

Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des sciences et la technologie

Département d'électrotechnique

Laboratoire des sciences et techniques de l'eau (LSTE)

THESE de DOCTORAT

Spécialité : Electrotechnique (Haute Tension, Réseaux électrique)

Intitulée

Contribution à l'étude de la séparation électrostatique dans l'industrie de recyclage par la technique des ondes mobiles.

Présentée par : Hadj Ali Aicha

Le : 25/11/2021

Devant le jury :

Président	Azzedine Hocine	MCA	Université de Mascara
Examineur	Dahou Omar	MCA	Université de Mascara
Examineur	Ouidir Rabah	Professeur	Université d'USTO-Oran
Encadrant	Zelmat Mohammed El Mouloud	Professeur	Université d'USTO-Oran
Co-Encadrant	Benmimoun Youcef	Professeur	Université de Mascara
Invité	Tilmatine Amar	Professeur	Université d'UDL-SBA

Année Universitaire : 2020-2021

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le clément et miséricordieux de m'avoir accordé des connaissances de la science, le courage et la force de mener à bien cet humble travail.

Mes remerciements à toute ma famille en particulier, je dois à mes parents, beaucoup de ce que je suis devenue. Je les remercie pour leur amour, leur soutien et leur confiance et pour tous les sacrifices.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Professeur ZELMAT Mohammed El Mouloud, pour ses multiples conseils, merci pour vos précieux conseils, qui ont été essentiels à notre succès au cours de toutes ces années de travail.

Je remercie également mon co-directeur de thèse, Professeur BENMIMOUN Youcef pour les nombreux conseils riches qu'il m'a fournis. J'adresse tous mes remerciements au Docteur AZZEDINE HOCINE, pour avoir accepté de présider mon jury.

Mes remerciements vont également à Messieurs : Professeur OUIDDIR Rabah, Docteur DAHOU Omar, qui m'ont fait l'honneur d'examiner, évaluer et juger cette thèse. Je les prie de bien vouloir accepter mes plus vifs et sincères remerciements.

Ma profonde gratitude, de façon très particulière, s'adresse aussi au professeur TILMATINE Amar de m'avoir facilité l'accès au laboratoire APELEC, où j'ai fait les expériences concernant le sujet de recherche, merci pour son aide précieuse et les remarques utiles qu'il m'a procurées durant les trois années précédentes. Je le remercie aussi pour ses conseils, son admirable esprit scientifique, sa disponibilité, sa gentillesse, ses orientations et son soutien.

HADJ ALI Aicha

Je dédié ce travail à :

Ma mère et mon père.

Mes frères, ma sœur et ma belle sœur.

Mes neveux, Tarek et Marouane.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art et généralité	
I.1. Introduction	4
I.2. Dispositifs de la séparation électrostatique (métal /plastique)	4
a) Séparateur à tambour	4
b) Séparateur à plaque	6
c) Séparateur à tapis	8
d) Séparateur à chute libre	9
I.3. Applications des convoyeurs à ondes mobiles basé sur un champ électrique non uniforme	11
I.3.1. Transport et séparation des particules chargées	11
I.3.2. Nettoyage des panneaux solaires	12
I.3.2.1. Panneaux solaires terrestres	12
I.3.2.2. Nettoyage des panneaux solaires dans l'espace	14
I.3.3. Transport des particules fines par convoyeur à ondes mobiles (COM)	16
I.3.4. Application du COM dans la séparation métal/plastique	19
I.3.4.1. Convoyeur à ondes mobiles simple face	19
I.3.4.2. Force diélectrophorétique	21
I.3.4.3. Ondes mobiles	23
I.3.4.4. Polarisabilité	24
I.3.4.5. Moment électrique d'un dipôle	25
I.4. Convoyeur à ondes mobiles	25
I.4.1. Convoyeurs à ondes mobiles incliné	25
I.4.2. Convoyeurs à ondes mobiles cylindrique	27
I.4.3. Convoyeurs à ondes mobiles à doubles face	28
I.5. Conclusion	29
Chapitre II : Etude expérimentale de la force d'attraction appliquée sur des particules en métal	
II.1. Introduction	31
II.2. Etude de la force d'attraction appliqué sur les particules métalliques	31
II.2.1. Description du dispositif expérimental	31
II.2.2. Configurations des convoyeurs étudiés	33
II.2.3. Particules utilisées	34
II.2.4. Choix de la forme du signal	35
II.2.5. Protocole expérimentale	36
II.3. Résultats et discussion	37
II.3.1. Expériences sur les particules en inox	37
II.3.1.1. Influence de l'écartement inter- électrodes d (largeur d'électrode fixe)	38
II.3.1.2. L'effet de la largeur d'électrode (écartement inter électrodes fixe)	42
II.3.2. Expérience avec des particules en cuivre	44
II.3.2.1. L'effet de l'écartement inter électrodes (largeur fixe)	45
II.3.2.2. L'effet de la largeur d'électrode (écartement inter électrodes fixe)	48
II.4. Conclusion	50
Chapitre III : Etude numérique du potentiel et du champ électrique	
III.1. Introduction	52
III.2. Simulation numérique du potentiel et du champ électrique	52
III.2.1. Conditions aux limites et domaine du calcul	52

Sommaire

III.2.2. Analyse de sensibilité des résultats au maillage	53
III.3. Résultats et discussion	53
III.3.1. Distribution du potentiel électrique	53
III.3.2. Distribution du champ électrique au niveau des électrodes	55
III.3.2.1. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 0.5 mm	55
III.3.2.2. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 1 mm	58
III.3.2.3. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 2 mm	62
III.3.2.4. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 5 mm	65
III.3.3. Le champ électrique pour des différentes hauteurs au-dessus de la surface des électrodes	66
III.4. Conclusion	67
Chapitre IV : Utilisation d'un convoyeur triphasé vibrant pour la séparation de particules plastiques/métalliques	
IV. 1. Introduction	69
IV.2. Montage expérimental et protocole de mesure	69
IV.3. Protocole expérimental	71
IV.3.1. Echantillons de particules	71
IV.3.2. COM statique (avec le vibreur désactivé)	72
IV.3.2.1. Echantillon de particules plastiques de mono-produit	72
IV.3.2.2. Echantillon de produit binaire de particules plastique/métal	73
IV.3.3. Convoyeur à ondes mobiles vibrant	73
IV.3.3.1. Echantillon de particules métalliques de mono-produit	74
IV.3.3.2. Echantillon de produit binaire de particules de plastique/métal	74
IV.3.4. Le processus du chargement par la décharge couronne	74
IV.4. Résultats et discussion	76
IV.4.1. Convoyeur statique	76
IV.4.1.1. Mono produit	76
IV.4.1.2. L'effet de la charge initial sur le déplacement des particules de plastique	78
IV.4.1.3. Produit binaire	79
IV.4.2. Convoyeur vibrant	82
IV.4.2.1. Mono produit	82
IV.4.2.2. Produit binaire	82
IV.4.3. L'effet du débit de vibration	85
IV.4.4. L'effet de la fréquence	86
IV.5. Conclusion	88
Conclusion générale	89
Références bibliographiques	91

INTRODUCTION GENERALE

Les équipements électriques et électroniques (EEE) sont des équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques ou, en d'autres termes, des produits avec une batterie ou un câble d'alimentation [1]. Les DEEE (en anglais 'WEEE' ou 'e-waste') sont les déchets issus des EEE, y compris tous les composants, sous-ensembles et produits consommables faisant partie intégrante du produit au moment de la mise au rebut. Ces déchets sont composés d'une grande variété de produits complexes tels que réfrigérateurs, téléviseurs, machines à laver, lampes, téléphones, etc., provenant de ménages ou d'activités économiques. Ce flux de déchets présente des enjeux environnementaux majeurs à cause des trois caractéristiques principales [2]: (1) l'augmentation continue des volumes ; (2) le contenu en substances dangereuses ; et (3) les coûts de traitement élevés. Le problème des DEEE se pose non seulement compte tenu de leur volume croissant, mais aussi de la présence de substances dangereuses qui représentent un risque pour la santé humaine et l'environnement, ils impactent la santé humaine en contaminant la chaîne alimentaire avec des substances toxiques provenant des procédés d'enfouissement ou en impactant directement les personnes qui s'exposent de façon dangereuse aux substances toxiques [1-2]. Les DEEE peuvent aussi avoir des impacts négatifs sur l'environnement de différentes façons: en contaminant l'eau et les systèmes aquatiques par lixiviation des décharges où les DEEE (traités ou non traités) ont été déposés [3].

De nombreuses méthodes de recyclage des DEEE ont été réalisées et développées telles que les méthodes mécaniques et chimiques, cependant ces méthodes exigent beaucoup de temps et demandent souvent une quantité importante de main-d'œuvre, ce qui augmente de façon significative le coût du recyclage. Les processus de la séparation mécanique ont un coût de traitement moindre, mais ils ne permettent pas de récupérer des substances à forte valeur ajoutée qui se trouvent en petites quantités, telles que des terres rares ou des métaux précieux [4- 6].

La séparation électrostatique est l'une des solutions les plus fiables qui a prouvé son efficacité dans le recyclage des différents mélanges métal/plastique, métal/métal, plastique/plastique de DEEE par des séparateurs électrostatiques.

Bien que cette technique soit efficace dans le tri des mélanges, ces séparateurs ont des fabrications très compliquées et consomment de l'énergie [7-27].

L'objectif du présent sujet de thèse, est d'analyser la faisabilité d'un convoyeur à ondes mobiles COM à la séparation électrostatique d'un mélange métal/plastique qui est basé sur un champ électrique non uniforme lors du fonctionnement. Ce type de séparateur a l'avantage d'une faible consommation d'énergie électrique avec un courant faible d'environ de quelques milliampères ainsi que sa fabrication est simple et pas coûteuse.

Notre travail est composé de quatre chapitres, **le premier chapitre** comprend trois parties :

La première partie, offre une synthèse sur les différents séparateurs électrostatiques des mélanges métal/plastique, et détaille bien leurs principes de fonctionnement. La seconde partie, une étude profonde des différentes applications des COM dans des divers domaines est présentée. La dernière partie est consacrée pour la présentation des séparateurs COM métal/plastique, qui étaient conçus au niveau du laboratoire APELEC. Ainsi leurs principes de fonctionnement et les force qui contrôlent le comportement des particules au niveau de leur surface.

Le second chapitre, apporte une étude expérimentale comparative entre des différentes configurations du COM. Nous avons décrit les différentes géométries des COM qui ont des différentes largeurs et écartement inter-électrodes. Ensuite, nous avons effectué des expériences sur les particules métalliques en utilisant un aspirateur d'air afin de bien comprendre leur comportement et d'estimer la force d'attraction engendrée par le champ électrique exercé sur elles. Sur la base de cette étude, une nouvelle technique de séparation en utilisant un aspirateur d'air a été réalisée.

Le troisième chapitre de ce manuscrit est réservé à la modélisation et à la simulation numérique avec logiciel Comsol 5.2a du champ électrique au niveau des différents COM afin de bien savoir le comportement des particules métalliques sur la surface de chaque COM. Nous avons décrit la géométrie et le domaine de calcul. Ensuite, le maillage utilisé dans cette simulation est montré. Les différents résultats numériques du potentiel et champ électrique ont été présenté et interprété.

Une autre nouvelle technique de séparation, basée sur la force d'attraction est présentée dans le **quatrième chapitre**. Cette technique a été réalisée en utilisant un COM triphasé fixé sur un vibreur électromagnétique. Deux types d'expériences ont été effectués, dans la première étape, une étude comparative de l'efficacité du déplacement et la séparation entre les

Introduction générale

mélanges neutres et celles pré-chargées par la décharge couronne. La deuxième étape est pour l'analyse de la technique de séparation par vibration des COM. Cette étude concerne les expériences de séparation effectuées sur des échantillons de mélanges de particules provenant de câbles électriques broyés.

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude bibliographique concernant l'utilisation du champ électrique dans diverses applications électrostatiques. La séparation électrostatique est parmi les applications les plus importantes qui sont basées sur le champ électrique, de sorte que plusieurs contributions du champ électrique à haute intensité contribuent au développement de cette technique pour diverses applications industrielles.

Ce chapitre est divisé en deux parties ; dans la première partie, nous présenterons une synthèse sur l'application du champ électrique dans la séparation électrostatique de l'industrie de recyclage et les différents séparateurs électrostatiques, et leurs modes de fonctionnement.

Dans la deuxième partie, une revue des applications des ondes mobiles dont le principe de fonctionnement est basé sur l'application d'un champ électrique non uniforme sera présentée ainsi que leurs applications au recyclage d'un mélange métal/plastique.

I.2. Dispositifs de la séparation électrostatique (métal/ plastique)

Le recyclage des métaux et plastiques à partir des déchets est l'une des principales applications des technologies de séparation électrostatique. L'efficacité des techniques de la séparation électrostatique est établie par l'utilisation de plusieurs configurations de séparateurs électrostatiques, impliquant le recyclage des déchets de fils et câbles électriques. Nous présentons dans ce qui suit les principales configurations des séparateurs électrostatiques:

a) Séparateur à tambour

Parmi les premières configurations utilisées dans la séparation électrostatique d'un mélange métal /plastique c'est le ***séparateur à tambour***. Dans plusieurs études les chercheurs ont proposé trois configurations concernant ce type de séparateur :

Configuration corona ; configuration induction ; configuration corona- induction.

Principe de fonctionnement

Dans les trois cas, le mélange granulaire est introduit à la surface d'une l'électrode à tambour rotatif, qui le transporte à travers le champ généré par une ou plusieurs électrodes actives, connecté à une alimentation haute tension en courant continu.

Deux mécanismes de charge sont utilisés simultanément :

Le bombardement ionique qui ne concerne que les particules isolantes lorsqu'elles sont incorporées dans la zone de décharge corona (figure I.1.a) ce qui concerne le mécanisme corona.

L'induction électrostatique produite par l'électrode dans la (figure I.1.b) consacré pour le chargement des particules métalliques en contact avec le cylindre mis à la terre avec la présence du champ électrostatique généré par l'électrode statique ce qui concerne le mécanisme induction électrostatique.

La charge corona et la charge d'induction électrostatique peuvent être combinées pour obtenir de meilleurs performances de séparation, comme le montre la (figure I.1.c) [28-30].

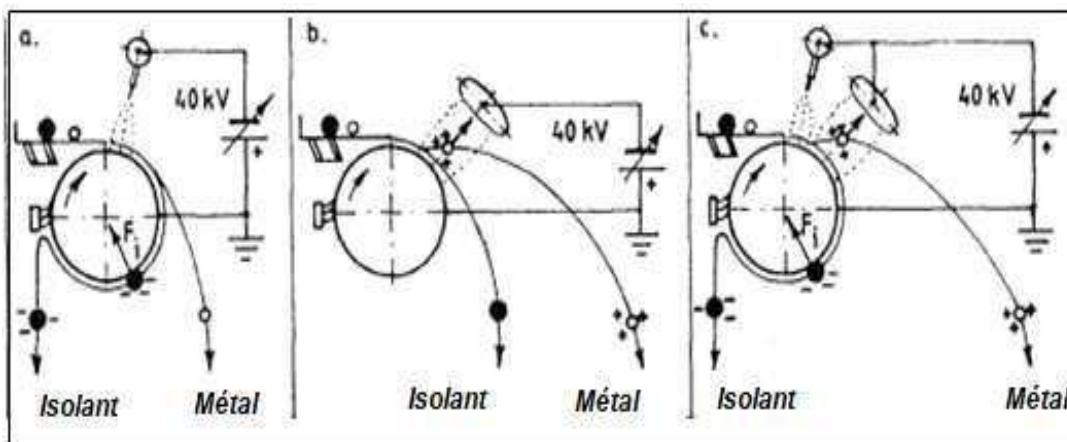


Figure I.1. Trajectoire des particules de métal/plastique lors de la séparation dans trois configurations d'électrode de base : (a) Corona (b) électrostatique (c) combiné corona-électrostatique

Le séparateur à champ électrostatique corona combiné, est la solution technique avantageuse, lorsque le but est de séparer les particules conductrices des particules non conductrices.

Des études approfondies ont été menées concernant les facteurs qui influencent l'efficacité de ce dispositif [28,29]. Outre la configuration du système d'électrodes qui génère la

décharge corona et détermine la forces de champ agissant sur les particules, les auteurs montrent qu'il y a plusieurs autres facteurs qui influencent l'efficacité du processus de séparation, y compris [30] la configuration du champ électrique, la vitesse et le rayon de l'électrode à rouleau rotatif, les conditions environnementales (ambiantes) tel que l'humidité, la température, la taille et la forme des particules traitées.

Dans un autre travail Andrei Catinean et al ont démontré la possibilité d'utiliser les forces du champ électrique utilisant le séparateur à tambour pour la récupération du cuivre dans le processus de recyclage des déchets de câbles électriques de l'industrie automobile. C'est une autre application permettant de récupérer jusqu'à 95% du cuivre de la "fraction de PVC" et l'augmentation du taux de récupération global du cuivre contenu dans ces déchets à près de 100 % [31].

b) Séparateur à plaque

La pureté des produits conducteurs dans une configuration corona-électrostatique est souvent compromise par le fait que les trajectoires des particules ne peuvent pas être contrôlées. Certaines de ces particules, en raison du faible coefficient de frottement avec la plaque sont accélérées à des vitesses relativement élevées, et leurs forces d'inertie peuvent les conduire au mauvais compartiment du collecteur. Thami et al [32] ont validé une solution à ce problème : soumettre les granulés à une décharge couronne pendant leur glissement le long de l'électrode à plaque de forme S .

Principe de fonctionnement

Le séparateur électrostatique à plaques en forme de S utiliser est équipé d'une électrode corona connectée à la même alimentation positive en courant continu à haute tension comme électrode elliptique (figure I.2) Lors de son passage dans la zone de décharge corona, les particules non-conductrices acquièrent une charge positive Q .

Dans ce cas, ***la force d'image électrique*** tend à fixer les particules sur la surface de l'électrode mise à la terre. En conséquence, la force de frottement entre les particules non-conductrices et l'électrode plaque augmente.

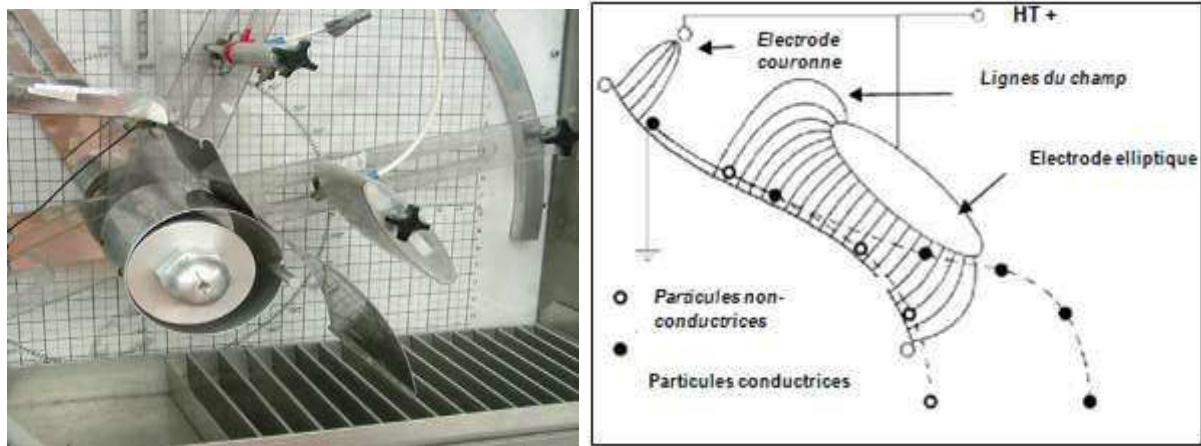


Figure I.2. Représentation schématique de la conductivité et de la non-conductivité et le comportement des particules dans une plaque électrostatique en forme de S

Les particules isolantes glissent vers le bas avec une réduction de la vitesse tout au long de l'électrode mise à la terre, et chutent verticalement dans le compartiment dédié du collecteur. En contact avec l'électrode plaque, les particules conductrices sont chargées par l'induction électrostatique et sont soumises à une force électrique qui les conduit vers l'électrode elliptique.

Le séparateur électrostatique à plaques en forme de S est une solution efficace pour la récupération des matériaux conducteurs et non conducteurs, des produits provenant de déchets de câbles électriques granuleux [32-35].

- **La force d'image**

Lorsqu'une particule chargée approche d'une surface, elle induit une charge d'image sur la surface. La force d'image électrostatique \vec{F}_{img} dépend de la taille des particules et de la nature du matériau du film isolant du convoyeur.

La force de l'image est donnée par l'équation:

$$\vec{F}_{img} = -\frac{\epsilon_{rd}-\epsilon_{rm}}{\epsilon_{rd}+\epsilon_{rm}} \cdot \frac{q_p^2}{16\pi\epsilon_0\epsilon_{rm}} \cdot \frac{1}{(\delta+r_p)^2} \cdot \vec{n} \quad (I-1)$$

Où, ϵ_{rd} est la constante diélectrique du substrat qui est un film de polyester ; ϵ_{rm} est la permittivité relative du milieu ; q_p et r_p sont la charge électrique et le rayon de la particule, respectivement δ est la distance entre la particule et l'électrode, cette distance est équivalente à

l'épaisseur du polyester film déposé sur les électrodes ; \vec{n} est l'unité vecteur dans la direction (OY).

c) Séparateur à tapis

Le séparateur électrostatique à tapis développé par Messal et al permet de séparer un mélange métal/plastique [36]. Ce séparateur a prouvé son efficacité dans la séparation des particules les plus fines des mélanges obtenus à partir de Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE).

Principe de fonctionnement

Le séparateur conçu par les chercheurs est un convoyeur à bande métallique (acier inoxydable), qui joue le rôle d'une électrode mise à la terre. La matière particulaire à séparer est versée sur la surface de ce convoyeur par une alimentation vibrante qui dispose d'une unité de contrôle dédiée.

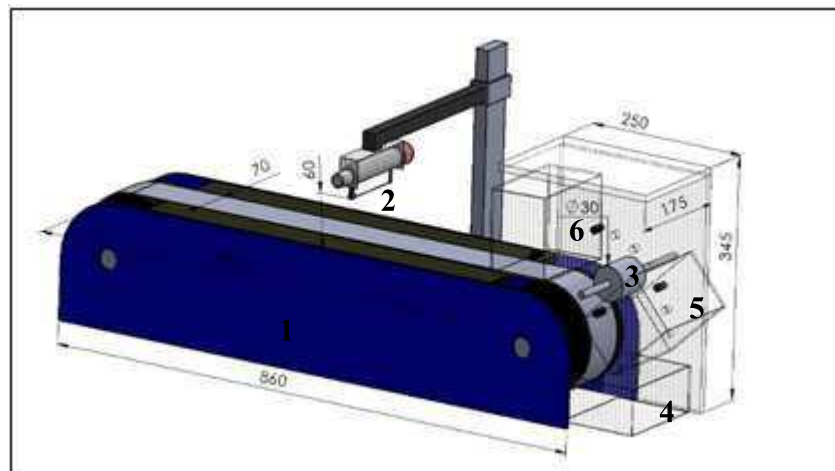


Figure I.3. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique avec un convoyeur à bande métallique (1) convoyeur métallique, (2) électrode couronne, (3) électrode cylindrique, (4) boîte n°1, (5) boîte n°2, (6) boîte n°3.

