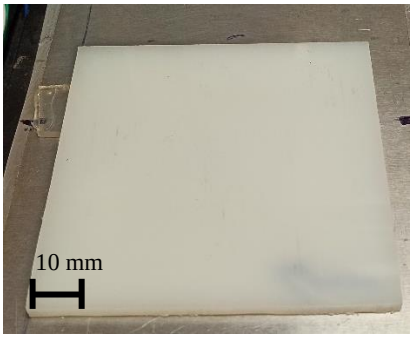


Figure II.3 : *Plaque de polypropylène (100 mm x 100 mm x 5 mm).*

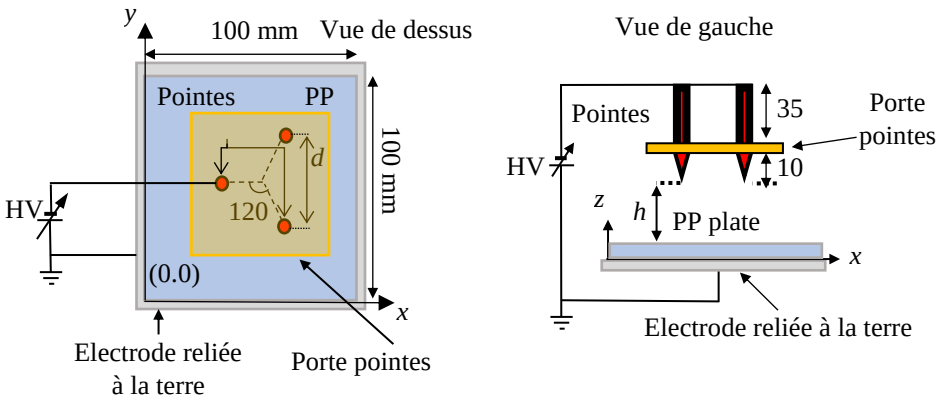


Figure II.4 : *Représentation schématique du banc expérimental pour l'étude de l'exposition des plaques de PP à l'action de la décharge couronne, en mode statique.*

Dans une série d'expériences réalisées avec ce dispositif, la densité de courant à la surface de l'électrode mise à la terre a été obtenue par une sonde de courant ayant une surface de 2,32 mm². Cette sonde connectée à un nano-ampèremètre, était placée au milieu de l'électrode reliée à la terre et isolée de celle-ci, qui était à son tour reliée à la terre par le biais d'un micro-ampèremètre (Figure II.5). La cartographie de la distribution du courant a été réalisée en déplaçant la plaque avec des incréments de Δ = 4 mm dans les deux directions (x et y).

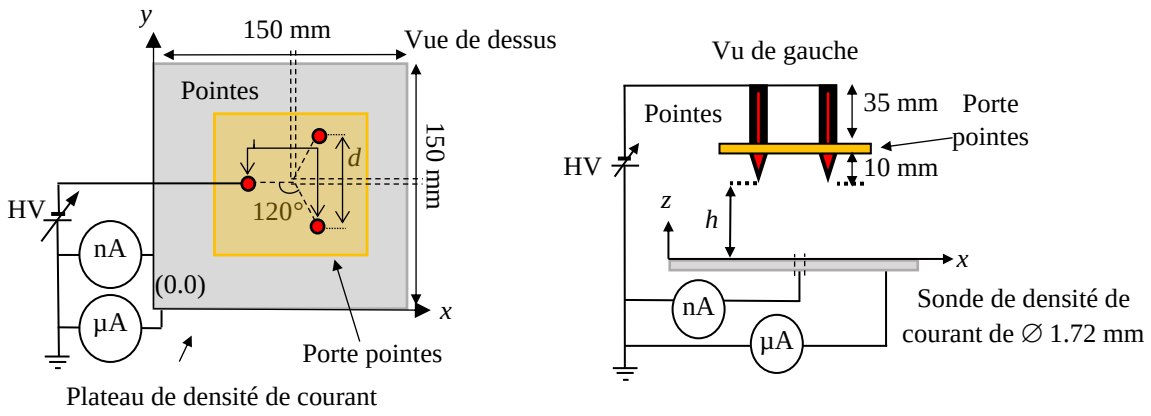


Figure II.5 : *Représentation schématique du banc expérimental pour la mesure de la densité de courant.*

Le banc expérimental nous a permis de cartographier la densité de courant sur une zone dont les dimensions ont été corrélées avec la distance entre les pointes. Dans le cas de d = 40 mm, la zone de mesure de la densité de courant avait les dimensions de 60 mm x 60 mm.

Afin d'estimer l'uniformité de la distribution de la charge électrostatique déposée sur l'échantillon de PP, le potentiel électrique de surface a été cartographié à l'aide d'une sonde électrostatique sans contact (TREC, modèle 6300-7) connectée à un voltmètre électrostatique (TREK, modèle 341B) qui est relié à un ordinateur portable équipé du logiciel LabVIEW. Le système a été automatisé pour acquérir le potentiel de surface de façon continue le long de l'axe y et par pas de 5 mm le long de l'axe x (Figure II.6).

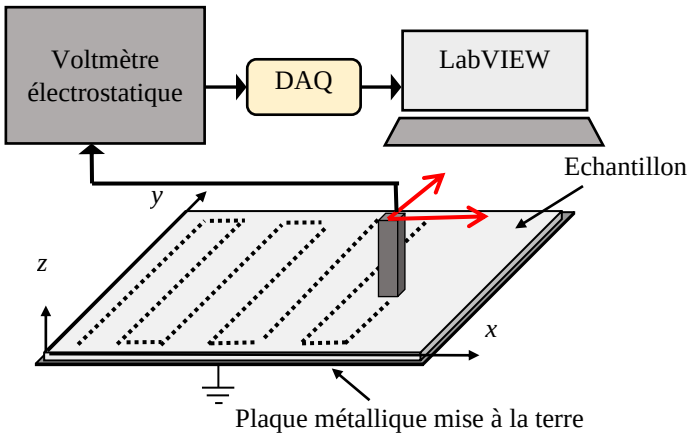


Figure II.6 : *Représentation schématique du banc expérimental pour la mesure du potentiel électrique de surface.*

Après le traitement par décharge couronne, l'échantillon de PP a été soigneusement placé sur le banc de caractérisation de la mouillabilité afin de quantifier le degré d'hydrophilie de sa surface. Une goutte d'eau a été déposée sur sa surface à l'aide d'une pipette de 1 ml puis la

caméra du microscope, connectée à un ordinateur, a enregistré l'image de la goutte et mesuré l'angle de contact, en utilisant un logiciel fourni par le fabricant (RS Microscope) (Figure II.7). Pour corréler et interpréter les résultats obtenus, un échantillon traité a été caractérisé chimiquement par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR-ATR) de type Miracle 10 (figure II.8).

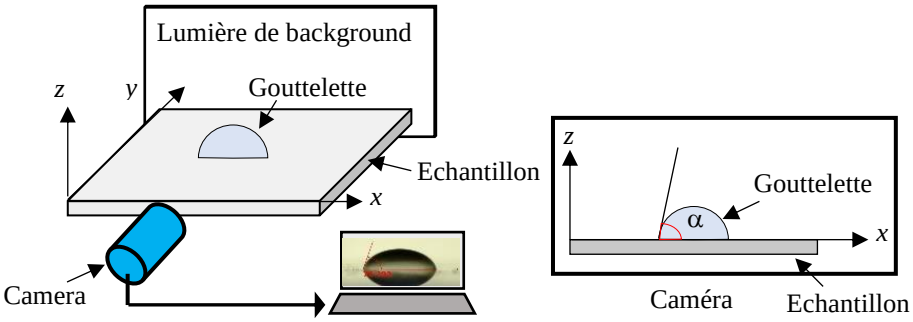


Figure II.7 : *Représentation schématique du banc expérimental pour la mesure de l'angle de contact.*

Figure II.8 : *Spectromètre FTIR-ATR Miracle 10.*

Figure II.8 *Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier par réflexion interne multiple*

La spectroscopie infrarouge est une technique d'analyse des matériaux en phase liquide, solide ou gazeuse, basée sur l'absorption spécifique des molécules dans le domaine infrarouge proche (12500 à 4000 cm^{-1}), moyen (4000 à 650 cm^{-1}) ou lointain (jusqu'à 10 cm^{-1}) [77]. La spectroscopie infrarouge connaît deux technologies [102] :

- la première technologie, qui est la plus ancienne, est la spectroscopie dispersive. Cette technique est lente (acquisition lente), manque de sensibilité. La résolution est difficile à maintenir et dépend de la longueur d'onde. La spectroscopie dispersive ne permet pas d'effectuer de couplage et supporte peu d'accessoires.

- la deuxième technologie est la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) dans laquelle les longueurs d'onde sont mesurées simultanément. Une opération de transformée

de Fourier permet ensuite l'obtention du spectre. Cette technique est très sensible, très rapide, compatible avec les couplages et offre une véritable gamme d'accessoires. La résolution est parfaitement reproductible et ne dépend plus de la longueur d'onde. Parmi les accessoires de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, l'ATR (Attenuated Total Reflectance) est l'un des plus utilisés. L'ATR est l'une des techniques qui a subi la plus forte évolution ces dernières années. Elle permet d'analyser spécifiquement la surface des matériaux. Le principe consiste à mettre en contact un cristal (ZnSe, Ge ou Si le plus souvent) avec l'échantillon à analyser. Le faisceau IR circule dans le cristal. Si l'indice de réfraction du cristal est supérieur à celui de l'échantillon, alors le faisceau subit des réflexions totales au-delà d'un certain angle d'incidence à l'interface échantillon-cristal (Figure II.9) [77].

En réalité une onde, dite onde évanescente, émerge du cristal et est absorbée par l'échantillon. Ce système permet d'amplifier l'intensité du signal transmis et d'obtenir des spectres d'absorption de la surface sur une profondeur qui dépend du cristal, de l'angle d'incidence et du matériau [77].

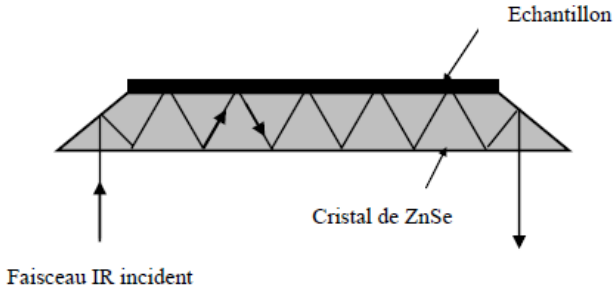


Figure II.9 : *Principe de l'ATR.*

La profondeur analysée par l'ATR est de l'ordre de 1 à 2 µm. Notons toutefois que l'ATR nécessite un contact intime entre le matériau analysé et le cristal. Des modifications de la rugosité et/ou de la structure du polymère induisent une variation de l'épaisseur analysée, donc de l'intensité du signal. C'est pourquoi la sensibilité des spectres obtenus par l'ATR est généralement plus faible que celle des spectres obtenus par transmission classique [77].

II.3. Chargement électrostatique

Les expériences ont été réalisées sur plusieurs matériaux : des plaques de polyvinylchloride (PVC) (190 mm × 170 mm, épaisseur z = 6 mm), des films de PP (160 mm × 50 mm, épaisseur z = 0,02 mm) et des particules de PP (dimensions moyennes 5,4 mm × 4,84 mm × 3,23 mm) (Figure II.10). La taille des particules est typique de celle des matériaux granulaires traités dans l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et

électroniques DEEE. Le choix de ces matériaux a été basé sur leur capacité à maintenir la charge de surface. Pour assurer la reproductibilité des résultats, avant chaque expérience, les charges électriques résiduelles à la surface des plaques de PVC ont été éliminées à l'aide d'une décharge corona AC générée par un neutralisateur commercial (ELCOWA, modèle SC04B) (Figure II.11). Le dessous des plaques de PVC a été recouvert d'une peinture conductrice de graphite, afin d'avoir un bon contact entre l'échantillon et l'électrode mise à la terre (Figure II.12).

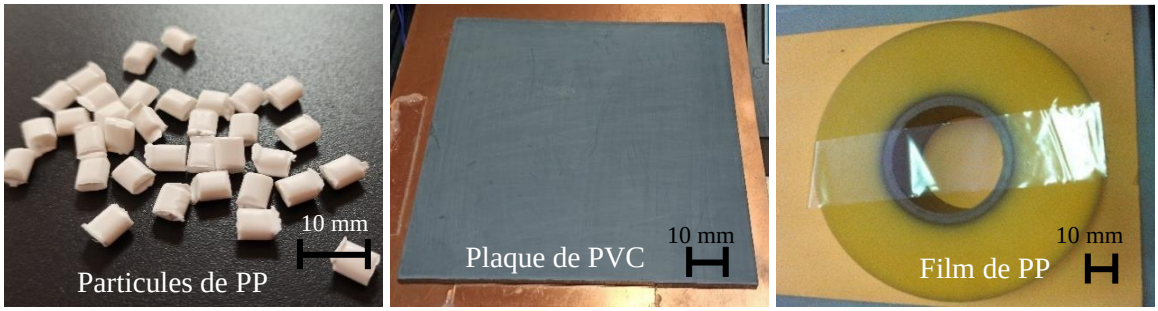


Figure II.10 : *Matériaux utilisés.*

Figure II.11 : *Neutralisateur de charge électrostatique.*

Figure II.12 *: Surface inferieure des plaques de PVC peintes avec du graphite.*

Trois modèles d'électrodes ont été utilisés : une électrode "à pointe unique" (Figure II.13), une électrode "à trois pointes" (Figure II.14) et une électrode "à sept pointes, deux rangées" (Figure II.15). Toutes les pointes en tungstène avaient un diamètre de 1 mm et un rayon de courbure de la pointe de 0,05 mm. Ces électrodes ont été alimentées par une source de tension continue négative régulée (ISEG, modèle T1 CP300n, 0 ~ -30 kV, 300 µA) (Figure II.16).

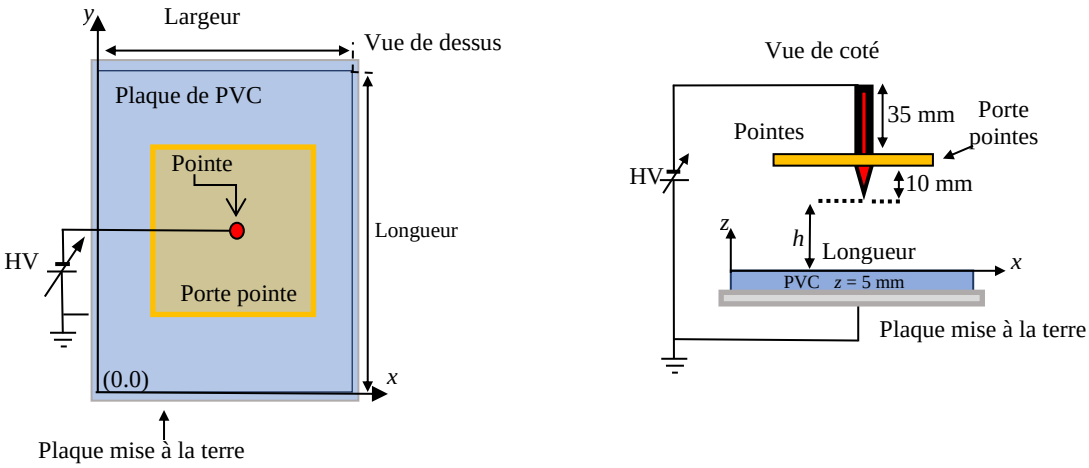


Figure II.13 : *Représentation schématique du banc expérimental de chargement électrique des plaques en polymère en utilisant la décharge couronne produite par une pointe.*

La configuration à trois pointes adoptée pour la présente étude est le dispositif le plus simple pour évaluer les facteurs pouvant influencer la non-uniformité de la charge électrique produite par l'association de plusieurs électrodes-pointes. Elle peut être considérée comme la cellule élémentaire d'une électrode à double rangée de pointes, comme l'électrode couronne à sept pointes, qui constitue une solution compacte pour la génération de décharges couronne dans des applications telles que la séparation électrostatique de mélanges granulaires.

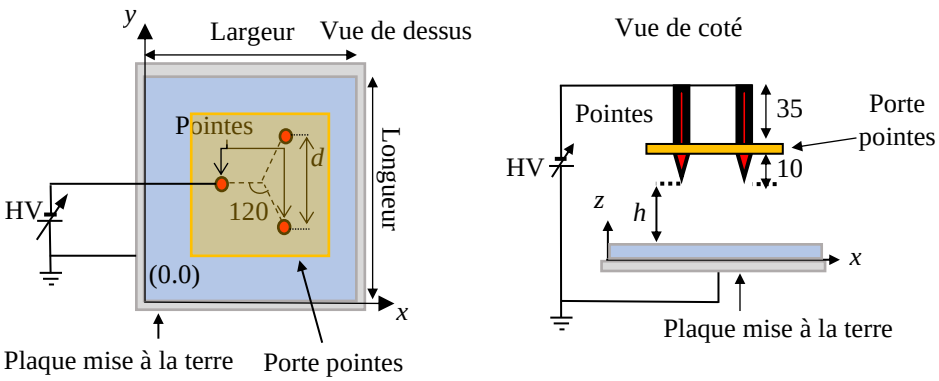


Figure II.14 : *Représentation schématique du banc expérimental de chargement électrique des plaques en polymère en utilisant la décharge couronne produite par trois pointes.*

Dans le cas de l'électrode "trois pointes", les éléments émetteurs de corona ont été placés aux extrémités d'un triangle équilatéral ; la distance entre eux peut varier entre 20 mm et 90 mm. Les éléments émetteurs de couronne de l'électrode "sept pointes, deux rangées" formaient les bords de 5 triangles équilatéraux, (I) à (V) ; cette électrode peut être considérée comme composée de 5 cellules "trois pointes".

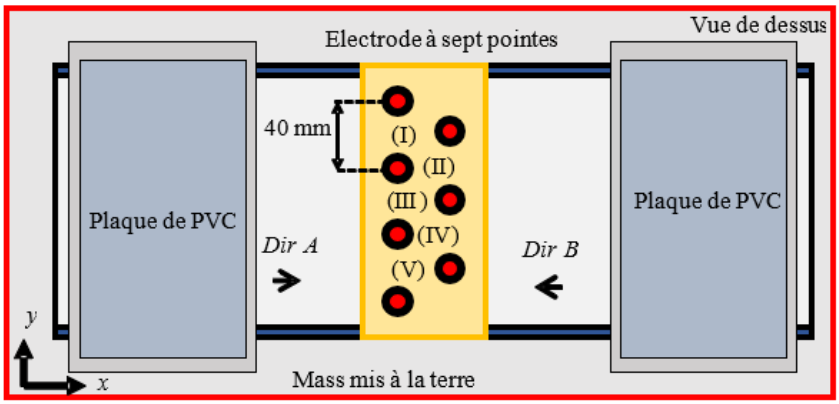


Figure II.15 : *Représentation schématique du banc expérimental à sept pointes*

Figure II.16 : *Alimentation haute tension de 0 à -30 kV.*

Pour estimer l'uniformité de la distribution de la charge électrique à la surface des échantillons, le potentiel électrique à leur surface a été cartographié à l'aide d'une sonde sans contact (TREK, modèle 6300-7) connectée à un voltmètre électrostatique de 20 kV (TREK, modèle 341B) (Figure II.6).

Dans cette partie, deux types d'expériences qualifiées de "statique" et de "dynamique", ont été réalisées.

L'autre approche développée pour l'étude "statique" consiste à placer l'électrode couronne "mono pointe" à différentes hauteurs *h* (allant de 20 mm à 40 mm) au-dessus des plaques de PVC, posées sur un support métallique mis à la terre (Figure II.13). Cette série d'expériences "statiques" a été réalisée pour différentes valeurs du niveau de haute tension appliquée (- 8 kV, - 10 kV et - 12 kV) et deux temps d'exposition (5 s et 10 s).

La procédure élaborée pour le chargement "dynamique" consiste à placer les films ou les particules de PP sur une plaque métallique mise à la terre qui est posée sur un convoyeur à bande métallique (Figure II.17), qui déplace les échantillons à une vitesse constante (1 m/min) sous la décharge couronne générée par l'électrode de type trois pointes. Afin de simuler les conditions de chargement des particules dans des conditions réelles, la vitesse linéaire du convoyeur a été variée dans des limites corrélées à la vitesse de rotation des électrodes tambour des séparateurs électrostatiques à effet couronne standard employés pour le recyclage du cuivre et des plastiques provenant des déchets de câbles électriques. Un nouvel échantillon de film est utilisé pour chaque expérience.

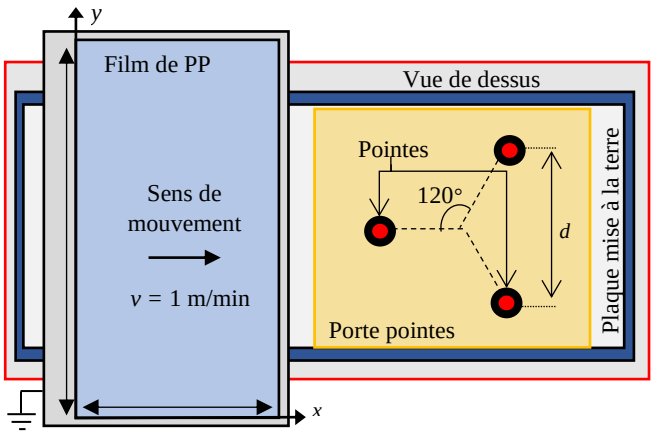


Figure II.17 : *Représentation schématique du banc de chargement dynamique des films de PP.*

Pour l'étude du chargement "dynamique" des particules de PP, chaque groupe de dix est pesé par une balance (résolution 0.1 g). Les particules sont ensuite alignées l'une après l'autre sur la bande transporteuse métallique mise à la terre (Figure II.18.a, b). L'échantillon de 10 particules est placé à une position précise p par rapport à la largeur du tapis convoyeur, qui les fait ensuite passer dans le champ électrique non uniforme pour finalement aboutir dans une cage de Faraday reliée à un électromètre (KEITHLEY 6514) (Figure II.18.b). En répétant les expériences tout en changeant l'emplacement des particules après chaque expérience de p = 0 à p = 67.5 mm (Figure II.18.c), nous avons obtenu un profil de charge sur la largeur de la bande transporteuse. Le temps d'exposition des particules à la décharge couronne a été ajusté en faisant varier la vitesse de la bande transporteuse v de 1 m/min à 3 m/min.

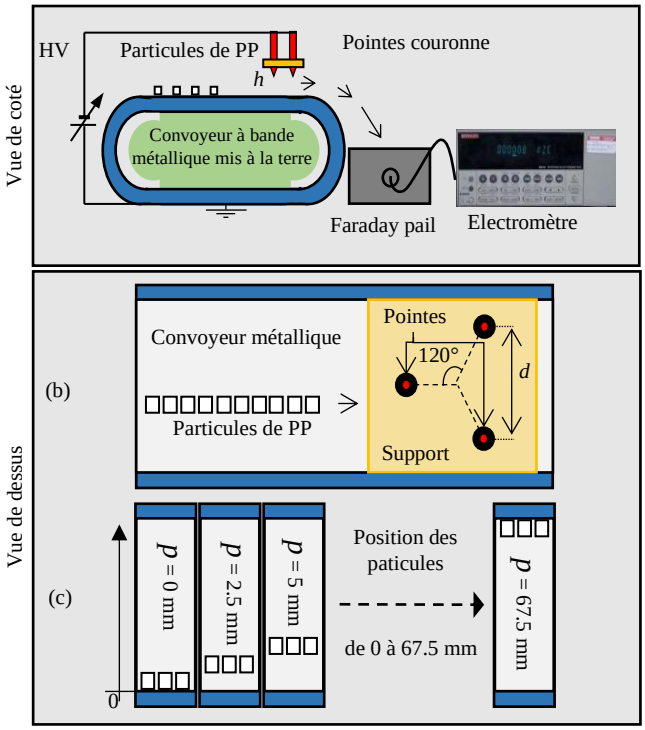


***Figure II .18** : Représentation schématique du banc de chargement dynamique des particules de PP.*

Pour assurer une bonne estimation de la charge déposée, chaque expérience a été répétée trois fois, et une moyenne a été calculée.

II.4. Uniformité de chargement électrostatique

Les expériences de chargement "dynamique" sur les plaques de PVC ont été réalisées avec les électrodes "trois pointes" et "sept-pointe, deux rangées". La plaque de PVC a été placée sur une plaque métallique mise à la terre située sur un convoyeur à bande métallique (Figure II.19.c), se déplaçant à une vitesse constante (1 m/min) sous l'électrode couronne dans les deux sens (de gauche à droite ou de droite à gauche).

Dans une première expérience avec l'électrode "trois pointes", seules les pointes numérotées (2) et (3) sur la Figure II.19.a ont été mises sous tension. Dans une deuxième expérience, la plaque de PVC s'est déplacée sous les trois pointes dans les deux sens. Pour obtenir une bonne estimation de la charge déposée, chaque expérience a été répétée trois fois.

La direction A, de gauche à droite, correspondait au cas où la plaque de PVC traversait la cellule "trois pointes" en se déplaçant d'abord sous les pointes (2) et (3), puis sous la pointe (1). Ceci a permis d'étudier l'influence des charges déposées par la pointe (1) sur la distribution des charges déposées par (2) et (3). Lorsque la plaque de PVC se déplaçait dans la direction B, de

droite à gauche, elle était d'abord exposée à la décharge générée par la pointe (1), puis aux décharges produites par les pointes (2) et (3).