La décharge corona, utilisée comme mécanisme de chargement pour les particules non conductrices, est générée par un fil double électrode, située à une hauteur h au-dessus de la surface du convoyeur à bande métallique (figure I.3). Une électrode en acier de forme cylindrique rotative est reliée à une alimentation électrique haute tension (polarité positive ou négative). Cette électrode crée une zone de champ électrique intense à travers laquelle passent les particules déposées sur la surface du convoyeur. Les particules conductrices se chargent

par induction électrostatique au contact de l'électrode reliée à la terre et sont attirées par l'électrode cylindrique de polarité opposée [36].

d) Séparateur à chute libre

Le séparateur corona-électrostatique à rouleau rotatif est l'équipement typique de cette technologie, où les trajectoires des granules dépendent de leur conductivité. Le mélange granulaire représentant dans le processus de recyclage c'est du l'alcaline et du Zn-Cpiles contiennent des granules métalliques non ferreux (zinc et laiton) et des granules non conducteurs (plastique, papier ...etc.), mais tous sont recouverts d'une fine poudre noire en graphite caractérisé par une conductivité élevée. En conséquence, les trajectoires des deux types de granules dans le séparateur électrostatique à couronne à rouleaux rotatifs sont non différenciées. Une nouvelle configuration d'un séparateur électrostatique à chute libre basée sur la technologie de la séparation corona-électrostatique, a été développée par Laur câlin et al. Cette configuration a été équipée d'une électrode corona spéciale (figure I.4) permet de génère une zone de charge corona étendue pour séparer les granules de zinc et de laiton des autres composants de la fraction grossière du processus de recyclage des piles alcalines et Zn-Czinc-carbone.

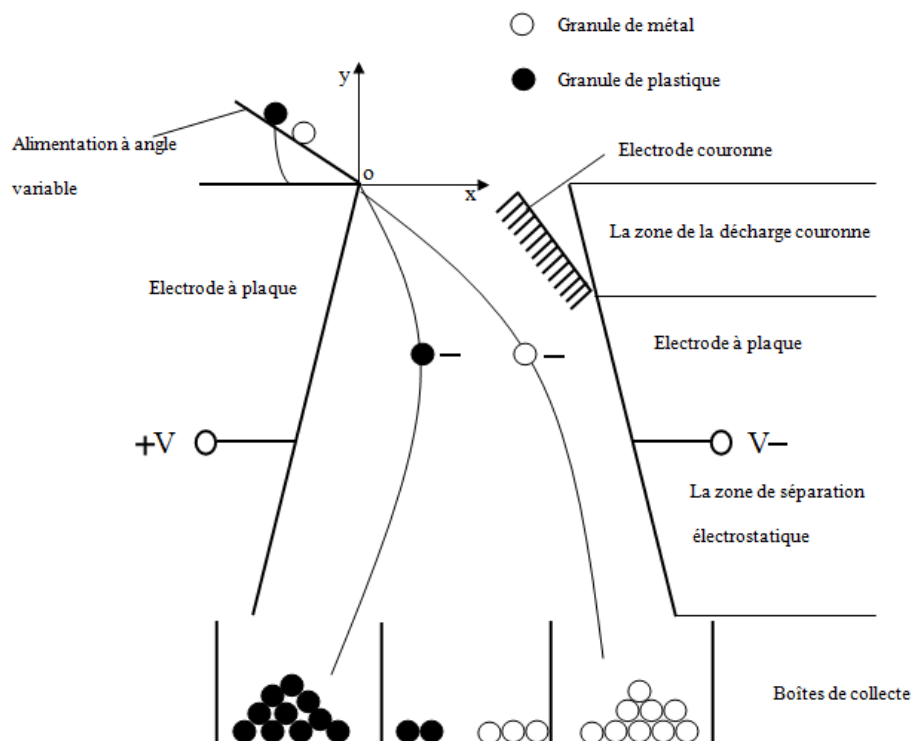


Figure I.4. Représentation schématique du principe de séparation des granules métalliques et plastiques dans le séparateur électrostatique à chute libre.

Principe de fonctionnement

Le mélange granulaire est introduit dans le séparateur au moyen d'un plan incliné et laissé en chute libre. Dans la zone de décharge corona, tous les granulés reçoivent charge négative ou positive après avoir été soumis à un bombardement intense d'ions.

La charge accumulée par les granules de plastique par la décharge corona influence de manière décisive leurs trajectoires et par conséquent les résultats de la séparation. Pour cela, l'efficacité du processus de charge par bombardement ionique est un facteur clé pour une séparation réussie. Dans le cas de cette configuration, les granulés qui entrent dans le séparateur après avoir acquis une charge en passant près de l'électrode couronne ont une vitesse initiale v_0 et leurs trajectoires dans la zone de séparation électrostatique sont principalement déterminées par l'action de la force de gravité \vec{F}_G , la force électrique exercée par le champ électrique \vec{F}_E et la force de traînée \vec{F}_A .

- **La force de coulomb**

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique E , les particules ayant acquis une charge électrique q subissent la force de Coulomb \vec{F}_C proportionnelle à la charge :

$$\vec{F}_C = q_p * \vec{E} = 4\pi r_p^2 * \sigma_s * \vec{E} \quad (I-2)$$

r_p^2 et σ_s sont le rayon de la particule et la charge de surface densité de la particule, respectivement. L'estimation de la densité de la charge de surface est une étape essentielle pour calculer la force de Coulomb.

- **La force de traînée \vec{F}_A**

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

$$\vec{F}_A = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_A \cdot S \cdot v^2 \quad (I-3)$$

Où C_D est le coefficient de traînée, ρ_A est la densité de l'air, S est la surface de la particule projetée, et v est la vitesse de la particule.

- **La force de gravité**

$$\vec{F}_G = m \cdot g \quad (I-4)$$

Avec m masse du granule et g le vecteur l'accélération de la gravitation

En raison de la différence de densité entre les granulés métalliques et plastiques, le déplacement des granules métalliques est influencé principalement par la force de gravité \vec{F}_G , tandis que la force du champ électrique \vec{F}_E a principalement influencé le déplacement des granules de plastique. En tant que résultat, les trajectoires de séparation de ces deux types de granules sont différentes, ce qui rend possible leur collecte sous forme de fractions séparées [37].

I.3. Applications des convoyeurs à ondes mobiles basé sur un champ électrique non uniforme

I.3.1. Transport et séparation des particules chargées

Depuis le début des années 70, de nombreuses études pour l'utiliser de la technique des ondes mobiles afin de manipuler les particules dans diverses applications ont été brevetées et développées par Masuda [38,39] et Melcher [40,41]. Le transport et la séparation des particules par la technique des ondes mobiles en utilisant une poudre composée de particules de sable et d'alumine avec deux distributions de taille significativement différentes ont été étudiés. Les auteurs ont montré que le comportement des particules dépend principalement de la géométrie de la configuration des ECC (Electric curtain conveyor). En se basant sur la géométrie, de la largeur et l'écartement inter-électrodes, les meilleures caractéristiques de séparation ont été observées pour les ECCs, avec des électrodes rectangulaires et un rapport largeur / écartement élevé [42]. Dans d'autres recherches effectuées par W. Machowski et Masuda, le transport et la séparation des particules chargées des poudres cohésives d'aérosol chargées basées sur un champ non uniforme AC (Alternating Current), ont été étudiées [43 - 44], en se basant sur l'effet de la configuration des convoyeurs en terme de nombre de phases, de sorte qu'ils ont démontré que les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant un

convoyeur polyphasé [45]. En outre les auteurs ont observé que le sens de transport des deux poudres dépend de la fréquence du potentiel AC appliqué. Deux bandes de fréquences ont été étudiées où la séparation peut être réalisée. Pour les particules de sable à basse fréquence (la première bande de séparation) suivaient la direction du déplacement champ, tandis que les particules d'alumine allaient dans la direction opposée. Pour les fréquences plus élevées (la seconde bande de séparation), la direction du mouvement des particules a été inversée [42]. Dans d'autres recherches le transport des particules de toner a fait partie très importante dans les études effectuées par Kawamoto et plusieurs chercheurs [46-54].

I.3.2. Nettoyage des panneaux solaires

I.3.2.1. Panneaux solaires terrestres

La conversion directe de l'énergie solaire par des procédés photovoltaïques est d'une importance nationale et mondiale pour répondre aux besoins de l'énergie. L'accumulation de la poussière sur panneaux solaires [55] peut masquer le rayonnement solaire rendant plus difficile la pénétration de la lumière solaire à travers le PV (panneau photovoltaïque) et affecte négativement la puissance de sortie ainsi que le courant de court-circuit et donc réduire considérablement l'efficacité des panneaux PV [56-58]. Le module photovoltaïque (PV) peut accumuler 80 à 300 mg • m² de poussière par jour, et chaque 100 mg • m² d'accumulation de poussière entraîne une perte de sortie de 0,4 à 0,7% [59]. Trouver des solutions pour éliminer la poussière déposée sur les panneaux est nécessaire pour maintenir les rendements des panneaux. Des chercheurs ont proposé des méthodes de nettoyage en utilisant l'eau nécessitant un nettoyage manuel [60]. D'autres ont proposé d'utiliser le flux d'air pour le dépoussiérage. Assi et al [61] ont proposé une méthode qui consiste à éliminer la poussière déposée sur les photovoltaïque à travers un flux d'air forcé d'existants et l'air de retour des systèmes de climatisation [61-62].

Un tel processus de nettoyage est coûteux pour les installations à grande échelle où l'eau est rare. EDS (Electrodynamic Dust Shield) est également connu comme électrodynamique écran, rideau électrique ou système de nettoyage électrostatique en profitant des charges électrostatiques portées par les particules de poussière [63] a été proposé comme une solution anti-poussière pour atténuer la perte des applications de l'énergie solaire. Comme le montre la (figure I.6) la conception d'EDS de base implique la fabrication d'électrodes sur un substrat. Les électrodes sont soit transparentes en oxyde d'indium et d'étain (ITO) imprimées sur substrat en verre constitué de rangées d'électrodes parallèles intégrées dans un film

diélectrique transparent, soit fabriquées en fil de cuivre très mince afin de minimiser les effets d'ombrage [55,64-71].

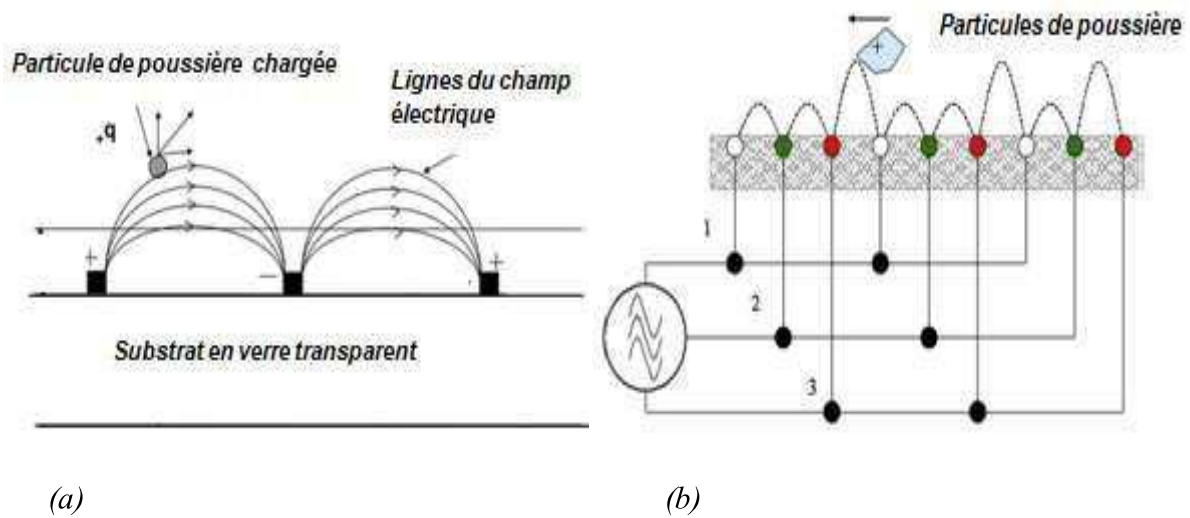


Figure I.6. Vue schématique d'un EDS (a) en ITO (b) en électrodes en cuivre fine

Kawamoto et Mazumder [55], ont démontré que plus de 98% de la poussière pourrait être enlevée en utilisant ondes progressives électrostatiques générées par des multi phases tension appliquée à un convoyeur transparent composé des électrodes transparentes en oxyde d'indium et d'étain (ITO) imprimées sur substrat en verre comme la (figure I.7) montre [55].

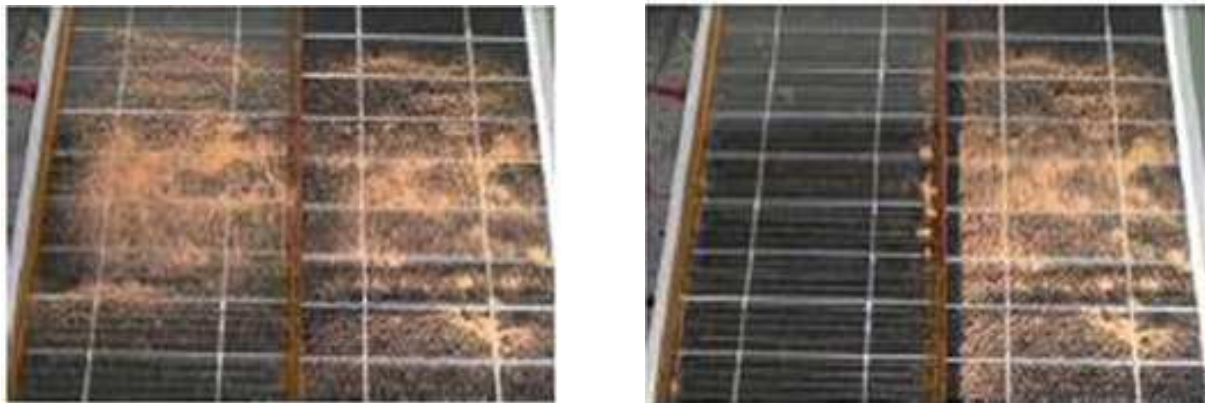
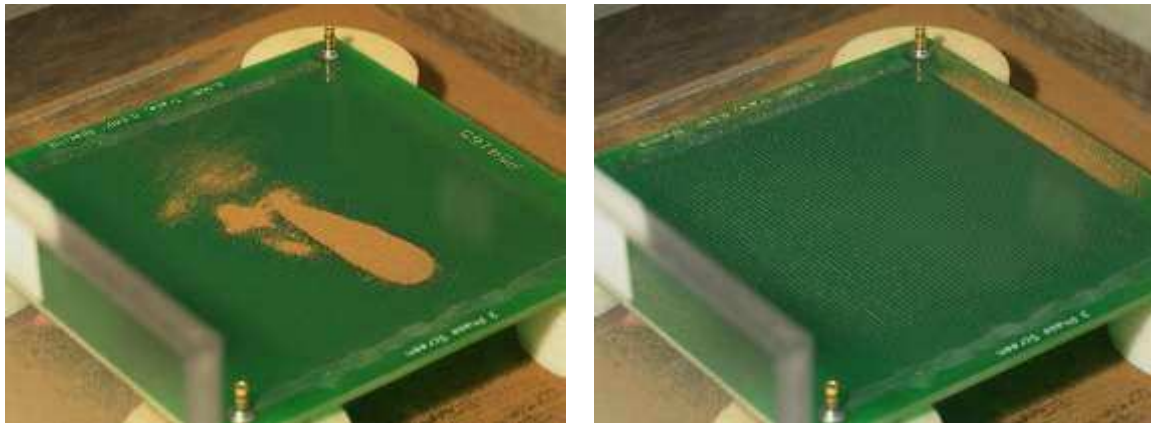


Figure I.7. Démonstration du système de nettoyage électrostatique

Lorsqu'une tension multiphasée alimente l'EDS le champ électrique génère une onde progressive. Les particules chargées sont soulevées de la surface par la composante verticale du champ (E_z), et l'onde mobile propulse la poussière vers le bord de l'écran. La figure I.8

montre une photo d'un panneau solaire alors que l'EDS en électrode en cuivre enlève une couche de poussière.



(a)

(b)

Figure I.8. Écran d'un EDS en électrodes en cuivre triphasé avec la poussière au centre de l'écran a) avant la mise sous tension b) Écran la mise sous tension [72].

Contrairement au cuivre ou l'aluminium, l'ITO est transparent, il laisse passer les photons de lumière ce qui n'affecte pas le rendement d'un panneau solaire.

I.3.2.2. Nettoyage des panneaux solaires dans l'espace

Les missions des ROVERS de la NASA d'exploration lunaire peuvent être entravées par la présence de poussières lunaires fortement chargées qui adhèrent électrostatiquement (la poussière recouvrant la surface de la lune devrait être chargée électrostatiquement par le vent solaire, les rayons cosmiques et le rayonnement solaire lui-même à travers l'effet photoélectrique) aux surfaces des équipements [73-76], son dépôt constitue un problème sérieux pour les cellules solaires, en raison de la poussière déposée qui empêche la lumière du soleil de pénétrer dans les cellules PV, ce qui réduit leur efficacité et leur durée de vie [77]. Le développement de solutions efficaces pour le dépeussierage de particules est essentiel pour la réussite de toute une série de voyages à la lune et Mars et pour les futures émissions humaines [78]. L'élimination des particules de poussière par les forces électrostatiques et diélectrophorétiques ayant des applications à la NASA aux futures missions d'exploration spatiales vers la planète Mars et la Lune. [72]. Des chercheurs ont développé un système écran anti-poussière électrodynamique EDS (Electrodynamical Dust Shield) (figure I.9) [78,79 80] utilisant des écrans transparents utilisant des électrodes en oxyde d'indium et d'étain (ITO) sur un substrat en polyester dans une configuration parallèle.

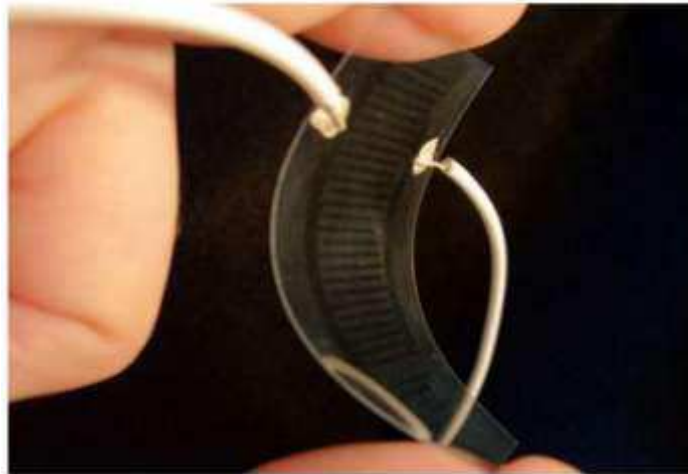


Figure I.9. Écran anti-poussière électrodynamique transparent avec électrodes parallèles en oxyde d'indium et d'étain (ITO) [73]

Des tests ont été effectués lors d'une expérience dans des conditions de type lunaire et martien [81], utilisant le simulateur JSC-1A et JSC-1AF (Johnson Space Center Number One). Quatre pare-poussières de l'acier inoxydable (figure I.10) ont été placés dans la chambre à vide élevé pour les tests de fonctionnement. Des résultats satisfaisants de dépoussiérage ont été obtenus [78,81].

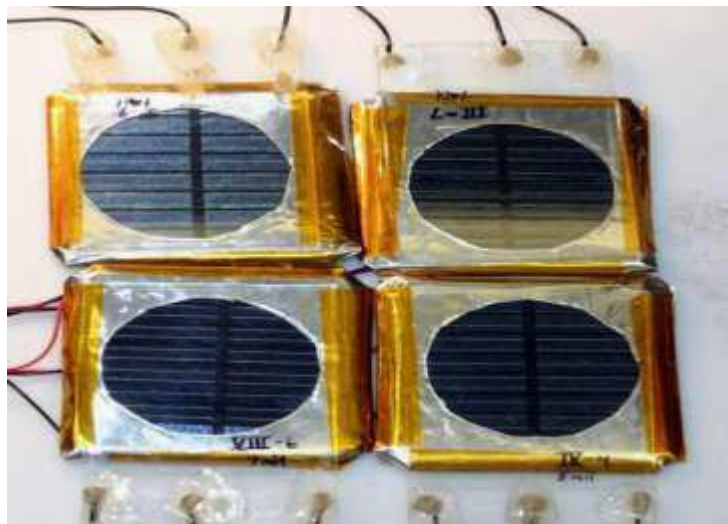


Figure I.10. Panneau solaire avec écran anti-poussière électrodynamique transparent utilisé dans des conditions de vide élevé fournissant entre 3 et 4V initialement

Des centaines de tests ont été réalisés sur l'écran anti-poussière transparent sous vide élevé pour comprendre les capacités et les limites et optimiser la conception. La (figure I.11) montre les écrans anti-poussières avec les poussières déposées sur ceux-ci à 106 kPa (kilopascals) (figure. I.11.a) et, après activation et dégagement (figure I.11.b). Les performances

de nettoyage ont été déterminées par la qualité, en utilisant des méthodes de surveillance et d'estimation des poussières.

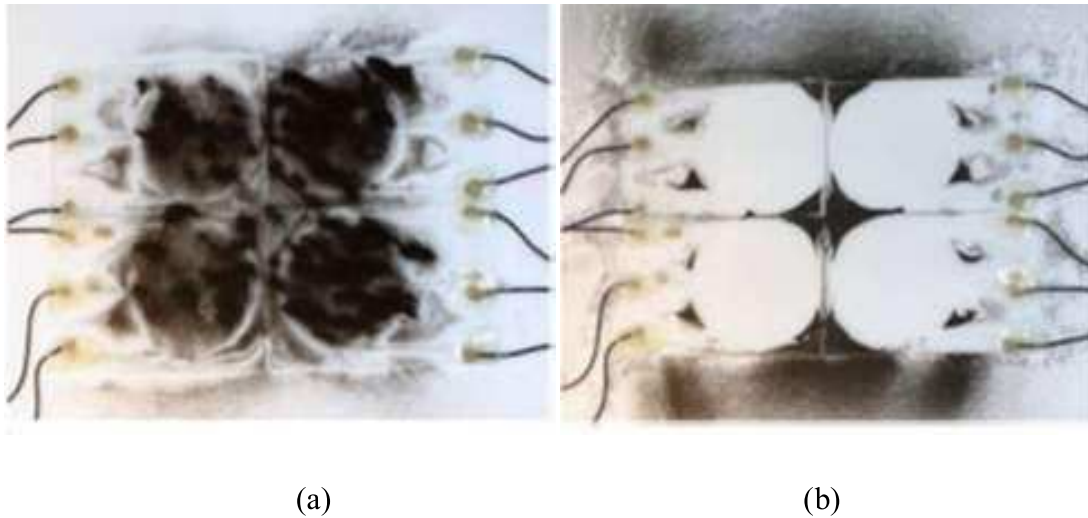


Figure I.11. (a) le simulateur lunaire JSC-1A (50-75 mm) déposé sous vide poussé sur l'anti poussière transparente (b) le dépoussiérage après activation des boucliers de protection avec des performances supérieures à 99 %.

I.3.3. Transport des particules fines par convoyeur à ondes mobiles (COM)

Dans le but d'optimiser le principe de fonctionnement du COM en étudiant les forces affectent sur le comportement des particules diélectriques. Entre 2017 et 2019 Zouaghi et al [82] au laboratoire de Poitiers ont réalisé des études expérimentales et numériques sur le comportement des particules diélectriques de PMM (Poly méthacrylate de méthyle) . La géométrie régulière et la forme sphérique sont les principales raisons pour l'utilisation de ces particules. Une étude expérimentale a été effectuée sur deux types de convoyeur biphasé et triphasé, (figure I.12) pour comparer leur l'efficacité pour le déplacement des particules.

Afin d'obtenir une description du phénomène, les auteurs ont mis au point une caméra sur la zone juste au-dessus de la surface du convoyeur dans les deux configurations biphasées et triphasées.