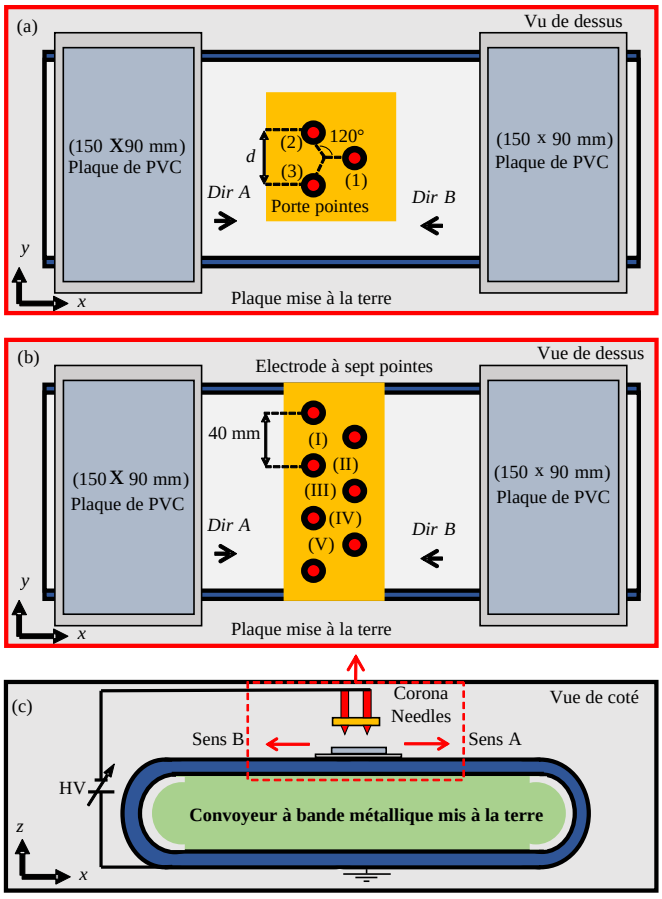


Figure II.19 : *Représentation schématique du banc de chargement dynamique des plaques de PVC.*

L'étude de l'uniformité de la décharge électrique s'est concentrée sur la zone pouvant présenter un intérêt pour les applications de charge de particules. Dans le cas d'une seule pointe, en raison de la symétrie cylindrique de la configuration des électrodes, la zone où le potentiel électrique généré par une seule pointe dépasse 80 % de la valeur maximale enregistrée à la surface de l'échantillon est définie par un cercle de rayon C_m. La valeur de C_m dépend de la tension appliquée V et de la hauteur h comme le montre la Figure II.20.a. Le centre de cette zone circulaire se trouve au point qui est la projection orthogonale de la pointe de la pointe sur la surface de l'échantillon. Avec l'une quelconque des deux pointes séparées par une distance d, la pointe de la première aiguille est située à une distance $dsin\,\pi/3$ de la ligne définie par les pointes des deux autres aiguilles. La zone d'intérêt pour notre étude était la bande limitée par deux lignes parallèles à l'axe transversal de l'échantillon et distantes de (Figure II.20.b) :

$$d_m = d\sin\pi/3 + 2C_m \qquad \text{(II.1)}$$

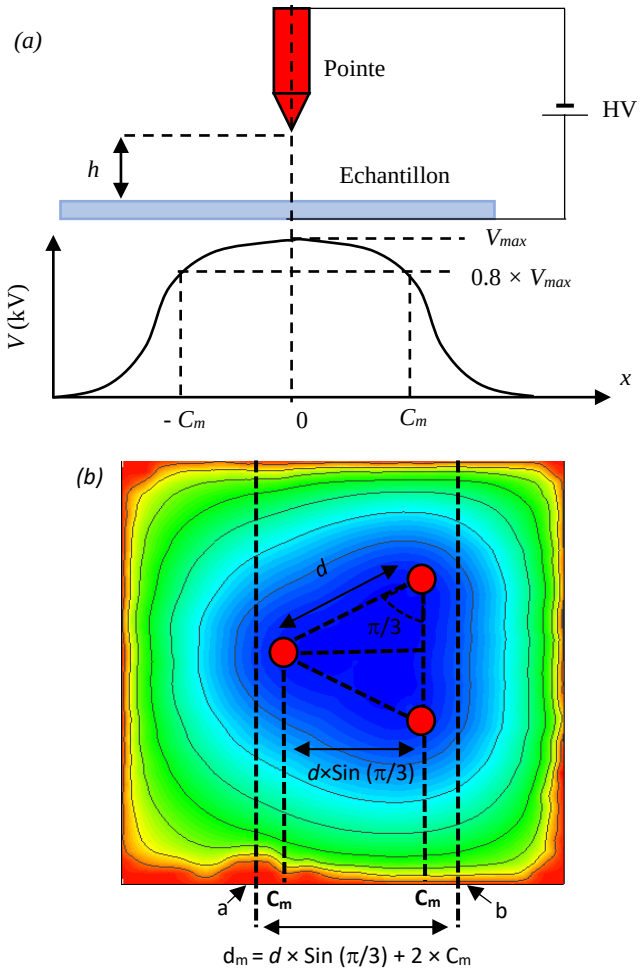


Figure II.20 : *Schéma explicatif pour les méthodes d'obtention de C_m et d_m.*

En plus des cartes de potentiel, les profils des potentiels électriques des surfaces ont été représentés, en utilisant l'une des méthodes suivantes :

(I) représenter les valeurs enregistrées le long de lignes parallèles à l'axe transversal central des échantillons (direction verticale sur la Figure II.21) ;

(II) représenter la moyenne V_{y_j} des valeurs enregistrées à chaque point d'ordonnées y_j, où y_j varie de 0 à 190 mm avec un pas Δ_y égal à 5 mm, et Δ_x est généré automatiquement par la vitesse du système d'acquisition de données (Figure II.22).

$$V_{y_j} = \frac{\sum_{i=0}^{(b-a)/\Delta_x} V_{(a+i\times\Delta_x, y_j)}}{\frac{(b-a)}{\Delta_x}} \qquad \text{(II.2)}$$

L'intérêt de calculer les valeurs moyennes V_{y_j} du potentiel mesuré en régime "statique" dans la zone d_m réside dans le fait qu'elles permettent, par exemple, d'anticiper le résultat de la

charge corona de matériaux granulaires lorsqu'ils sont transférés à travers la décharge couronne générée par de telles configurations d'électrodes.

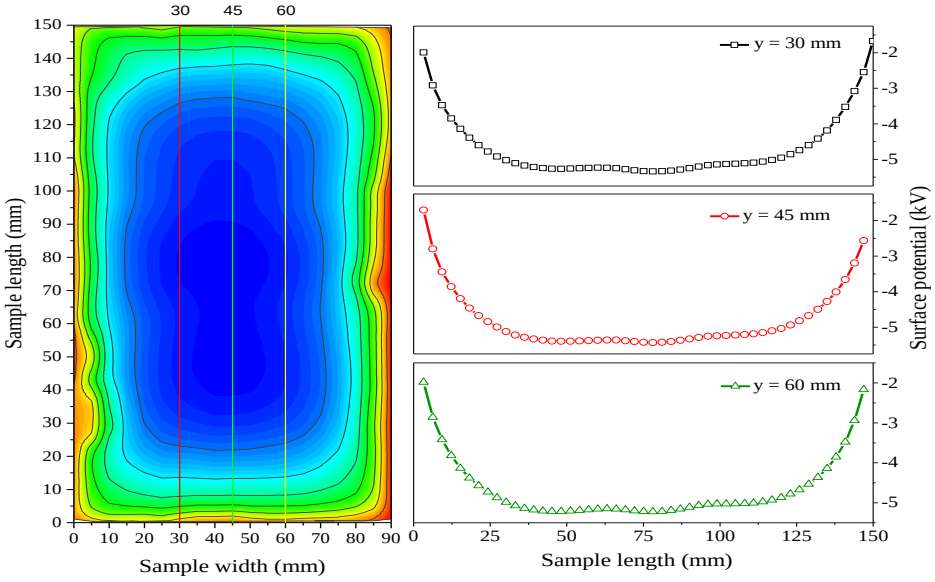


Figure II.21 : *Schéma représentatif de la méthode (I) de la génération des profils de potentiel de surface.*

Les taux d'uniformité de la charge déposée sur les plaques de PVC ont été étudiés en modifiant les paramètres géométriques des différentes électrodes couronne présentées dans cette partie. Pour l'électrode à une pointe, le taux d'uniformité a été étudié en faisant varier la hauteur de la pointe et le niveau de la tension appliquée. L'uniformité obtenue par l'électrode à deux et trois pointes a été obtenue en faisant varier le niveau de la haute tension appliquée et la distance entre les pointes, tout en fixant la hauteur à h = 30 mm. Les taux d'uniformité de l'électrode couronne à rangées multiples ont été obtenus en faisant varier le niveau de la haute tension appliquée et la hauteur des pointes par rapport à la surface de la plaque de PVC.

L'uniformité de chargement par décharge couronne est calculée en divisant la différence entre la valeur maximale et minimale du potentiel électrique mesuré dans la zone de largeur d entre les pointes latérales, par la valeur maximale absolue mesurée dans la même zone. Ainsi, la non-uniformité du potentiel électrique de surface est exprimée par :

$$\left(1 - (\Delta V / |V_{max}|)\right).100\ [\%] \qquad \text{(II.3)}$$

Dans le cas de l'électrode à une pointe, en régime "statique", ΔV est la différence entre le potentiel maximum V_{max} et le potentiel minimum V_{min} mesurés dans une zone circulaire de rayon $h/2$ et ayant pour centre le point où l'axe de la pointe traverse la surface de l'échantillon. Dans le cas de l'électrode à trois pointes, en régime "dynamique", ΔV est la différence entre les

valeurs maximum V_{max} et minimum V_{min} du potentiel électrique mesuré dans la zone de largeur d entre les pointes latérales. De même, l'uniformité de la charge par rapport à la masse des particules peut être calculée avec :

$$\left(1 - (\Delta(C/m)/|(C/m)_{max}|)\right).100\ [\%] \qquad \text{(II.4)}$$

où $\Delta(C/m)$ est la différence entre la charge massique maximale $(C/m)_{max}$ et minimale $(C/m)_{min}$ mesurée dans la zone entre les pointes latérales et $(C/m)_{max}$ est la valeur du rapport maximal de charge massique enregistré dans cette zone.

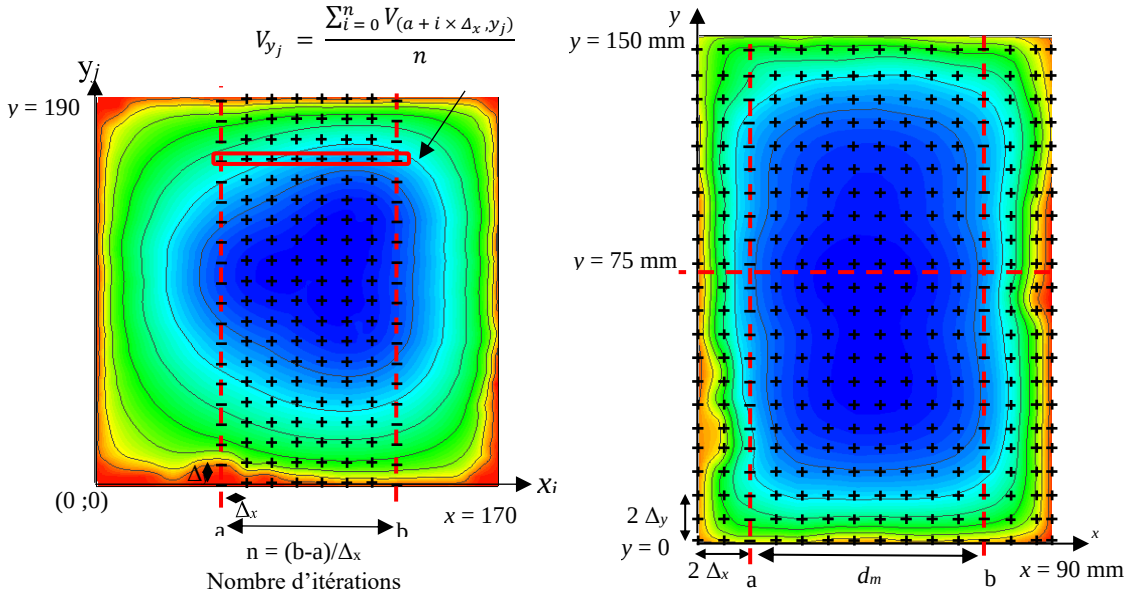


Figure II.22 : *Schéma représentatif de la méthode (II) de la génération de profiles de potentiel de surface.*

Le potentiel de surface et la quantité de charge déposée sont deux quantités liées par :

$$V = \frac{e}{\varepsilon_r . \varepsilon_o} . \sigma \qquad \text{(II.5)}$$

où σ est la densité de charge surfacique, e est l'épaisseur du diélectrique, ε_r est la permittivité relative spécifique à chaque matériau (ε_r (PVC) = 4 et ε_r (PP) = 2.2) et ε_o est la permittivité du vide qui est égale à $8.85418782.10^{-12}$ F/m.

II.5. Conclusions

Dans le deuxième chapitre l'ensemble de dispositifs expérimentaux mis en œuvre pour le chargement et le traitement des matériaux diélectriques ont été présentés de manière synthétique.

1) La construction du dispositif expérimental permettra l'étude de plusieurs configurations multi-pointes utilisables pour déposer des charges sur les surfaces de différents matériaux diélectriques, laminaires ou granulaires.

2) La caractérisation des effets de la décharge couronne sera faite sur des bancs expérimentaux instrumentalisés pour la mesure de la densité de courant, du potentiel électrique de surface et de l'angle de contact, ainsi qu'en utilisant un spectroscope à réflexion interne multiple FTIR-ATR.

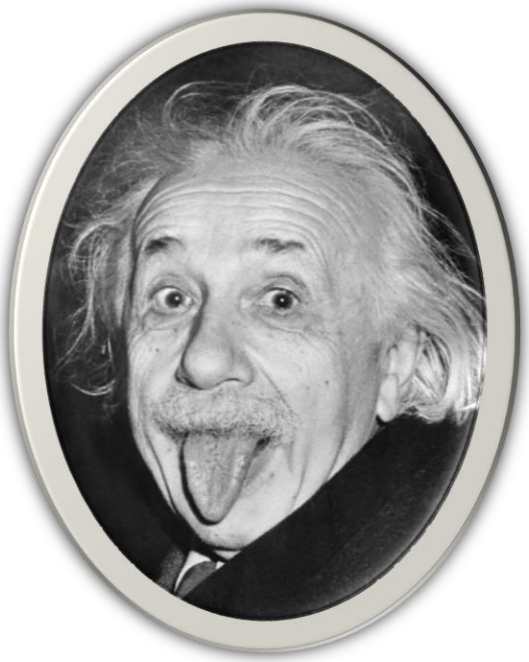
3) Le chargement électrique des films, des plaques et des particules de PP se fera en utilisant la décharge couronne produite par une électrode couronne multi-pointes, en modes "statique" et "dynamique".

4) L'uniformité du chargement sera évaluée par la cartographie du potentiel électrique à la surface des plaques et des films en polymère, à l'aide d'un voltmètre électrostatique.

5) La mesure directe de la charge acquise par des particules de PP après leur passage sous le système d'électrodes à pointes sera réalisé en utilisant une cage de Faraday connectée à un électromètre.

Chapitre III

Caractérisation électrique de la décharge couronne multi-pointes dans l'air : Application au traitement de surface de plaques isolantes



« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Si la pratique et la théorie sont réunies, rien ne fonctionne et on ne sait pas pourquoi »

- Albert EINSTEIN (1879-1955)

Chapitre III : Caractérisation électrique de la décharge couronne multi-pointes dans l'air : Application au traitement de surface de plaques isolantes

Aujourd'hui, nombreux travaux théoriques et expérimentaux sont menés principalement sur la caractérisation de la décharge couronne en raison de sa grande utilité dans divers domaines d'applications commerciales et industrielles. La décharge couronne est largement utilisée non seulement comme une technique de chargement électrostatique [9], [16], [29]–[31], mais aussi comme une méthode pour modifier la structure chimique de surface des matériaux diélectriques [8], [9], [32]. Cependant, en raison des nombreux facteurs d'influence et de la difficulté d'observation directe, la physique sous-jacente de la décharge couronne n'est toujours pas claire et nécessite des recherches plus approfondies. Les électrodes couronne sont généralement composées de pointes, de fils ou de lames connectés à une alimentation haute tension [33]–[35]. Les charges électriques déposées à la surface des matériaux isolants sont un indice important de la surface traitée et sont en corrélation directe avec la configuration des électrodes couronne [24], [25], [36]. Les modifications de surfaces dépendent de nombreux paramètres tels que la nature, la taille et l'état de surface des matériaux polymères exposés, le niveau et la polarité de la haute tension appliquée, ainsi que le temps d'exposition à la décharge couronne [9], [25]. En effet, l'interaction de la décharge couronne avec la surface des polymères modifie leurs propriétés physiques et chimiques. Ces modifications conduisent à l'amélioration des propriétés de mouillabilité et d'adhérence et au changement de la rugosité de surface ainsi que d'autres caractéristiques technologiques importantes, dues à l'introduction de groupes polaires par la création de radicaux libres. La génération de ces radicaux libres est le début du processus des réactions qui se produisent à la surface du polymère [6], [9], [51].

L'objectif du travail qui sera présenté dans ce chapitre est double :

- Etudier l'influence des paramètres opératoires sur les caractéristiques courant-tension de la décharge couronne appliquée sur des films minces de PP. Les expériences ont été réalisées pour caractériser la décharge couronne produite par une électrode multi-pointes. Les caractéristiques courant-tension mesurées dans l'air ambiant sont particulièrement analysées et discutées.

- Etudier l'effet de la décharge couronne sur la modification des caractéristiques chimiques de surface des plaques de PP. L'uniformité des modifications de surface a été comparée à celle des charges déposées sur les échantillons de PP. Les expériences ont été réalisées en utilisant une géométrie d'électrodes couronne dont l'aptitude d'assurer une bonne uniformité du dépôt de charge électrique sera démontrée dans le chapitre IV.

III.1. Caractérisation électrique de la décharge couronne

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de l'influence de la présence de l'échantillon, du nombre de pointes et de la distance inter-électrodes sur les caractéristiques courant-tension I(V) d'un système d'électrodes couronne multi-pointes.

III.1.1. Procédure expérimentale

Cette partie de l'étude a été effectuée sur des films minces de polypropylène (PP) d'épaisseur proche de 20 µm et de dimension de 30 mm x 50 mm. Pour chaque expérience nous avons utilisé un nouvel échantillon afin d'éviter qu'une mesure influe sur l'autre. Les expériences ont été réalisées dans une enceinte climatique à une température T de 27 ± 1 °C et une humidité relative RH de 22 ± 2 %, dont les valeurs ont été contrôlées en permanence à l'aide d'un hygromètre Testo 635.

Un système d'électrodes couronne multi-pointes (Figure II.1) est utilisé pour déposer des charges sur des surfaces de films de PP. La décharge couronne négative est obtenue à l'aide d'un générateur de courant continu à haute tension variable jusqu'à - 10 kV. Des pointes métalliques de tungstène de rayon de courbure de 50 µm (angle de pointe de 20°) sont utilisées comme électrodes actives pour générer la décharge couronne. Pour la mesure du courant de charge, la plaque est mise à la terre via une résistance non inductive de 1 MΩ. La tension aux bornes de cette résistance est mesurée à l'aide d'un voltmètre et les valeurs de courant sont obtenues en appliquant la loi d'Ohm. La tension a été augmentée progressivement par paliers de 1 kV. La valeur du courant enregistrée pour une tension donnée est celle qui avait été obtenue après la stabilisation de la décharge couronne. L'espacement entre les électrodes a été ajusté de 2 mm à 30 mm en utilisant une platine micrométrique.

Les résultats obtenus à partir de la caractéristique courant-tension de la décharge couronne pour différentes distances inter-électrodes sont analysés en utilisant les équations de Townsend et de Ferreira et *al*. afin de déterminer la formule appropriée du courant de charge

en fonction de la tension appliquée. L'ajustement linéaire a été fait par la méthode des moindres carrés.

III.1.2. Résultats et discussion

La forme de la caractéristique courant-tension de la décharge couronne donne de nombreuses informations sur la mobilité apparente des ions et les mécanismes de transport de charges [103]–[105]. Il est bien connu que le courant de charge augmente avec la croissance de la tension appliquée à partir de la valeur de seuil de claquage de l'air (tension de seuil d'apparition de couronne) [26], [104]–[106]. Dans cette étude, des films de PP qui réduisent normalement la mobilité apparente et limitent le transport de charges entre les électrodes ont été utilisés. Pour vérifier les résultats trouvés dans la littérature, une expérience comparative des caractéristiques courant-tension a été réalisée en absence et en présence de l'échantillon de PP (Figure III.1).

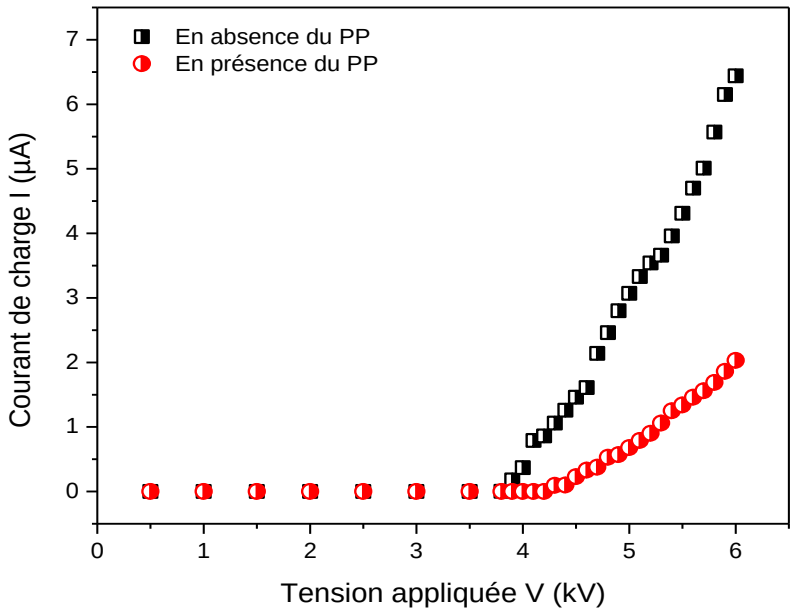


Figure III.1 : *Caractéristiques courant-tension en absence et en présence du PP.*

Comme prévu, le courant de charge augmente progressivement avec l'augmentation de la tension de pointe appliquée à partir de la valeur de la tension de seuil de l'apparition de couronne. De plus, la tension d'apparition de l'effet couronne est plus élevée en présence du film de PP entre les électrodes, tandis que la pente de la caractéristique courant-tension est plus élevée en absence du film de PP. Pour une tension de pointe appliquée égale à 6 kV, le courant de charge *I* est égal à 6,5 µA en absence d'un échantillon, par contre, le courant de charge *I* est égal à 2 µA en présence d'un échantillon car le PP représente une très grande résistance en série

avec l'espace d'air entre les électrodes et a comme conséquence une réduction du courant de charge. Des chercheurs ont démontré que les valeurs de la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne et de la pente de la caractéristique courant-tension dépendent de l'épaisseur et de la nature du matériau placé entre les électrodes [26], [107].

En présence du film de PP entre les électrodes, nous avons étudié les effets du nombre de pointes et de la distance inter-électrodes pointes-plaque sur les caractéristiques courant-tension. La Figure III.2 représente les caractéristiques courant-tension d'une décharge couronne négative à courant continu enregistrées en utilisant une, deux et trois pointes. La distance inter-électrode *h* et l'espacement entre les pointes *d* sont maintenus constants durant cette expérience (*h* = 10 mm et *d* = 5 mm).

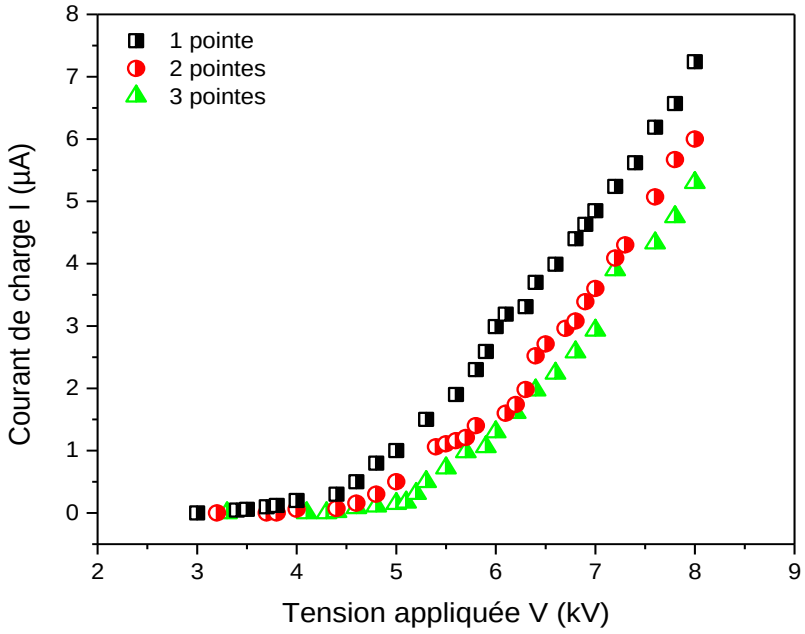


Figure III.2 : *Caractéristiques courant-tension de la décharge couronne pour une, deux et trois pointes.*

Nous remarquons que les évolutions des trois caractéristiques représentées sur la Figure III.2 ont presque les mêmes allures. Le courant de charge augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. La seule différence observée est la valeur de la tension d'apparition de l'effet couronne qui augmente avec le nombre de pointes. Ce phénomène a été discuté dans [108] et expliqué par l'hypothèse de l'ionisation par collision près de la pointe de l'aiguille qui nécessite une certaine valeur de champ. Pour une seule pointe, cette condition est atteinte lorsque la tension appliquée est égale à la tension de seuil caractérisant le gaz entre les électrodes. Si une autre pointe est placée à proximité de la première, le début de l'ionisation nécessite une tension appliquée plus élevée que pour une seule pointe [109].