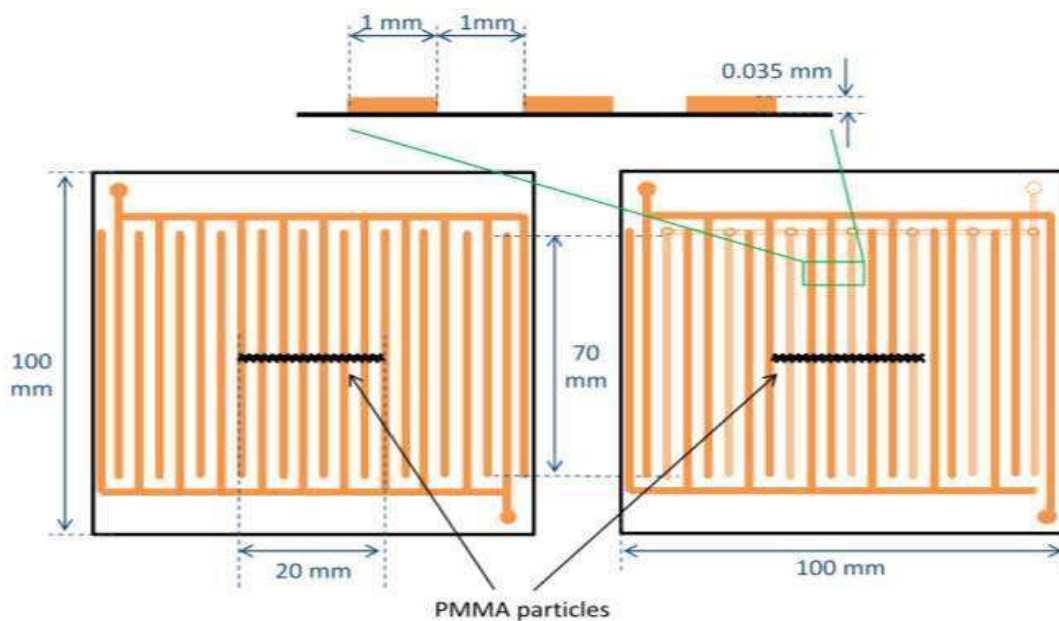


Figure I.12. Schéma descriptif des configurations des convoyeurs à ondes mobiles biphasé et triphasé.

Les auteurs ont constaté que les particules sont éliminées et la surface est presque nettoyée dans les deux configurations. Cependant, la configuration triphasée semble plus efficace par rapport à la première pour une tension appliquée des signaux sinusoïdaux égale à 1 kV et une fréquence de 50 Hz. L'efficacité totale du déplacement est plus élevée dans le cas du convoyeur triphasé (plus de 35 % avec le convoyeur biphasé à 50 Hz et 70 % avec le triphasé à 20 Hz) [82].

L'effet des paramètres expérimentaux tel que la tension et la fréquence sur l'efficacité de déplacement de PMMA ont été étudiées pour les deux configurations. Les résultats obtenus montrent que l'efficacité de déplacement augmente avec l'application de la tension pour les deux configurations. Pour une fréquence basse, le déplacement est trop lent. A haute fréquence, ils ne font que sauter et vibrer à faible hauteur au-dessus de la surface. Plus de l'effet de la fréquence sur le rendement et la vitesse du déplacement, elle affecte également la direction des particules (figure I.13); dans le cas du COS (Convoyeur à ondes stationnaire) (figure I.13.a), les particules se déplacent vers la droite et la gauche pour les deux bandes de fréquence. Cependant, la direction du mouvement des particules dépend de la fréquence dans le cas de COM (figure I.13.b). À basse fréquence, presque toutes les particules sont déplacées vers l'avant. Pour les fréquences supérieures à 50 Hz, les auteurs ont constatés qu'il y a une masse considérable de particules qui se déplacent vers l'arrière en raison de la contribution des ondes harmoniques. Ces harmoniques apparaissent près de la surface en raison de la

géométrie rectangulaire des électrodes, qui provoque une déformation dans l'onde de potentiel électrique.

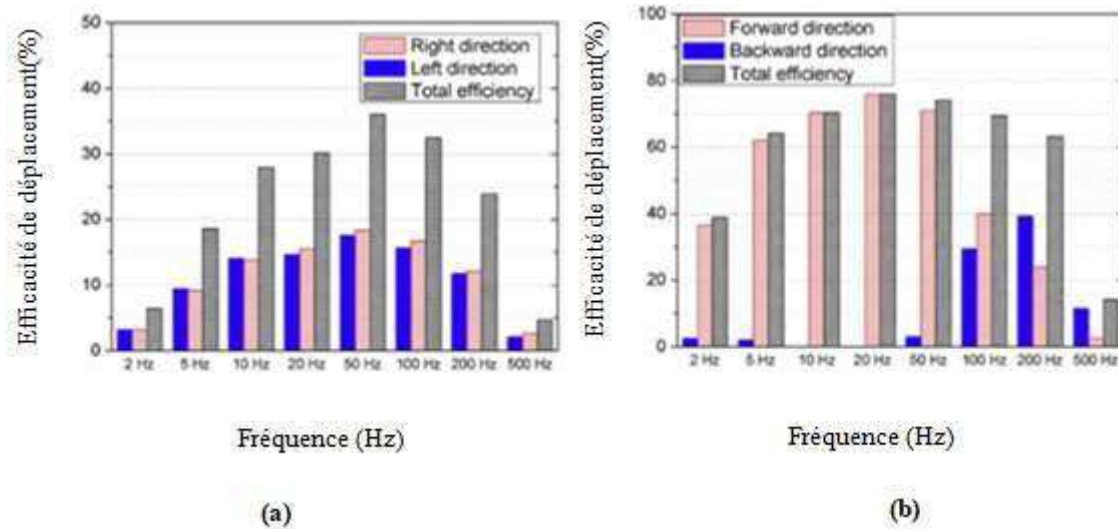


Figure I.13. Evolution de l'efficacité du déplacement des particules en fonction de la fréquence : (a) biphasé (b) triphasé [83].

Dans un autre travail Zouaghi et al [84] ont étudié en particulier, l'impact de la taille et de la charge initiale des particules sur leur efficacité de déplacement et leur mouvement, en référence à l'équilibre des forces électrostatiques impliquées. Les particules de PMMA de taille comprise entre 50 et 500 μm ont été utilisées.

La charge des particules est acquise par un mécanisme triboélectrique, le système de chargement et de mesure de la charge acquise par les particules est présenté sur la (figure I.14).

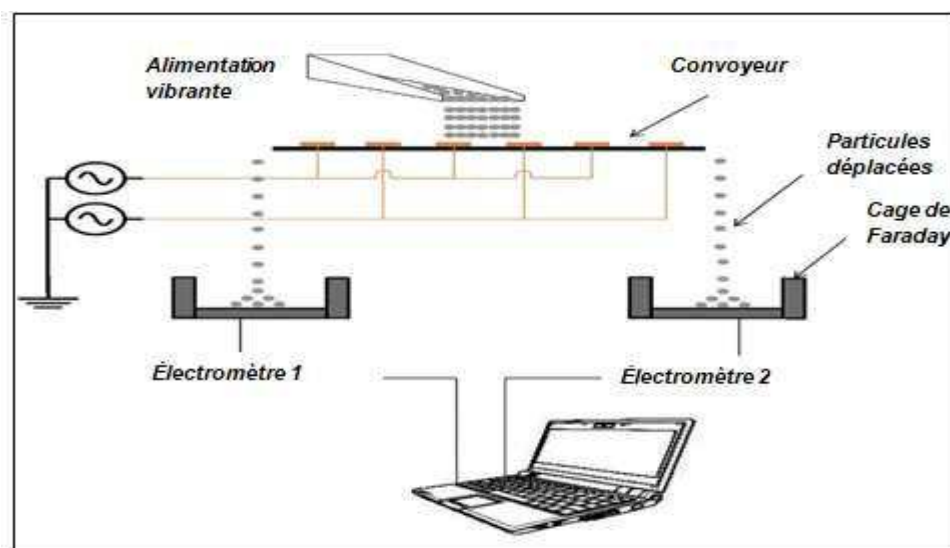


Figure I.14. Illustration du protocole expérimental.

Les auteurs ont constaté que les particules qui se déplacent vers l'avant sur le COM sont les plus chargées ; d'autre part les particules qui se déplacent dans la direction opposée ou les particules non déplacées qui restent à la surface ont une charge plus faible. Par ailleurs, la taille de la particule a un effet significatif sur le rendement du déplacement, de sorte que l'efficacité diminue lorsque la taille des particules augmente en raison de l'effet de la force gravitationnelle. En revanche les auteurs ont étudié numériquement les forces exercées sur la particule. Les résultats de la simulation montrent que la force de Coulomb (force répulsive) est prédominante dans une certaine gamme de la taille de particules. Ainsi, l'augmentation de la charge initiale des particules et de l'amplitude du voltage appliqué peut améliorer leur efficacité de déplacement, d'autre part les principales forces qui empêchent le mouvement des particules sont la force de Van Der Waals qui est dominante pour les petites particules, la force gravitationnelle qui est dominante pour les grandes particules.

NB : la force de Coulomb ne peut pas inverser le sens du mouvement des particules, sauf si leur charge était suffisamment élevée [84].

I.3.4. Application du COM dans la séparation métal/plastique

I.3.4.1. Convoyeur à ondes mobiles simple face

La première utilisation de la technique des COM (Convoyeur à Ondes Mobiles) pour la séparation d'un mélange métal/plastique, était réalisée par l'équipe de laboratoire APELEC de l'université de Sidi Bel-Abbés. Les chercheurs ont remarqué que contrairement aux particules diélectriques les particules métalliques restent attachées sur la surface des COM par le fait de la force d'attraction. Mahi et Belgacem [85,86] ont réalisé des études expérimentales sur la faisabilité de la séparation, en utilisant un mélange de cuivre et PVC de taille granulométrique moyenne de 100 μm , en utilisant un convoyeur plat. Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec une pureté élevée de cuivre presque de 80% [85,86].

Principe de fonctionnement

Dans une configuration de champ électrique alternatif et non-uniforme, la particule diélectrique est exposée à plusieurs forces (figure I.15). Les forces responsables de son déplacement font l'objet d'étude dans cette partie. En présence d'un champ électrique E , les particules ayant acquis une charge électrique q subissent la force de **Coulomb** \vec{F}_C qui est proportionnelle à la charge. C'est une force qui lévite la particule à se déplacer verticalement, le long de l'axe des Y. Et une autre force horizontale qui déplace la particule le long de l'axe

des X est connue sous le nom de force *diélectrophorèse d'onde progressive* (TW_{DEP}). Par exemple, les particules chargées négativement par *le DBD* (décharge à barrière diélectrique) sont attirées par des électrodes positives et repoussées par les électrodes négatives.

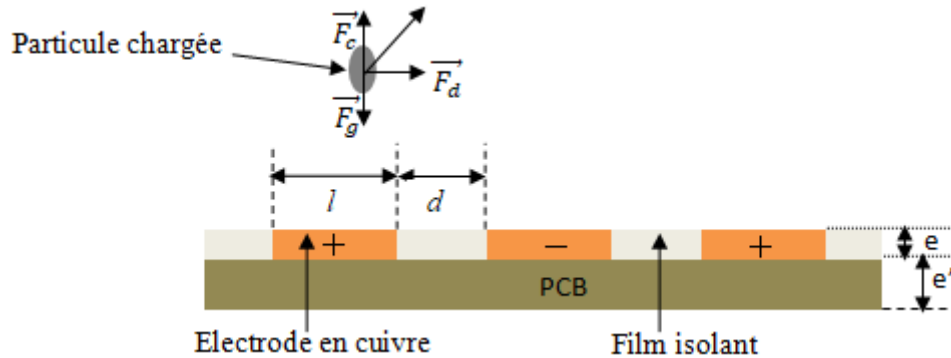


Figure I.15. Représentation schématique des forces en vigueur sur un convoyeur.

➤ Processus de chargement par DBD

Atten, et al [87] ont considérés que la décharge à barrière diélectrique (DBD) est le processus par lequel s'effectue le chargement de particules sur un convoyeur électrodynamique. Ils ont appliqués une haute-tension à un convoyeur monophasé avec des électrodes nues et une tension appliquée de 0 à 6 kV. Ils ont constatés l'apparition de microdécharges DBD pour une certaine tension de façon répétitive à chaque alternance. Des microdécharges apparaissent et occupent un volume de gaz au-dessus du convoyeur ou elles se développent. Ils ont expliqués que lorsque la tension appliquée atteint le champ électrique critique de DBD, il y a des décharges partielles dans l'air créant des ions gazeux (positifs et négatifs) et des électrons (figure I.16).

Pour chaque décharge partielle locale, le champ conduit les porteurs de charge vers deux régions de la surface de la couche des particules. À la pression atmosphérique ambiante, les quantités de charges ioniques et électroniques créées par chaque DBD sur la surface sont assez élevées pour favoriser une charge élevée des particules avec des polarités positives et négatives.

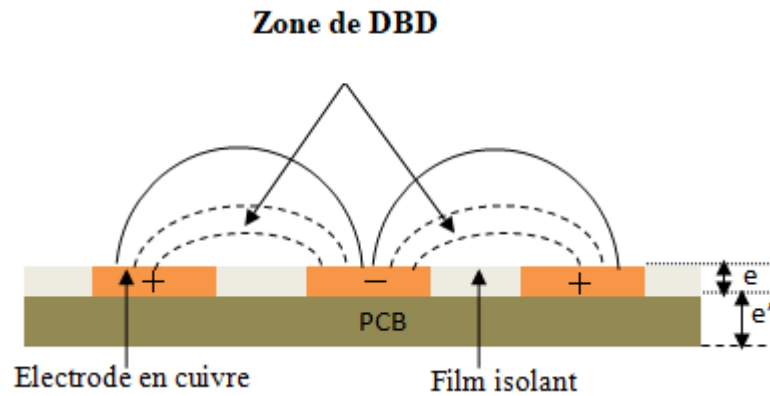


Figure I.16. Représentation schématique des lignes de champ et des zones où peuvent se produire des décharges sur un COM

Puis ils ont expliqués que sur un dispositif à deux phases, la charge d'espace créée dans le gaz est positive, car la plupart des porteurs de charge négatives sont des électrons (ils ont une forte mobilité par rapport aux ions), ce qui fait que les particules suspendues dans l'air ont une charge positive. Finalement, le mouvement des particules est expliqué par la répulsion qu'exerce la charge d'espace positive sur des particules de même signe de charge.

I.3.4.2. Force diélectrophorétique

La théorie de la diélectrophorèse (DEP) classique se base sur les mécanismes de polarisation des particules pour déterminer les mouvements diélectrophorétiques des particules et leur comportement de dispersion diélectrique en fonction de leur conductivité par rapport à leur milieu de suspension. Si la particule diélectrique considérée est sphérique et homogène, le facteur de Clausius-Mossotti f_{CM} peut être utilisé pour décrire la polarisabilité effective p: [88-91]

$$f_{CM} = \frac{\varepsilon_{rp}^* - \varepsilon_{rm}^*}{\varepsilon_{rp}^* + 2\varepsilon_{rm}^*} \quad (\text{I-5})$$

où ε est la permittivité complexe de la forme $\varepsilon^* = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$ (I-6), elle dépend donc de la fréquence f (avec $\omega = 2\pi f$) et de la conductivité électrique σ , du milieu (ici les indices p et m indiquent respectivement la particule et le milieu de suspension). La théorie de la DEP classique est basée sur la représentation dipolaire de la polarisation (théorie de Clausius-Mossotti). Elle permet d'écrire la force \vec{F} et le couple \vec{T} appliqués sur une particule diélectrique plongée dans un champ électrique \vec{E} , comme [89, 90, 92, 94-96] :

$$\vec{F} = \vec{p} \cdot \nabla \vec{E} \quad (\text{I-7})$$

$$\vec{T} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (\text{I-8})$$

avec \vec{p} le moment dipolaire qui sera traité dans les paragraphes suivants.

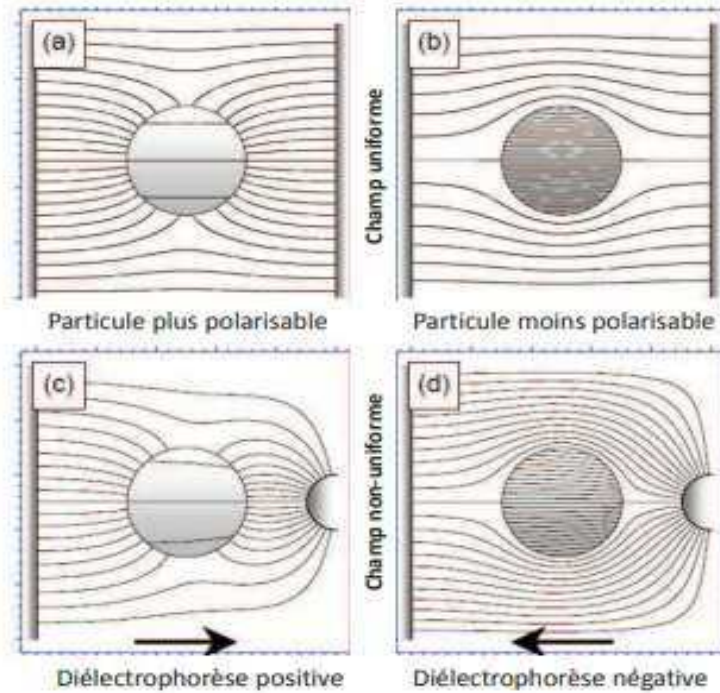


Figure I.17. Lignes de champ électrique pour quatre situations où la particule est plus ou moins polarisable que son milieu de suspension, dans un champ électrique uniforme ou non uniforme [97].

Diélectrophorèse l'expression de la force diélectrique moyenne exercée sur une particule diélectrique sphérique et homogène dans un champ alternatif s'écrit [98]:

$$\vec{F}_{DEP} = 2 * \pi * r_p^3 * \epsilon_0 * \epsilon_{rm} * R_e(f_{CM}) * \nabla(E^2) \quad (\text{I-9})$$

où r_p est le rayon de la particule et E est la racine carré de l'amplitude du champ électrique alternatif appliqué.

La diélectrophorèse naît de l'interaction du moment dipolaire avec le champ électrique externe appliqué. Dans un gradient de champ non nul, une force nette est exercée sur la particule polarisée, engendrant son déplacement vers les régions de champ électrique élevé ou faible selon les propriétés de la particule et de son milieu de suspension (figure I.18).

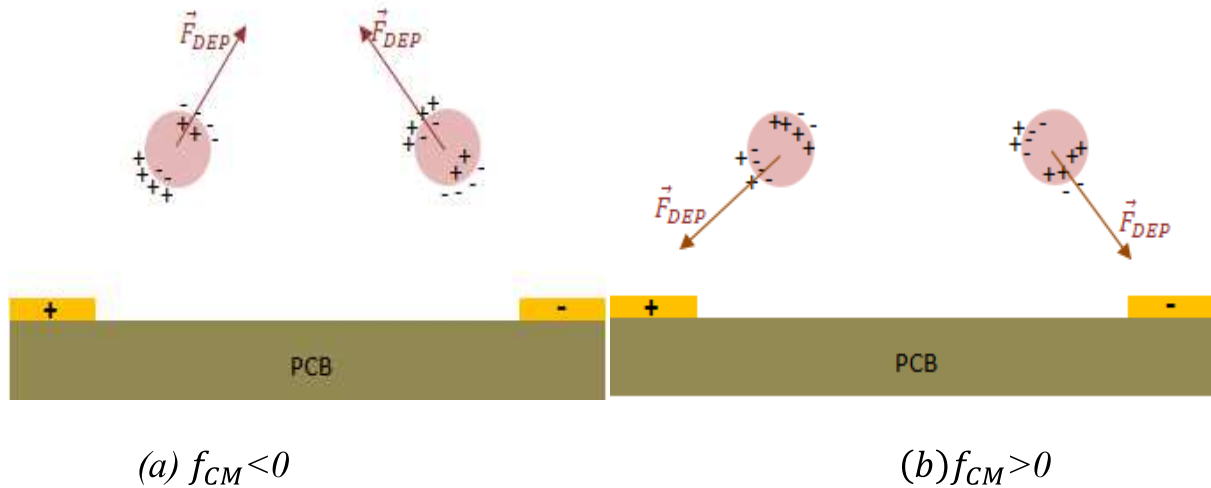


Figure I.18. Polarisation de la particule dans un champ électrique. Cas de particules plus polarisables et moins polarisables que leurs milieux de suspension [97].

Lorsque la particule est plus polarisable que le milieu externe, $R_e(f_{CM})$ est positif et le moment dipolaire résultant provoque une force vers les régions de champ électrique élevé. Il convient de noter que la densité du champ est plus élevée aux points de forte courbure des électrodes et l'attraction vers ces régions est connue sous le nom de DEP positive. Lorsque la particule est moins polarisable que son milieu de suspension, $R_e(f_{CM})$ est négatif et la force dipolaire est dirigée vers les régions de champ faible.

I.3.4.3. Ondes mobiles

Notons que la simplification de l'équation (I-7) à l'équation (I-8) est basée sur la condition que le champ électrique non uniforme ne présente pas une phase qui dépende de la position spatiale. Dans le cas contraire, pour les champs électriques avec une dépendance spatiale de la phase tel que celui créé en utilisant la structure d'électrodes de la (figure I.19), l'équation (I-7) donne :

$$\vec{F}_{DEP} = 2 * \pi * r_p^3 * \epsilon_0 * \epsilon_{rm} * R_e(f_{CM}) * \nabla(E^2) - 2 * \pi * r_p^3 * Im(f_{CM}(\omega)) * \left(\nabla * \left(Re(\vec{E}) * Im(\vec{E}) \right) \right) \quad (I-10)$$

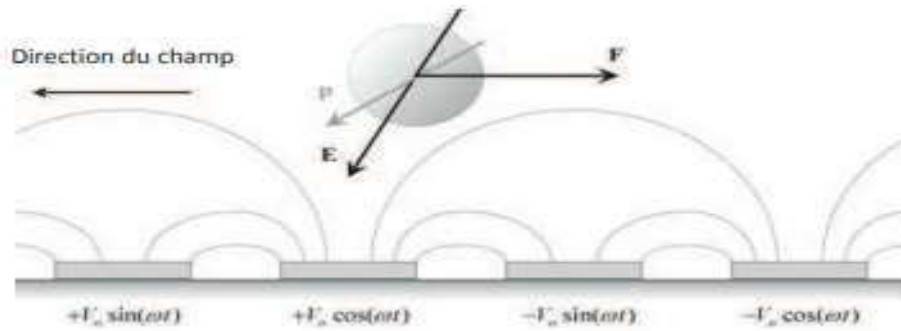


Figure I.19. Diagramme schématique illustrant un système d'électrodes pour la diélectrophorèse à onde mobile linéaire avec les signaux consécutifs déphasés nécessaires pour générer le champ électrique à onde mobile.

L'équation (I-10) montre que la force diélectrophorétique est constituée de deux composantes ; le premier terme est l'expression de la force DEP classique et le second terme est appelé force diélectrophorétique à onde mobile (twDEP). Pour que la force twDEP soit effective, la fréquence de la tension appliquée aux électrodes et la conductivité du milieu doivent être choisies de telle sorte que les deux conditions suivantes soient vérifiées : 1) La particule doit subir une force de diélectrophorèse négative pour la léviter au-dessus des électrodes ; 2) La partie imaginaire du facteur de Clausius-Mossotti doit être non-nulle.

I.3.4.4. Polarisabilité

Toute particule a une charge électrique négative et positive. Lorsqu'elle est exposée à un champ électrique, il agira selon sa nature. Les particules conductrices seront polarisées, c'est-à-dire que la charge positive sera combinée de l'autre côté de la charge négative ; le nuage d'électrons aura un léger déplacement par rapport au noyau, ce qui générera **un moment dipolaire**, qui est la polarisation (figure I.20).