A partir de la caractéristique courant-tension I(V), le courant continu qui traverse l'espace inter-électrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée. Cette caractéristique $I(V)$ peut être délivrée de manière analytique et elle est exprimée par deux formules empiriques :

- Une formule empirique simple, à savoir la relation de Townsend [105] a été introduite pour les caractéristiques courant-tension entre cylindres coaxiaux. Henson [110] a découvert que la relation de Townsend pouvait également être utilisée pour un système pointe-plan. Cette formule est donnée par :

$$I = AV(V - V_o) \tag{III.1}$$

où I est le courant de charge couronne, V est la tension appliquée, V_o est la tension de seuil d'apparition de l'effet couronne et A est un paramètre dimensionnel qui dépend de la permittivité de l'air, de la mobilité des ions, du rayon de la plaque mise à la terre et du rayon de la pointe de l'aiguille. Les paramètres A et V_o sont déterminés expérimentalement [111].

- Un autre type de relation empirique (formule quadratique) mentionné par Ferreira et *al*. [106] est la suivante :

$$I = K(V - V_o)^2 \tag{III.2}$$

la constante K étant un paramètre dimensionnel similaire à A, dépendant de la configuration des électrodes, de la tension continue ou alternative appliquée à un système d'électrodes, de la mobilité des porteurs de charges, de la température, de la pression et de l'humidité.

Une autre formule empirique courant-tension pour un système de décharge couronne pointe-plan a été étudiée par Meng et *al*. [112], mais elle n'a pas été utilisée dans ce travail. La tension de seuil d'apparition de l'effet couronne peut être déterminée par la méthode théorique, en traçant la caractéristique $I/V = f(V)$, qui est tirée de la formule de Townsend [105] ou $sqrt(I) = f(V)$ qui est tirée de la formule de Ferreira et *al*. [106].

Les expériences ci-dessous ont été réalisées en plaçant deux pointes comme électrode active. La distance entre les pointes *d* est maintenue constante à 8 mm.

La Figure III.3 montre l'effet de la distance inter-électrodes *h* sur la caractéristique *I*(*V*) de la décharge couronne. La distance inter-électrodes *h* est variée entre 2 et 30 mm.

La Figure III.4 montre les caractéristiques courant-tension pour de petites distances inter-électrodes *h* de 2, 4, 6 et 8 mm. Ces résultats sont représentés de trois manières différentes : I versus V représente le graphique relatif à la caractéristique courant-tension (Figure III.4.a), I/V

versus V représente le graphique utilisant l'équation (III.1) (Figure III.4.b) et $I^{1/2}$ versus V représente le graphique utilisant l'équation (III.2), ajustée linéairement par la méthode des moindres carrés (Figure III.4.c).

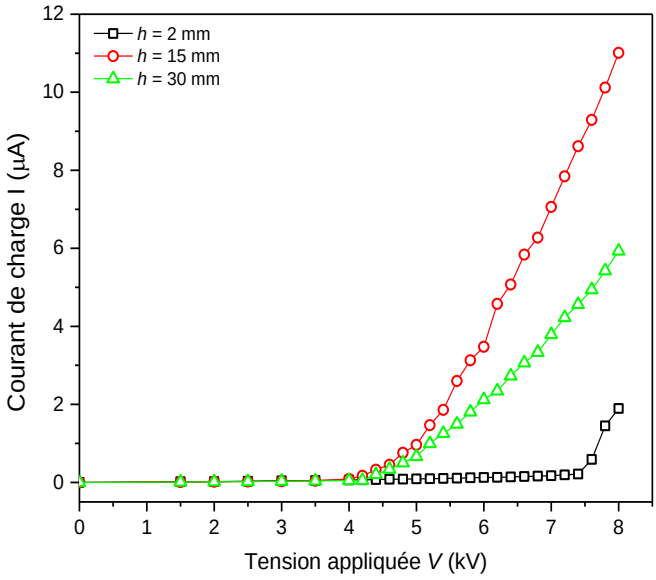


Figure III.3 : *Caractéristiques courant-tension en fonction de la distance inter-électrodes.*

Pour des distances inférieures à 8 mm, les résultats de la Figure III.4.a montrent que le courant de charge augmente avec l'augmentation de la tension appliquée et que la tension d'apparition de l'effet couronne ainsi que la pente de la caractéristique $I(V)$ diminuent avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. C'est différent de ce qui est rapporté dans [106], [112] où la tension d'apparition de l'effet couronne n'est plus modifiée et la pente de la caractéristique $I(V)$ diminue. Ce décalage de la tension d'apparition de l'effet couronne est dû à la présence d'un échantillon de PP à haute résistance.

La dépendance de I/V par rapport à V montre une légère courbure vers le bas comme le montre la Figure. III.4.b (forme concave), tandis que celle de $I^{1/2}$ versus V montre un comportement linéaire (Figure III.4.c). La tension de seuil d'apparition de l'effet couronne se déplace vers les faibles valeurs lorsque la distance inter-électrodes augmente.

La Figure III.5 montre les caractéristiques courant-tension pour des distances inter-électrodes de 8, 10, 12 et 15 mm. Pour des distances inter-électrodes comprises entre 8 et 15 mm, nous pouvons remarquer que la tension d'apparition de l'effet couronne n'est plus modifiée et que les caractéristiques courant-tension ont les mêmes pentes. Ces résultats sont dus au fait que le courant maximal est atteint.

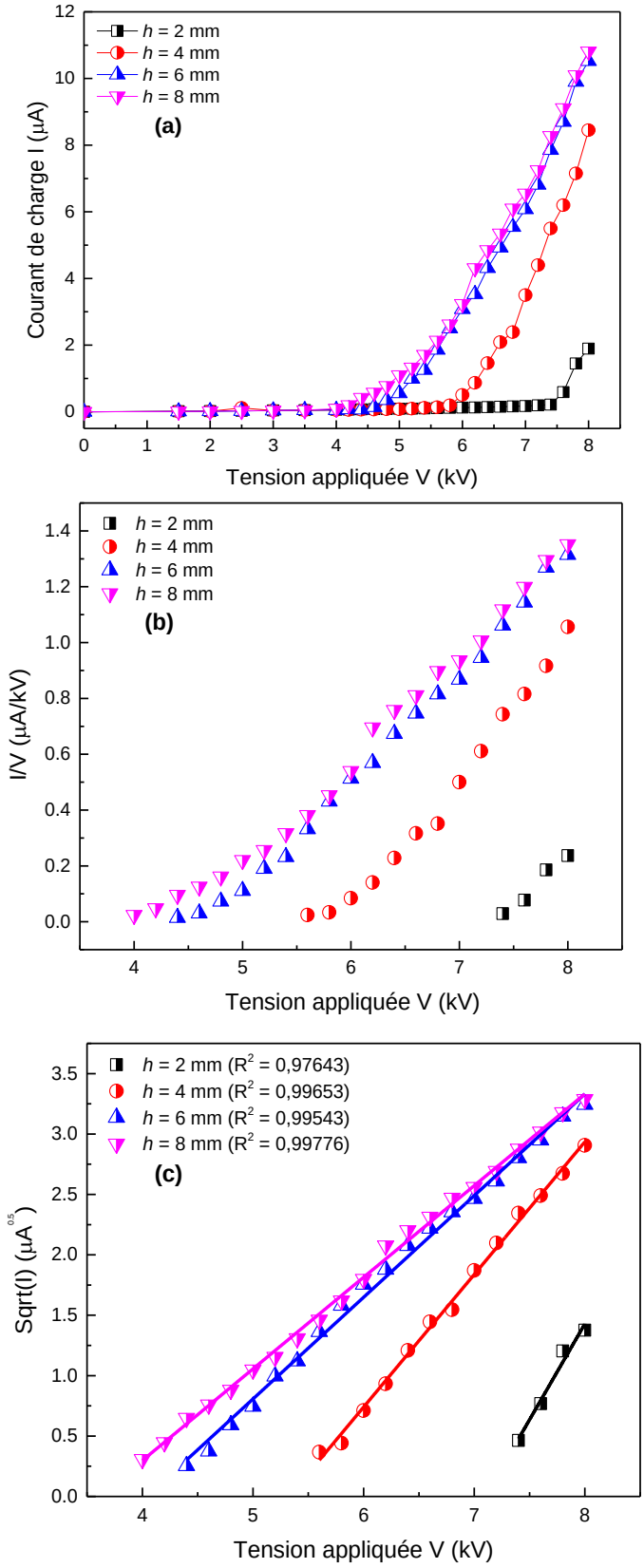


Figure III.4 : *Caractéristiques courant-tension pour h = 2, 4, 6 et 8 mm, (a) : I versus V, (b) : I/V versus V, (c) : $I^{1/2}$ versus V.*

Les résultats des Figures III.4 et III.5 utilisant les équations (III.1) et (III.2) montrent que $I^{1/2}$ versus V exprime une meilleure linéarité que I/V versus V dans les deux domaines. La tension d'apparition de l'effet couronne se déplace vers les faibles valeurs lorsque la distance inter-électrodes augmente dans le premier cas (Figure III. 4) et reste presque constante dans le second cas (Figure III.5).

La même expérience a été réalisée pour des distances inter-électrodes supérieures à 15 mm. La Figure III.6 montre les caractéristiques courant-tension pour des distances inter-électrodes D de 18, 22, 26 et 30 mm. Nous remarquons que le courant de charge décroit avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. Nous pouvons également remarquer que la tension d'apparition de l'effet couronne n'est pas modifiée et que la pente du caractéristique courant-tension diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. Ces comportements sont dus au faible taux d'ionisation et à la réduction de la distribution de la charge d'espace dans la zone de dérive.

Ces expériences montrent que I/V versus V de l'équation (III.1) exprime une meilleure linéarité que $I^{1/2}$ versus V de l'équation (III.2). Des auteurs [106], [111], [112] ont rapporté que pour les décharges couronnes négatives, l'équation (III.2) s'exprime mieux dans toutes les plages inter-électrodes que l'équation (III.1), qui n'est valable que pour des distances inter-électrodes supérieures à 15 mm.

Trois phases distinctes ont été mises en évidence dans l'étude de l'effet de la distance inter-électrodes sur le comportement du courant de charge (Figure III.3). Dans la première phase, le courant de charge augmente avec la distance inter-électrodes (phase de croissance du courant de charge). La deuxième phase est la phase de stabilisation du courant de charge. La troisième phase apparaît après une distance inter-électrode d'environ 15 mm où le courant diminue avec la distance (phase de décroissance du courant de charge).

Les résultats de cette étude sont en bon accord avec ceux de Ferreira et *al*. (équation III.2) pour les petites distances inter-électrodes et de Townsend (équation III.1) pour les grandes distances inter-électrodes supérieures à 15 mm. Par conséquent, l'évolution de la caractéristique I(V) est analysée en utilisant l'équation (III.2) de Ferreira et *al*. (Figures III.4.c et III.5.c) et l'équation (III.1) de Townsend (Figure III.6.b). Les paramètres A, K et V_o sont ajustés après plusieurs itérations de manière à obtenir la meilleure régression sur l'évolution de la caractéristique courant-tension.

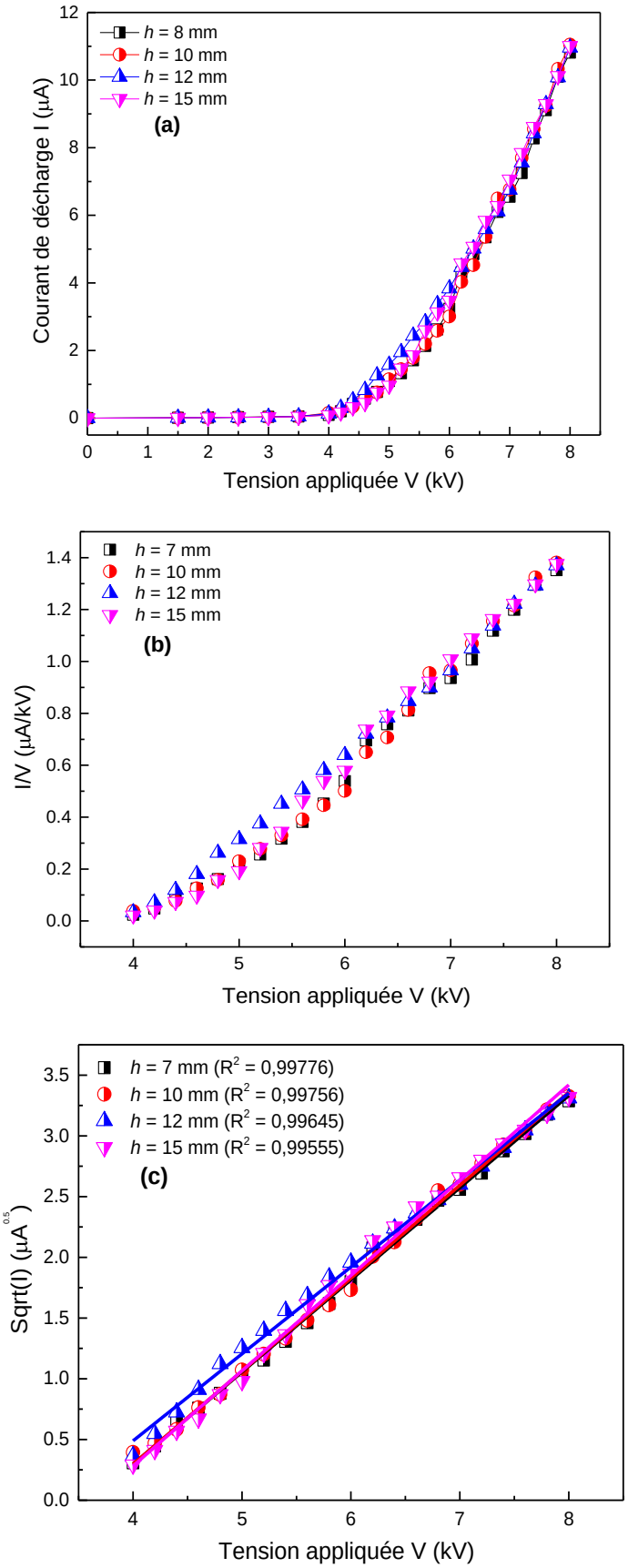


Figure III.5 : *Caractéristiques courant-tension pour h = 8, 10, 12 et 15 mm, (a) : I versus V, (b) : I/V versus V, (c) : $I^{1/2}$ versus V.*

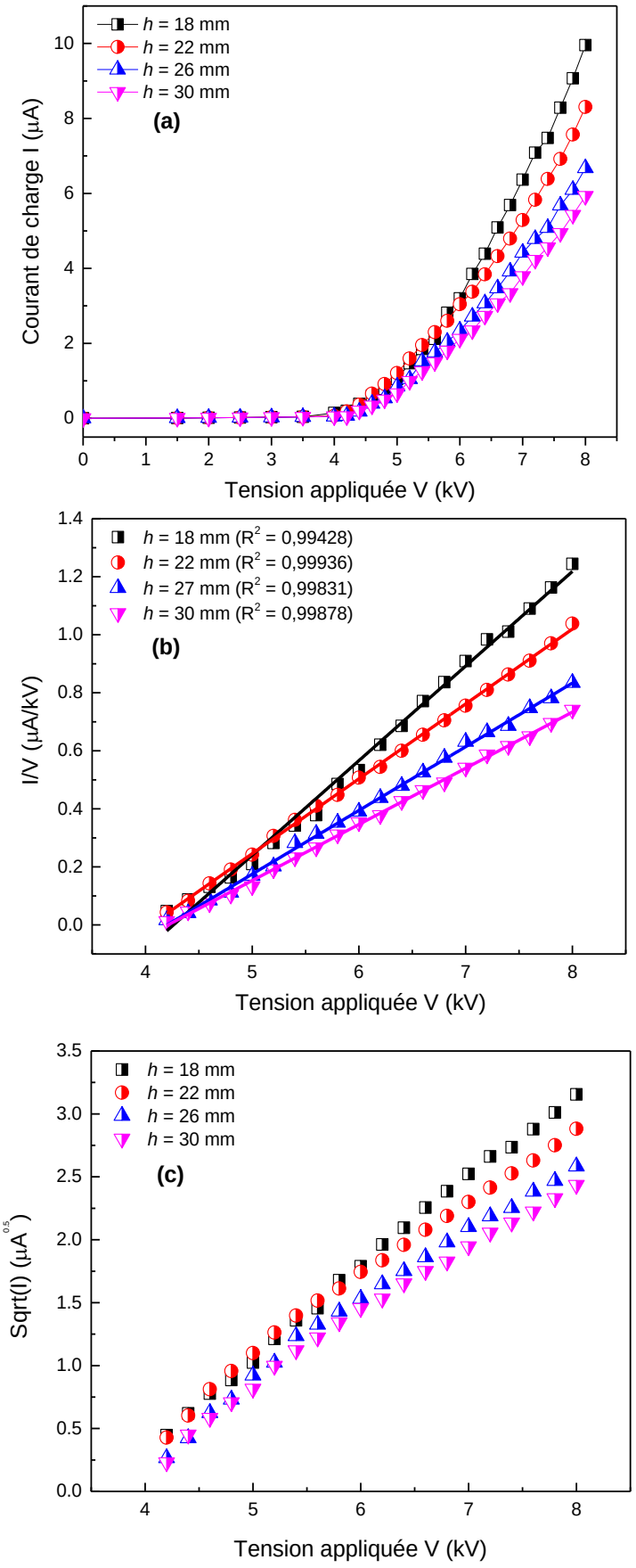


Figure III.6 : *Caractéristiques courant-tension pour h = 18, 22, 26 et 30 mm, (a) : I versus V, (b) : I/V versus V, (c) : $I^{1/2}$ versus V.*

Les courbes de variation du rapport $I^{1/2}$ (Figures III.4.c et III.5.c) et I/V (Figure III.6.b) en fonction de la tension appliquée V pour différentes distances inter-électrodes sont très proches de droites. L'ajustement linéaire par la méthode des moindres carrés effectué par le logiciel Origine 8.0 de ces courbes nous permet de déterminer les paramètres des deux équations (III.1) et (III.2) qui sont la tension de seuil V_o et les constantes A et K.

La Figure III.7 montre l'évolution de la tension d'apparition de l'effet couronne en fonction de la distance inter-électrodes. Les résultats sont obtenus en ajustant les données expérimentales avec les équations précédentes (équations (III.1) et (III.2)). Nous pouvons remarquer que la tension d'apparition de l'effet couronne décroît rapidement à partir des courtes distances inter-électrodes de 7,1 à 3,6 kV lorsque la distance varie de 2 à 8 mm (phase de croissance du courant). Sa valeur se stabilise ensuite autour de 3,6 kV pour des distances comprises entre 8 et 15 mm (phase de stabilisation du courant) et 4,2 kV pour des distances entre 18 et 30 mm (phase de décroissance du courant).

Les constantes de proportionnalités A et K ont été obtenues expérimentalement à partir des équations (III.1) et (III.2), respectivement. Les deux paramètres sont obtenus par l'ajustement par la méthode des moindres carrés. La Figure III.8 montre la variation des constantes de proportionnalité avec la distance inter-électrodes. Ces constantes sont proportionnelles à la mobilité apparente des porteurs de charges. Il semble que la mobilité apparente diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes. La constante *K* diminue significativement de 2,5 à 0,58 µA/kV² lorsque la distance augmente de 2 à 8 mm, puis se stabilise à une valeur de 0,58 µA/kV² jusqu'à une distance de 15 mm. Ensuite, la constante *A* diminue légèrement de 0,33 à 0,19 µA/kV² pour des distances supérieures à 15 mm.

A travers ces résultats, nous pouvons conclure que dans la phase de croissance du courant de charge (h = 2, 4, 6 et 8 mm), la tension d'apparition de l'effet couronne V_o diminue significativement avec la distance inter-électrodes (la constante K, qui est proportionnelle à la mobilité apparente des porteurs de charges, diminue significativement avec la distance). Alors que dans la phase de décroissance du courant de charge (h = 18, 22, 26 et 30 mm), la constante A décroît légèrement avec la distance inter-électrodes (V_o se stabilise avec la distance). Le coefficient de régression R^2 (erreur calculée par la méthode des moindres carrés) de l'analyse de la caractéristique *I*(*V*) est presque constant et égale à 1 quel que soit la distance inter-électrodes variant de 2 à 30 mm, indiquant que les allures de la caractéristique *I*(*V*) utilisant les équations de Ferreira et *al*. et Townsend sont en bon accord avec celles de l'expérience.

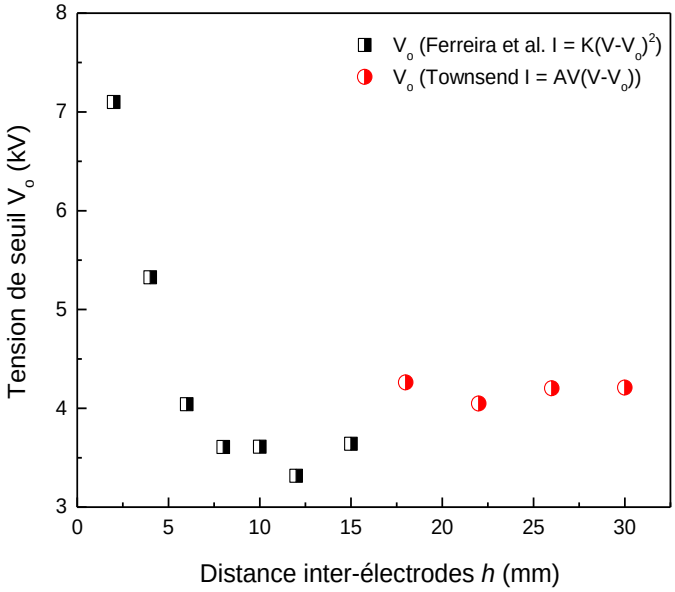


Figure III.7 : *Variation de la tension d'apparition de l'effet couronne avec la distance inter-électrodes.*

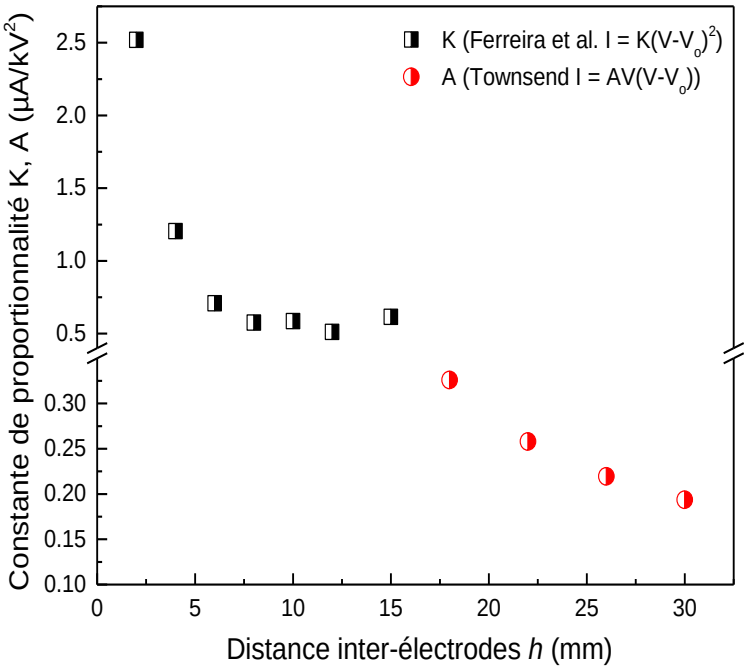


Figure III.8 : *Variations des constantes de proportionnalités K et A avec la distance inter-électrodes.*

III.2. Traitement de surface de plaques de polypropylène

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'étude de la modification des caractéristiques chimiques des surfaces de plaques de PP soumises à une décharge couronne sous différentes durées d'exposition.

III.2.1. Procédure expérimentale

Dans cette étude, nous avons utilisé une décharge couronne négative générée par un système constitué d'une électrode multi-pointes (Figure II.4) portée à la haute tension et une-plaque métallique liée à la terre pour traiter les surfaces de plaques de PP. L'électrode couronne était constituée de trois pointes de tungstène disposées aux sommets d'un triangle équilatéral. La distance *d* entre deux pointes a été fixée à 40 mm. Les pointes des aiguilles étaient situées à une hauteur *h* = 30 mm au-dessus de la surface de l'échantillon. Les plaques de PP d'épaisseur 5 mm ont été découpées sous forme de carré de 100 mm de côté. Un nouvel échantillon a été utilisé pour chaque expérience.

Dans une série d'expériences réalisées avec le dispositif, la densité de courant à la surface de l'électrode mise à la terre a été obtenue par une sonde de courant ayant une surface de 2,32 mm². Cette sonde connectée à un nano-ampèremètre était placée au milieu de l'électrode reliée à la terre et isolée de celle-ci, qui était à son tour reliée à la terre par le biais d`un micro-ampèremètre (Figure II.5). La cartographie de la distribution du courant a été réalisée en déplaçant la plaque avec des incréments de $\Delta = 4$ mm dans les deux directions (*x* et *y*).

Le banc expérimental nous a permis de cartographier la densité de courant sur une zone dont les dimensions ont été corrélées avec la distance entre les pointes. Dans le cas de *d* = 40 mm, la zone de mesure de la densité de courant avait les dimensions de 60 mm x 60 mm.

Afin d'estimer l'uniformité de la distribution de charge électrostatique déposée sur l'échantillon de PP, le potentiel électrique de surface a été cartographié à l'aide d'une sonde électrostatique sans contact. Cette sonde électrostatique est connectée à un voltmètre électrostatique, relié à un ordinateur portable, qui mesure le potentiel électrique de surface dans la gamme ± 20 kV. Le potentiel électrique de surface est enregistré immédiatement après la fin du processus de chargement par décharge couronne. Le système a été automatisé pour acquérir le potentiel de surface de façon continue le long de l'axe *y* et par pas de 5 mm le long de l'axe *x*.