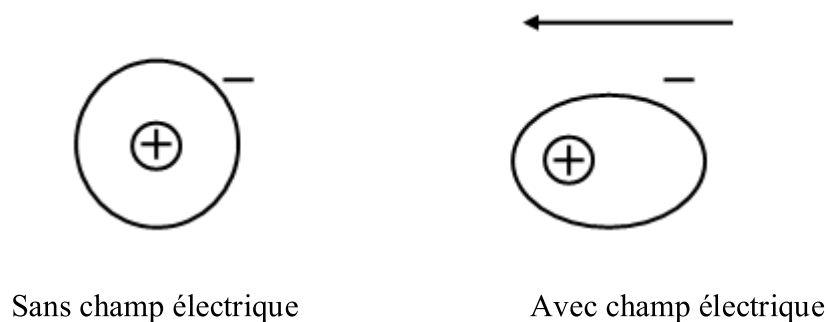


Figure I.20. Polarisation d'une particule sous un champ électrique

Ce décalage du nuage d'électrons par rapport au centre du noyau de la particule va créer un moment dipolaire qui est à l'origine de la force diélectrophorétique [94].

I.3.4.5. Moment électrique d'un dipôle

Un dipôle est formé de deux charges égales et de signes opposés. La valeur du moment électrique d'un dipôle est où q est la charge positive (ou la valeur absolue de la charge négative) et d_p la longueur du dipôle. Il va de soi que pour les molécules où $d_p = 0$, le moment dipolaire est nul (figure I.21).

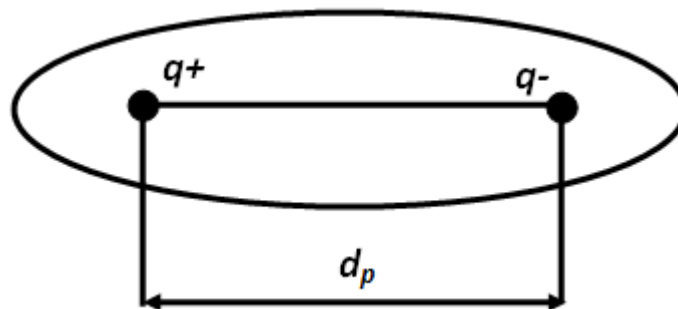


Figure I.21. Moment dipolaire

I.4. Convoyeurs à ondes mobiles

I.4.1. Convoyeurs à ondes mobiles incliné

Pour bien comprendre le phénomène de l'attraction des particules métalliques sur la surface d'un COM, Alibida et al [99] ont réalisé une étude expérimentale sur des pièces métalliques utilisant un plan incliné sur lequel est fixé le convoyeur pour estimer l'intensité de cette *forced attraction*.

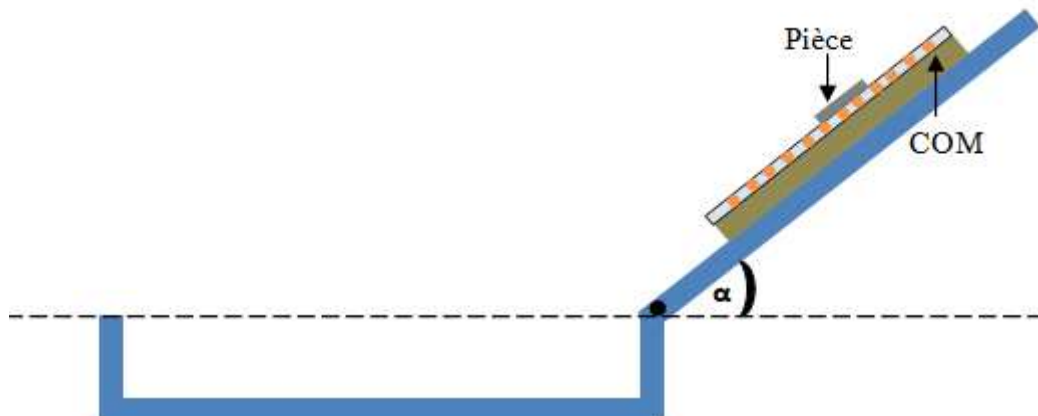


Figure I.22. Système d'inclinaison du COM pour estimer la force d'attraction.

Principe de fonctionnement

Le COM était fixé sur un dispositif mécanique qui permettait son inclinaison manuelle de 0° (horizontal ; condition initiale) à 180°. Comme le montre la (figure I.22) lorsque la pièce métallique est en contact avec les électrodes, une charge électrique à induction de polarité opposée à la tension appliquée y est induite (figure I.23). Par conséquent, une force électrostatique d'attraction est générée qui provoque l'attachement. L'intensité de la force était alors estimée en mesurant l'angle de chute auquel la pièce métallique se détachait de la surface du convoyeur. Les résultats obtenus ont révélé l'existence d'une **force d'attraction** qui dépend de la fréquence, de l'amplitude et de la forme d'onde de la tension appliquée [99].

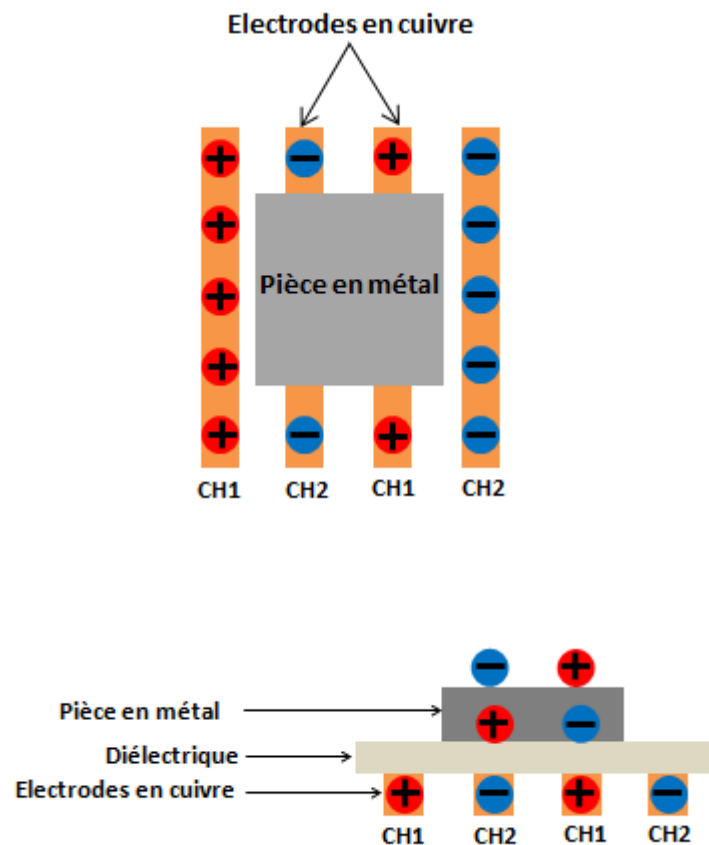


Figure I.23. Représentation schématique du principe de fonctionnement de la polarisation de la particule métallique

- **La force d'attraction**

$$\vec{F}_a = \frac{1}{2}\epsilon A \left(\frac{U}{l}\right)^2 \quad (\text{I-11})$$

Où ϵ est la permittivité absolue du milieu, A est l'aire de l'électrode, U et l sont la différence de tension et l'écart équivalent entre les électrodes.

I.4.2. Convoyeurs à ondes mobiles cylindrique

En se basant sur cette étude Tilmatine et al [100] ont développé un nouveau dispositif pour la séparation des particules métal/plastique qui a été mise au point à l'aide d'un COM cylindrique (figure I.24).

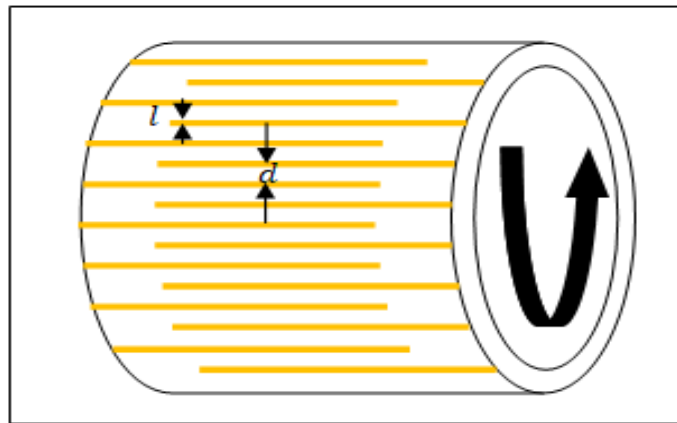


Figure I.24. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique cylindrique biphasé

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de ce séparateur est principalement basé sur cette force exercée sur les particules métalliques. Lors de la rotation du convoyeur à l'aide d'un moteur les particules de cuivre sont maintenues sur le convoyeur par **la force d'attraction** tandis que les granulés de plastique tombent sous l'action de **la force de centrifuge** et **la force de gravité**.

- **La force centrifuge**

Force agissant sur un corps ayant une trajectoire curviligne et tendant à le pousser radialement vers l'extérieur en direction opposée à celle de la force centripète.

$$\vec{F}_{ce} = m \cdot W \cdot R^2 \quad (I-12)$$

Avec la vitesse de rotation W (rad/s) du cylindre et le rayon R du cylindre.

Des expériences préliminaires ont montré que l'on obtient des produits avec une grande pureté, jusqu'à 100% pour les particules métalliques [100].

Les paramètres qui influencent les performances de la séparation d'un tel dispositif ont été étudiés par Louati et al [101] pour un mélange de particules métalliques/plastiques de taille granulométrique allant jusqu'à 10 mm. Un séparateur électrostatique cylindrique a été développé et analysé. Les résultats obtenus ont confirmé les performances élevées de la séparation, en termes de récupération et pureté. Les performances de la séparation dépendent de la distance entre les électrodes, la fréquence du signal, la tension appliquée et la vitesse de rotation.

Bien que de meilleurs résultats aient été obtenus en appliquant des valeurs élevées de la tension appliquée. Toutefois, le dispositif de séparation électrostatique doit être développé avec une isolation élevée entre les électrodes adjacentes [101].

1.4.3. Convoyeur à onde mobiles à double face

Bien que cette technique ait donné des résultats satisfaisants de séparation ; l'augmentation de la tension appliquée provoque le claquage entre les électrodes ce qui empêche le fonctionnement du COM.

Pour minimiser le problème du claquage et optimiser les performances de la séparation Louhaj et al [102] ont développé une nouvelle configuration du rideau électrique. Un rideau électrique biphasé à doubles faces a été réalisé (figure I.25) ce qui a permis d'augmenter la tension jusqu'à 10 kV utilisant un transformateur à haute tension.

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du Convoyeur à doubles- faces n'est pas différent à celui de simple face, mais dans ce cas, le but consiste à l'augmentation de la force d'attraction en appliquant des tensions électriques plus élevées.

Les résultats obtenus ont révélé d'une part l'existence d'une force d'attraction appliquée sur les particules métalliques qui dépendent principalement de l'amplitude de la tension appliquée. D'autre part, ils ont montré la possibilité de la séparation d'un mélange métal /plastique en utilisant tel dispositif [102].

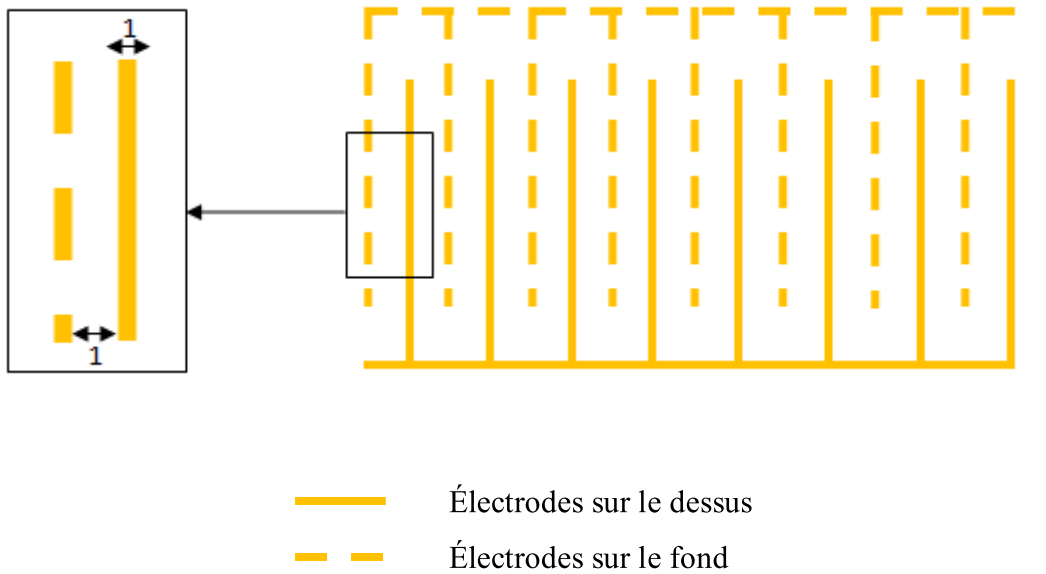


Figure I.25. Schéma descriptif du convoyeur double face

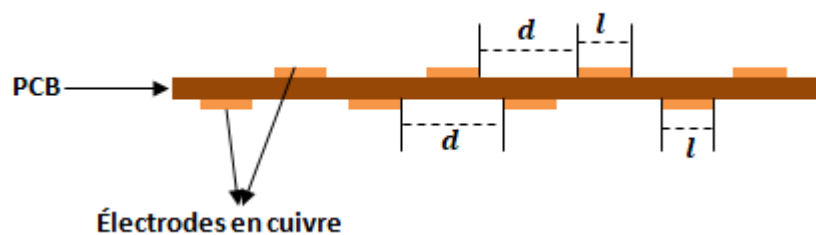


Figure I.26. Vue transversale du COM double face.

- Pour une application industrielle, il serait intéressant de remplacer le dispositif incliné du COM par une courroie rotative.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principaux séparateurs électrostatiques métal/plastique qui sont basés dans leurs fonctionnements sur le champ électrique. D'après les études réalisées par les chercheurs, chaque séparateur consacré à un genre de produit, il y a des séparateurs consacrés à la séparation des particules micronisées tel que le séparateur à tapi, d'autres pour les particules millimétriques tels que, le séparateur à tambour et chute libre.

Les recherches ont montré que l'application du champ électrique est très importante dans la technique des ondes mobiles. Dans le côté pratique, les chercheurs ont été intéressés par

l'étude des paramètres qui influencent le déplacement des particules et ils ont montré l'impact de la taille des particules sur leur déplacement. Pour améliorer l'efficacité du déplacement, les chercheurs ont étudiés l'effet de la charge initiale sur le sens et la vitesse des particules. Ils ont montrés que la charge initiale est un facteur très important à étudier.

Coté numérique, les chercheurs ont étudié les forces exercées sur la particule. Les résultats de la simulation montrent que la force de Coulomb est la force responsable du déplacement des particules en tant que c'est la seule force répulsive. Ainsi, l'augmentation de la charge initiale des particules et de l'amplitude du voltage appliqué peut améliorer leur efficacité de déplacement. Dans les travaux actuels de l'équipe de laboratoire APELEC, une nouvelle application du champ électrique à ondes mobiles a été démontrée. Cette nouvelle application a été consacrée à la séparation électrostatique d'un mélange granulaire métal/plastique. Les chercheurs ont montré la faisabilité de la séparation par telle technique après des études profondes sur la force d'attraction exercée sur les particules métalliques, d'autre part les chercheurs ont développé plusieurs configurations de convoyeurs à ondes mobiles, tels que le séparateur à double face et le séparateur à tambour. Cette dernière configuration est adaptable aux besoins de l'industrie.

Dans le chapitre suivant une étude expérimentale sur les particules métalliques au niveau de la surface du COM sera réalisée, en comparant le comportement des particules sur chaque COM.

II.1. Introduction

La technique des ondes mobiles en utilisant un convoyeur à ondes mobiles a été largement utilisée par plusieurs chercheurs pour le déplacement des particules diélectriques. Une étude expérimentale ce qui concerne l'influence de plusieurs paramètres sur le comportement des particules diélectriques a été effectuée. L'objectif de notre travail est totalement différent, c'est une étude expérimentale sur l'influence de plusieurs paramètres sur l'intensité de la force d'attraction appliquée sur des particules en métal en utilisant un COM. Ces paramètres sont, la géométrie du convoyeur, le type et la taille des particules, le niveau de la tension électrique et le débit d'aspiration.

Une étude expérimentale et paramétrique sur les particules de l'acier inoxydable carrée est effectuée en variant les différents paramètres. En outre, le comportement des particules de plastique est opposé à celui des particules métalliques. Donc une nouvelle technique de séparation d'un mélange métal /plastique sera réalisé, en utilisant un aspirateur d'air avec un débit varié.

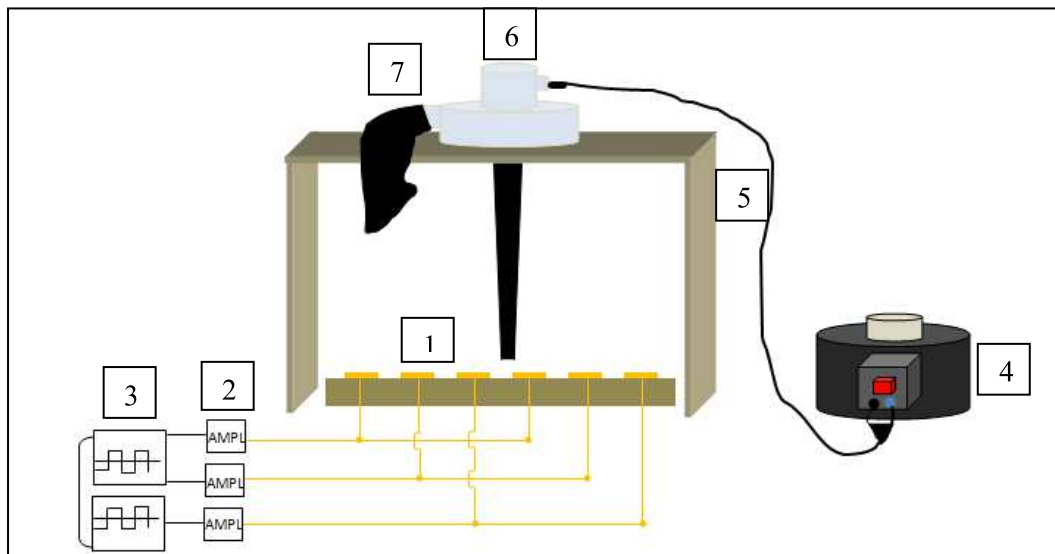
Ensuite, une étude expérimentale sera réalisée sur l'effet de la position de la particule de cuivre mise sur un rideau électrique en fonction des facteurs précédents, de sorte que la particule est mise sur différentes positions, pour savoir le siège de la force d'attraction.

II.2. Etude de la force d'attraction appliquée sur les particules métalliques

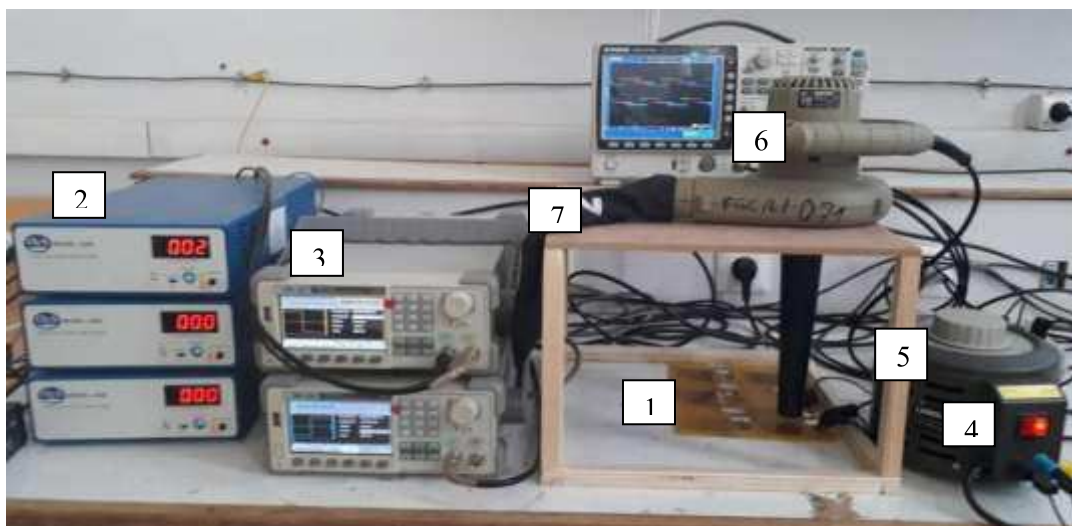
II.2.1. Description du dispositif expérimental

Le montage expérimental utilisé dans cette étude est montré sur la (figure II.1). Il comprend principalement un convoyeur à ondes mobiles, trois amplificateurs (TREK, Modèle 2220) de HT et deux générateurs de fonction synchronisés (Siglent SDG 1025). Neuf convoyeurs à 3 phases ont été réalisés. Chaque électrode est alimentée par l'amplificateur HT, qui peut délivrer une tension de 2 kV, avec un courant de 20 mA. Ces amplificateurs sont commandés à l'aide des générateurs de fonction.

L'ensemble du système permet de faire varier le déphasage, la fréquence et le niveau de la tension appliquée à chaque électrode. Les ondes des signaux hauts tension sont visualisées avec un oscilloscope à mémoire (Gwinstek GDS-3154).



a) Représentation schématique de l'installation expérimentale



(b) Photographie du dispositif expérimental utilisé

Figure II.1. Dispositif expérimental

(1) COM, (2) amplificateurs HT, (3) générateurs de fonction, (4) autotransformateur, (5) support, (6) aspirateur, (7) poche.

Le souffleur électrique (CROWN 550 W CT17002) se compose de deux fonctions : un aspirateur et un souffleur. Cet appareil, nous garantit des résultats remarquables grâce à son puissant débit d'air. Dans notre étude, nous allons utiliser l'appareil comme un aspirateur, afin d'étudier l'intensité de la force d'attraction appliquée sur les particules métalliques, en utilisant un autotransformateur pour contrôler le débit d'aspiration d'air.

II.2.2. Configurations des convoyeurs étudiés

La (figure II.2) représente une vue en coupe transversale, des configurations des convoyeurs à ondes mobiles (triphase).