Après le traitement par décharge couronne, l'échantillon de PP a été soigneusement placé sur le banc de caractérisation de la mouillabilité afin de quantifier le degré d'hydrophilie de sa surface. Une goutte d'eau a été déposée sur sa surface à l'aide d'une pipette de 1 ml puis la caméra du microscope, reliée à un ordinateur, a enregistré l'image de la goutte et mesuré l'angle de contact, en utilisant un logiciel fourni par le fabricant. Nous avons régulé le volume du liquide à 1 ml afin d'atténuer l'effet de la gravité sur la valeur de l'angle de contact. Toutes les mesures de l'angle de contact ont été effectuées juste après le dépôt d'une goutte d'eau sur la

plaque de PP afin d'éviter l'effet de l'évaporation du liquide. Les angles de contact ont été mesurés trois fois.

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier par réflexion interne multiple FTIR-ATR (Shimadzu FTIR IRAffinity-1S (IR) Miracle-10 (ATR)) a été utilisée pour analyser la composition chimique de surface de l'échantillon de PP avant et après exposition à la décharge couronne afin d'identifier les groupements chimiques responsables de l'hydrophilie de sa surface. Ce spectromètre est équipé d'un accessoire de réflexion interne multiple qui permet d'analyser spécifiquement la surface des matériaux. Nous avons utilisé le cristal ZnSe qui travaille dans une gamme de longueur d'onde allant de 4000 à 500 cm^{-1}.

III.2.2. Résultats et discussion

III.2.2.1. Mesure de densité de courant

La première série d'expériences consiste à mesurer la densité du courant générée par la décharge couronne à la surface de l'électrode de plaque mise à la terre (Figure III.9).

Trois zones de haute densité de courant ont été obtenues sous les pointes (1 à 3). La densité de courant était plutôt faible dans la zone (4). Ceci peut s'expliquer par le fait que les lignes de champ générées par les pointes se repoussent mutuellement [48], [113]. Comme on l'a vu, la densité de courant enregistrée sous la pointe énergisant la zone (3) est légèrement supérieure à celle enregistrée sous les pointes dans les autres zones ; ceci est dû aux imperfections de la hauteur des pointes à effet couronne.

La deuxième série d'expériences a permis de cartographier le potentiel électrique à la surface des échantillons exposés à la décharge couronne (Figure III.10). Le potentiel électrique, et donc le niveau de charge, était assez uniforme dans la zone triangulaire située sous les pointes (1-3) et entre elles (4). L'uniformité du potentiel électrique peut s'expliquer, au moins en partie, par la migration de la charge accumulée à la surface du PP dans les zones (1-3) vers les zones moins chargées (4), pour atteindre l'équilibre [114], [115].

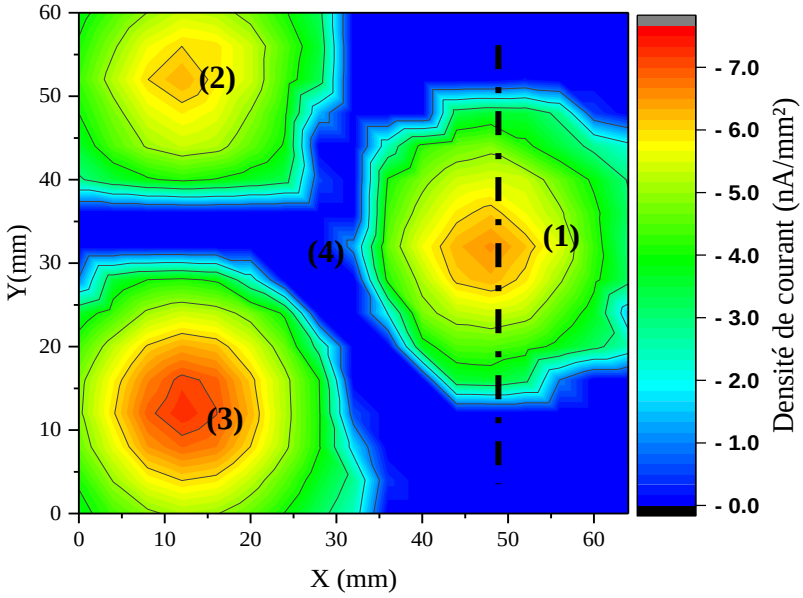


Figure III.9 : *Densité de courant de la décharge couronne générée par l'électrode à trois pointes à la surface de l'électrode plaque mise à la terre (V = 10 kV, d = 40 mm et h = 30 mm) ; (1, 2 et 3 sont les zones sous les pointes, 4 la zone entre les pointes).*

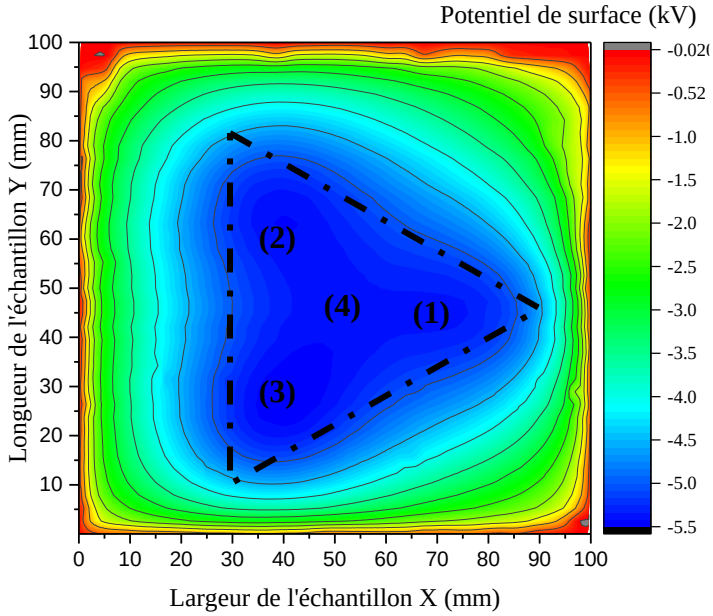


Figure III.10 : *Cartographie du potentiel de surface sur une plaque de PP (V = 10 kV, d = 40 mm, t = 20 sec et h = 30 mm) ; (1, 2 et 3 sont les zones sous les pointes, 4 la zone entre les pointes).*

III.2.2.2. Mesure de l'angle de contact et calcul du travail d'adhésion

La troisième série d'expériences consiste à caractériser la mouillabilité de la surface des films de PP traités par décharge couronne en fonction du temps de traitement en mesurant l'angle de contact que fait une goutte d'eau avec cette surface en choisissant quatre zones différentes sur la surface des échantillons de PP traités.

La Figure III.11 montre les zones A, B, C et D où les gouttelettes d'eau ont été déposées pour effectuer la caractérisation : A se situe sous la pointe (1), B se situe à mi-distance entre les pointes (2) et (3), C se situe au centre de symétrie du système à trois pointes, D se situe au bord de l'échantillon.

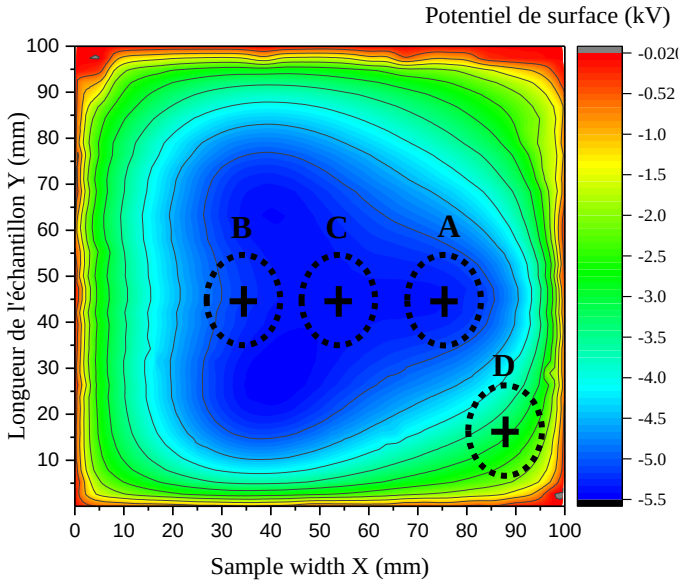


Figure III.11 : *Représentation des zones où la mesure de l'angle de contact a été effectuée ; (A) sous la pointe (1), (B) au milieu entre les deux pointes (2) et (3), (C) au milieu entre les trois pointes et (D) dans le bord de la plaque.*

La Figure III.12 montre à titre d'illustration les photographies de la forme de la goutte d'eau déposée sur des plaques de PP non traitées et traitées par décharge couronne pour deux temps de traitement (zone A).

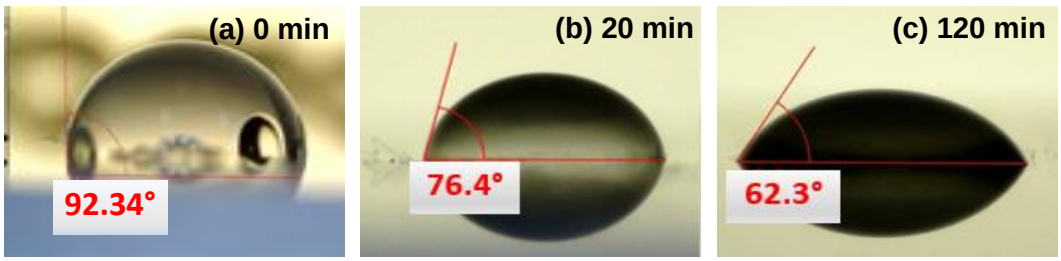


Figure III.12 : *Photo de la goutte d'eau déposée sur des plaques de PP non traitée (a) et traitées par décharge couronne pour deux temps de traitement 20 min (b) et 120 min (c).*

La Figure III.13 montre la variation de l'angle de contact en fonction de la durée d'exposition à la décharge couronne.

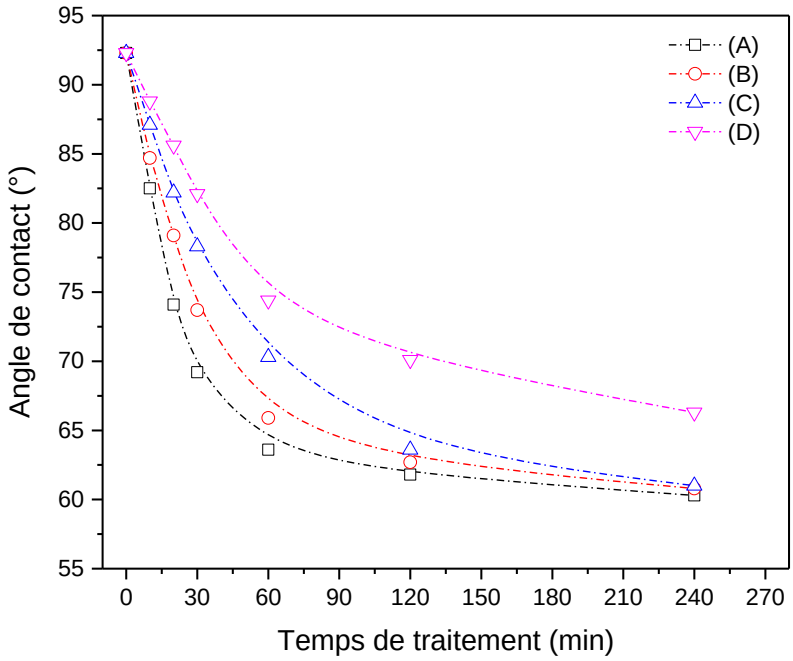


Figure III.13 : *Variation de l'angle de contact en fonction du temps de traitement des plaques de PP ; (A) sous la pointe, (B) entre les deux pointes, (C) entre les trois pointes et (D) dans le bord de la plaque.*

Pour un échantillon de PP non traité, l'angle de contact était de 93°. Il a été constaté que pendant les 30 premières minutes, l'angle de contact dans la zone A (sous la pointe) décroît plus rapidement, par rapport aux autres zones, ce qui est en bon accord avec le fait que la densité de courant est plus élevée dans cette zone (Figure III.10). Au-delà de ce temps de traitement, la décroissance de la valeur de l'angle de contact devient moins prononcée et tant à se stabiliser, montrant ainsi une amélioration notable de la mouillabilité de cet échantillon. Cette amélioration de la mouillabilité en fonction de la durée d'exposition à la décharge couronne est confirmée par la variation du travail d'adhésion calculée à partir de l'équation (I.5) (Figure III.14). La valeur de ce dernier augmente de manière significative au cours des premières minutes du temps de traitement. L'augmentation du travail d'adhésion *W* avec la durée de traitement *t* s'explique par le changement des caractéristiques chimiques de la surface du PP suite à l'incorporation de certaines espèces par la décharge couronne. Ces espèces réagissent avec la surface de l'échantillon pour créer des entités chimiques fonctionnelles polaires responsables de l'amélioration de la mouillabilité [4], [71]. Cette hypothèse est confirmée par l'analyse chimique de la surface des plaques de PP traitées par spectroscopie FTIR-ATR.

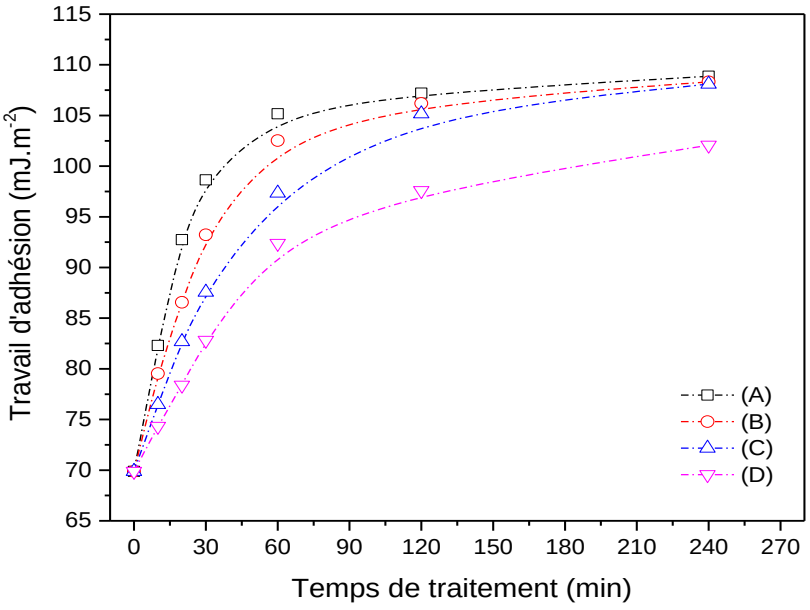


Figure III.14 : *Travail d'adhésion en fonction du temps de traitement des plaques de PP ; (A) sous la pointe, (B) au milieu entre les deux pointes, (C) au milieu entre les trois pointes et (D) dans le bord de la plaque.*

III.2.2.3. Caractérisation par spectroscopie FTIR-ATR

Afin d'identifier les groupes fonctionnels responsables de l'amélioration de la mouillabilité, les échantillons de PP non traités et traités par décharge couronne pendant 60 min et 120 min ont été caractérisés par spectroscopie FTIR-ATR (Figure III.15).

Le spectre relatif à la plaque de PP non traitée indique que l'absorbance due au CH est similaire à celles données dans les références [8], [71] (la plaque de PP non traitée présente à 2800-3000 cm^{-1} et 1200-1500 cm^{-1} des pics intenses attribués aux différentes vibrations de la liaison C-H dans le groupement méthyl). Après 60 min et 120 min de traitement par décharge couronne dans l'air atmosphérique, nous remarquons l'apparition de nouveaux groupements polaires carbonyle (C=O) situés à 1741 et 1653 cm^{-1} et hydroxyle (OH) situé à 3300 cm^{-1}. Comme toutes les nouvelles liaisons sont liées à l'oxygène, nous pouvons conclure que la décharge couronne est responsable de l'oxydation de la surface des plaques traités.

Lorsque une haute tension est appliquée entre les deux électrodes, le champ électrique généré dans l'espace inter-électrodes excite les molécules d'oxygène présentes dans l'air conduisant à la formation d'oxygène élémentaire (O), de molécules d'oxygène activé (O_2*) et/ou d'ozone (O_3) [71]. Parallèlement, des radicaux libres sont immédiatement créés en surface par la dissociation des molécules de PP. L'oxygène activé (O_2*) présent dans l'espace entre les électrodes réagit avec la surface activée pour former une surface oxydée. Ces groupes carbonyle et hydroxyle sont responsables de la mouillabilité des échantillons de PP [8], [70], [71]. En

effet, l'augmentation du temps d'exposition induit une augmentation des groupes carbonyle et hydroxyle due à l'oxydation de la surface du PP traitée par décharge couronne.

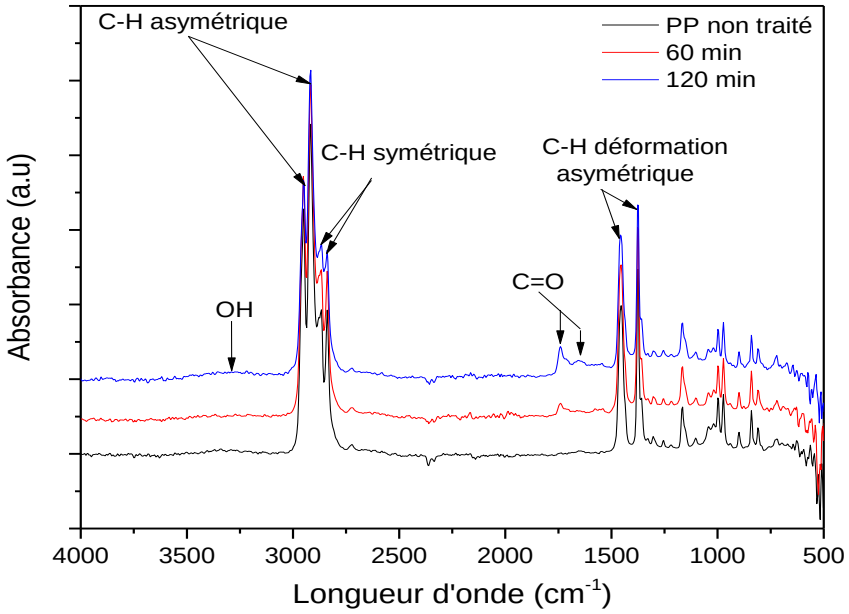


Figure III.15 : *Spectres FTIR-ATR pour des plaques de PP non traitée et traitées par décharge couronne avec différents temps d'exposition.*

En se basant sur les résultats obtenus par mesure de l'angle de contact et l'analyse FTIR-ATR, nous constatons que l'introduction de groupements chimiques fonctionnels polaires (groupes carbonyle C=O et hydroxyle OH) à la surface des échantillons de PP traités par décharge couronne est responsable de l'évolution de l'angle de contact en fonction de la durée de traitement et par conséquent de l'amélioration considérable de la mouillabilité de surface. Cette conclusion est en bon accord avec des études antérieures publiées dans la littérature, qui ont montré que la modification de surface des polymères par décharge couronne [8], [9], [70]–[73] et par décharge à barrière diélectrique DBD [10], [11] induit une amélioration de la mouillabilité de surface.

III.3. Conclusions

Les caractéristiques courant-tension pour une géométrie multi-aiguilles-échantillon ont été étudiées pour différentes distances inter-électrodes.

1) Dans ce travail, il a été démontré que l'équation de Townsend correspond aux caractéristiques courant-tension en présence de diélectrique entre les électrodes. Ce résultat n'est valable que pour des distances inter-électrodes supérieures à 15 mm, dont la tension

d'apparition de l'effet couronne n'est pas modifiée et la pente de la caractéristique courant-tension diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes.

2) Pour des distances inférieures à 15 mm, nous avons constaté que la formule empirique évoquée par Ferreira et *al*. s'adapte mieux aux caractéristiques courant-tension de la décharge couronne. La tension d'apparition de l'effet couronne diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes lorsque l'échantillon de PP est situé à des distances inférieures à 8 mm. La pente de la caractéristique courant-tension dans cette plage de distances diminue toujours. Pour des distances comprises entre 8 et 15 mm, la tension d'apparition de l'effet couronne et la pente de la caractéristique courant-tension deviennent stables.

3) L'analyse de divers aspects de l'uniformité de la charge déposée et de la modification chimique des plaques de PP exposées à la décharge couronne générée par une électrode à trois pointes montrent que :

- La distribution de la densité de courant produite par ce type d'électrode couronne est hautement non-uniforme.
- De manière surprenante, l'uniformité de la charge électrique déposée à la surface des plaques de PP exposées à la décharge couronne générée par l'électrode de type trois pointes est supérieure à 95 %. Cela peut s'expliquer par le fait que - avec le temps - les charges électriques se redistribuent à la surface de la plaque de PP, ce qui conduit à une cartographie de potentiel électrique de surface de plus en plus uniforme.
- La durée d'exposition à la décharge couronne a également un effet sur l'apparition de groupes carbonyle (C=O) et hydroxyle (OH), qui améliorent l'hydrophilie des plaques de PP.
- L'angle de contact d'une goutte d'eau mesuré à différents endroits de la surface des plaques de PP diminue avec la durée d'exposition à la décharge couronne.
- L'uniformité du traitement s'améliore avec la durée d'exposition, un phénomène qui est bien corrélé avec la cartographie du potentiel électrique de surface.

Chapitre IV

Uniformité du chargement électrique produit par une décharge couronne multi-pointes

« Quand on vous demande si vous êtes capable de faire un travail répondez : « bien sûr, je peux ! » Puis débrouillez-vous pour y arriver »

- Theodore ROOSVELT (1858-1919)

Chapitre IV : Uniformité du chargement électrique produit par une décharge couronne multi-pointes

Les électrodes couronne sont généralement composées de pointes, de fils ou de lames connectés à une alimentation haute tension. L'uniformité de la charge électrique déposée sur la surface des matériaux isolants exposés à la décharge couronne dépend de la configuration du champ électrique généré par ces électrodes [33]–[35]. Les électrodes à base de pointes ont des tensions d'amorçage corona plus faibles et une meilleure résistance mécanique que les électrodes de type fil, par exemple [47]. Le problème est que la décharge générée par une telle géométrie n'est pas uniforme [37].

La caractérisation expérimentale des électrodes couronne à base de pointes est une question importante qui a fait l'objet de recherches antérieures [47], [48]. Ainsi, il a déjà été démontré que la proximité des pointes augmente l'uniformité du champ électrique près de leurs pointes et donc augmente la tension d'amorçage corona.

En choisissant les paramètres géométriques appropriés de l'électrode couronne, tels que la distance entre les pointes *d*, leur hauteur *h* au-dessus de la surface diélectrique et le niveau de la haute tension appliquée, il a été constaté que l'uniformité de la charge déposée sur la surface du matériau exposé peut atteindre des valeurs supérieures à 95 %. Cette uniformité dépend de la géométrie de l'électrode, mais aussi de la direction du mouvement de l'échantillon dans la décharge couronne.

L'objectif de ce chapitre est d'explorer les limites de l'uniformité de la charge obtenue lors de l'utilisation des électrodes couronne dans des dispositifs de séparation électrostatique de mélanges granulaires. Le défi était de concevoir une électrode multi-pointes de manière à générer un effet de charge aussi uniforme que possible à la surface des diélectriques exposés à la décharge couronne.

Deux méthodes de charge différentes ont été étudiées : "statique" pour des plaques de chlorure de polyvinyle (PVC), et "dynamique" pour les mêmes plaques, ainsi que pour des films et des particules de polypropylène (PP).

Afin d'estimer l'uniformité de la charge déposée sur ces matériaux diélectriques, deux méthodes de caractérisation ont été employées :

(i) cartographie des potentiels de surface sur les plaques de PVC et les films de PP, à l'aide d'un voltmètre électrostatique ;

(ii) mesure directe de la charge déposée sur les particules de PP après leur passage sous le système d'électrodes, à l'aide d'une cage de Faraday reliée à un électromètre.

En modifiant les paramètres géométriques du système d'électrodes (hauteur, distance entre les pointes) et la tension appliquée, des taux d'uniformité satisfaisants ont été enregistrés: plus de 95 % pour les plaques de PVC et les films de PP ; plus de 85 % pour les particules de PP. Ceci dépend de la géométrie du système d'électrode et de la direction du mouvement des polymères dans le champ électrique. Les temps d'exposition supérieurs à deux secondes n'ont pratiquement pas affecté le niveau de charge ni son uniformité.

IV.1. Chargement stationnaire des plaques de PVC

Le niveau et l'uniformité de la répartition des charges électrostatiques déposées sur la surface des matériaux isolants dépendent du moyen de chargement. Le moyen de chargement que nous avons utilisé est la décharge couronne et son effet dépend de deux classes de paramètre ; (i) géométriques, tels que le type et la nature des électrodes utilisés, la distance entre les électrodes, et le nombre des pointes. (ii) opératoires, tels que le niveau et la polarité de la tension appliquée, le temps de chargement ainsi que la température et l'humidité relative ambiantes.

L'objectif de la première série d'expériences est de déterminer l'influence des paramètres étudiés sur le niveau et l'uniformité de la répartition des charges déposées en mode statique. Pour les deux types d'électrodes utilisées, il s'est avéré que le niveau de la tension appliquée et la hauteur des pointes au-dessus de la surface de l'échantillon influent de la même façon le taux d'uniformité du chargement, et que la durée d'exposition à la décharge couronne n'a pratiquement aucun effet ni sur le niveau ni sur l'uniformité de la répartition des charges déposées.

IV.1.1. Procédure expérimentale

Deux types d'électrodes ont été utilisés pour charger des plaques de PVC de tailles différentes. Ces plaques ont été chargées d'une façon stationnaire avec des électrodes à une ou trois pointes, ce qui nous a permis d'observer l'effet du temps d'exposition à la décharge couronne t (s), l'effet de l'amplitude de la tension appliquée V (kV) et l'effet de la hauteur h (mm) de l'électrode active au-dessus de la plaque de PVC.