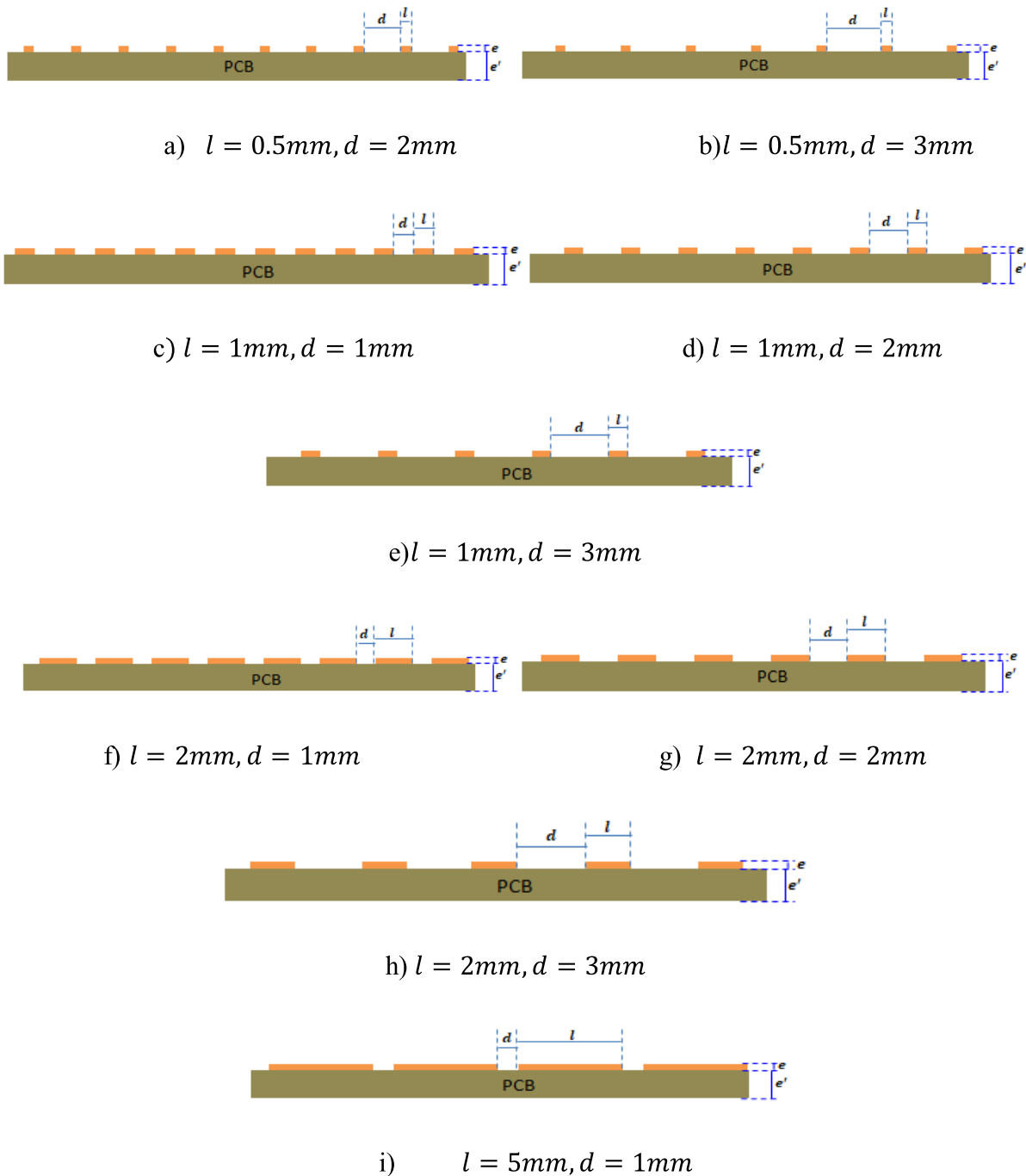


Figure II.2. Vue en coupe transversale sur le plan x-y des configurations des convoyeurs triphasés.

Les convoyeurs utilisés comprennent plusieurs électrodes en cuivre ; gravées parallèlement sur des plaques d'époxy pré-sensibilisé, de $50 \times 50\text{mm}^2$ (figure II.3). On a

utilisé quatre électrodes de largeurs « l » (0.5, 1, 2, et 5mm) et de trois valeurs de l'écartement inter- électrodes « d » (1, 2 et 3mm), e et e' sont l'épaisseur des électrodes et l'épaisseur de la plaque d'époxy respectivement. Un film isolant en ruban adhésif couvre le convoyeur pour minimiser le risque de claquage entre électrodes.

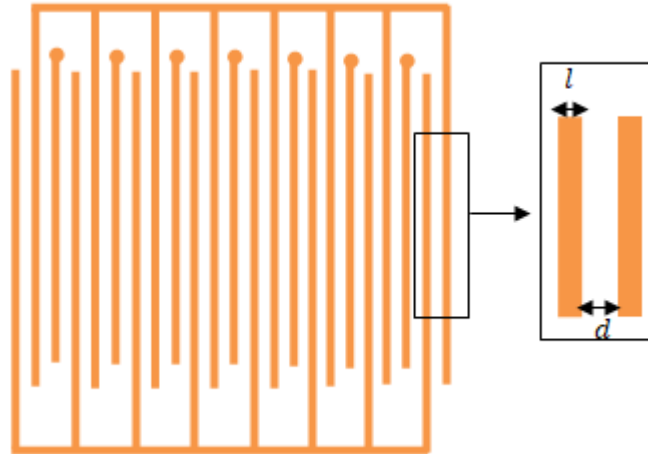


Figure II.3. Représentation détaillée d'un convoyeur de largeur 1 mm et intervalle inter-électrode 2 mm.

II.2.3. Particules utilisées

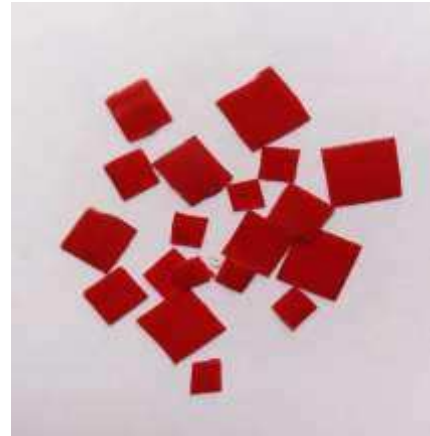
Les expériences sont effectuées en utilisant des pièces carrées en INOX (acier inoxydable) et de plastique de différentes tailles (de 1 mm jusqu'à 15 mm), et des particules de cuivre de longueur égale à 10 mm et 0.5 mm de diamètre (figure II.4).

L'ACIER INOXYDABLE est un alliage métallique ferreux. Il contient plus de 50 % de fer, un minimum de 10,5 % de chrome et un maximum de 1,2 % de carbone. Sa grande résistance à la corrosion est sa principale caractéristique.

Le CUIVRE est un métal rougeâtre, malléable et ductile, qui conduit bien la chaleur et l'électricité.



a) Particules de l'INOX D= (1à15) mm



b) Particules de plastique D= (1à15) mm



c) Particules de cuivre L = 10 mm

Figure II.4. Aspect des pièces carrées et des particules utilisées.

II.2.4. Choix de la forme du signal

Le signal de sortie sélectionné est carré au lieu de sinusoïdal, et triangulaire, car l'onde carrée appliquera la pleine tension tout au long du cycle, contrairement aux deux autres signaux, en plus du changement de polarité (figure II.5). Les résultats préliminaires montrent que la tension électrique a un effet significatif en appliquant des signaux carrés [94].

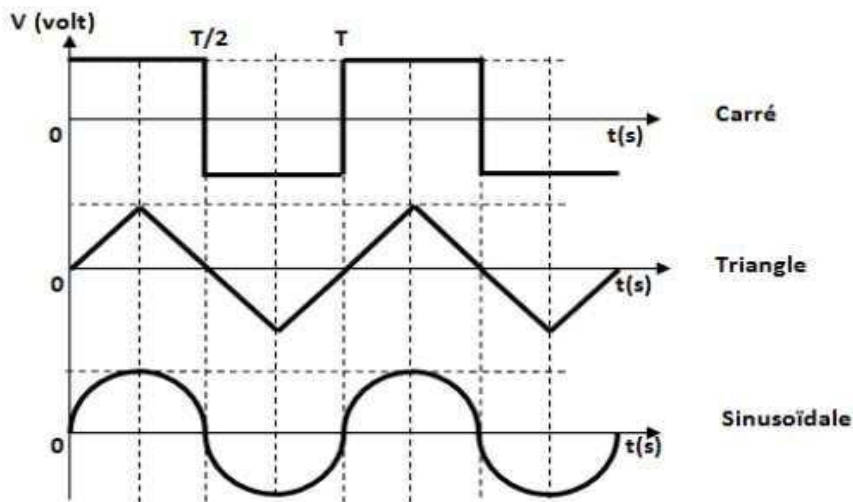


Figure II.5. Différentes formes du signal (carré, sinusoidale et triangle).

II.2.5. Protocole expérimental

La force d'attraction appliquée aux particules métalliques sur un convoyeur à onde mobile dépend de plusieurs facteurs. L'objectif de cette étude est d'analyser la force d'attraction appliquée aux particules de l'acier inoxydable et de cuivre en fonction de la tension appliquée, la taille des particules, la largeur d'électrode, l'écartement inter-électrode et la position des particules (pour la position des particules c'est pour les particules de cuivre).

L'effet de ces facteurs sur le comportement des particules de plastique fait partie dans cette étude. Les particules de l'assistâtes thermique (plastique) ont été utilisées, afin d'étudier leurs comportement, en appliquant une force d'aspiration.

- **Réglage du débit**

Pour régler le débit d'aspiration d'air ; les particules métalliques sont déposées sur le convoyeur sans l'application de tension électrique. Une fois l'aspirateur est mis en marche, on varie le débit d'aspiration par l'autotransformateur, jusqu'à ce que la force d'aspiration puisse aspirer les particules métalliques. Ensuite les mêmes expériences sont effectuées en appliquant la tension, une fois les pièces métalliques ou de plastique sont posées à la surface du convoyeur, celui-ci est alimenté à travers les amplificateurs HT et l'aspirateur est ensuite mis en marche. On varie la tension jusqu'à ce que la force d'aspiration ne puisse pas aspirer

les pièces qui restent collées à la surface du convoyeur. Les particules sont récupérées avec une poche fixée sur la sortie de l'aspirateur.

Puis nous avons refait le même travail avec les particules en cuivre, que nous avons mis dans différentes positions (horizontal, perpendiculaire, sur l'électrode) (figure II.6).



a) Particule sur l'électrode



b. Particule entre électrodes



c. Particule perpendiculaire aux électrodes

Figure II.6. Présentation de la position des particules sur le convoyeur.

II.3. Résultats et discussion

II.3.1. Expériences sur les particules en l'acier inoxydable

L'effet du débit d'aspiration (Particule $S=1 \text{ mm}^2$)

Les résultats de la (figure II.7), représentent la variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction du débit d'aspiration. Les résultats montrent que l'augmentation du débit d'aspiration entraîne une augmentation de la tension d'attachement

pour les différents types de convoyeurs étudiés et par conséquent l'augmentation du champ électrique crée. Par exemple pour un débit d'aspiration de $1.15 \text{ m}^3/\text{s}$, la tension d'attachement de la particule est seulement 250 V, tandis qu'elle atteint 600 V pour un débit de $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

On peut expliquer ce résultat par le fait que l'augmentation de la force d'aspiration devient de plus en plus dominante par rapport à la force d'attraction créée par le champ électrique appliqué aux électrodes.

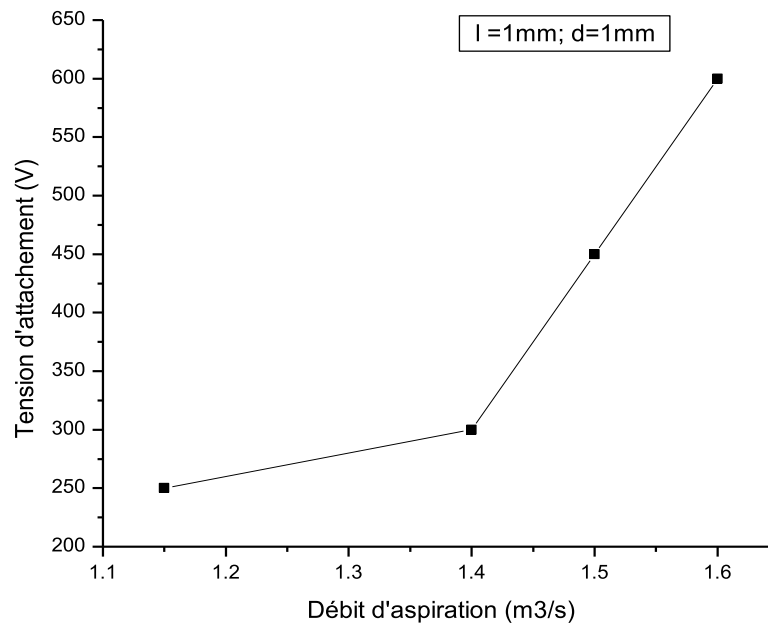


Figure II.7. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction du débit d'aspiration, pour une valeur d'écartement inter-électrodes $d = 1$ (Largeur d'électrode $l = 1 \text{ mm}$).

II.3.1.1. Influence de l'écartement inter-électrodes d (largeur d'électrode fixe)

Les résultats obtenus de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de l'écartement inter-électrodes d , sont représentés sur les figures (II.8, II.9, II.10 et II.11). Ces figures sont tracées pour des valeurs de largeur d'électrode égale à 0,5 mm, 1 mm, 2 mm et 5 mm, respectivement.

La tension d'attachement est la tension à partir de laquelle la pièce carrée reste attachée sur la surface du COM, malgré la forte aspiration causée par l'aspirateur.

Les résultats obtenus montrent que la tension d'attachement pour la gamme de pièces entre 1 et 4 mm, diminue en fonction des dimensions des pièces jusqu'à une dimension de 4

mm puis augmente pour les pièces de dimensions supérieures à 4 mm. Ce résultat s'explique par le fait que la force d'attraction produite par le convoyeur, augmente avec la surface de contact des pièces avec les électrodes, qui devient plus grande en augmentant de 1 mm à 4 mm. Dans notre étude les pièces ont été mises entre deux électrodes, du coup les pièces de 1 mm et 2 mm n'ont aucun contact avec les électrodes, tandis que les pièces de 3 mm et 4 mm ont un contact entre les deux électrodes. Pour la pièce de 4 mm, la surface de contact est plus grande que la pièce de 3 mm, puisque pour 4mm la pièce a un contact avec toute la surface des deux électrodes (pour une largeur de 0.5 mm et un écartement inter électrodes de 2 mm) (figure II.8). Ce qui explique les résultats précédents.

Par contre, à partir une dimension de 5 mm, on constate qu'il existe une relation directement proportionnelle entre la dimension de la pièce et la tension d'attachement. Par exemple, pour les pièces des dimensions de 5mm, 7mm, 9mm, 15mm: la tension d'attachement nécessaire est de 300 V, 350 V, 500V et 950V respectivement. On peut expliquer ce résultat par le fait que, bien que la surface de contact avec les électrodes augmente, la force d'attraction produite par le convoyeur devient plus faible et insuffisante pour l'attachement des pièces en raison de la force d'aspiration appliquée sur la pièce qui devient plus dominante que la force d'attraction par rapport aux dimensions supérieures à 5mm. Par conséquent, la tension nécessaire pour l'attachement des pièces en INOX augmente avec l'augmentation de leurs dimensions.

Par ailleurs, nous remarquons qu'en général que la tension d'attachement augmente avec l'écartement inter-électrodes, car la force d'attraction produite par le convoyeur diminue, lorsque l'écartement inter-électrodes d augmente. Par exemple pour une pièce de 3 mm, la tension nécessaire pour son attachement est de 100 V, 250 V et 400 V pour un écartement inter-électrode de 1 mm, 2 mm et 3 mm respectivement (largeur 1mm). Effectivement, le champ électrique moyen qui est égal au rapport de la tension sur la distance ($E=U/d$) diminue, lorsque la distance d augmente et donc la force d'attraction diminue, ce qui fait qu'il faut une tension d'attachement plus grande pour maintenir les pièces.

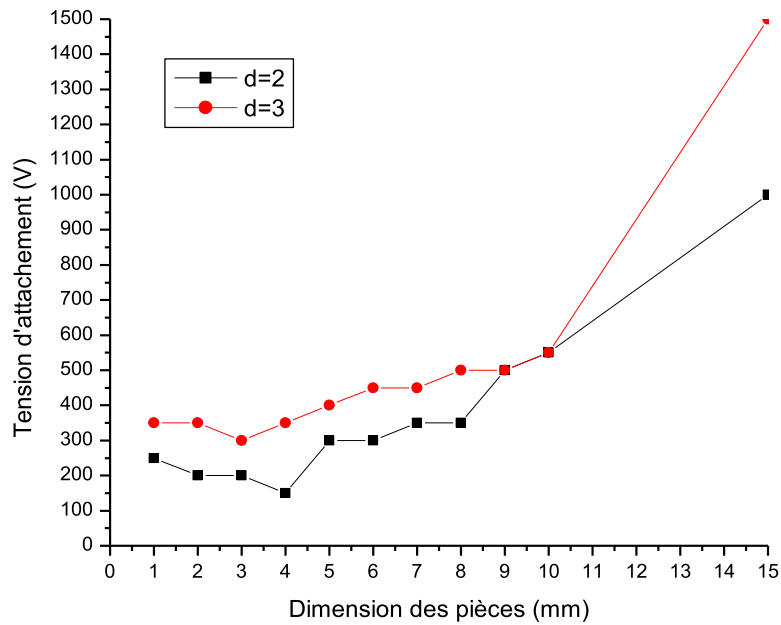


Figure II.8. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour deux valeurs de l'écartements inter-électrodes d (Largeur d'électrode, $l = 0,5$ mm)

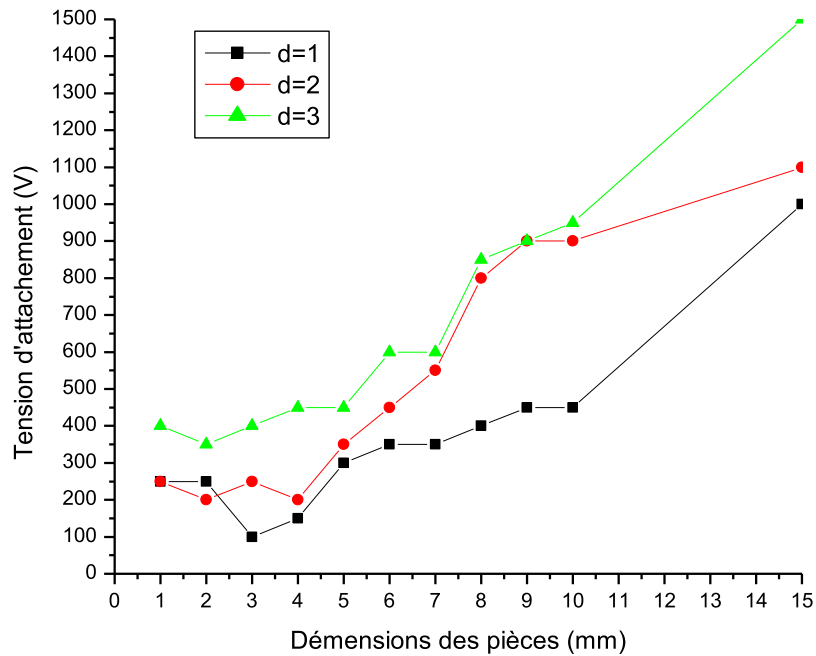


Figure II.9. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de l'écartement inter-électrodes d (Largeur d'électrode, $l = 1$ mm)

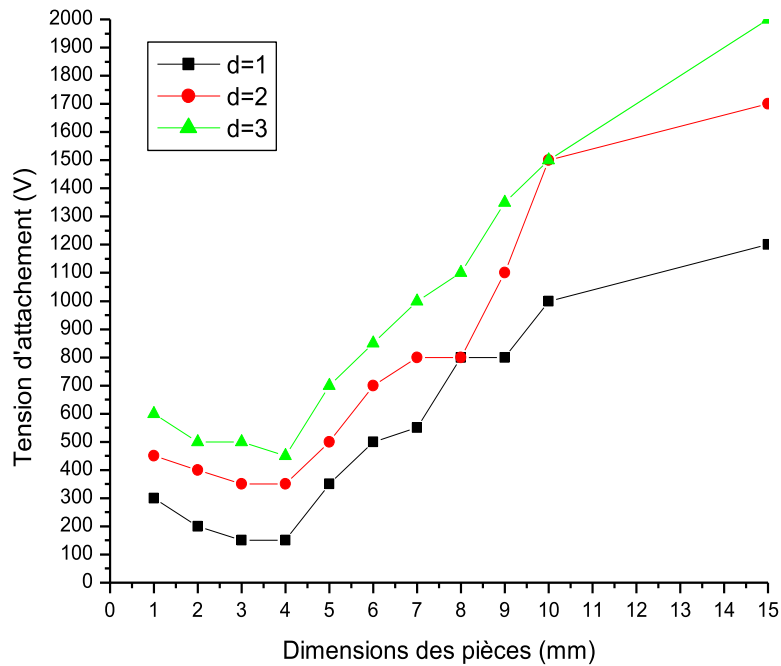


Figure II.10. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de l'écartement inter-électrodes d (Largeur d'électrode, $l = 2$ mm)

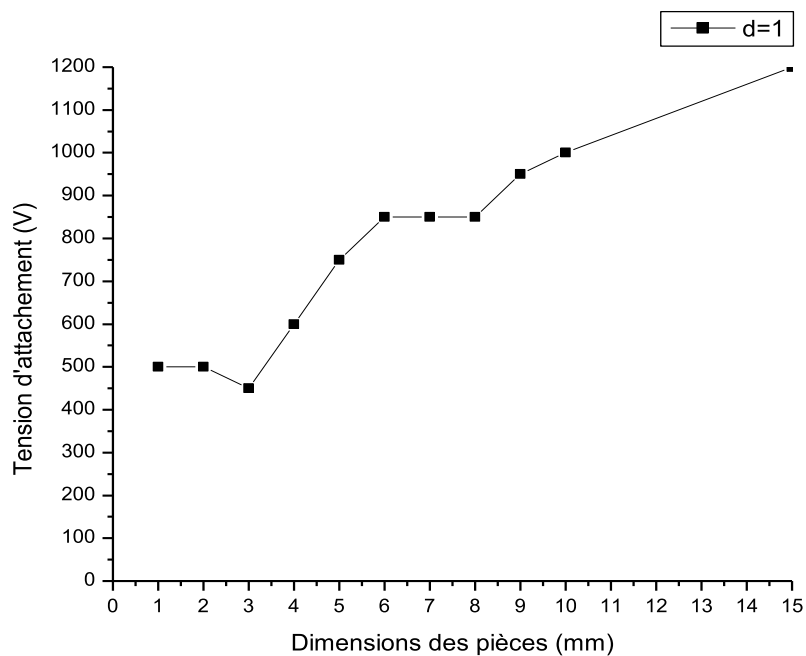


Figure II.11. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour valeur de l'écartement inter-électrodes $d=1$ (Largeur d'électrode $l=5$ mm).

II.3.1.2. L'effet de la largeur d'électrode l (écartement inter électrodes d fixe)

Les résultats obtenus de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de la largeur d'électrode l sont représentés aux figures (II.12, II.13 et II.14). Ces figures, sont tracées pour trois valeurs de l'écartement inter-électrodes d égales à 1 mm, 2 mm et 3 mm, respectivement.

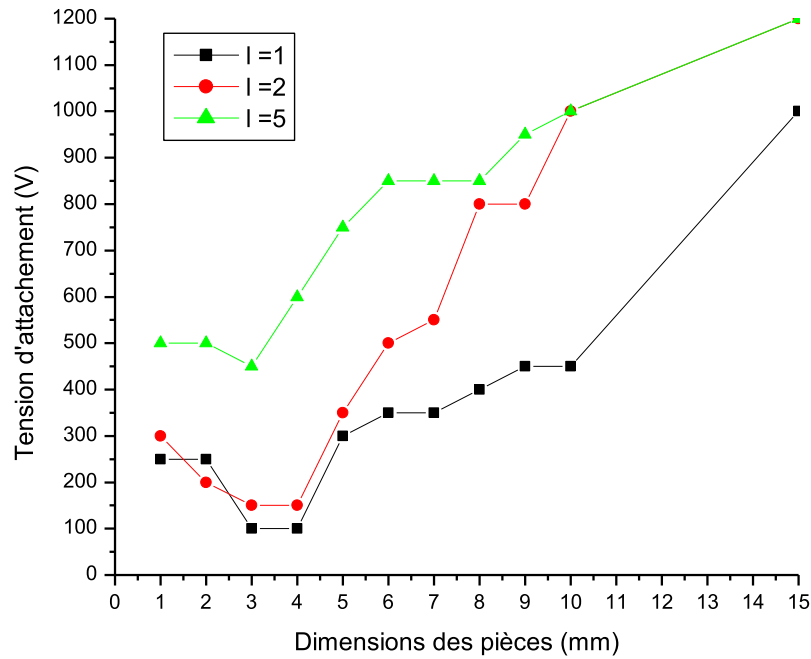


Figure II.12. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de la largeur d'électrode (écartement inter-électrodes $d=1$ mm).