L'approche développée pour l'étude "statique" consiste à placer l'électrode couronne à différentes hauteurs *h* (allant de 20 mm à 40 mm) au-dessus des plaques de PVC, posées sur un support métallique mis à la terre (Figure II.14). Cette série d'expériences a été réalisée pour différentes valeurs du niveau de tension (de - 8 kV à - 12 kV) et du temps d'exposition (de 2 s à 20 s).

Pour estimer l'uniformité de la distribution de la charge électrique, le potentiel électrique à la surface des échantillons a été cartographié à l'aide d'une sonde sans contact (TREK, modèle 6300-7) connectée à un voltmètre électrostatique (TREK, modèle 341B) qui mesure le potentiel électrique de surface jusqu'au 20 kV (Figure II.7).

Les profils de potentiel électrique de surface enregistrés ont été représentés, en utilisant soit les valeurs enregistrées le long de lignes parallèles à l'axe longitudinal central des échantillons (direction verticale sur la Figure II.22), soit la moyenne des valeurs enregistrées en chaque point de coordonnées y_j, où y_j varie de 0 mm à 150 mm pour une pointe, ou de 0 mm à 190 mm pour trois pointes, avec un pas Δy égal à 5 mm, Δx étant généré automatiquement par la vitesse du système d'acquisition de données (II.1)

Les taux d'uniformité présentés et discutés dans cette partie sont calculés selon les formules données dans le chapitre II.

IV.1.2.Facteurs influant le profil du potentiel de surface

IV.1.2.1. Effet du temps d'exposition

Les distributions spatiales du potentiel de surface mesurées à différents temps d'exposition sous une tension de chargement de - 10 kV sont rapportées dans la Figure IV.1 pour deux types de configuration d'électrodes.

De manière inattendue, l'augmentation du temps d'exposition au-delà de t = 5 s n'affecte ni le niveau moyen du potentiel de surface ni l'uniformité des profils (Figure IV.1. (a) et (b)). Ce comportement peut être expliqué en relation avec l'épaisseur de l'échantillon, par la saturation rapide de la charge à la surface de la plaque de PVC; en raison de l'accumulation de charges sur la surface diélectrique, le potentiel de surface peut rapidement atteindre une valeur suffisamment élevée en fonction de la valeur de la tension appliquée, ce qui entraîne une diminution de l'intensité du champ électrique et une réduction significative du processus de chargement par décharge couronne.

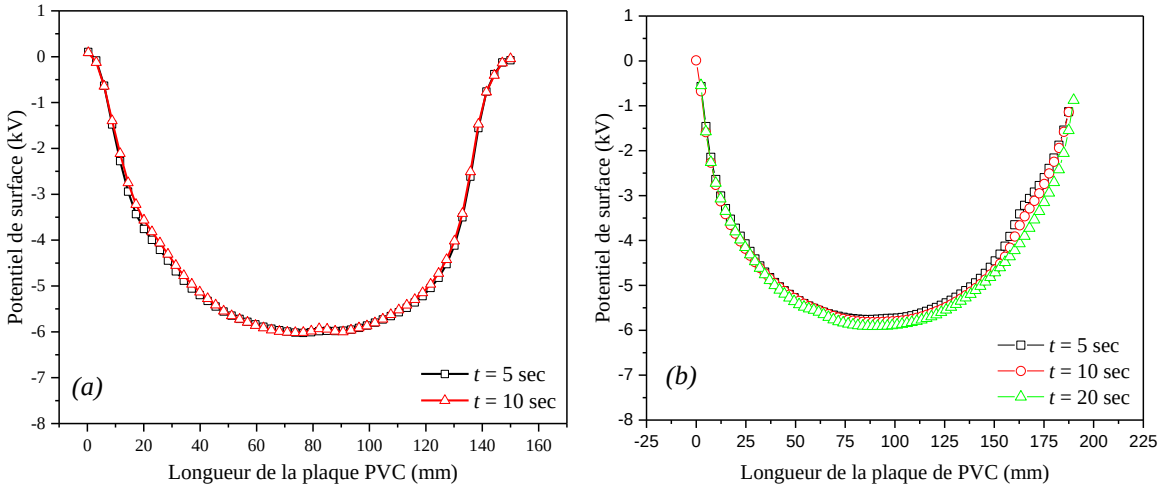


Figure IV.1 : *Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC; effet du temps d'exposition t, (a) une pointe (V = -10 kV, h = 30 mm), (b) trois pointes (V = -10 kV, h = 30 mm, d = 60 mm).*

IV.1.2.2. Effet de la tension appliquée

Sur les Figures IV.2. (a) et (b), nous avons représenté les profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC pour différentes valeurs de la tension appliquée. Nous remarquons que le niveau du potentiel de surface augmente significativement avec la tension appliquée. Une distorsion des profils du potentiel se produit à des niveaux plus élevés de la tension appliquée, comme le montre le cas de V = - 12 kV, pour une pointe, et au-dessus de V = -11 kV, pour trois pointes. Ce comportement peut être lié à l'accélération de la décroissance du potentiel de surface dans la zone la plus exposée, ce qui a déjà été signalé par Ieda et *al*. [116] pour les films de polyéthylène, par Sahli et *al*. [69] pour les films de polypropylène, ainsi que par Zhou et *al*. [117] et Mallem et *al*. [118] pour les films de polyimide.

De multiples explications ont été données à ce phénomène dit de " cross-over ". Cependant, les auteurs cités ci-dessus s'accordent à dire qu'il est très probablement dû au fait que les charges déposées sous une tension de décharge élevée sont capables de dériver sous leur propre champ électrique en sautant entre des pièges peu profonds présents dans le volume du polymère, conduisant ainsi à une décroissance rapide du potentiel de surface. En revanche, à une faible tension de décharge, on peut supposer que les charges restent dans des pièges peu profonds en surface. L'injection de charges est une autre explication possible de ce phénomène [119].

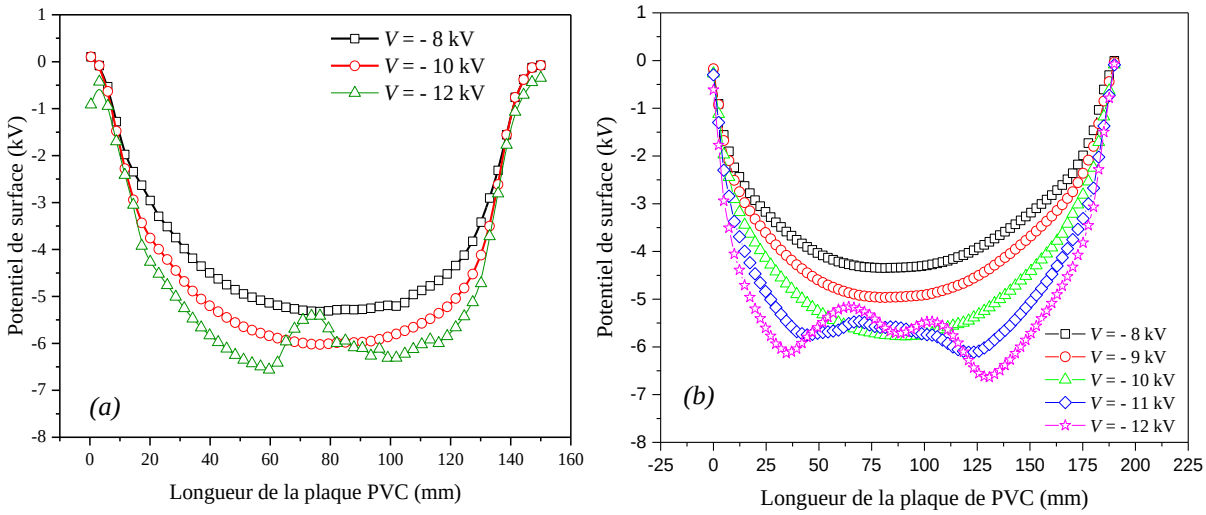


Figure IV.2 : *Profils du potentiel de surface de plaque de PVC; effet de la tension appliquée V, (a) Une pointe (h = 30 mm, t = 5 s), (b) Trois pointes (h = 30 mm, t = 2 s, d = 60 mm).*

IV.1.2.3. Effet de la hauteur de l'électrode couronne au-dessus de surface de la plaque

La hauteur *h* de la pointe au-dessus de la surface à un effet très important. Les Figures IV.3.(a) et (b) représentent bien le rapport entre le potentiel de surface enregistré et la hauteur des pointes au dessus de la surface. Sur la Figure IV.3. (a) nous avons représenté les maximums du potentiel de surface enregistré dans la zone juste en face de la pointe dans le cas d'une seule pointe. En baissant la hauteur de 50 mm à 30 mm, le potentiel de surface augmente et le champ électrique local s'intensifie. Cependant, la hauteur entre la surface de PVC et la pointe a un effet plus faible sur l'extension de la zone chargée que celui observé avec la tension appliquée (Figures IV.2. (a) et (b)). Une baisse supplémentaire de la hauteur *h* de 30 mm à 20 mm renforce de plus en plus l'intensité du champ électrique. En conséquence, la quantité de charge accumulée sur la surface du diélectrique augmente et conduit à l'accélération de la décroissance du potentiel dans la zone la plus exposée, comme discuté dans la référence [120] et produit une dégradation de l'uniformité du potentiel similaire à celle déjà observée pour les tensions les plus élevées. Les courbes de la Figure IV.3. (b) montrent que sous une certaine valeur seuil de la hauteur, l'uniformité de la disposition de charge surfacique se détériore, ce qui est nuisible en rapport aux objectifs de ce travail.

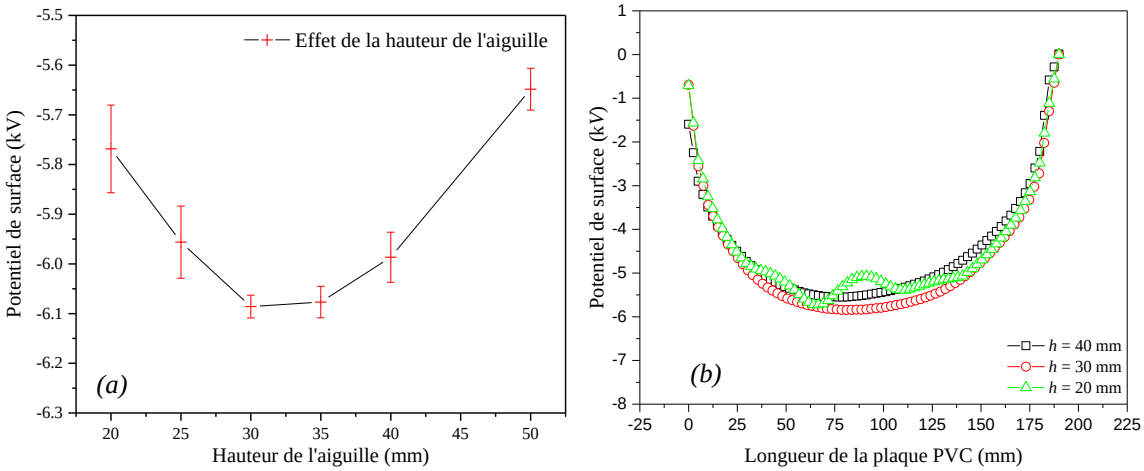


Figure IV.3 : *(a) (Une pointe) Valeurs maximales du potentiel de surface enregistrées; effet de la hauteur h au-dessus de la surface de la plaque de PVC, (V = - 10 kV, t = 5 s), (b) (Trois pointes) Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques PVC; effet de la hauteur des pointes au-dessus de la plaque de PVC (V = - 10 kV, t = 2 s, d = 60 mm)*

IV.1.3. Etude de l'uniformité de la charge

IV.1.3.1. Uniformité de la charge pour une seule pointe

L'analyse statistique des données acquises dans le cas de l'électrode à une seule pointe est représentée sur la Figure IV.4. Dans chaque situation où la hauteur de la pointe au-dessus des échantillons était h > 20 mm, il y avait au moins un niveau de haute tension pour lequel l'uniformité dépassait 95 %. Pour V = - 12 kV, la meilleure uniformité (96 %) a été atteinte à h = 50 mm. A des hauteurs plus basses au-dessus de l'échantillon, l'uniformité se dégrade, à cause des creux observés dans les profils du potentiel, comme celui représenté pour h = 30 mm sur la Figure IV.2. Ces creux sont liés au phénomène de "cross-over" décrit précédemment [116]. A de faibles niveaux de tension en valeurs absolues (V = - 8 kV et - 12 kV), les meilleurs résultats ont été obtenus pour h = 30 mm. Lorsque les aiguilles étaient trop proches de la surface (h = 20 mm), l'uniformité obtenue pour les deux valeurs de la haute tension était considérablement plus mauvaise, car l'intensification du champ électrique dans la zone centrale de l'aire circulaire considérée pour le calcul a provoqué l'accélération de la décroissance du potentiel électrique, comme déjà décrit dans [120]. Lorsque la pointe a été placée à des hauteurs plus élevées au-dessus de la surface, à h = 40 mm et 50 mm, le champ électrique était plus faible et aucun phénomène de "cross-over" ne s'est produit. Ainsi, le potentiel électrique de surface était maximal dans l'axe du système d'électrodes et diminuait progressivement dans les zones circulaires éloignées de cet axe. Par conséquent, l'uniformité a diminué lorsque la hauteur h a été augmentée au-delà de la valeur optimale de 30 mm.

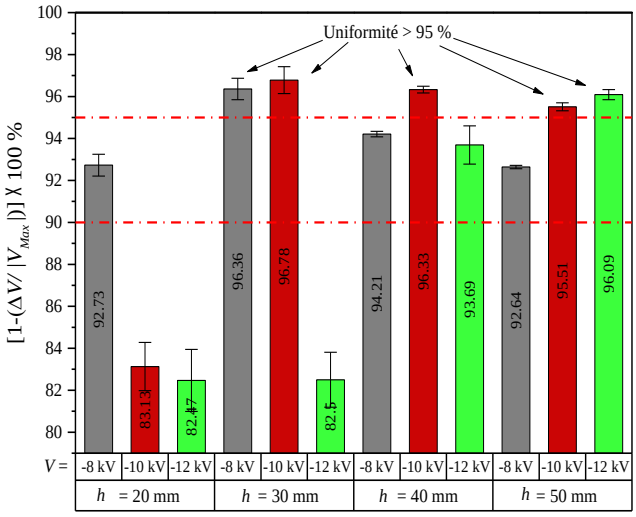


Figure IV.4 : *Taux d'uniformités pour le chargement statique par une pointe des plaques de PVC; effet de la tension appliquée V et de la hauteur au-dessus de la surface h, (t = 5 s).*

IV.1.3.2. Uniformité de la charge pour trois pointes

L'analyse statistique des données acquises dans le cas de l'électrode à trois pointes est représentée sur la Figure IV.5. Comme pour une pointe, à chaque hauteur de la pointe au-dessus des échantillons h > 20 mm, il y avait au moins un niveau de la haute tension pour lequel l'uniformité dépassait 95 %. Pour V = - 12 kV, la meilleure uniformité (96 %) a été atteinte à h = 40 mm. A des hauteurs plus basses au-dessus de l'échantillon, l'uniformité était plus médiocre. De façon générale, les taux d'uniformités enregistrés avec l'électrode à une pointe sont meilleurs que ceux obtenus avec trois pointes.

En conclusion partielle des expériences de chargement "statique", le temps d'exposition n'affecte ni le niveau moyen ni l'uniformité de la charge de surface, alors que la tension appliquée et la hauteur des pointes au-dessus de l'échantillon ont un effet significatif sur le niveau de charge ainsi que sur l'extension de la zone chargée. Une bonne uniformité des charges de surface est obtenue si un certain seuil de tension V n'est pas dépassé et que certains niveaux de hauteur h sont respectés. Les taux d'uniformités enregistrés avec l'électrode à une pointe sont meilleurs par rapport à ceux trouvés avec trois pointes, ce qui nous conduit à effectuer une étude sur l'effet de la distance entre les pointes pour voir si cette uniformité peut être améliorée.

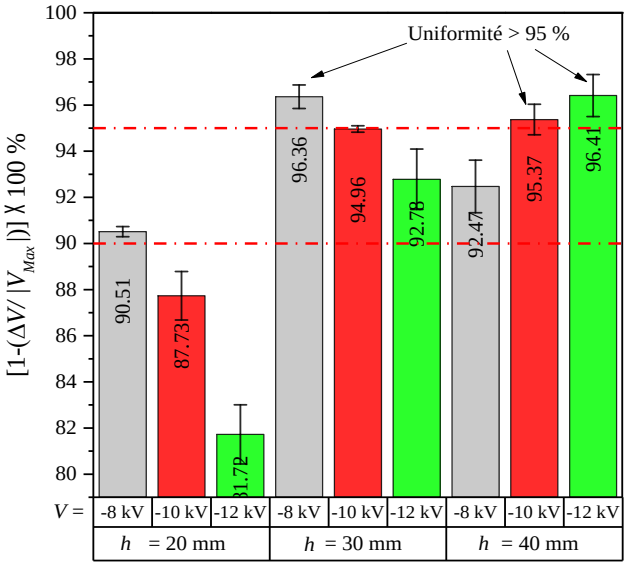


Figure IV.5 : *Taux d'uniformités pour le chargement statique des plaques de PVC dans le cas de l'électrode à trois pointes; effet de la tension appliquée V et la hauteur au-dessus de la surface h, (t = 2 s, d=60 mm).*

IV.2. Chargement dynamique des produits laminés

Afin d'atteindre à l'objectif final qui consiste à réaliser un chargement uniforme de produits granulaires en utilisant une décharge couronne générée par des électrodes multi-pointes, une étude du chargement des produits laminés était nécessaire pour bien comprendre les effets de la distance entre les pointes, la direction de passage sous les pointes, ainsi que l'effet de l'électrode à plusieurs pointes. L'une des expériences réalisées à été effectuée sur des films de polypropylène (PP), elle a pour but d'étudier l'effet de la distance entre les pointes de l'électrode à trois pointes sur l'uniformité de la charge électrique.

L'objectif de la deuxième série d'expériences est de déterminer les meilleures conditions pour avoir une uniformité optimale dans des conditions similaires à celles utilisées pour le chargement de produits granulaires.

IV.2.1. Procédures expérimentales

Les procédures élaborées pour optimiser l'uniformité de la charge sur les produits laminées ont été effectuées sur deux matériaux différents (films de PP et plaques de PVC). La première série d'expériences a été effectuée sur des plaques de PVC avec l'électrode couronne à deux, trois et à sept pointes réparties sur deux rangées respectivement, comme illustré sur la Figure II.19, les expériences ont pour but de quantifier l'effet du nombre de pointes et de la distance entre elles, leurs directions de passage au dessus des plaques de PVC ainsi que leur hauteur au-dessus de la surface. Dans une première expérience avec l'électrode à trois pointes,

seules les pointes numérotées (2) et (3) sur la Figure II.19 (a) ont été mises sous tension. Dans une deuxième expérience, la plaque de PVC s'est déplacée sous les trois pointes dans les deux sens. Pour obtenir une bonne estimation de la charge déposée, chaque expérience a été répétée trois fois.

La direction A, de gauche à droite, correspondait au cas où la plaque de PVC traversait la cellule multi-pointes en se déplaçant d'abord sous les pointes (2) et (3), puis sous la pointe (1). Ceci a permis d'étudier l'influence des charges déposées par la pointe (1) sur la distribution des charges déposées par (2) et (3). Lorsque la plaque de PVC se déplaçait dans la direction B, de droite à gauche, elle était d'abord exposée à la décharge générée par la pointe (1), puis aux décharges produites par les pointes (2) et (3).

La deuxième série d'expériences a été effectuée sur des films de PP avec une électrode à trois pointes. L'objectif est de confirmer la reproductibilité des résultats obtenus sur les plaques de PVC et d'étudier l'effet de la distance inter-pointes sur l'uniformité du chargement.

Les procédures de détermination des profils du potentiel de surface et du calcul des taux d'uniformités sont similaires à celles discutées dans le sous-chapitre IV.1 et qui sont explicitées dans le chapitre II.

IV.2.2. Effet de la direction du passage sur les profils de potentiel de surface du PVC

La Figure IV.6 illustre l'effet du déplacement des plaques de PVC sous les électrodes à deux et à trois pointes. Dans le cas où les trois pointes se déplacent dans la direction A, l'échantillon est d'abord exposé à la décharge générée par les deux pointes latérales, qui créent deux zones bien chargées séparées par une zone moins chargée ; l'échantillon est ensuite exposé à la pointe centrale qui compense le manque de charge dans la zone centrale, tandis que le potentiel électrique dans les zones latérales diminue légèrement. Lorsque les trois pointes se déplacent dans la direction B, l'échantillon est d'abord exposé à la décharge couronne de la pointe centrale ; puis l'échantillon traverse les zones de décharge électrique générées par les deux pointes latérales, qui chargent les zones latérales et compensent la baisse du potentiel de surface dans la zone centrale. Pour des distances *d* inférieures à 60 mm, les profils de potentiel de surface obtenus sur les échantillons de plaques de PVC, chargés par deux ou trois pointes pour les deux directions sont presque similaires. Pour les distances d = 70 mm et 90 mm, les profils de potentiel de surface diffèrent dans la zone autour de la coordonnée x = 80 mm ; les niveaux de potentiel électrique enregistrés sur la surface de l'échantillon de la plaque de PVC étaient plus élevés lorsque les trois pointes de l'électrode avaient été excitées. Cet effet est plus

prononcé à la plus grande distance entre les pointes $d = 90$ mm, où les zones de charge d'espace générées par les deux pointes latérales se chevauchent de moins au moins. Les résultats sont représentés sous forme de profils du potentiel de surface sur la longueur de la surface de la plaque de PVC (Figure IV.6), pour différentes distances entre les pointes. Notons enfin, que la gamme de distances inter-pointes d considérée, cette dernière n'a que peu d'influence sur la valeur maximale du potentiel enregistrée au voisinage de $x = 80$ mm.

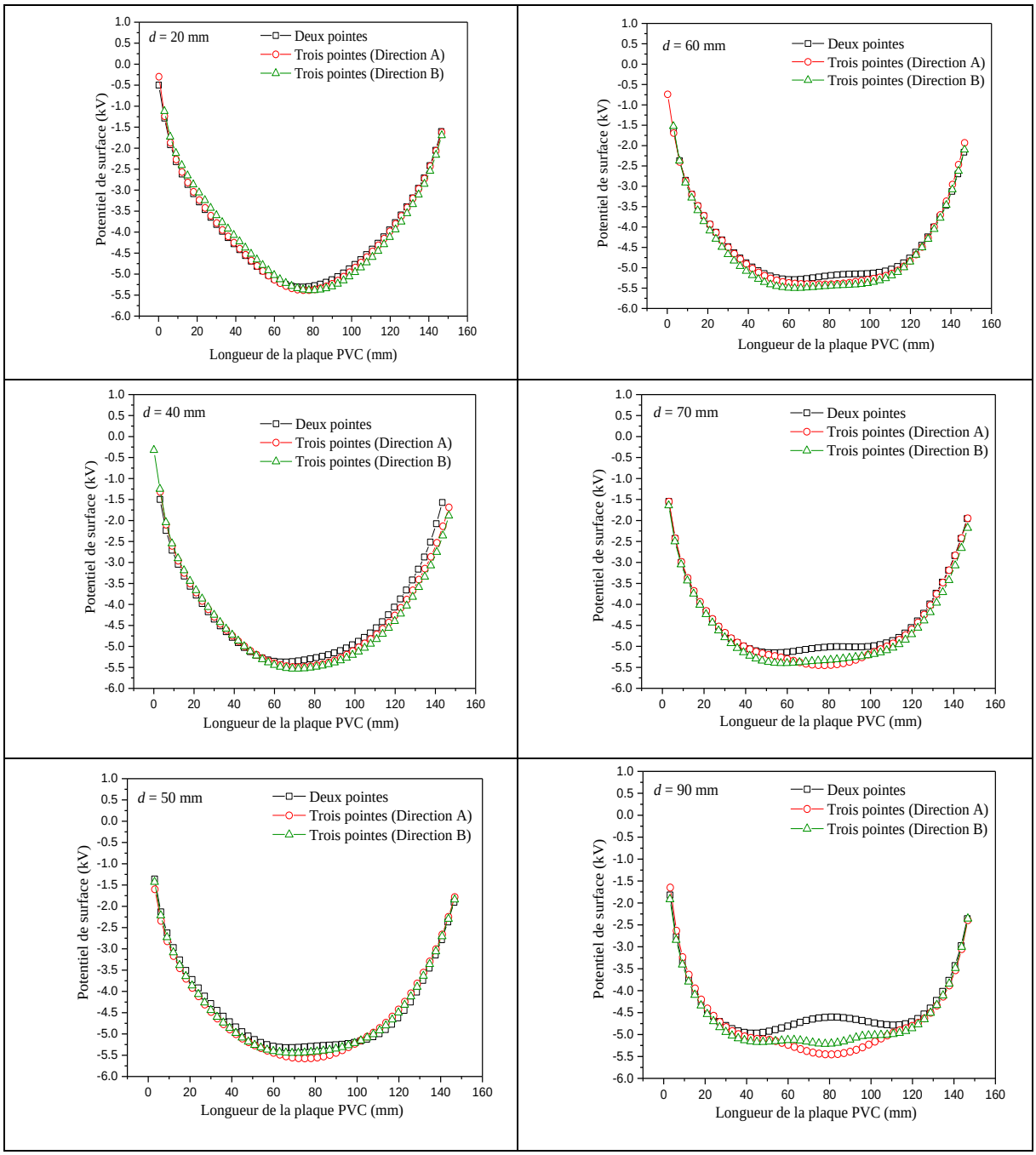


Figure IV.6 : *Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC; effet de la direction du mouvement, (V = - 10 kV, h = 30 mm, t = 2 s, v = 1 m/min).*

Les résultats des expériences réalisées avec l'électrode couronne à deux rangées sont représentés sur les Figures IV.7 et IV.8. Lorsque la distance entre les pointes était fixée à 40 mm, la hauteur au-dessus de l'échantillon à 30 mm et la tension à - 10 kV, la direction du mouvement n'avait presque aucun effet sur les profils du potentiel de surface (Figure IV.7). Ceci peut s'expliquer par le fait que d = 40 mm appartient à la classe des courtes distances entre les pointes, comme nous l'avons déjà discuté.