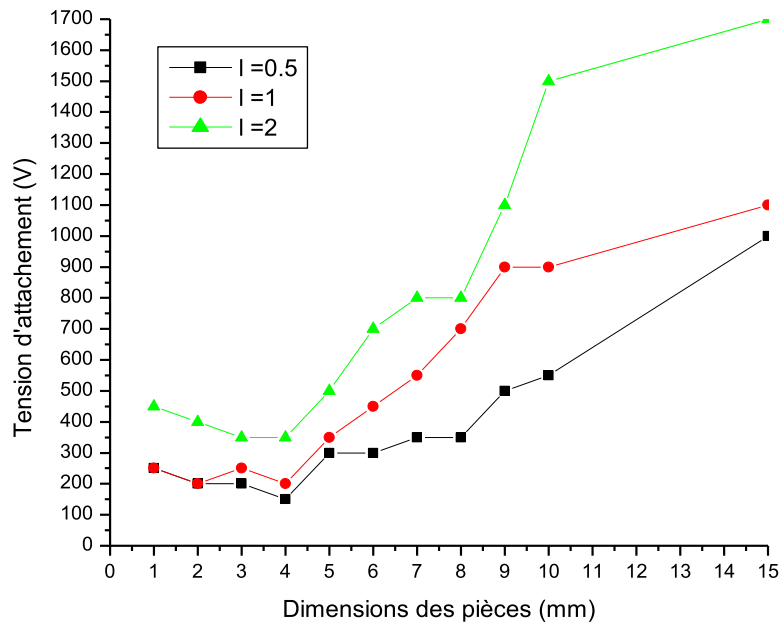


Figure II.13. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de la largeur d'électrode (écartement inter-électrodes $d=2$ mm).

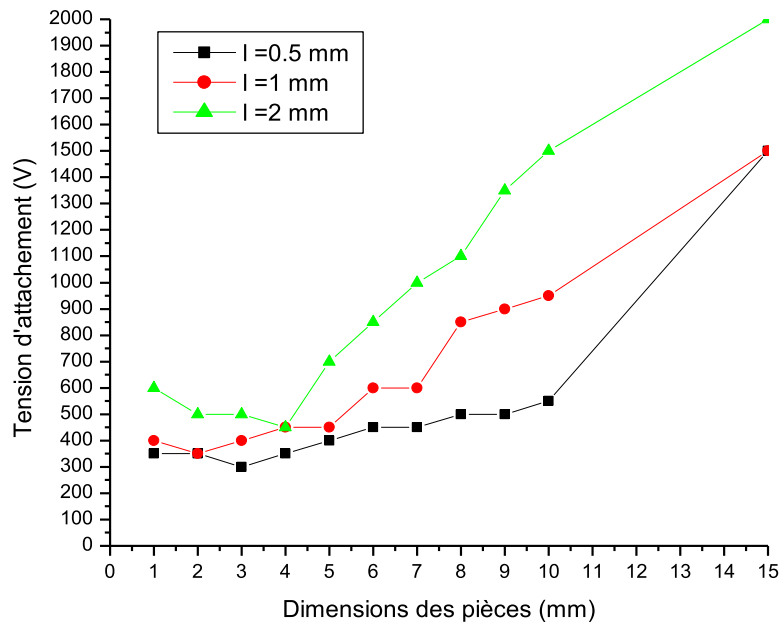


Figure II.14. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de la largeur d'électrode (écartement inter-électrodes $d=3$ mm).

Comme pour les résultats précédents, la tension d'attachement diminue en fonction des dimensions des pièces jusqu'à une dimension de 4 mm, puis augmente pour les pièces de

dimension supérieures à 4 mm. Pour les pièces de dimension inférieure à 4 mm, la force d'attachement des particules diminue, car la force d'attraction produite par le convoyeur augmente avec la surface de contact des pièces avec les électrodes, qui devient plus grande en augmentant de 1 mm à 4 mm. Par contre, à partir d'une dimension de 5 mm, l'attachement produit par le convoyeur devient plus faible à cause de la force d'aspiration appliquée sur la pièce qui augmente avec leurs dimensions.

Pour l'effet de la largeur d'électrode, on constate que la tension d'attachement nécessaire est plus faible pour les petites largeurs d'électrodes. Cela est vérifié, pour toutes les tailles des particules. Tandis que l'attachement des particules devient plus faible, pour les largeurs d'électrodes plus grandes. Ces résultats s'expliquent, par le fait que le champ électrique engendré par les électrodes de petites largeurs, est plus élevé par rapport aux grandes largeurs.

II.3.2. Expériences avec des particules en cuivre

Les expériences suivantes sont réalisées pour déterminer l'importance de la position des particules sur le convoyeur. Des particules de cuivre de longueur de 10 mm ont été utilisées et qui sont placées dans 3 positions différentes.

- Particule placée parallèlement entre les électrodes (sans contact avec les électrodes).
- Particule placée perpendiculairement, en contact sur les électrodes.
- Particule placée sur l'électrode elle-même.

- **L'effet du débit d'aspiration pour les particules de cuivre (Particule L = 10 mm)**

Les résultats de la **figure II.15** représentent la variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction du débit d'aspiration.

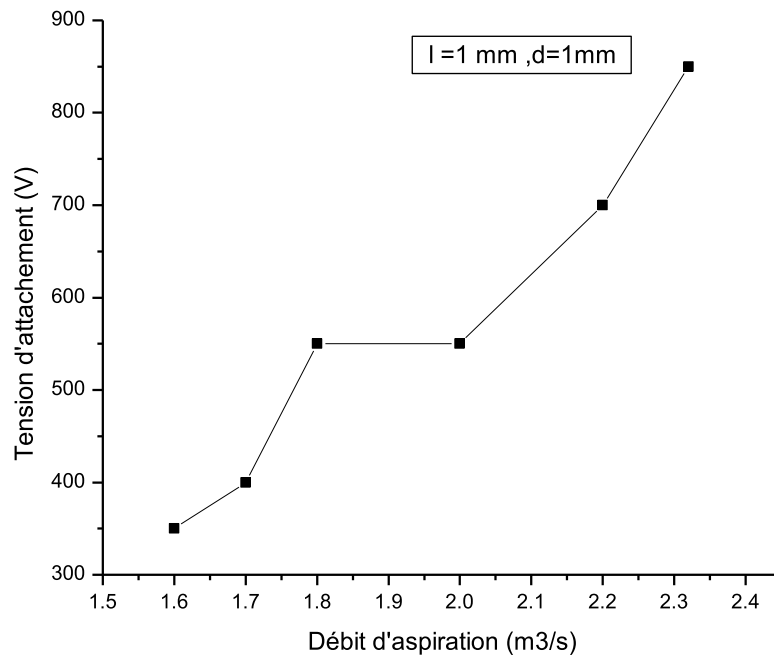


Figure II.15. Variation de la tension d'attachement des pièces métalliques en fonction du débit d'aspiration pour valeur de distance inter-électrodes $d = 1$ (Largeur d'électrode $l = 1$ mm).

Nous avons remarqué les mêmes remarques et observations des particules d'inox sauf que le débit d'aspiration nécessaire pour les particules de cuivre est beaucoup plus grand par rapport à celui nécessaire pour les particules d'inox. On peut expliquer ce résultat, par la dimension mince (pointée) de la particule de cuivre qui nécessite un grand débit d'aspiration.

D'après les résultats obtenus, on constate que par exemple, pour un débit d'aspiration de $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$, la tension nécessaire pour l'attachement de la particule est seulement 350 V, tandis qu'elle atteint 700 V pour un débit de $2.25 \text{ m}^3/\text{s}$.

II.3.2.1. L'effet de l'écartement inter électrodes (largeur fixe)

Les résultats obtenus sont tracés aux figures (II.16, II.17, II.18 et II.19), pour des valeurs différentes de la largeur d'électrodes égale à 0,5 mm, 1 mm, 2 mm et 5 mm respectivement.

Les résultats obtenus montrent, que lorsque la particule est placée perpendiculairement en contact avec les électrodes, la tension d'attachement nécessaire pour l'adhésion des particules est plus faible. Cela, est vérifié pour toutes les configurations des convoyeurs. Par contre, cette tension augmente significativement lorsque la particule est placée entre les électrodes ou sur une électrode. Par exemple pour la position perpendiculaire, la tension d'attachement est

de 750 V, tandis que pour les positions entre les électrodes et sur l'électrode, la tension est de 900V, 1000 V respectivement pour ($l = 0.5, d = 2$). Ce résultat, s'explique par le fait que le champ est plus intense entre les électrodes, ce qui explique l'attachement fort lorsque la particule est posée sur deux électrodes différentes. Par ailleurs, on peut conclure que le champ électrique est plus faible au niveau de la surface d'électrode, puisque la tension nécessaire d'attachement des particules est beaucoup plus élevée par rapport à celle dont la particule est placée perpendiculairement. En outre, le champ est plus intense entre les électrodes que sur l'électrode elle-même d'après les résultats obtenus.

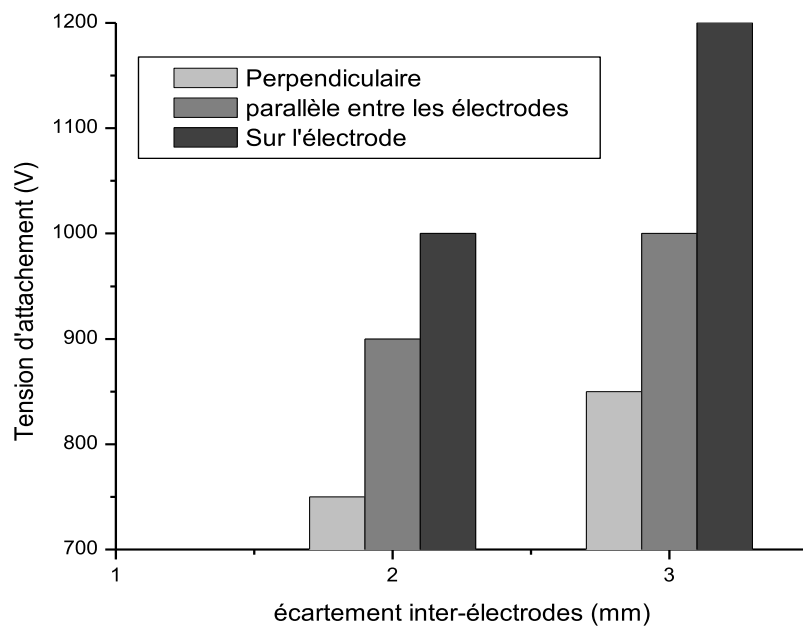


Figure II.16. Variation de la tension d'attachement des particules de cuivre en fonction de leur position pour deux valeurs différentes écartements inter-électrodes 2 et 3 mm ($l = 0,5$ mm).

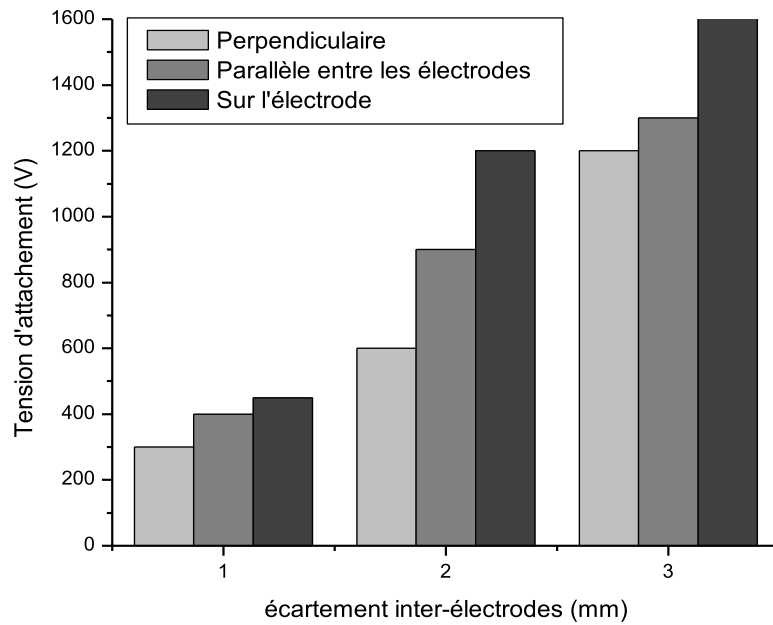


Figure II.17. Variation de la tension d'attachement des particules de cuivre en fonction de leur position pour deux valeurs différentes écartements inter-électrodes 1,2 et 3 mm ($l = 1$ mm).

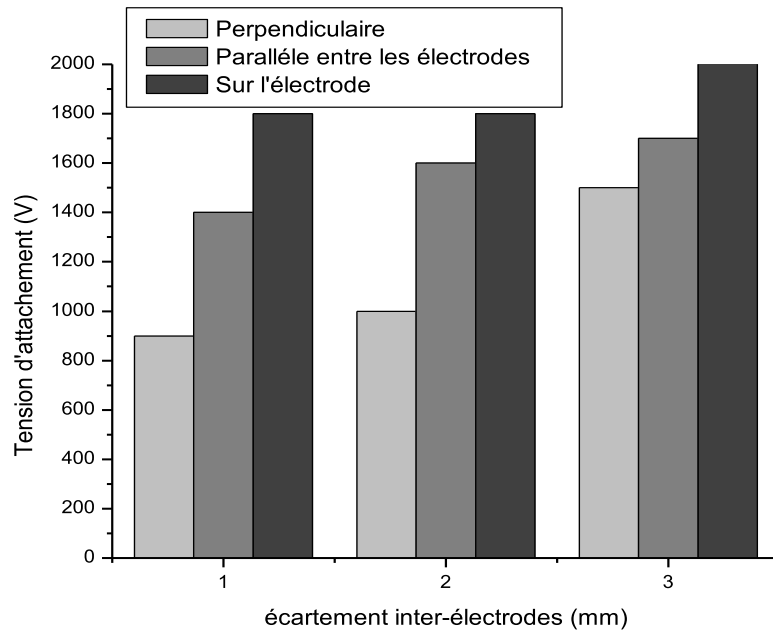


Figure II.18. Variation de la tension d'attachement des particules de cuivre en fonction de leur position pour deux valeurs différentes écartements inter-électrodes 1,2 et 3 mm ($l = 2$ mm).

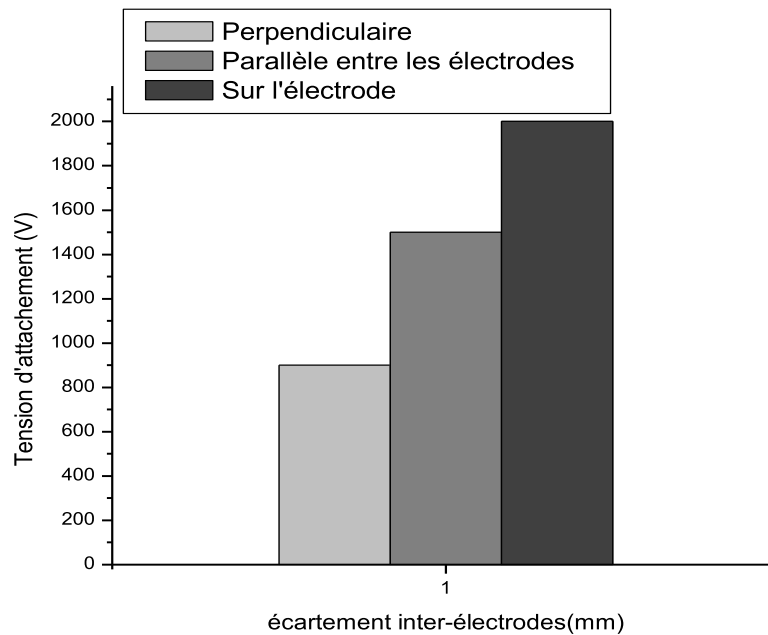


Figure II.19. Variation de la tension d'attachement des particules de cuivre en fonction de leur position pour une valeur d'écartement inter-électrodes $d = 1 \text{ mm}$ ($l = 5 \text{ mm}$).

II.3.2.2. l'effet de la largeur d'électrode (écartement inter -électrodes fixe)

Le même travail a été effectué pour voir l'influence de la largeur des électrodes sur l'intensité de la force d'attraction. Nous avons remarqué les mêmes remarques et observations.

D'après les résultats présentés sur les figures (II.20, II.21 et II.22), on remarque que la tension d'attachement pour les grandes largeurs d'électrode, est plus élevée par rapport aux petites largeurs. Par exemple, la tension nécessaire pour l'attachement est de 850 V, 1200 V et 1500 V pour des largeurs d'électrodes de 0.5mm, 1mm et 2 mm respectivement et un écartement inter-électrodes 3mm. Ceci s'explique, par le fait que le champ électrique engendré par les électrodes avec grands largeurs est moins élevé par rapport aux électrodes avec des petites largeurs. Concernant la position des particules, la position perpendiculaire est toujours la meilleure position.

D'après les résultats trouvés, on peut déduire que le champ électrique est beaucoup plus intense aux extrémités des électrodes.

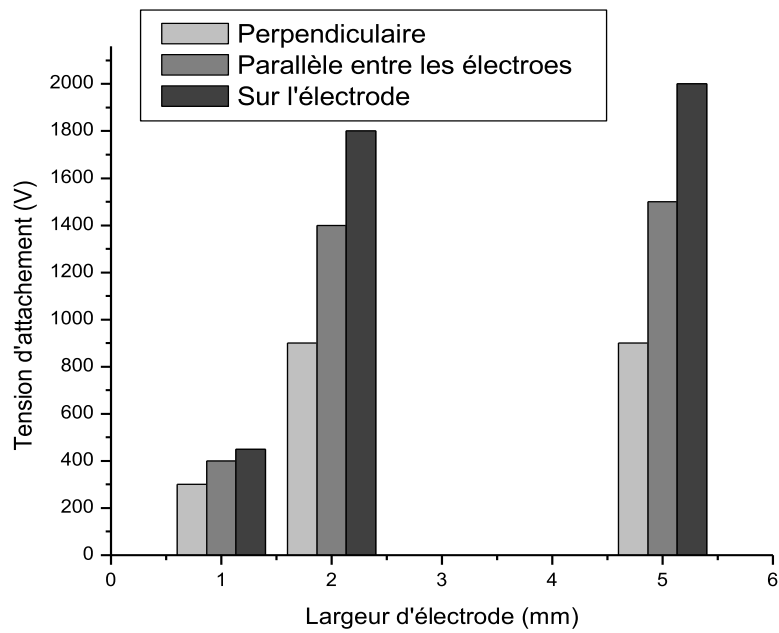


Figure II.20. Variation de la tension d'attachement des particules de cuivre en fonction de leur position pour trois valeurs différentes de largeur d'électrode 1, 2 et 5 mm ($d = 1$ mm).

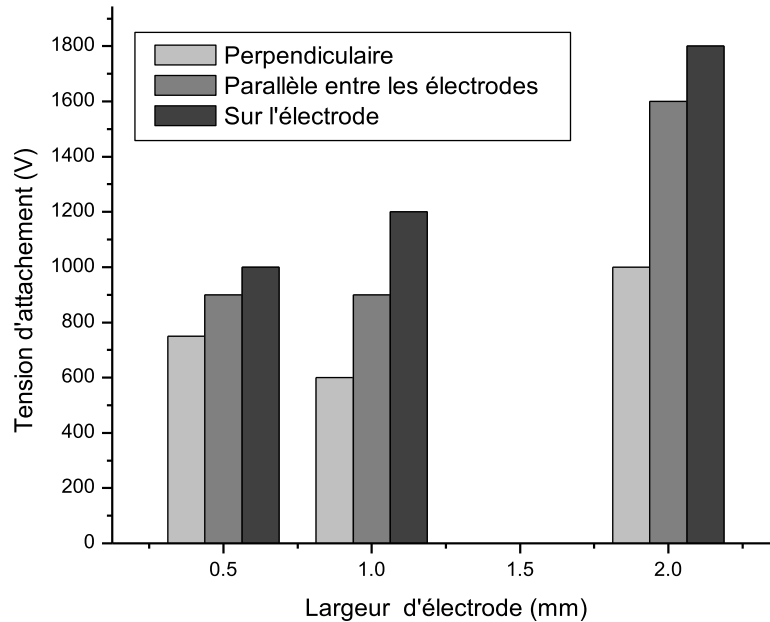


Figure II.21. Variation de la tension d'attachement des particules de cuivre en fonction de leur position pour trois valeurs différentes de largeur d'électrode 0.5, 1 et 2 mm ($d = 2$ mm).

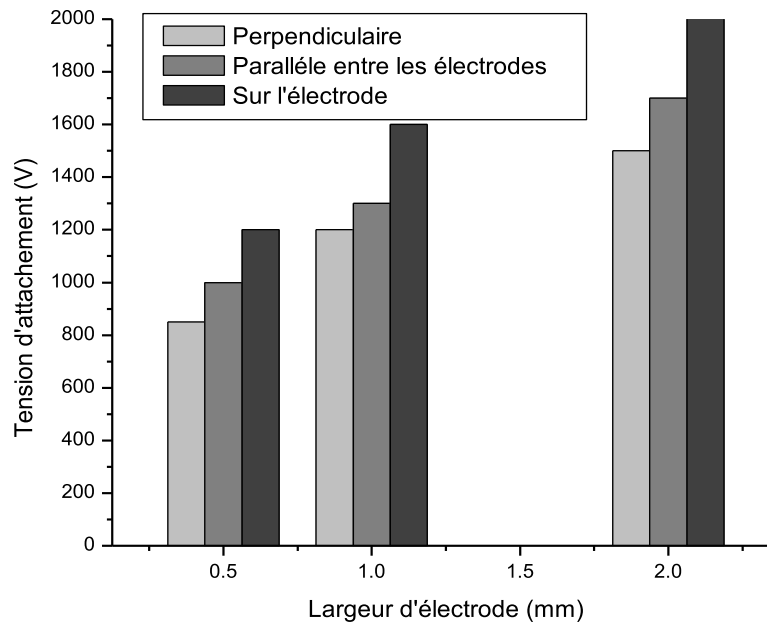


Figure II.22. Variation de la tension d'attachement des particules de cuivre en fonction de leur position pour trois valeurs différentes de largeur d'électrode 0.5, 1 et 2 mm ($d = 3$ mm).

II.4. Conclusion

Une étude expérimentale comparative entre neuf convoyeurs à ondes mobiles a été présentée dans le présent chapitre. A partir des expériences réalisées, il est possible de conclure que l'intensité de la force d'attraction appliquée aux particules métalliques peut être influencée par les facteurs suivants :

- ✓ Un facteur électrique représenté par la tension électrique, de sorte que plus la tension est élevée, plus l'intensité de la force appliquée est intense, ce qui s'explique par l'augmentation du champ électrique généré par les électrodes.
- ✓ Un facteur géométrique représenté par l'écartement inter – électrodes et la largeur d'électrode, de sorte que des résultats satisfaisants ont été obtenus pour le petit écartement inter électrodes et la largeur d'électrode plus mince.
- ✓ Un facteur mécanique représenté par la force d'aspiration d'air. Les essais réalisés ont montré que les meilleurs résultats ont été obtenus pour des débits faibles en termes de tension d'attachement des particules métalliques.

- ✓ Après avoir étudié le comportement des particules de plastique utilisant la force d'aspiration, une nouvelle technique de séparation d'un mélange de particules métal/plastique a été démontré par ce type de convoyeurs à champ polyphasé en utilisant ce convoyeur et une force d'aspiration.
- ✓ Concernant la position de la particule utilisant les particules de cuivre, on a démontré que parmi les positions étudiées qui sont (perpendiculaire, parallèle, sur l'électrode), la meilleure position c'est lorsque on mit la particule perpendiculairement aux électrodes ce qui montre que la force d'attraction est beaucoup plus intense aux extrémités des électrodes.

Le chapitre suivant est consacré à une étude numérique comparative du champ électrique généré par les différents convoyeurs à ondes mobiles.