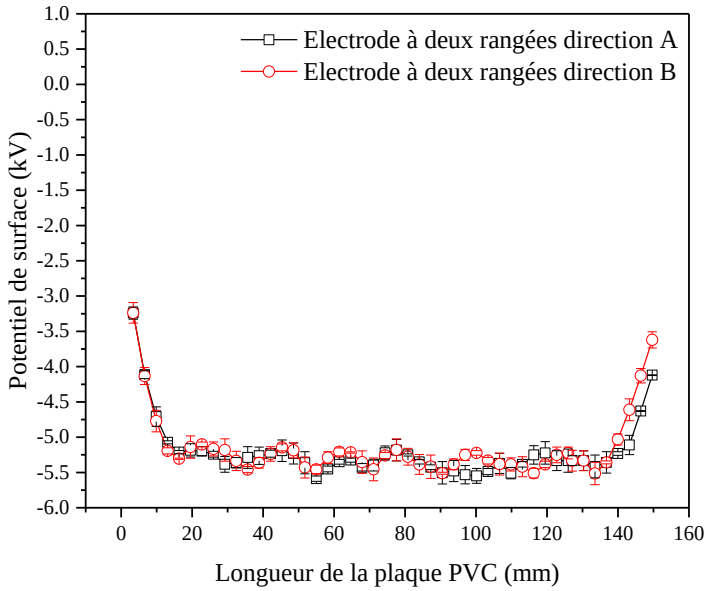


Figure IV.7 : *Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC chargées par l'électrode à deux rangées ; effet de la direction, (V = -10 kV, h = 30 mm, v = 1 m/min).*

Le niveau moyen du potentiel de surface a augmenté avec la tension appliquée à l'électrode (Figure IV.8). Les uniformités des profils du potentiel étaient presque identiques pour tous les niveaux de tensions appliquées, même pour - 12 kV, qui aurait dû accélérer la décroissance du potentiel dans les zones les plus exposées sous les pointes. L'explication réside dans le fait que les décharges produites par la deuxième rangée de pointes compensent partiellement cette décroissance.

IV.2.3. Effet de la distance inter-pointes sur les profils du potentiel de surface du PP

En modifiant la distance d entre les pointes (Figure IV.9), la forme de la distribution de charges de surface change. Pour la distance d = 40 mm, des niveaux de potentiel élevés ont été enregistrés dans les zones passées sous les pointes, indiquant un niveau de charge élevé, un niveau de potentiel relativement identique a été enregistré dans la zone située entre les pointes, la distribution du potentiel de surface était presque plate, ce qui signifie que la charge était

uniformément répartie dans la direction perpendiculaire au mouvement. Pour des distances d > 40 mm, l'uniformité diminue avec l'augmentation de la distance entre les pointes, avec des niveaux de charge élevés enregistrés dans les zones passant directement sous les pointes et des potentiels relativement faibles enregistrés dans les zones situées entre le niveau des pointes, indiquant une densité de charge plus faible.

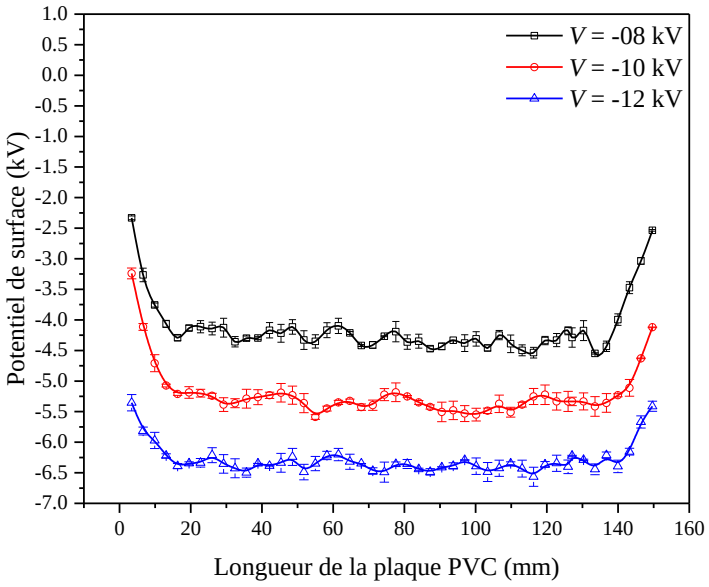


Figure IV.8 : *Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC chargées par l'électrode à deux rangées; effet de la tension appliquée, (Direction A, h = 30 mm, v =*

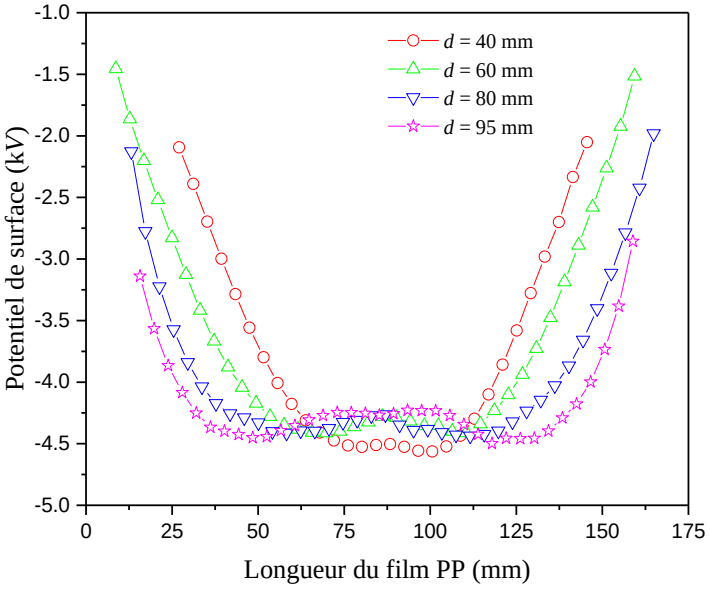


Figure IV.9 : *Profils du potentiel de surface enregistrés sur des films de PP; effet de la distance entre les pointes d (h = 40 mm, v = 1 m/min s, V = - 14 kV).*

IV.2.4. Etude de l'uniformité de la charge

IV.2.4.1. Uniformité de la charge sur des plaques de PVC

Les taux d'uniformité de la charge déposée sur des plaques de PVC ont été étudiés en modifiant les paramètres géométriques des différentes électrodes couronne. Les valeurs de taux d'uniformités calculées pour les différentes expériences réalisées avec la disposition des électrodes à 2 et 3 pointes, pour h = 30 mm et v = 1 m/min sont représentées sur la Figure IV.10. Plus les pointes sont distantes l'une de l'autre, plus la non-uniformité est importante. Pour chaque distance entre les pointes, il y a au moins une situation dans laquelle l'uniformité était supérieure à 95 % sauf pour 2 pointes alimentées par – 8 kV. Les meilleures valeurs ont été obtenues pour la distance d = 60 mm. Comme on pouvait s'y attendre, l'uniformité s'est dégradée à mesure que la distance entre les pointes augmentait.

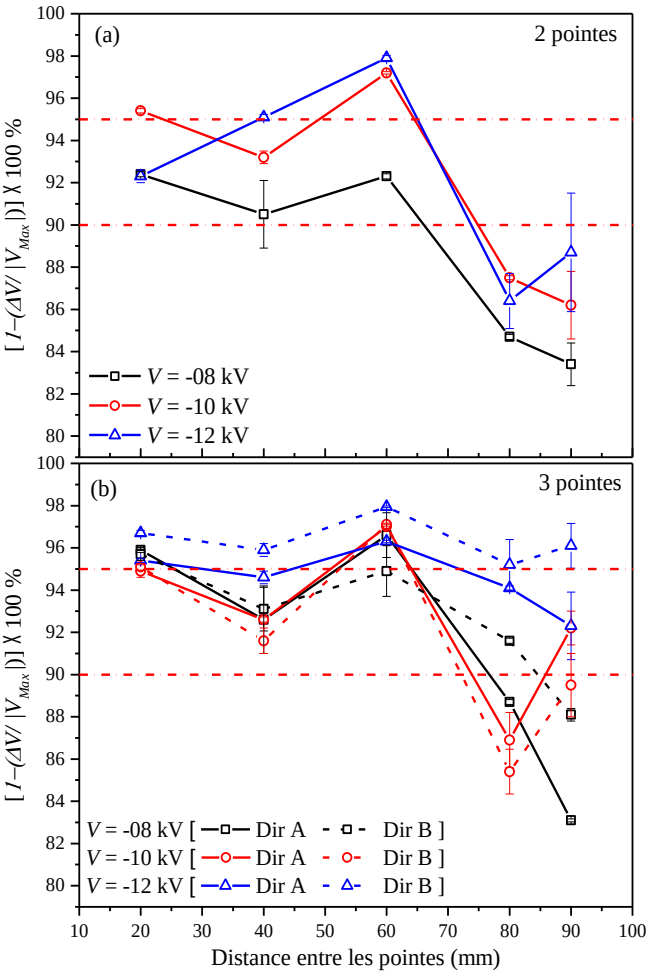


Figure IV.10 : *Taux d'uniformité pour le chargement dynamique des plaques de PVC par deux et trois pointes ; effets de la tension appliquée V et de la direction de passage, (h = 30 mm, v = 1 m/min).*

La Figure IV.11, représente les taux d'uniformités obtenus avec l'électrode à deux rangées, pour trois valeurs de tensions appliquées et à différentes hauteurs de l'électrode au-dessus de la surface. Les meilleurs taux ont été enregistrés pour la hauteur h = 30 mm, pour tous les niveaux de la haute tension appliquée. Pour des valeurs plus basses de h, la non-uniformité est due au phénomène de "cross-over", qui est lié au renforcement du champ électrique, comme discuté précédemment pour le régime "statique". Lorsque l'électrode est située plus haut au-dessus de la surface, la force du champ électrique et l'intensité du courant de décharge diminuent, et modifient la distribution de charges à la surface de la plaque de polymère. Cette conclusion est valable pour une distance inter-pointes d = 40 mm et ne peut être généralisée pour d'autres configurations d'électrodes.

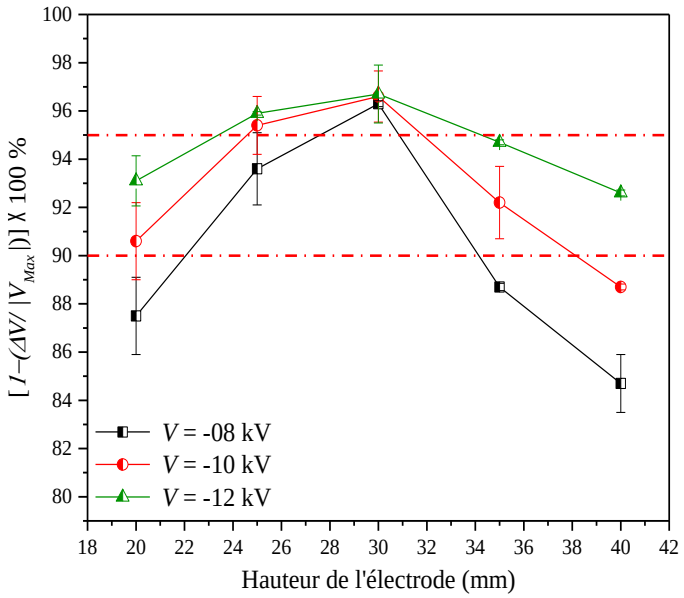


Figure IV.11 : *Taux d'uniformités pour le chargement dynamique des plaques de PVC par sept pointes ; effet de la tension appliquée V et de la hauteur au dessus de la surface, (Direction A, v = 1 m/min).*

IV.2.4.2. Uniformité de la charge sur des films de PP

Un mauvais taux d'uniformité a été observé à la fois pour les faibles hauteurs et les tensions élevées. Ceci s'explique par l'augmentation du champ électrique local avec la tension appliquée qui accélère le phénomène de décroissance du potentiel électrique dans les zones directement en face de la pointe de l'aiguille couronne et accentue la non-uniformité de la distribution de la charge électrique. Afin d'obtenir les conditions optimales pour améliorer l'uniformité de la charge, des expériences ont été menées pour d = 40 mm, qui s'est avérée être satisfaisante en termes de taux d'uniformité et en faisant varier à la fois la hauteur h et la tension

appliquée (Figure IV.12). Pour chaque tension appliquée, au moins une hauteur *h* assure un taux d'uniformité de la charge supérieure à 95 %.

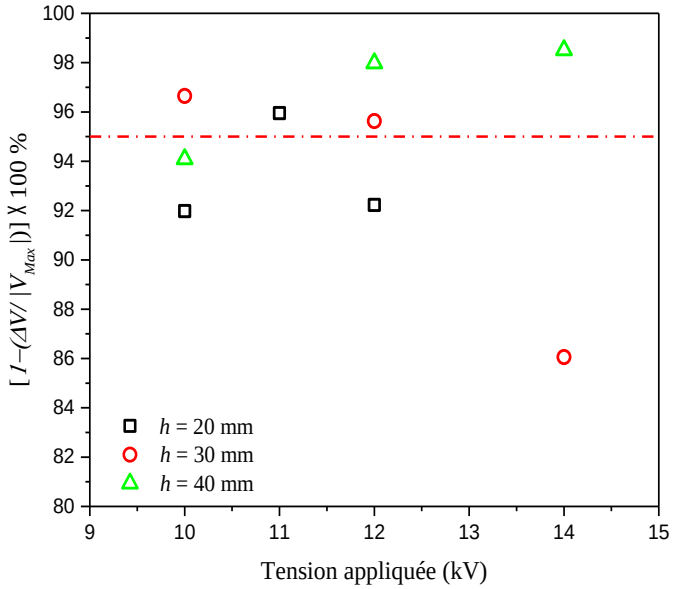


Figure IV.12 : *Taux d'uniformités pour le chargement dynamique avec trois pointes du film de PP; effet de la tension appliquée V et de la hauteur des pointes au-dessus de la surface (d = 40 mm).*

Dans le cas de deux pointes, la direction du mouvement n'a pas d'effet sur les profils du potentiel comparable à celui de la distance entre les pointes. Dans le cas de trois pointes, à des faibles distances entre celles-ci, l'allure des profils du potentiel de surface est similaire à celle enregistrée pour deux pointes et la direction du mouvement n'a pas d'effet notable. Pour les distances $d > 60$ mm, la direction a un effet remarquable sur les profils du potentiel. D'après les expériences menées sur les films de PP, la distance *d* entre les aiguilles est un facteur essentiel de l'uniformité de la charge. En choisissant la distance $d = 40$ mm, pour chaque tension appliquée il y a au moins une hauteur qui assure un taux d'uniformité supérieur à 95%. La distance optimale entre les pointes est $d = 40$ mm, au delà de cette distance la distribution de charge tend vers plus de non-uniformité. L'augmentation du nombre d'aiguilles a un effet positif significatif sur l'uniformité de la charge déposée pour les deux directions. Même si la configuration de l'électrode à deux rangs n'a pas encore été optimisée, des taux d'uniformités supérieurs à 95 % peuvent être facilement atteints. La hauteur *h* des aiguilles au-dessus de la surface des échantillons a un effet significatif sur l'uniformité de la charge déposée ; elle peut atteindre 96 % pour $h = 30$ mm, et être inférieure à 90 % pour $h = 20$ mm, 35 mm et 40 mm.

IV.3. Chargement dynamique de produits granulaires

Pour chacune des expériences précédentes, que ce soit en régime stationnaire ou dynamique, un intervalle de paramètres opératoires qui assure une bonne uniformité a été obtenu. L'objectif de cette nouvelle série d'expériences est d'explorer les limites de l'uniformité de la charge obtenue lors de l'utilisation d'une électrode couronne à trois pointes dans des dispositifs de séparation électrostatique de mélanges granulaires. En choisissant les paramètres géométriques appropriés de l'électrode couronne, tels que la distance entre les pointes *d* et leur hauteur *h* au-dessus de la surface diélectrique exposée à la décharge, il a été constaté que l'uniformité de la charge déposée peut dépasser 85 %.

IV.3.1. Procédure expérimentale

L'étude a porté sur la charge des particules de PP. Chaque groupe de 10 particules est pesé par une balance (résolution 0,1 g). Elles sont ensuite alignées l'une après l'autre sur la bande transporteuse métallique mise à la terre (Figure II.18.(a), (b)). L'échantillon de 10 particules est placé à une position précise *p* par rapport à la largeur du tapis roulant, qui les fait ensuite passer dans le champ électrique non uniforme pour finalement les collecter dans une cage de Faraday reliée à un électromètre (KEITHLEY 6514) (Figure II.18. (b)). En répétant les expériences tout en changeant l'emplacement des particules après chaque expérience de $p = 0$ à $p = 67{,}5$ mm (Figure II.18. (c)), nous obtenons un profil de charge sur la largeur de la bande transporteuse. Le temps d'exposition des particules à la décharge couronne a été ajusté en faisant varier la vitesse de la bande transporteuse *v* de 1 m/min à 3 m/min. Pour assurer une bonne estimation de la charge déposée, chaque expérience a été répétée trois fois, et à la fin une moyenne a été calculée.

Afin d'estimer l'uniformité de la charge électrique des particules de PP, une analyse statistique a été faite sur les courbes de charge massique ; cette procédure est bien détaillée dans le chapitre II.

IV.3.2. Etude de l'uniformité de la charge

Les séries d'expériences réalisées sur les particules de PP visaient à étudier l'effet de la distance entre les aiguilles *d* (mm), de l'amplitude de la tension appliquée *V* (kV), de la vitesse de la bande (transportant les particules se déplaçant sous l'électrode couronne) *v* (m/min), et de la hauteur *h* (mm) séparant les aiguilles et les particules.

Bien que la distance entre les pointes n'ait pas d'effet sur le niveau de charge du film PP (Figure IV.4), il a été observé qu'elle affecte le niveau de charge des particules PP (Figure IV.13). Pour la distance d = 50 mm, le niveau de charge était le même pour les trois pointes. Cependant, pour la distance d = 25 mm, le niveau de charge était plus élevé uniquement sous la pointe centrale et légèrement plus faible sous les pointes latérales, mais toujours plus élevé que le niveau enregistré pour la distance d = 50 mm. Cela peut s'expliquer par le fait que les particules de la zone centrale sont exposées plus longtemps à des niveaux plus élevés de densité de charge spatiale générée par l'électrode couronne.

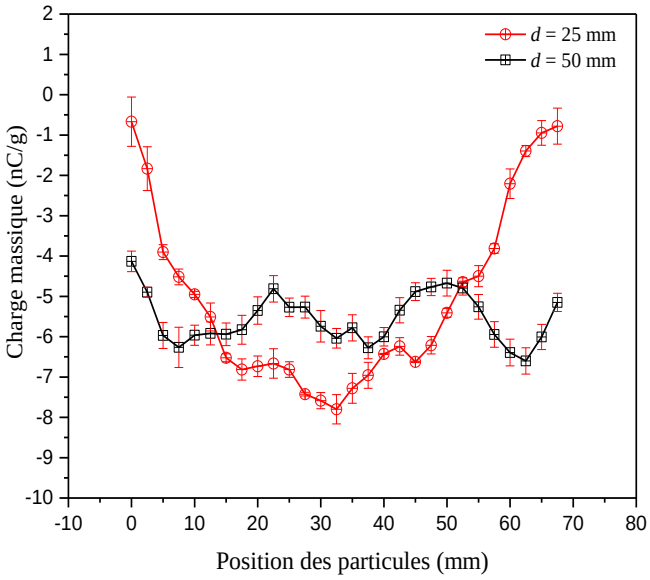


Figure IV.13 : *Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la distance inter-pointes d (v = 1 m/min, h = 30 mm, V = - 6 kV).*

En modifiant la tension appliquée (Figure IV.14), nous avons observé que pour V = - 6 kV le niveau de charge était plus élevé sous les aiguilles qu'entre elles, ce qui implique un mauvais taux d'uniformité. Pour V = - 8 kV, le niveau de charge global est plus élevé et presque uniforme. A V = - 10 kV, le niveau de charge sous les aiguilles est plus faible qu'entre elles, ce qui s'explique par le phénomène de « back corona » (« couronne inverse »), comme expliqué ci-dessous.

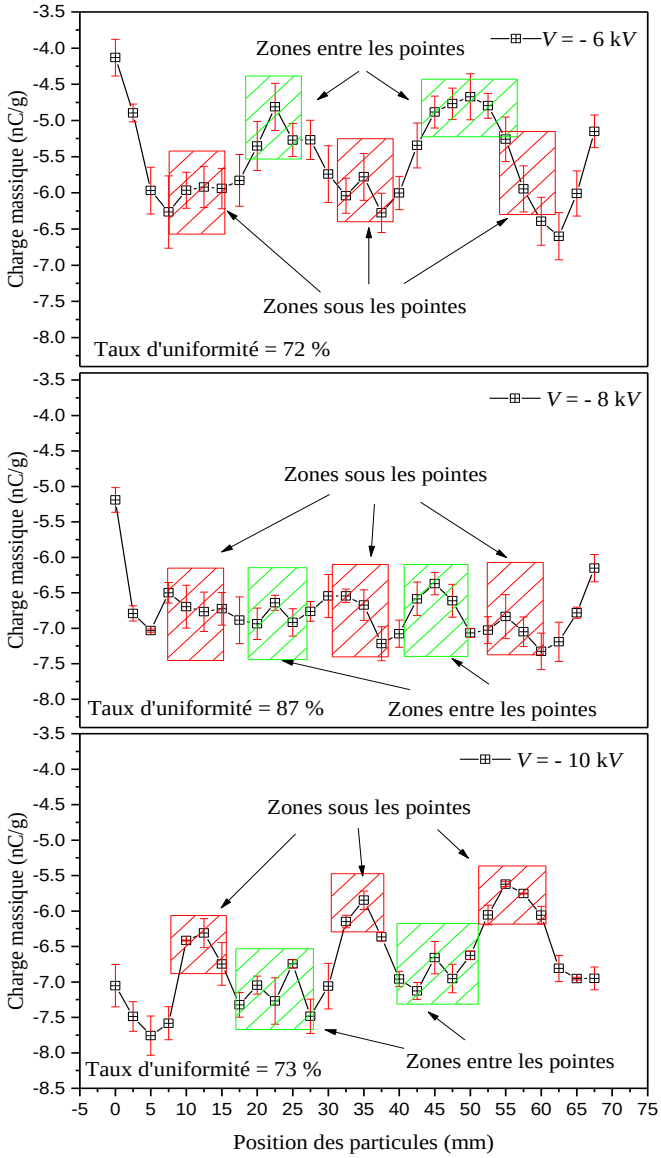


Figure IV.14 : *Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la tension appliquée V (v = 1 m/min, h = 30 mm, d = 50 mm).*

Le potentiel électrique à la surface supérieure de la particule augmente en raison de la charge électrique accumulée sur les particules pendant leur transfert sous la décharge couronne. Un champ électrique de haute intensité apparaît entre la particule chargée et la bande transporteuse. Lorsque ce champ électrique dépasse un certain seuil, une décharge partielle locale peut se produire et la charge sur la particule diminue. Ce phénomène est connu sous le nom de décharge couronne inverse et a été largement étudié en relation avec le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques [48], [114], [115]. Puisque les particules sont exposées à un champ électrique dont l'intensité diminue alors qu'elles se déplacent vers la sortie de la zone de décharge couronne, elles ne peuvent récupérer qu'une partie de la charge perdue lors de la

décharge partielle locale. Leur charge finale sera inférieure à celle des particules qui n'ont pas été soumises à la décharge couronne.

Dans la gamme de vitesses utilisée, la vitesse à laquelle les particules se déplacent à travers la décharge couronne a peu d'effet sur leur charge (Figure IV.15). Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus avec les plaques de PVC, dont la charge n'était pas affectée par le temps d'exposition. Ceci peut s'expliquer par la saturation rapide de la surface.

L'effet de la hauteur *h* (Figure IV.16), des aiguilles au-dessus des particules est similaire à celui de la tension appliquée. Pour *h* = 40 mm, le niveau des charges était plus élevé sous les aiguilles qu'entre elles, ce qui implique un mauvais taux d'uniformité. Pour *h* = 30 mm, le niveau global de charges est plus élevé et presque uniforme. Cependant, pour *h* = 20 mm, le niveau de charges était plus élevé entre les aiguilles et sur les bords.

Les résultats obtenus sur les particules de PP et les films de PP sont similaires pour toutes les distances entre les pointes. Une tension appliquée excessive accélère la décroissance du potentiel de surface et réduit le niveau de charge. Pour de faibles tensions appliquées, des bandes faiblement chargées apparaissent dans les zones entre les aiguilles.

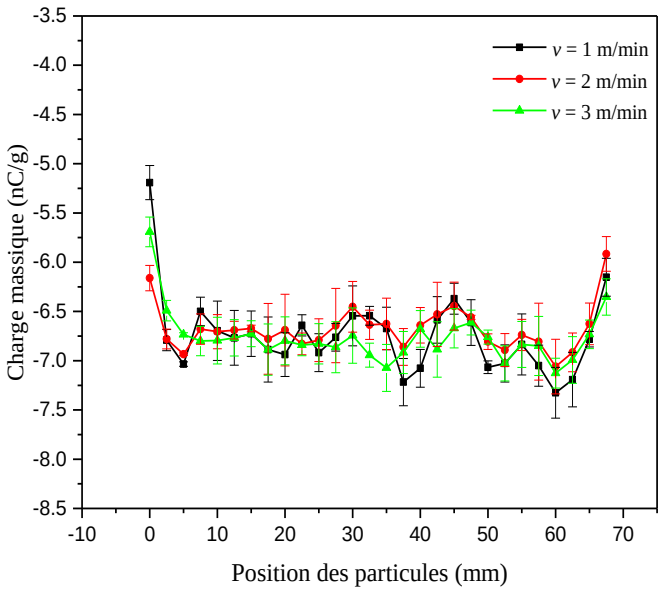


Figure IV.15 : *Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la vitesse v (V = - 8 kV, h = 30 mm, d = 50 mm).*

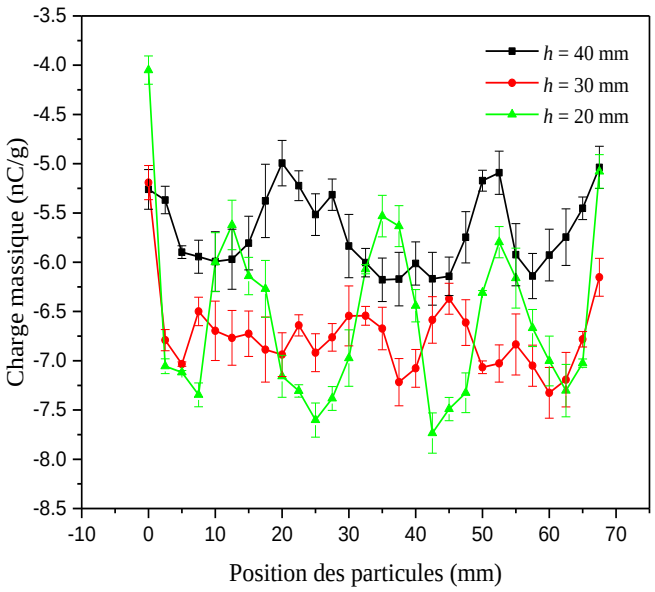


Figure IV.16 : *Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la hauteur h (v = 1 m/min, d = 50 mm, V = - 8 kV).*

La hauteur des pointes au-dessus des échantillons a le même effet que celui de la tension. À faible hauteur, un fort champ électrique est appliqué à la surface du matériau exposé, ce qui accélère la décroissance du potentiel de surface et réduit le niveau de charge. Pour des hauteurs plus élevées, des franges faiblement chargées apparaissent entre les aiguilles, ce qui augmente le taux d'uniformité. Le meilleur taux d'uniformité enregistré pour les particules de PP était de 87,81 % pour V = - 8 kV, d = 50 mm et h = 30 mm (Figure IV.17).

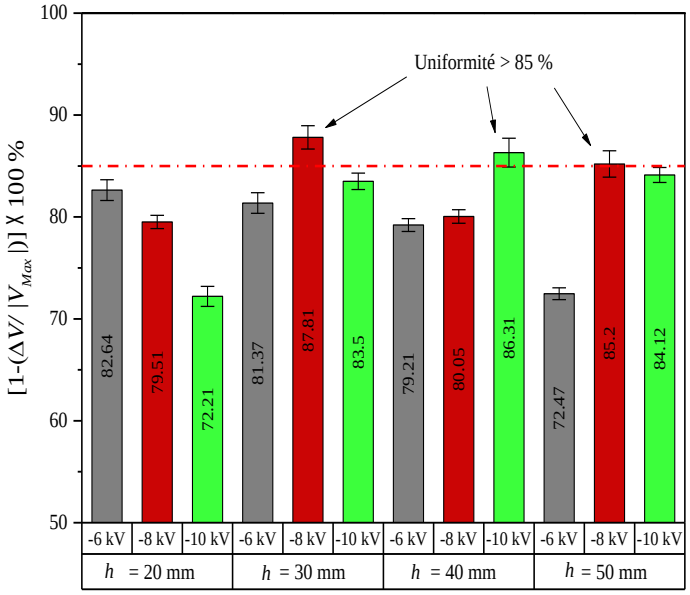


Figure IV.17 : *Taux d'uniformités pour le chargement dynamique des particules de PP; effet de la tension appliquée V et de la hauteur au-dessus de la surface h, (d = 50 mm et v = 1 m/min).*

La tension appliquée a un effet significatif sur le niveau de charge des particules. Afin d'assurer l'uniformité des charges sur la surface, un certain niveau de tension ne doit pas être dépassé, et un certain niveau de hauteur doit être respecté.

IV.4. Conclusions

Les résultats présentés dans ce chapitre mettent en évidence l'uniformité de la décharge couronne générée par des électrodes de plusieurs types : une pointe, trois pointes et sept pointes sur deux rangées.

1) Des corrélations existent entre la géométrie du système d'électrodes couronne et l'uniformité du potentiel électrique de surface et donc de la charge déposée des surfaces de polymères exposées au flux ionique.

2) Une étude "statique", réalisée avec des plaques de PVC au repos sous l'action de la décharge couronne générée par de tels arrangements d'électrodes, fait possible l'évaluation de l'effet de chaque facteur : la tension appliquée, la hauteur des pointes au-dessus de la surface du diélectrique, la distance inter-pointes et le temps d'exposition.

3) Une étude "dynamique", dans laquelle les échantillons sont en mouvement relatif par rapport aux électrodes, permet de quantifier ces effets dans des conditions plus proches de celles qui devraient être rencontrées dans des applications industrielles, telles que le chargement par effet couronne de matériaux granulaires en vue d'une séparation électrostatique ou dans le traitement de surface.

Les conclusions des études de charge "statique" réalisées avec une électrode "à pointe unique" peuvent être formulées comme suit :

(1) Pour des plaques diélectriques épaisses et des temps supérieurs à deux secondes, la durée d'exposition *t* a un effet négligeable dans la gamme des millisecondes à plusieurs secondes.

(2) Au-delà d'une certaine valeur de la tension appliquée, la décroissance du potentiel électrique de surface est accélérée dans les zones les plus exposées à la décharge couronne et l'uniformité de la distribution de charges devient plus faible.

(3) La diminution de la hauteur des pointes au-dessus des échantillons a un effet similaire à celui de la tension appliquée.

Dans le cas d'une charge "dynamique" utilisant l'électrode couronne à trois pointes :

(1) Pour de petites distances entre les pointes (moins de 20 mm), le potentiel électrique, ainsi que la quantité de charge déposée sur la surface, sont presque identiques lors de l'excitation de deux ou trois pointes dans les deux directions du mouvement relatif entre les échantillons et l'électrode.

(2) Lorsque la distance entre les pointes est à d = 60 mm, un bon taux d'uniformité (supérieur à 95 %) peut être enregistré dans toutes les situations.

(3) Dans le cas du chargement par deux pointes, en augmentant la distance d > 60 mm, des niveaux de charge inférieurs d'environ 10 % sont obtenus dans la zone centrale.

(4) Dans le cas de trois pointes, le niveau d'uniformité peut dépasser 96 %.

(5) Dans les conditions des expériences réalisées sur les films de PP, le meilleur taux d'uniformité (plus de 95 %) est enregistré pour la distance d = 40 mm entre les pointes, une hauteur de h = 40 mm et une tension appliquée V comprise entre - 12 kV et - 14 kV.

(6) La distance d entre les pointes est un facteur essentiel de l'uniformité de la charge sur des films de PP ; en choisissant la distance d = 40 mm avec chaque tension appliquée il y a au moins une hauteur qui assure une uniformité supérieure à 95 %.

(7) Dans les conditions des expériences réalisées sur les particules de PP, le meilleur taux d'uniformité (plus de 95 %) a été enregistré pour une distance entre les pointes des aiguilles d = 50 mm, une hauteur de h = 30 mm et une tension appliquée V = - 8 kV.

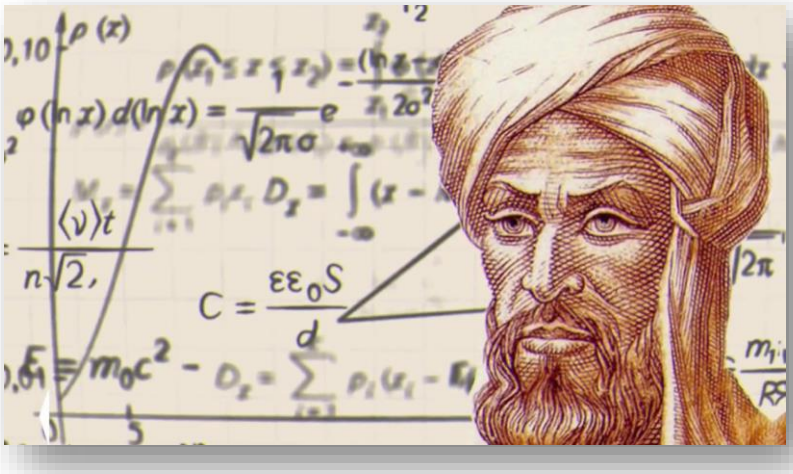
Lors de l'utilisation de l'électrode à sept pointes réparties sur deux rangées, pour la charge "dynamique" des plaques de PVC :

(1) La direction du mouvement n'a pas d'effet observable sur les profils du potentiel de surface.

(2) L'augmentation du nombre de pointes a un effet positif significatif sur l'uniformité de la charge déposée. Même si la configuration de l'électrode à deux rangées n'a pas encore été optimisée, des taux d'uniformités supérieures à 95 % peuvent être facilement atteints.

(3) La hauteur h des pointes au-dessus de la surface des échantillons a un effet significatif sur l'uniformité de la charge déposée ; elle peut atteindre 96 % pour h = 30 mm, et être inférieure à 90 % pour h = 20 mm, 35 mm et 40 mm.

Conclusions générales



Mohammad Ibn Mousa al-Khuwarizmi

محمد بن موسى الخوارزمي

(780-850)

Al-Khwarizmi, considéré comme le père de l'algèbre, était un mathématicien et un astronome qui a vécu au 9e siècle. Il a apporté à l'Occident les chiffres et le système décimal. Émigré de Perse orientale, il a mené une vie entourée de livres et s'est fait connaître pour sa façon audacieuse de penser.

Conclusions générales

Le sujet de cette thèse de doctorat s'inscrit dans le cadre général de l'étude expérimentale de la décharge couronne multi-pointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique. L'étude de l'influence de l'exposition à la décharge couronne a été menée afin d'assurer une bonne uniformité du dépôt de charge électrique sur des matériaux diélectriques. Notre travail avait pour objectifs :

- d'étudier l'influence des paramètres opératoires sur les caractéristiques courant-tension de la décharge couronne appliquée sur des films minces de PP et l'étude de l'effet de la décharge couronne sur la modification des caractéristiques chimiques de surface des plaques de PP.
- d'explorer les limites de l'uniformité de la charge obtenue lors de l'utilisation des électrodes couronne dans des dispositifs de séparation électrostatique de mélanges granulaires. Le challenge était de concevoir une électrode multi-pointes de manière à générer un effet de charge aussi uniforme que possible à la surface des diélectriques exposés à la décharge couronne.

Les caractéristiques courant-tension pour une géométrie multi-aiguilles ont été étudiées pour différentes distances inter-électrodes. Il a été démontré que l'équation de Townsend ne correspondait aux caractéristiques courant-tension en présence de diélectrique entre les électrodes que pour des distances inter-électrodes supérieures à 15 mm. Dans ces situations, la tension d'apparition de l'effet couronne n'est pas modifiée et la pente de la caractéristique courant-tension diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes.

Pour des distances inférieures à 15 mm, nous avons constaté que la formule empirique évoquée par Ferreira et *al*. s'adaptait mieux aux caractéristiques courant-tension de la décharge couronne. La tension d'apparition de l'effet couronne diminue avec l'augmentation de la distance inter-électrodes lorsque l'échantillon de PP est situé à des distances inférieures à 8 mm. La pente de la caractéristique courant-tension dans cette plage de distances diminue toujours. Pour des distances comprises entre 8 mm et 15 mm, la tension d'apparition de l'effet couronne et la pente de la caractéristique courant-tension deviennent stables.

L'analyse de divers aspects de l'uniformité de la charge déposée et de la modification chimique des plaques de PP exposées à la décharge couronne générée par une électrode à trois pointes montrent que :

- La distribution de la densité de courant produite par ce type d'électrode couronne est hautement non-uniforme.
- De manière surprenante, l'uniformité de la charge électrique déposée à la surface des plaques de PP exposées à la décharge couronne générée par l'électrode de type trois aiguilles est supérieure à 95 %.
- La durée d'exposition à la décharge couronne a également un effet sur l'apparition de groupes carbonyle (C=O) et hydroxyle (OH), qui améliorent l'hydrophilie des plaques de PP.
- Les angles de contact de gouttes d'eau mesurés à différents endroits de la surface des plaques de PP diminuent avec la durée d'exposition à la décharge couronne.
- L'uniformité du traitement s'améliore avec la durée d'exposition, un phénomène qui est bien corrélé avec la cartographie du potentiel électrique de surface.

Les résultats obtenus concernant l'uniformité de la décharge couronne générée par des électrodes de plusieurs types (une pointe, trois pointes et sept pointes sur deux rangées) mettent en évidence les corrélations qui existent entre la géométrie du système d'électrodes couronne et l'uniformité du potentiel électrique de surface et donc de la charge déposée sur des surfaces de polymères exposées au flux ionique. Une étude "statique", réalisée avec des plaques de PVC au repos sous l'action de la décharge couronne générée par de tels arrangements d'électrodes, a permis d'évaluer l'effet de plusieurs facteurs : la tension appliquée, la hauteur des pointes au-dessus de la surface du diélectrique, la distance inter-pointes et le temps d'exposition. Une étude "dynamique", dans laquelle les échantillons étaient en mouvement relatif par rapport aux électrodes, a permis de quantifier ces effets dans des conditions plus proches de celles qui devraient être rencontrées dans des applications industrielles. La troisième série d'expériences a été réalisée sur des particules de PP en mouvement sous la décharge couronne.

Les conclusions des études de charge "statique" réalisées avec une électrode "à pointe unique" peuvent être formulées comme suit :

- Pour des plaques diélectriques épaisses et des temps supérieurs à deux secondes, la durée d'exposition t a un effet négligeable dans la gamme des millisecondes à plusieurs secondes.

- Au-delà d'une certaine valeur de la tension appliquée, la décroissance du potentiel électrique de surface est accélérée dans les zones les plus exposées à la décharge couronne et l'uniformité de la distribution de charges se détériore.
- La diminution de la hauteur des pointes au-dessus des échantillons a un effet similaire à celui de la tension appliquée.

Dans le cas d'une charge "dynamique" utilisant l'électrode couronne à trois pointes :

- Pour de petites distances entre les aiguilles (moins de 20 mm), le potentiel électrique, ainsi que la quantité de charge déposée sur la surface, sont presque identiques lors de l'excitation de deux ou trois pointes dans les deux directions du mouvement relatif entre les échantillons et l'électrode.
- Lorsque la distance entre les pointes est à d = 60 mm, un bon taux d'uniformité (supérieur à 95 %) peut être enregistré dans toutes les situations.
- Dans le cas du chargement par deux pointes, en augmentant la distance d > 60 mm, des niveaux de charge inférieurs d'environ 10 % sont obtenus dans la zone centrale.
- Dans le cas de trois pointes, le niveau d'uniformité peut dépasser 96 %.
- Dans les conditions des expériences réalisées sur les films de PP, le meilleur taux d'uniformité (plus de 95 %) est enregistré pour la distance d = 40 mm entre les pointes, une hauteur de h = 40 mm et une tension appliquée V comprise entre - 12 kV et - 14 kV.
- La distance d entre les pointes est un facteur essentiel de l'uniformité de la charge sur des films de PP ; en choisissant la distance d = 40 mm avec chaque tension appliquée il y a au moins une hauteur qui assure une uniformité supérieure à 95 %.
- Dans les conditions des expériences réalisées sur les particules de PP, le meilleur taux d'uniformité (plus de 95 %) a été enregistré pour une distance entre les pointes des aiguilles d = 50 mm, une hauteur de h = 30 mm et une tension appliquée V = - 8 kV.

Lors de l'utilisation de l'électrode à sept pointes réparties sur deux rangées, pour la charge "dynamique" des plaques de PVC :

- La direction du mouvement n'a pas d'effet observable sur les profils du potentiel de surface.

- L'augmentation du nombre de pointes a un effet positif significatif sur l'uniformité de la charge déposée. Même si la configuration de l'électrode à deux rangées n'a pas encore été optimisée, des taux d'uniformités supérieures à 95 % peuvent être facilement atteints.
- La hauteur *h* des pointes au-dessus de la surface des échantillons a un effet significatif sur l'uniformité de la charge déposée ; elle peut atteindre 96 % pour *h* = 30 mm, et être inférieure à 90 % pour *h* = 20 mm, 35 mm et 40 mm.

Comme perspectives de ce travail, il serait intéressant de faire :

- L'extension de l'étude de la décharge couronne multi-pointes pour d'autres applications (le traitement de l'eau et la génération d'ozone).
- La modélisation de la décharge couronne multi-pointes/plan en absence et en présence du polymère.
- L'étude de l'uniformité du chargement produit par décharge couronne multi-pointes sur d'autres classes de polymères.
- L'étude de l'évolution de l'énergie de surface des plaques de PP traités par décharge couronne.

Liste des publications et communications de l'auteur

Publications Internationales

1. **M.S. Bendilmi,** T. Zeghloul, Z. Ziari, K. Medles, L. Dascalescu, "*Experimental characterization of electric potential uniformity at the surface of polymer plates corona charged by multiple-row needle-type electrodes*", Journal of Electrostatics, Vol. 115, 103656 (9 pages), January **2022**, **ISSN :** 0304-3886
   DOI : 10.1016/j.elstat.2021.103656
   https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388621001005

2. **M.S. Bendilmi,** T. Zeghloul, Z. Ziari, K. Medles, L. Dascalescu, "*Experimental characterization of a tri-needle-type corona electrode in view of improving charging uniformity*", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 58, N°. 1, pp. 783-791, Jan.-Feb. **2022**, **ISSN :** 0093-9994
   DOI : 10.1109/TIA.2021.3130012
   URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/9625803

Communications Internationales et Nationales

1. **M.S. Bendilmi**, T. Zeghloul, Z. Ziari, K. Medles, L. Dascalescu, "*Experimental characterization of a tri-needle-type corona electrode"*, 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS 2020), October 10-16, **2020**, Detroit, Michigan, **USA**
   ISBN : 978-1-7281-7193-7 (978-1-7281-7192-0/20/$31.00 © 2020 IEEE)
   DOI : 10.1109/IAS44978.2020.9334774
   URL : https://ieeexplore.ieee.org/document/9334774

2. **M.S. Bendilmi**, Z. Ziari, T. Zeghloul, K. Medles, L. Dascalescu, "*Deposited charge uniformity and chemical modification of a dielectric surface exposed to the corona discharge generated by a multi-needle electrode*", Proc. 2021 Annual Meeting of the Electrostatics Society of America (ESA 2021), June 14-16, **2021**, Norman, Oklahoma, **États-Unis**
   http://www.electrostatics.org/annualmeeting.html

3. **M.S. Bendilmi**, T. Zeghloul, Z. Ziari, K. Medles, L. Dascalescu, "*Experimental characterization of electric potential uniformity at the surface of polymer plates corona charged by multiple-row needle-type electrodes*", International Conference on Electrostatics, Electrostatics 2022, March 28-31, **2022**, Wroclaw, **Poland**
   https://www.electrostatics2021.pwr.edu.pl/wp/

4. **M.S. Bendilmi**, Z. Ziari, A. Boughedda, "*Réalisation d'un banc automatisé de décharge couronne multi-pointes*", Salon National des Produits de la Recherche organisé par la DGRSDT au Palais des Expositions, la SAFEX, **Alger**, les 2, 3 et 4 Juillet **2018**
   https://atrst.dz/salon-national-des-produits-de-la-recherche-2-4-juillet-2018-palais-des-expositions-alger/

5. **M.S. Bendilmi**, A. Boughedda, Z. Ziari, "*Banc automatisé de décharge couronne multi-pointes*", Journées Sciences Innovations (JSI'2018), FABLAB CIRTA, Université Frères Mentouri Constantine 1, **Constantine**, 22-23 Avril **2018**
   https://www.umc.edu.dz/index.php/en/students/entrepreneurship/item/1639-appel-a-projets-innovants-22-23-avril-2018

Table des Figures

Figure I.1 : Configuration d'électrodes pour la génération de la décharge couronne [52]. 13

Figure I.2 : Zone de dérive dans la décharge couronne configuration pointe-plan. 13

Figure I.3 : Décharge couronne négative pour une configuration pointe-plan, (a) cas de décharge couronne positive et (b) cas de décharge couronne négative. 14

Figure I.4 : Caractéristique courant-tension d'une décharge couronne dans l'air à pression atmosphérique [49]. 15

Figure I.5 : Différents mécanismes pouvant contribuer au déclin du potentiel de surface. 19

Figure I.6 : Mécanisme de formation du groupement carbonyle. 22

Figure I.7 : Schéma des forces superficielles présentes à l'interface solide-liquide 23

Figure I.8 : Exemples de divers angles de contact possibles [3] 24

Figure I.9 : Illustration du travail d'adhésion. 25

Figure I.10 : Séparateur électrostatique multifonctionnel à bande métallique. 26

Figure I.11 : Schéma représentatif d'un séparateur électrostatique multi-fonctions. 27

Figure II.1 : Schéma de la configuration expérimentale. 32

Figure II.2 : Extrémité des pointes utilisées (r = 50 µm). 33

Figure II.3 : Plaque de polypropylène (100 mm x 100 mm x 5 mm). 34

Figure II.4 : Représentation schématique du banc expérimental pour l'étude de l'exposition des plaques de PP à l'action de la décharge couronne, en mode statique. 34

Figure II.5 : Représentation schématique du banc expérimental pour la mesure de la densité de courant. 35

Figure II.6 : Représentation schématique du banc expérimental pour la mesure du potentiel électrique de surface. 35

Figure II.7 : Représentation schématique du banc expérimental pour la mesure de l'angle de contact. 36

Figure II.8 : Spectromètre FTIR-ATR Miracle 10. 36

Figure II.9 : Principe de l'ATR. 37

Figure II.10 : Matériaux utilisés. 38

Figure II.11 : Neutralisateur de charge électrostatique. 38

Figure II.12 : Surface inferieure des plaques de PVC peintes avec du graphite. 38

Figure II.13 : Représentation schématique du banc expérimental de chargement électrique des plaques en polymère en utilisant la décharge couronne produite par une pointe. 39

Figure II.14 : Représentation schématique du banc expérimental de chargement électrique des plaques en polymère en utilisant la décharge couronne produite par trois pointes. 39

Figure II.15 : Représentation schématique du banc expérimental à sept pointes 40

Figure II.16 : Alimentation haute tension de 0 à -30 kV. 40

Figure II.17 : Représentation schématique du banc de chargement dynamique des films de PP. 41

Figure II .18 : Représentation schématique du banc de chargement dynamique des particules de PP. 42

Figure II.19 : Représentation schématique du banc de chargement dynamique des plaques de PVC. 43

Figure II.20 : Schéma explicatif pour les méthodes d'obtention de Cm et dm. 44

Figure II.21 : Schéma représentatif de la méthode (I) de la génération des profils de potentiel de surface. 45

Figure II.22 : Schéma représentatif de la méthode (II) de la génération de profiles de potentiel de surface. 46

Figure III.1 : Caractéristiques courant-tension en absence et en présence du PP. 51

Figure III.2 : Caractéristiques courant-tension de la décharge couronne pour une, deux et trois pointes. 52

Figure III.3 : Caractéristiques courant-tension en fonction de la distance inter-électrodes. 54

Figure III.4 : Caractéristiques courant-tension pour h = 2, 4, 6 et 8 mm, (a) : I versus V, (b) : I/V versus V, (c) : $I^{1/2}$ versus V. 55

Figure III.5 : Caractéristiques courant-tension pour h = 8, 10, 12 et 15 mm, (a) : I versus V, (b) : I/V versus V, (c) : $I^{1/2}$ versus V. 57

Figure III.6 : Caractéristiques courant-tension pour h = 18, 22, 26 et 30 mm, (a) : I versus V, (b) : I/V versus V, (c) : $I^{1/2}$ versus V. 58

Figure III.7 : Variation de la tension d'apparition de l'effet couronne avec la distance inter-électrodes. 60

Figure III.8 : Variations des constantes de proportionnalités K et A avec la distance inter-électrodes. 60

Figure III.9 : Densité de courant de la décharge couronne générée par l'électrode à trois pointes à la surface de l'électrode plaque mise à la terre (V = 10 kV, d = 40 mm et h = 30 mm) ; (1, 2 et 3 sont les zones sous les pointes, 4 la zone entre les pointes). 63

Figure III.10 : Cartographie du potentiel de surface sur une plaque de PP (V = 10 kV, d = 40 mm, t = 20 sec et h = 30 mm) ; (1, 2 et 3 sont les zones sous les pointes, 4 la zone entre les pointes). 63

Figure III.11 : Représentation des zones où la mesure de l'angle de contact a été effectuée ; (A) sous la pointe (1), (B) au milieu entre les deux pointes (2) et (3), (C) au milieu entre les trois pointes et (D) dans le bord de la plaque. 64

Figure III.12 : Photo de la goutte d'eau déposée sur des plaques de PP non traitée (a) et traitées par décharge couronne pour deux temps de traitement 20 min (b) et 120 min (c). 64

Figure III.13 : Variation de l'angle de contact en fonction du temps de traitement des plaques de PP ; (A) sous la pointe, (B) entre les deux pointes, (C) entre les trois pointes et (D) dans le bord de la plaque. 65

Figure III.14 : Travail d'adhésion en fonction du temps de traitement des plaques de PP ; (A) sous la pointe, (B) au milieu entre les deux pointes, (C) au milieu entre les trois pointes et (D) dans le bord de la plaque. 66

Figure III.15 : Spectres FTIR-ATR pour des plaques de PP non traitée et traitées par décharge couronne avec différents temps d'exposition. 67

Figure IV.1 : Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC; effet du temps d'exposition t, (a) une pointe (V = -10 kV, h = 30 mm), (b) trois pointes (V = -10 kV, h = 30 mm, d = 60 mm). 73

Figure IV.2 : Profils du potentiel de surface de plaque de PVC; effet de la tension appliquée V, (a) Une pointe (h = 30 mm, t = 5 s), (b) Trois pointes (h = 30 mm, t = 2 s, d = 60 mm).... 74

Figure IV.3 : (a) (Une pointe) Valeurs maximales du potentiel de surface enregistrées; effet de la hauteur h au-dessus de la surface de la plaque de PVC, (V = - 10 kV, t = 5 s), (b) (Trois pointes) Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques PVC; effet de la hauteur des pointes au-dessus de la plaque de PVC (V = - 10 kV, t = 2 s, d = 60 mm) 75

Figure IV.4 : Taux d'uniformités pour le chargement statique par une pointe des plaques de PVC; effet de la tension appliquée V et de la hauteur au-dessus de la surface h, (t = 5 s). 76

Figure IV.5 : Taux d'uniformités pour le chargement statique des plaques de PVC dans le cas de l'électrode à trois pointes; effet de la tension appliquée V et la hauteur au-dessus de la surface h, (t = 2 s, d=60 mm). 77

Figure IV.6 : Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC; effet de la direction du mouvement, (V = - 10 kV, h = 30 mm, t = 2 s, v = 1 m/min)..... 79

Figure IV.7 : Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC chargées par l'électrode à deux rangées ; effet de la direction, (V = -10 kV, h = 30 mm, v = 1 m/min)..... 80

Figure IV.8 : Profils du potentiel de surface enregistrés sur des plaques de PVC chargées par l'électrode à deux rangées; effet de la tension appliquée, (Direction A, h = 30 mm, v =..... 81

Figure IV.9 : Profils du potentiel de surface enregistrés sur des films de PP; effet de la distance entre les pointes d (h = 40 mm, v = 1 m/min s, V = - 14 kV). 81

Figure IV.10 : Taux d'uniformité pour le chargement dynamique des plaques de PVC par deux et trois pointes ; effets de la tension appliquée V et de la direction de passage, (h = 30 mm, v = 1 m/min). 82

Figure IV.11 : Taux d'uniformités pour le chargement dynamique des plaques de PVC par sept pointes ; effet de la tension appliquée V et de la hauteur au dessus de la surface, (Direction A, v = 1 m/min). 83

Figure IV.12 : Taux d'uniformités pour le chargement dynamique avec trois pointes du film de PP; effet de la tension appliquée V et de la hauteur des pointes au-dessus de la surface (d = 40 mm). 84

Figure IV.13 : Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la distance inter-pointes d (v = 1 m/min, h = 30 mm, V = - 6 kV). 86

Figure IV.14 : Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la tension appliquée V (v = 1 m/min, h = 30 mm, d = 50 mm). 87

Figure IV.15 : Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la vitesse v (V = - 8 kV, h = 30 mm, d = 50 mm). 88

Figure IV.16 : Charge massique des particules de PP chargées par décharge couronne ; effet de la hauteur h (v = 1 m/min, d = 50 mm, V = - 8 kV). 89

Figure IV.17 : Taux d'uniformités pour le chargement dynamique des particules de PP; effet de la tension appliquée V et de la hauteur au-dessus de la surface h, (d = 50 mm et v = 1 m/min). 89

Références bibliographiques

[1] C.M. Chan, T.M. Ko, H. Hiraoka, "Polymer surface modification by plasmas and photons", Surface Science Reports, Vol. 24, N°. 1-2, pp. 1-54, 1996. .