III.1.Introduction

Les résultats obtenus lors des expériences expérimentaux ont montré, que le comportement hydrodynamique des particules de cuivre et de l'acier inoxydable est affecté par plusieurs paramètres géométriques tels que la largeur et l'écartement inter électrodes, de sorte que ces paramètres influent à leur tour sur l'intensité du champ électrique engendré par les électrodes connectées à la haute tension. Par ailleurs, le champ électrique contrôle la force d'attraction qui est responsable de l'attachement des particules sur la surface du COM.

Le but de ce chapitre, est d'analyser numériquement la distribution du champ électrique en utilisant le logiciel (**Comsol**) pour estimer le champ électrique de chaque configuration du COM. Nous commençons par la présentation des conditions aux limites, nous présentons le domaine du calcul et le choix du maillage. Ensuite, nous illustrons les résultats de la simulation pour chaque configuration du COM, afin de réaliser une étude comparative entre eux. Pour chaque configuration, le champ électrique maximal est estimé au voisinage de l'électrode haute tension. Par ailleurs, l'influence des paramètres expérimentaux tels que la largeur et l'écartement inter-électrodes sont également étudiées.

III.2.Simulation numérique du potentiel et du champ électrique

III.2.1. Conditions aux limites et domaine du calcul

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

Les conditions aux limites sur les électrodes sont données par la condition de type Dirichlet $V=V1$, $V2$ et $V3$ pour les électrodes U, V et W, respectivement. Par ailleurs, les conditions de Neumann sont fixées sur les limites de l'espace et la plaque d'époxy.

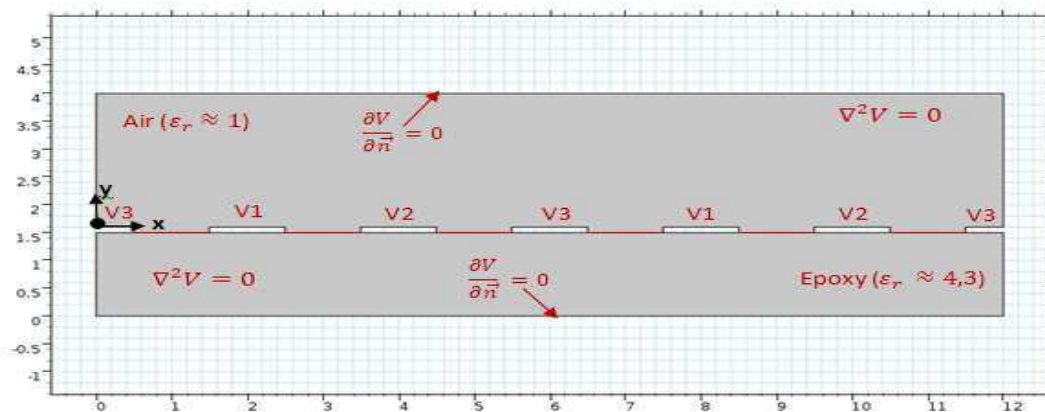


Figure III.1. Conditions aux limites et domaine de simulation.

La (figure III.1), représente l'ensemble des domaines de calcul de la simulation. Le domaine se compose de sept électrodes haute tension avec une largeur de 1 mm et un écartement- inter électrodes de 1 mm. Le domaine correspond à l'espace environnant avec les dimensions suivantes (12 mm x4 mm).

III.2.2. Analyse de sensibilité des résultats au maillage

Quatre tests de maillages différents (grossier, fin, très fin et extrêmement fin) ont été élaboré, l'utilisation des maillages grossier, fin et très fin cause un problème de divergence dans le calcul, nous avons donc choisi le maillage triangulaire extrêmement fin (figure III.2). Etant donné que le champ électrique varie dans l'espace à proximité de l'électrode de décharge, un raffinement du maillage est nécessaire à proximité des électrodes couronne [103].

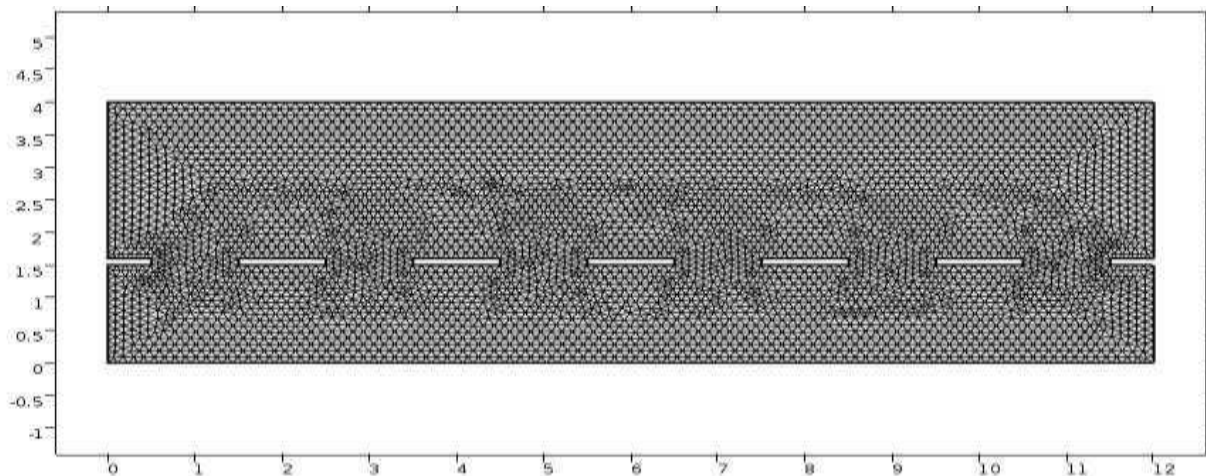


Figure III.2. Maillage extrêmement raffiné.

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. Distribution du potentiel électrique

La (figure III.3), représente la distribution en 2D du potentiel électrique à l'instant $t=0$. L'amplitude du potentiel électrique est indiquée par la barre d'échelle en couleur sur le côté droit. Le potentiel au niveau des électrodes est de +2000 V, +2000 V et -2000 V sur les électrodes U, V et W, respectivement.

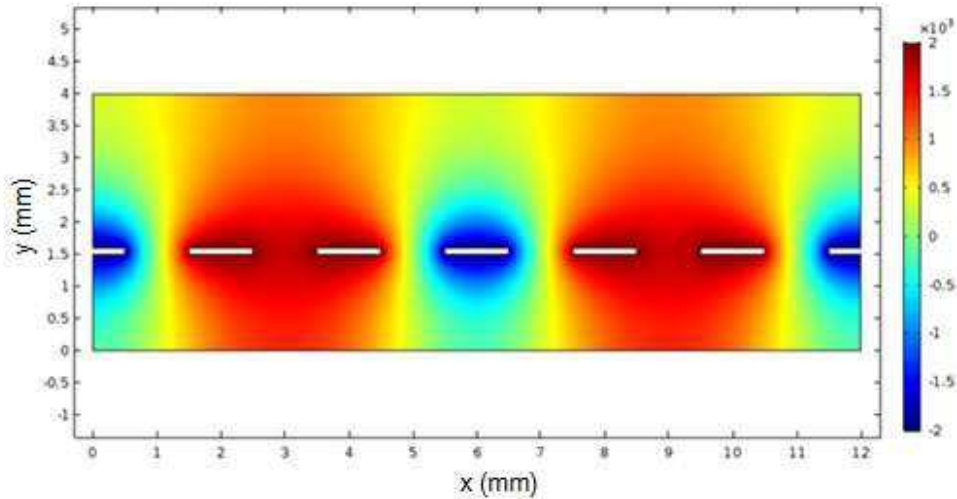
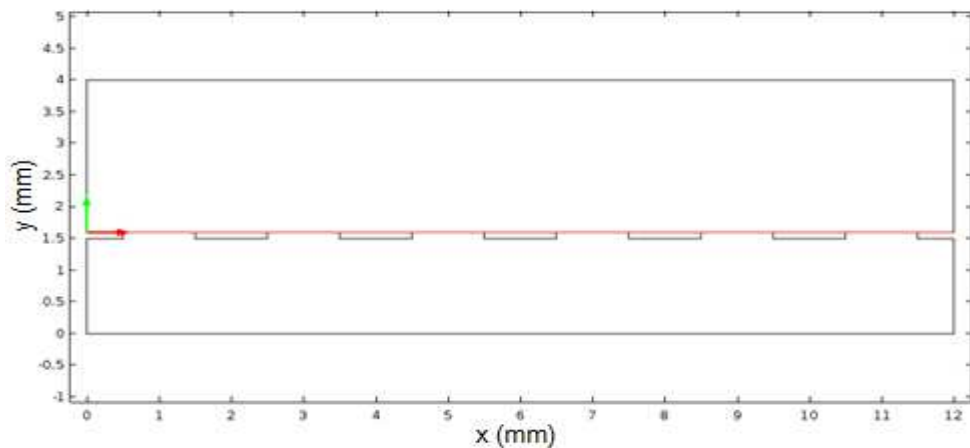
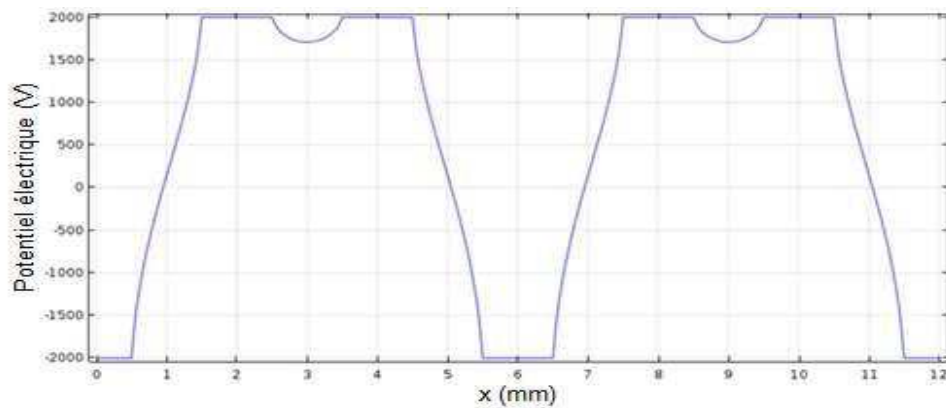


Figure III.3. Distribution du potentiel électrique à l'instant $t=0$, $V=2000$ V.

Si nous traçons les profils du potentiel électrique sur les sept électrodes suivant l'axe des abscisses $V(x)$, nous aurons le résultat montré sur la (figure III.4).



(a)



(b)

Figure III.4. Profil numérique du potentiel électrique suivant l'axe des $V(x)$ à l'instant $t=0$ s, $V=2000$ V.

D'après les résultats de la (figure III.4), on constate que la valeur du potentiel électrique est beaucoup plus élevée au niveau des électrodes et diminue en s'éloignant d'elles. Sa valeur au niveau de la première et la seconde électrode est de 2000 V et a une polarité opposée est de -2000 V pour la troisième électrode.

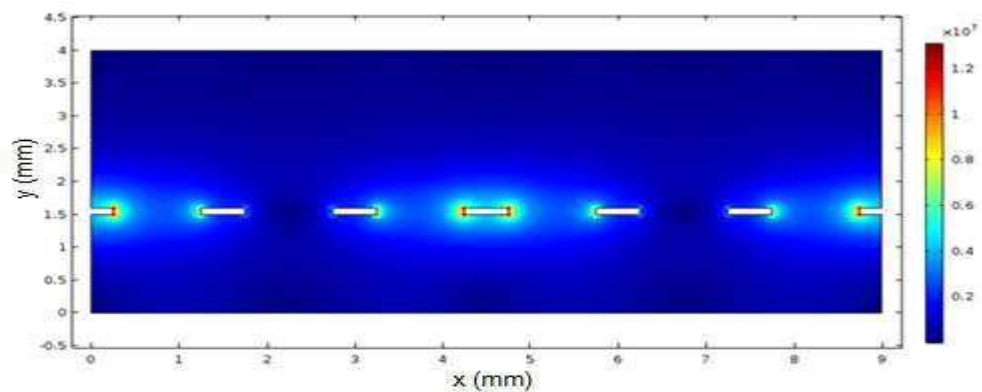
III.3.2. Distribution du champ électrique au niveau des électrodes

Dans cette partie, une étude comparative entre les profils du champ électrique pour les différentes configurations des COM, obtenus par simulation numérique est présentée.

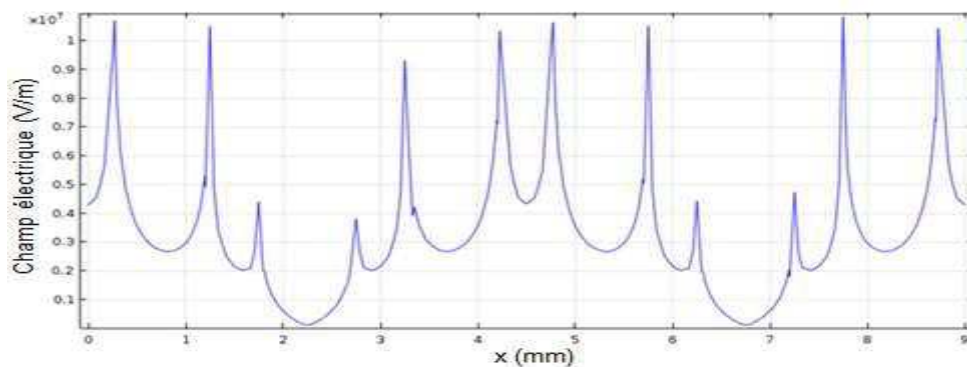
III.3.2.1. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 0.5 mm

Les figures (III.5, III.6, III.7) illustrent la distribution et le profil du champ électrique $E(x)$ pour $y = 1.6$ mm à l'instant $t = 0$ s pour une largeur d'électrode de 0.5 mm et des écartements inter-électrodes de 1 mm, 2 mm et 3 mm.

- **Ecartement inter-électrode 1mm**



(a)

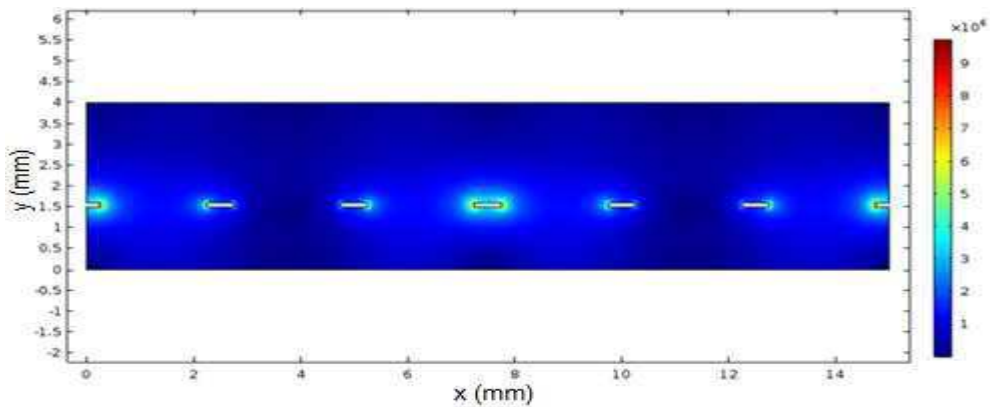


(b)

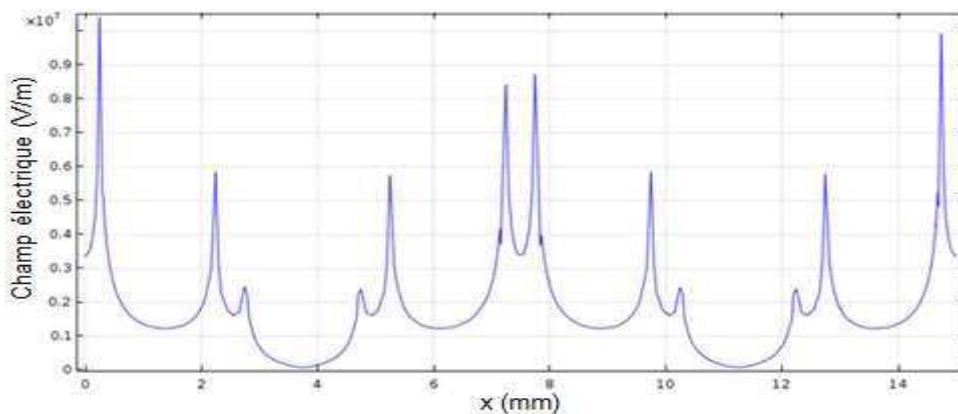
Figure III.5. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V = 2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t = 0$ s.

Les résultats obtenus tracés sur la (figure III.5), indiquent que le champ électrique est plus élevé au niveau des électrodes et il se diminue en s'éloignant d'elles. Sa valeur est très importante au niveau des extrémités des électrodes, qui atteint 1.2×10^7 V/m, cela est dû à l'intensité élevée de la décharge couronne aux régions pointues qui est le siège de la zone d'ionisation. Pour un écartement inter-électrodes de 1 mm, on constate que la distribution du champ électrique qui est de 0.28×10^7 V/m entre les électrodes est légèrement plus petite par rapport à la distribution au niveau de la surface d'électrode elle-même, qui est de 0.42×10^7 V/m.

- **Ecartement inter-électrode 2 mm**



(a)



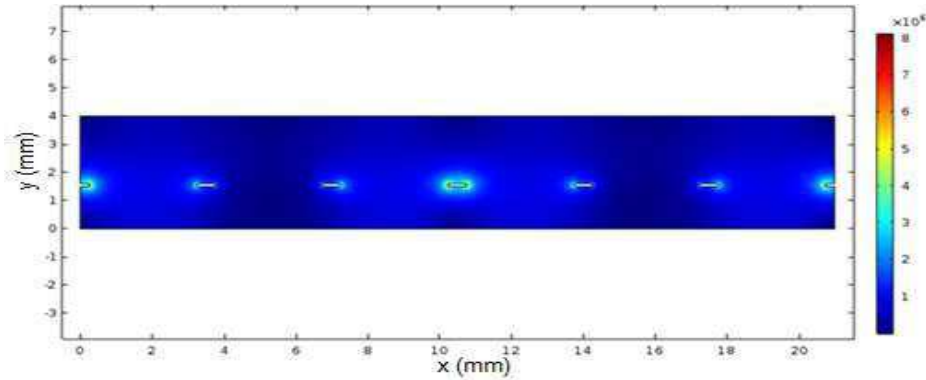
(b)

Figure III.6. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V= 2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t= 0$ s.

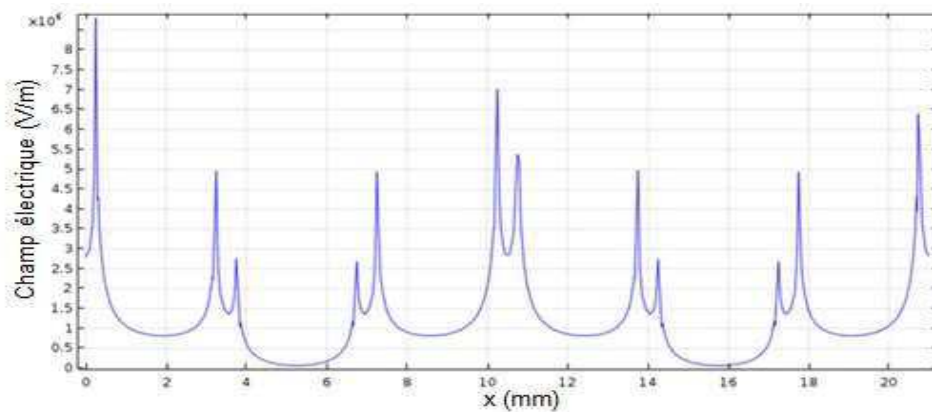
Pour cette configuration, on constate que la valeur du champ électrique entre les électrodes qui est de 0.12×10^7 V/m est moins élevée par rapport au niveau de la surface d'électrode elle-même, qui est de 0.35×10^7 V/m. Par ailleurs, les résultats montrent que le

champ électrique au niveau des extrémités des électrodes est beaucoup plus élevé par rapport à celui qui est au niveau de la surface et entre les électrodes, sa valeur atteint $1 \times 10^7 \text{ V/m}$ ce qui confirme le comportement des particules de cuivre (chapitre II) dans le cas de la position perpendiculaire aux électrodes où elle est bien attachée aux électrodes, étant donné la particule est en contact avec les extrémités des électrodes.

- **Ecartement inter-électrodes 3mm**



(a)



(b)

Figure III.7. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V= 2000\text{V}$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t= 0 \text{ s}$.

Pour cette configuration, on constate que le champ électrique est moins élevé par rapport à la configuration (0.5 mm, 2 mm). Le champ électrique au niveau des extrémités est de 8.10^6 V/m pour (0.5, 3 mm). D'après l'analyse des résultats, on remarque que le champ électrique au niveau de la surface d'électrode pour un écartement inter électrode de 3 mm est moins élevé par rapport à un écartement inter électrode de 1 mm et 2 mm, le champ électrique est de

0.42×10^7 V/m et 0.35×10^7 V/m pour un écartement inter électrode de 1 mm 2 mm respectivement et seulement de 2.9×10^6 V/m pour 3 mm.

Par ailleurs, le champ électrique entre les électrodes est de 0.28×10^7 V/m et 0.12×10^7 V/m pour un écartement de 1 mm et 2 mm respectivement et seulement de 0.8×10^6 V/m pour 3 mm.

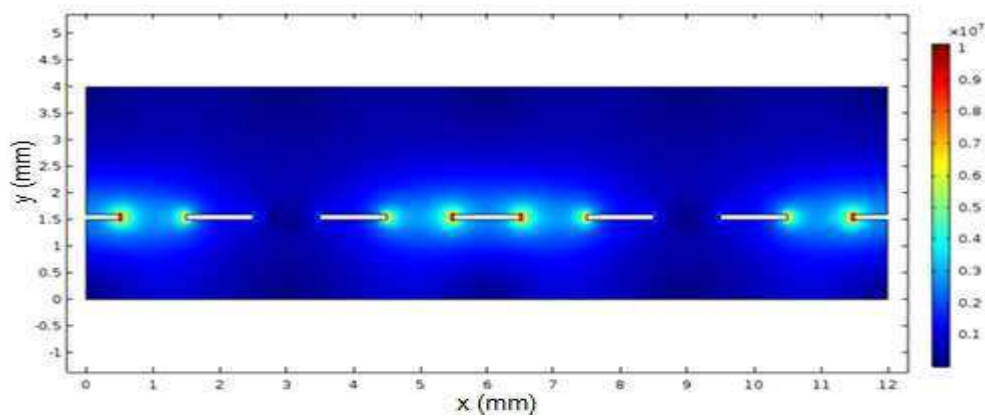
Les résultats numériques précédents montrent que l'écartement inter-électrodes a un effet très important sur la distribution du champ électrique sur tout le niveau du COM d'ailleurs l'écartement affecte la distribution du champ électrique au niveau des extrémités, entre les électrodes et même au niveau de la surface d'électrode, et par conséquent sur l'intensité de la force d'attraction qui a une relation directement proportionnelle avec le champ.

Sur la base de ces résultats, on peut comprendre l'attachement fort des particules de cuivre sur la surface du COM (chapitre II), pour le petit écartement inter-électrodes étant donné la force d'attraction augmente avec la diminution d'écartement inter –électrode.