[2] S.M. Mirabedini, H. Rahimi, Sh Hamedifar, S.M. Mohseni, "Microwave irradiation of polypropylene surface : a study on wettability and adhesion", International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 24, N°. 2, pp. 163-170, 2004.

[3] E. Darque-Ceretti, E. Felder, Sciences et Techniques de l'Ingénieur, "Adhésion et adhérence", Vol. 4, CNRS Edition, Paris, Chapitre 4, pp. 285-373, 2003.

[4] S.J. Park, J.S. Jin, "Effect of corona discharge treatment on the dyeability of low density polyethylene film", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 236, N°. 1, pp. 155-160, 2001.

[5] J. Friedrich, L. Wigant, W. Unger, A. Lippitz, H. Wittrich, "Corona, spark and combined UV and ozone modification of polymer films WeBP23", Surface and Coatings Technology, Vol. 98, N°. 1-3, pp. 879-885, 1998.

[6] L.F. MacManus, "Surface modification studies of polypropylene using ultraviolet radiation and ozone", Master of Science, University of Western Ontario, London, Ontario, 1998.

[7] H. Kaczmarek, J. Kowalonek, A. Szalla, A. Sionkowska, "Surface modification of thin polymeric films by air-plasma or UV-irradiation", Surface Science, Vol. 507-510, pp. 883-888, 2002.

[8] M. Matsunaga, P. J. Whitney, "Surface changes brought about by corona discharge treatment of polyethylene film and the effect on subsequent microbial colonisation", Polymer Degradation and Stability, Vol. 70, N°. 3, pp. 325–332, 2000.

[9] L.A. O'Hare, S. Leadley, B. Parbhoo, "Surface physicochemistry of corona discharge treated polypropylene film", Surface Interface Analysis, Vol. 33, N°. 4, pp. 335-342, 2002.

[10] Z. Niu, C. Zhang, T. Shao, Z. Fang, Y. Yu, P. Yan, "Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers", Surface and Coatings Technology, Vol. 228, N°. 1, S578-S582, Aug. 2013.

[11] C. Liu, N. Cui, M.D. Brown, B.J. Meenan, "Effects of DBD plasma operating parameters on the polymer surface modification", Surface and Coatings Technology, Vol. 185, N°. 2, pp. 311-320, Jul. 2004.

[12] A. Popelka, I. Krupa, I. Novak, S.A. Al-Maadeed, M. Ouederni, "Improvement of aluminum/polyethylene adhesion through corona discharge", Journal of Physics D Appleid Physics, Vol. 50, N°. 3, 35204, 2016.

[13] K. Kim, K. Seomoon, "A study on the corona-treated PVdF films with alkyl methacrylate monomer as a coupling agent", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 47, pp. 150-153, 2017.

[14] V.O. Dryakhlov, M. Yu Nikitina, I.G. Shaikhiev, M.F. Galikhanov, T.I. Shaikhiev, B.S. Bonev, "Effect of parameters of the corona discharge treatment of the surface of polyacrylonitrile membranes on the separation efficiency of oil-in-water emulsions", Surface Engineering and Applied Electrochemistry, Vol. 51, N°. 4, pp. 406-411, 2015.

[15] E. Bormashenko, I. Legchenkova, S. Navon-Venezia, M. Frenkel, Y. Bormashenko, "Investigation of the impact of cold plasma treatment on the chemical composition and wettability of medical grade polyvinylchloride", Applied Sciences, Vol. 11, N°. 1, 300, 2021.

[16] L. Dascalescu, T. Zeghloul, A. Iuga, "Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment", Chapter 4, WEEE Recycling, Research, Development, and Policies, Amsterdam, Elsevier, pp. 75-106, 2016.

[17] M. Maamar, W. Aksa, M.F. Boukhoulda, S. Touhami, L. Dascalescu, T. Zeghloul, "Modeling and simulation of nonconductive particles trajectories in a multifunctional electrostatic separator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, N°. 5, pp. 5244-5252, 2019.

[18] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, L. Dascalescu, "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, N°. 4, pp. 1045-1051, Jul./Aug. 2008.

[19] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, "Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes", Particulate Science and Technology, Vol. 16, N°. 1, pp. 25-42, 1998.

[20] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef, L. Dascalescu, "Sorting of finely-grinded granular mixtures using a belt-type corona-electrostatic separator", in Proc. IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Addison, TX, USA, pp. 1-5, 2015.

[21] J.E. Lawver, W.P. Dyrenforth, "Electrostatic separation", Electrostatics and Its Applications, A.D. Moore, Ed., New York, NY, USA : Wiley, pp. 221-249, 1973.

[22] Y. Higashiyama, K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology", Particulate Science and Technology, Vol. 16, N°. 1, pp. 77-90, 1998.

[23] J.M. Crowley, Fundamentals of Applied Electrostatics. Morgan Hill (Calif.) : Laplacian Press, cop, USA : 1999.

[24] S. Chen, K. Li, S. Nijdam, "Transition mechanism of negative DC corona modes in atmospheric air : from Trichel pulses to pulseless glow", Plasma Sources Science Technology, Vol. 28, N°. 5, 55017, 2019.

[25] M. Rong, D. Liu, D. Wang, B. Su, X. Wang, Y. Wu, "A new structure optimization method for the inter-needle distance of a multi-needle-to-plane barrier discharge reactor", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 38, N°. 4, pp. 966-972, 2010.

[26] M.C. Plopeanu, L. Dascalescu, B. Yahiaoui, A. Antoniu, M. Hulea, P.V. Notingher, "Repartition of electric potential at the surface of nonwoven fabrics for air filtration", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 48, N°. 3, pp. 851-856, May-June 2012.

[27] B. Yahiaoui, M. Megherbi, A. Smaili, A. Antoniu, B. Tabti, L. Dascalescu, "Distribution of electric potential at the surface of corona-charged polypropylene nonwoven fabrics after neutralization", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, N°. 4, pp. 1758-1766, July-Aug. 2013.

[28] P. Llovera, P. Molinie, "New methodology for surface potential decay measurements: application to study charge injection dynamics on polypropylene films", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, N°. 6, pp. 1049-1056, 2004.

[29] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, L. Dascalescu, "Characterization of dual corona-electrostatic electrodes for electrostatic processes applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, N°. 3, pp. 692-698, May-June 2008.

[30] B. He, T. Li, Y. Xiu, H. Zhao, Z. Peng, Y. Meng, "Study on law of negative corona discharge in microparticle-air two-phase flow media", AIP Advanced 6, Vol. 6, N°. 3, 035114, 2016.

[31] H. Nouri, N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, "Effect of relative humidity on current-voltage characteristics of an electrostatic precipitator", Journal of Electrostatics, Vol. 70, N°. 1, pp. 20-24, 2012.

[32] J.H. Lee, H.G. Kim, G.S. Khang, H.B. Lee, M.S. Jhon, "Characterization of wettability gradient surfaces prepared by corona discharge treatment", Journal of Colloid Interface Science, Vol. 151, N°. 2, pp. 563-570, 1992.

[33] X. Li, L. Cai, X. Xu, Z. Wan, X. Ma, Y. Liu, "Analysis on corona discharge electrical characteristics of wind turbine blades", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 60, N°. 1, pp. 91-101, 2019.

[34] A. Rahmani, O. Chibane, K. Smili, B. Bendahmane, A. Kasdi, L. Dascalescu, "Characterisation of a two-wire corona electrode", Proc. The Electrical Engineering International Conference EEIC'2019, University of Bejaia, Algeria, Vol. 1, pp. 4-7, 2019..

[35] A.Y. Wardaya, M. Nur, J.E. Suseno, "A study of the corona discharge theory for multipoint–plane configurations", Indian Journal of Physics, Vol. 94, N°. 3, pp. 409-415, 2020.

[36] A. Fatihou, L. Dascalescu, N. Zouzou, M.B. Neagoe, A. Reguig, L. M. Dumitran, "Measurement of surface potential of non-uniformly charged insulating materials using a non-contact electrostatic voltmeter", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, N°. 4, pp. 2377-2384, Aug. 2016.

[37] L. Dascalescu, A. Luga, R. Morar, V. Neamtu. I. Suarasan, A. Samuila, D. Rafiroiu, "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators", Journal of Electrostatics, Vol. 29, N°. 3, pp. 211-225, 1993.

[38] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, L. Dascalescu, "Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, N°. 4, pp. 1564-1569, 2010.

[39] R. Gupta, D. Gidaspow, D.T. Wasan, "Electrostatic separation of powder mixtures based on the work functions of its constituents", Powder Technology, Vol. 75, N°. 1, pp. 79-87, 1993.

[40] L. Dascalescu, C. Dragan, M. Bilici, R. Beleca, Y. Hemery, X. Rouau, "Electrostatic basis for separation of wheat bran tissues", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, N°. 2, pp. 659-665, 2010.

[41] M. Remadnia, M. Kachi, S. Messal, A. Oprean, X. Rouau, L. Dascalescu, "Electrostatic separation of peeling and gluten from finely ground wheat grains", Particulate Science and Technology, Vol. 32, N°. 6, pp. 608-615, 2014.

[42] S. Kumara, B. Ma, Y.V. Serdyuk, S.M. Gubanski, "Surface charge decay on HTV silicone rubber: effect of material treatment by corona discharges", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, N°. 6, pp. 2189-2195, 2012.

[43] K. Komatsu, M. Shimada, Y. Mizuno, "Interaction of partial discharge in air with silicone rubber", 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-4, 2018.

[44] S.M. Gubanski, "Outdoor polymeric insulators: Role of corona in performance of silicone rubber housings", 2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 1-9, 2015.

[45] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M.C. Plopeanu, L. Dascalescu, "Experimental and numerical characterization of corona discharge generated by a triode electrode system", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, N°. 3, pp. 2513-2519, 2015.

[46] I. Benaouda, T. Zeghloul, K. Medles, M.E.M. Zelmat, A. Tilmatine, L. Dascalescu, "Corona-charged insulating belt electrode conveyor-type electrostatic separator for granular plastic wastes", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 56, N°. 6, pp. 6997-7004, 2020.

[47] A. Iuga, R. Morar, L. Dascalescu, A. Samuila, D. Rafiroiu, "A new type of corona electrode for high-tension separators", Magnetic and Electrical Separation, Vol. 4, pp. 75-90, 1993.

[48] L. Dascalescu, A. Samuila, D. Rafiroiu, A. Iuga, R. Morar, "Multiple-needle corona electrodes for electrostatic processes application", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, N°. 3, pp. 543-548, 1999.

[49] N. Amiour, "Contribution à l'étude de l'influence d'une décharge couronne sur les propriétés de films minces de polyimide en vue de leur utilisation dans le biomédical", Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2022.

[50] B. Tabti, B. Yahiaoui, B. Bendahmane, L. Dascalescu, "Surface potential decay dynamic characteristics of negative-corona-charged fibrous dielectric materials", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, N°. 2, pp. 829-835, 2014.

[51] 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, 2008.

[52] J.M. Plewa, "Simulation 3D d'une décharge couronne pointe-plan, dans l'air : calcul haute performance, algorithmes de résolution de l'équation de Poisson et analyses physiques", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017.

[53] G. Quinio, "Modélisation numérique de la génération d'un plasma d'air dans un écoulement aérodynamique", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2005.

[54] H. Mellouki, "Charge et décharge des matériaux isolants", Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.

[55] J.C. Matéo-Vélez, "Modélisation et simulation numérique de la génération de plasma dans les décharges couronnes et de son interaction avec l'aérodynamique", Thèse de Doctorat, ONERA - Centre de Toulouse, 2006.

[56] A. Labergue, "Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas - Application au contrôle de décollements d'écoulements", Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.

[57] A. Nadjem, "Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques", Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2018.

[58] A. hamidi, "Développement d'un chargeur à décharge couronne pour la mesure à 10 Hz de la concentration d'aérosol atmosphérique", Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud, 2014.

[59] B. Benamar, "La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : Etude expérimentale et numérique", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008.

[60] A. Bouteffaha, "Etude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans des configurations d'électrodes de type « triode »", Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbes, 2015.

[61] A. Abahazem, "Etude expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009.

[62] M. Meziane, "Modélisation 2D et 3D d'un écoulement gazeux instationnaire activé par décharges couronne dans un réacteur multi-pointes plan dédié à la décontamination des gaz", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011.

[63] M. Karadjian, "Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique", Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 2018.

[64] K. Rouagdia, "Analyse de la dynamique des charges à la surface des polymères isolants", Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2015.

[65] E.A. Baum, T.J. Lewis, R. Toomer, "The lateral motion of charge on thin films of polyethylene terephtalate", Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 11, N°. 6, pp. 963-977, 1978.

[66] D.K. Das Gupta, "Electrical properties of surfaces of polymeric insulators", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, N° 5, pp. 909-923, 1992.

[67] P. Llovera Segovia, "Étude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel : Nouveaux outils d'analyse", Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, 2002.

[68] P. Molinie, "Charge injection in corona charged polymeric films : Potential decay and current measurements", Journal of Electrostatics, Vol. 45, N°. 4, pp. 265-273, 1999.

[69] S. Sahli, A. Bellel, Z. Ziari, A. Kahlouche, Y. Segui, "Measure and analysis of potential decay in polypropylene films after negative corona charge deposition", Journal of Electrostatics, Vol. 57, N°.2, pp. 169-181, 2003.

[70] N. Sellin, C. Campos, "Surface composition analysis of PP films treated by corona discharge", Materials Research, Vol. 6, N°. 2, pp. 163-166, 2003.

[71] D. Zhang, Q. Sun, L.C. Wadsworth, "Mechanism of corona treatment on polyolefin films", Polymer Engineering and Science, Vol. 38, N°. 6, pp. 965-970, 1998.

[72] Q. Sun, D. Zhang, L.C. Wadsworth, "Corona treatment of polyolefin films-A review", Advances in Polymer Technology, Vol. 18, N°. 2, (1999), pp. 171-180, 1999.

[73] N. Dumitrascu, G. Borcia, G. Popa, "Corona discharge treatments of plastified PVC samples used in biological environment", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 81, pp. 2419-2425. 2001.

[74] F. Dini, S. Thery, "Adhérence des polymères sur l'acier et leurs traitements de surface", Résumé du rapport. RI 90 604, pp. 1-36, 1990.

[75] S.B. Christian, "Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surfaces dans le domaine des biomatériaux", Mémoire pour l'obtention du grade de Maître des Sciences (M.Sc.), Génie des mines, Métallurgie et matériaux, Université Laval, 2007.

[76] Syed Asif Ansar, "Co-projection d'alumine et d'acier inoxydable par plasma d.arc", Thèse de doctorat, Du Gik Institute of Engineering Sciences & Technology, Université de Limoges, 2004.

[77]] S. Petit-Boileau, "Préparation de surface du PET avant métallisation : étude et comparaison des procédés laser excimère et plasma hors-équilibre", Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 2003.

[78] A.D. Moore, "Electrostatics and its Applications", Wiley, New York, 1973.

[79] Davis J. Bohm, "Electrostatic Precipitators, Elsevier", Amsterdam, 1982.

[80] J.F. Hughes, "Electrostatic Powder Coating", Wiley, New York, 1985.

[81] J.M. Crowley, "Fundamentals of Applied Electrostatics", Wiley, New York, 1986.

[82] O.C. Ralston, "Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids", Elsevier, Amsterdam, 1961.

[83] L. Brands, P.M. Beier, I. Stahl, "Electrostatic Separation, in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley–VCH Verlag, Weinheim, 2001.

[84] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, I. Suarasan, "Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators", Journal of Physics D : Applied Physics Vol. 27, N°. 6, pp. 1242-1251, 1994.

[85] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazeon, A. Iuga, R. Morar, M. Mihailescu, A. Samuila, "Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N°. 5, pp. 947-956, 1995.

[86] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, L. Dascalescu, "Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes", IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, Vol. 148, pp. 47-54, 2001.

[87] I.I. Inculet, "Electrostatic Mineral Separation", Wiley, New York, 1986.

[88] K. Haga, "Applications of the electrostatic separation technique", in: J.S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley, Eds. Handbook of Electrostatic Processes, New York : Marcel Decker, pp. 365-386, 1995.

[89] J.F. Delon, "Théorie de la séparation électrostatique à l'aide de l'effet corona", Annales des Mines, Vol. 3, pp. 37-50, 1966.

[90] G.S.P. Castle, "Contact charging between insulators", Journal of Electrostatics. Vol. 40-41, pp. 13-20, 1997.

[91] S. Trigwell, K.B. Tennal, M.K. Mazumder, D.A. Lindquist, "Precombustion cleaning of coal by triboelectric separation of minerals", Particulate Science and Technology. Vol. 21, pp 353-364, 2003.

[92] L. Dascalescu, R. Tobazeon, P. Atten, "Behaviour of conductive particles in corona-dominated electric fields", Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 28, pp. 1611-1618, 1995.

[93] A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani, L. Dascalescu, "Séparation électrostatique : complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels", Journal of Electrostatics, Vol. 61, N°. 1, pp. 21-30, 2004.

[94] M. Pauthenier and M. Moreau-Hanot, "La charge des particules sphériques dans un champ ionisé", Journal de Physique et le Radium, Vol. 3, N°. 12, pp 590-613, 1932.

[95] N. J. Félici, "Forces et charges de petits objets en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique", General Electric Review, Vol. 75, pp. 1145-1160, 1966.

[96] Touhami, W. Aksa, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, "Numerical simulation of the trajectories of insulating particles in a tribo-aero-electrostatic separator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, N°. 5, pp. 4151-4158, Sep. 2015.

[97] J. Li, L. Dascalescu, M. Bilici, Z. Xu, "Numerical modeling of the trajectories of plastic granules in a tribo-aero-electrostatic separator", Journal of Electrostatics, Vol. 71, N°. 3, pp. 281-286, 2013.

[98] H. Labair, S. Touhami, A. Tilmatine, S. Hadjeri, K. Medles, L. Dascalescu, "Study of charged particles trajectories in free fall electrostatic separators", Journal of Electrostatics, Vol. 88, pp. 10-14, 2017.

[99] S. Touhami, W. Aksa, M. Maammar, T. Zeghloul, K. Medles, L. Dascalescu, "Numerical simulation of the behavior of insulating particles in a free fall tribo-electrostatic separator with four vertical cylindrical electrodes", Journal of Electrostatics, Vol. 97, pp. 8-14, 2019.

[100] J. Wu, J. Li, Z.M. Xu, "An improved model for computing the trajectories of conductive particles in roll-type electrostatic separator for recycling metals from WEEE", Journal of Hazardous Materials, Vol. 167, N°. 1-3, pp. 489-493, 2009.

[101] C. Kevin, C. Muammer, T.M. Dario, C. Vincent, O. Stephen, "Modelling of particle motion in an internal re-circulatory fluidized bed", Chemical Engineering Journal, Vol. 164, N°. 2-3, pp. 393-402, 2010.

[102] M. D. Mirouse, "L'apport de l'infrarouge à l'analyse", Reims, Mar. 1998.

[103] S. Kumara, Y. Serdyuk, S.M. Gubanski, "Calculation of corona voltage-current characteristics in air", 2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), Peradeniya, Sri Lanka, pp. 489-492, 28-29 December 2009.

[104] H. Ait Said, M. Aissou, H. Nouri, and Y. Zebboudj, "Effect of wires number on corona discharge of an electrostatic precipitators", Journal of Electrical Systems, Vol. 10, N°. 4, pp. 392-405, 2014.

[105] J.S. Townsend, "Electricity in gases", 1915.

[106] G.F.L. Ferreira, O.N. Oliveira, J.A. Giacometti, "Point-to-plane corona : Current-voltage characteristics for positive and negative polarity with evidence of an electronic component", Journal of Applied Physics, Vol. 59, N°. 9, pp. 3045-3049, 1986.

[107] M. Kachi, A. Nadjem, A. Moussaoui, L. Dascalescu, N. Zouzou, "Corona discharge as affected by the presence of various dielectric materials on the surface of a grounded electrode", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, N°. 2, pp. 390-395, 2018.

[108] M.T. El-Mohandes, S. Ushiroda, S. Kajita, Y. Kondo, K. Horii, "Current density distribution on the plane electrode in a multineedle to plane configuration", Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, TX, USA, pp. 1527-15306, August 1992.

[109] L.C. Thanh, "Negative corona in a multiple interacting point-to-plane gap in air", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-21, N°. 2, pp. 518-522, 1985.

[110] B.L. Henson, "A space-charge region model for microscopic steady coronas from points", Journal of Applied Physics, Vol. 52, N°. 2, pp. 709-715, 1981.

[111] A.J. Conesa, M. Sánchez, "The current-voltage characteristics of corona discharge in wire to cylinder in parallel electrode arrangement', IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 46, N°.8, pp. 3022-3030, 2018.

[112] X. Meng, H. Zhang, J. Zhu, "A general empirical formula of current-voltage characteristics for point-to-plane geometry corona discharges", Journal of Physics D Applied Physics, Vol. 41, N°. 6, 065209, 2008.

[113] A. Reguig, A. Bendaoud, B. Neagoe, Y. Prawatya, L. Dascalescu, "Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations", Journal of Electrostatics, Vol. 82, pp. 55, 2016.

[114] M.S. Bendilmi, T. Zeghloul, Z. Ziari, K. Medles, L. Dascalescu, "Experimental characterization of electric potential uniformity at the surface of polymer plates corona charged by multiple-row needle-type electrodes", Journal of Electrostatics, Vol. 115, 103656, 2022.

[115] M.S. Bendilmi, T. Zeghloul, Z. Ziari, K. Medles, L. Dascalescu, "Experimental characterization of a tri-needle-type corona electrode", 2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-4, 2020.

[116] M. Ieda, G. Sawa, U. Shinohara, "A decay process of surface electric charges across polyethylene film", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 6, N°. 6, pp. 793-794, 1967.

[117] L.R. Zhou, G.N. Wu, B. Gao, K. Zhou, J. Liu, K.J. Cao, L.J. Zhou, "Study on charge transport mechanism and space charge characteristics of polyimide films", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 4, pp. 1143-1149, 2009.

[118] H. Mallem, Z. Ziari, S. Sahli, "Temperature effect on electrical characteristics of negative DC corona charged polyimide films", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, N°. 2, pp. 421-427, 2018.

[119] Z. Xu, L. Zhang, G. Chen, "Decay of electric charge on corona charged polyethylene", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 40, N°. 22, p. 7085, 2007.

[120] Z. Ziari, S. Sahli, A. Bellel, "Surface potential decay of low density polyethylene (LDPE) films under different corona discharge conditions", Moroccan Journal of Condensed Matter, Vol. 12, N°. 3, 2010.