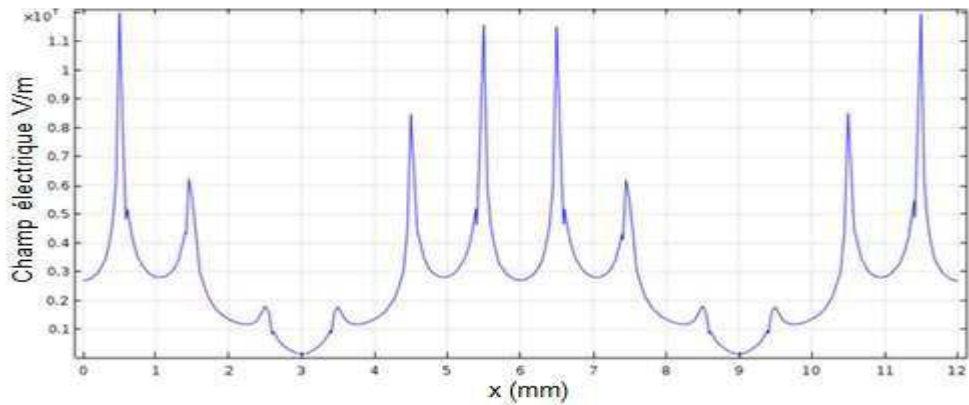
III.3.2.2. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 1 mm

Les figures (III.8, III.9, III.10), illustrent la distribution et le profil du champ électrique E (x) pour $y = 0.2$ mm à l'instant $t = 0$ s pour une largeur d'électrode de 1 mm et des écartements inter-électrodes de 1 mm, 2 mm et 3 mm.

- **Ecartement inter-électrodes 1 mm**



(a)



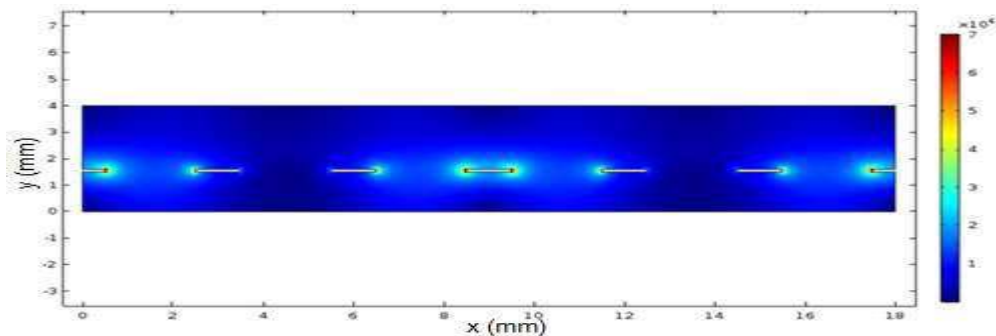
(b)

La figure III.8. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V=2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t=0s$.

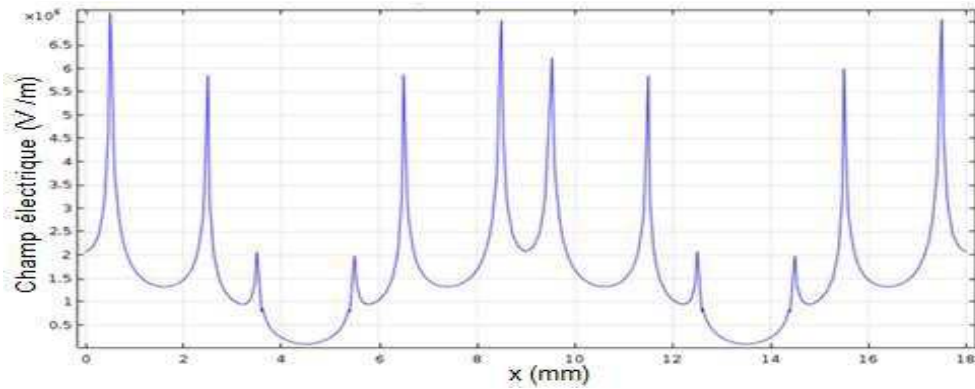
Le résultat obtenu sur la (figure III.8), montre que le champ électrique est plus élevé au niveau des électrodes et se diminue en s'éloignant d'elles. Sa valeur est très importante au niveau des extrémités des électrodes. Elle atteint 1×10^7 V/m, cela est dû à l'intensité élevée de la décharge couronne aux régions pointues qui sont le siège de la zone d'ionisation. Par ailleurs, on constate que l'intensité du champ électrique au niveau de la surface est de 0.28×10^7 V/m et de 0.29×10^7 V/m entre les électrodes.

Les résultats montrent que les valeurs entre les électrodes et au niveau de la surface elle-même sont rapprochés sauf que le champ entre les électrodes est légèrement plus grand par rapport au champ, au niveau de la surface d'électrode. Ce qui explique la raison, du fort attachement des particules dans le cas de la position perpendiculaire par rapport à la position parallèle et au niveau de la surface d'électrode. De sorte que, la tension d'attachement nécessaire pour l'attraction des particules sur la surface du COM est moins élevée pour la position perpendiculaire. Par ailleurs, la tension d'attachement pour la position parallèle et sur la surface d'électrode est rapprochée.

- **Ecartement inter-électrodes 2mm**



(a)

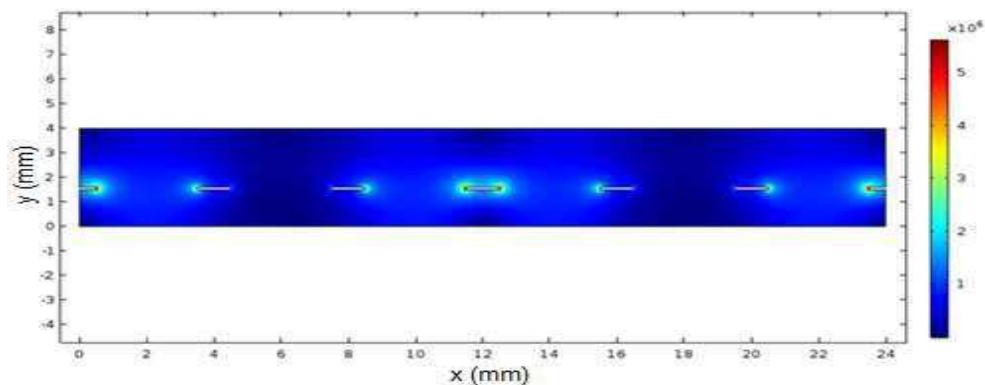


(b)

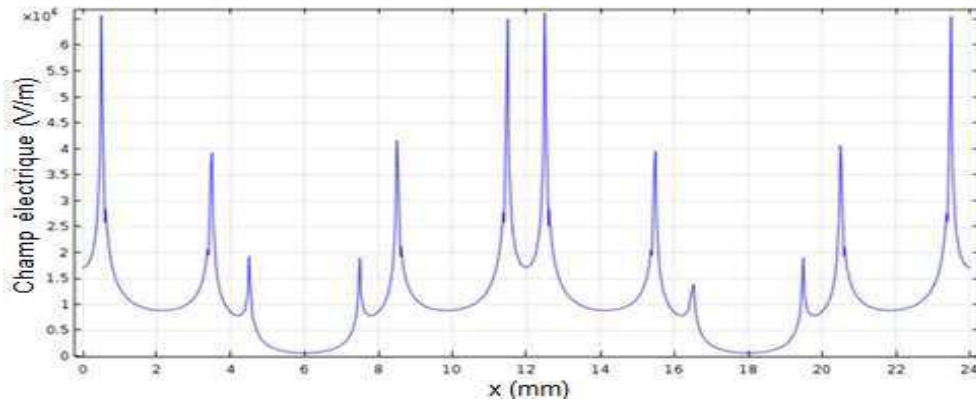
Figure III.9. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V=2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t=0s$.

Pour cette configuration, on constate que le champ électrique au niveau des extrémités des électrodes est moins élevé par rapport à la configuration de (1mm, 1mm). Il atteint 7×10^6 V/m. D'après l'analyse des résultats on remarque que le champ électrique au niveau de la surface d'électrode pour un écartement inter électrode de 1mm, est plus élevé que celui de 2mm. Le champ électrique est de 0.28×10^7 V/m et 2×10^6 V/m pour un 1 mm 2 mm respectivement. Par ailleurs, le champ électrique entre les électrodes est de 0.29×10^7 et 1.3×10^6 pour un écartement de 1mm et 2 mm respectivement. En revanche les résultats montrent, que le champ électrique au niveau des extrémités des électrodes est plus élevé, par rapport au niveau de la surface et entre les électrodes. Ce qui confirme le comportement des particules de cuivre (chapitre II) dans le cas de la position perpendiculaire aux électrodes où elles sont bien attachées aux électrodes.

- **Ecartement inter-électrodes 3mm**



(a)



(b)

Figure III.10. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V=2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t=0s$.

Pour un écartement inter-électrode de 3mm les résultats illustrés sur la (figure III.10) montrent que le champ électrique au niveau des extrémités des électrodes diminue significativement par rapport à un écartement inter-électrodes de (1mm) et (2 mm). Il atteint la valeur de 5.5×10^6 V/m.

D'après l'analyse des résultats, on remarque que le champ électrique sur la surface d'électrode pour un écartement inter électrode de 3mm est moins élevé par rapport aux écartements de 2 mm et 1 mm. Le champ électrique est de 0.28×10^7 V/m et 2×10^6 V/m pour un 1 mm 2 mm respectivement et seulement de 1.7×10^6 V/m pour 3 mm. Par contre, le champ électrique entre les électrodes est de 0.29×10^7 V/m et 1.3×10^6 V/m pour un écartement de 1mm et 2 mm respectivement et seulement de 0.9×10^6 V/m pour 3 mm.

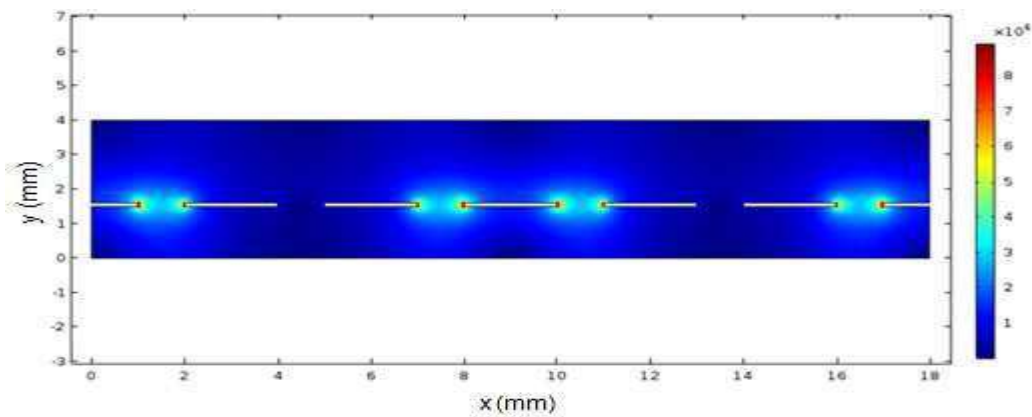
Donc, les résultats numériques précédents, montrent que la largeur d'électrodes a un effet très important sur l'intensité du champ électrique. Le champ électrique est plus intense sur toutes les régions, pour une largeur d'électrode plus petite pour tous les écartements inter électrodes. Sur la base de ces résultats, on peut comprendre l'attachement fort des particules de cuivre sur la surface du COM (chapitre II) pour les petites largeurs d'électrodes étant donné que la force d'attraction augmente avec la diminution des largeurs d'électrodes. En revanche sur la base de ces résultats, on peut bien expliquer le comportement des particules en acier inoxydable en forme carrés au niveau de la surface du COM, de sorte que les particules ont des sections inférieures à 4 mm^2 . Leur tension d'attachement sur la surface du COM diminue en fonction des dimensions des pièces, jusqu'à une section de 4 mm^2 . La tension d'attachement des particules diminue, car la force d'attraction produite par le

convoyeur augmente avec la surface de contact des pièces avec les électrodes qui devient plus grande en augmentant de $a=1 \text{ mm}^2$ à $a=4 \text{ mm}^2$.

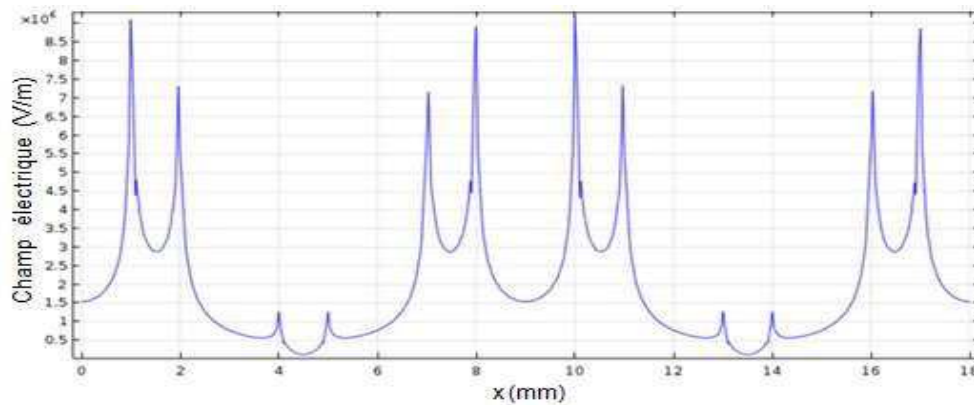
III.3.2.3. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 2mm

Les figures (III.11, III.12, III.13), illustrent la distribution et le profil du champ électrique $E(x)$ pour $y = 0.2 \text{ mm}$ à l'instant $t = 0 \text{ s}$ pour une largeur d'électrode de 2 mm et des écartements inter-électrodes de 1 mm, 2 mm et 3 mm.

- **Ecartement inter-électrode 1mm**



(a)



(b)

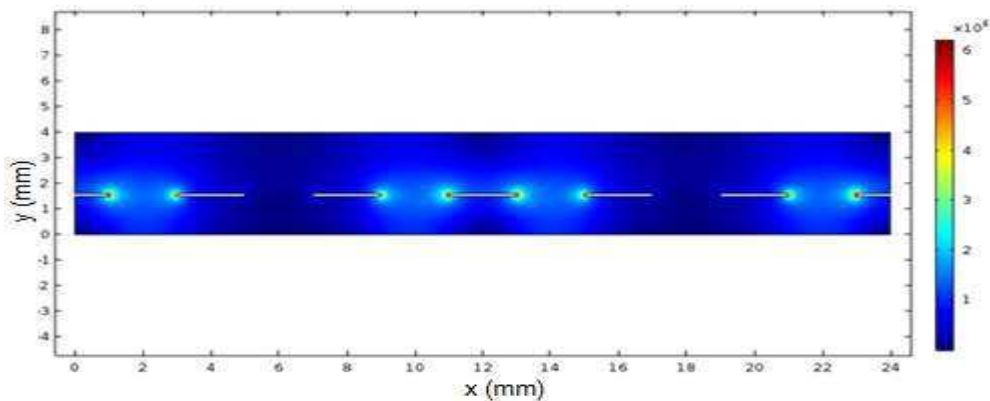
Figure III.11. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V=2000\text{V}$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t=0 \text{ s}$.

Pour un écartement inter-électrodes de 1mm, les résultats sont illustrés sur la (figure III.11), la valeur du champ électrique est très importante au niveau des extrémités des électrodes est de $(8.5 \times 10^6 \text{ V/m})$, cela est dû à l'intensité élevée de la décharge couronne aux

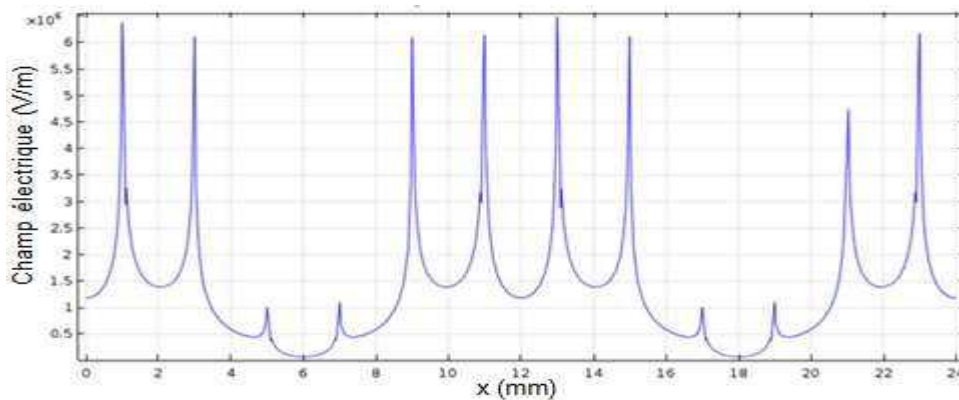
régions pointues qui sont le siège de la zone d'ionisation. On remarque, que le champ électrique est beaucoup plus élevé entre les électrodes est de 0.29×10^7 V/m que sur la surface d'électrodes elle-même, qui est de 0.15×10^7 V/m.

Ce résultat peut être exprimé par le fait, que la distance entre les pointes de l'électrode est plus grande par rapport à la distance entre les électrodes, de sorte que la distance entre les deux pointes est de 2 mm et entre les électrodes est de 1 mm. La distribution du champ électrique sur l'électrode est plus faible par rapport entre les électrodes. En se basant sur la relation $E=U/d$ donc le champ est plus intense pour les petites distances.

- **Ecartement inter-électrodes 2mm**



(a)



(b)

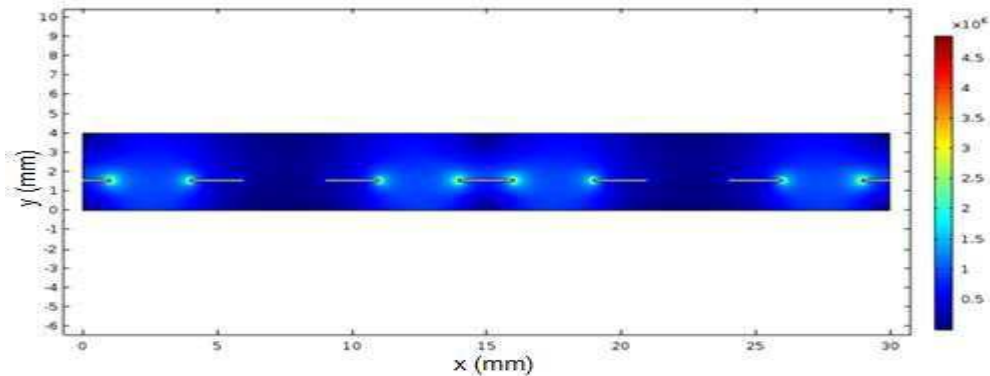
Figure III.12. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V= 2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t= 0 s$.

Pour cette configuration, on constate que le champ électrique au niveau des électrodes 1.3×10^6 V/m est moins élevé par rapport au champ entre les électrodes qui est de 1.4×10^6

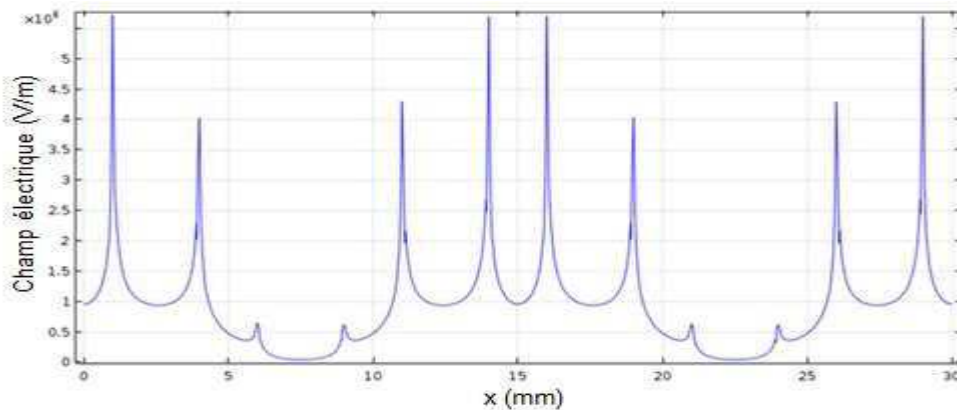
V/m. D'après l'analyse des résultats on remarque que le champ électrique au niveau des extrémités des électrodes est de 6.2×10^6 V/m.

Observant l'effet de l'écartement inter électrodes, on remarque que le champ électrique est plus élevé pour un écartement de 1 mm que pour un écartement de 2 mm.

- **Ecartement inter-électrodes 3mm**



(a)



(b)

Figure III.13. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V=2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t=0$ s.

La (figure III.13) représente la distribution du champ électrique pour une configuration de $l=2$ mm et $d=3$ mm. On constate que, le champ électrique au niveau des extrémités est plus élevé par rapport au niveau d'électrode et entre les électrodes. Sa valeur est de 4.8×10^6 V/m au niveau des extrémités, et de 1×10^6 V/m et 1×10^6 V/m au niveau d'électrode et entre les électrodes respectivement. Par ailleurs, l'intensité du champ électrique pour un écartement de 3mm, est moins élevée par rapport aux écartements de 2 mm et 1mm.

III.3.2.4. Distribution du champ électrique pour une largeur d'électrode de 5 mm

La (figure III.14), illustrent la distribution et le profil du champ électrique $E(x)$ pour $y = 0.2$ mm à l'instant $t = 0$ s pour une largeur d'électrode de 5 mm et des écartements inter-électrodes de 1 mm.

- **Ecartement inter-électrode 1 mm**

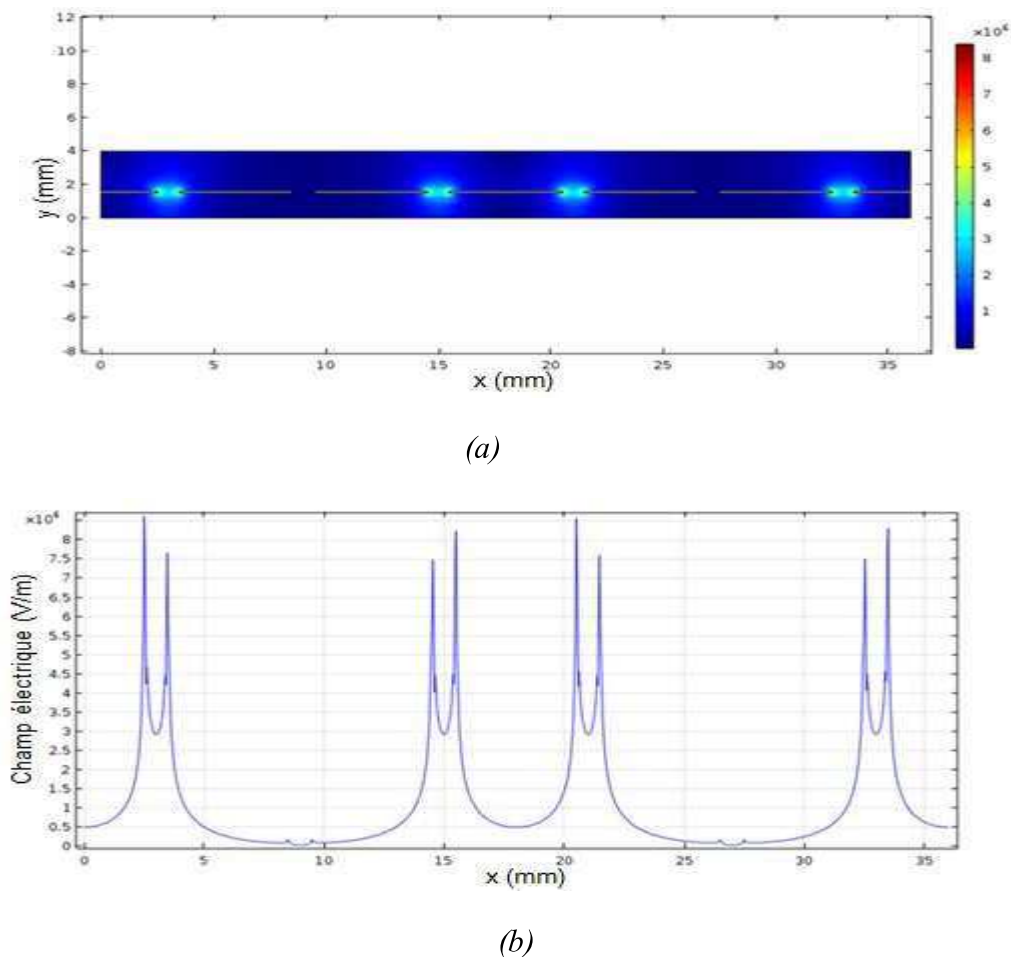


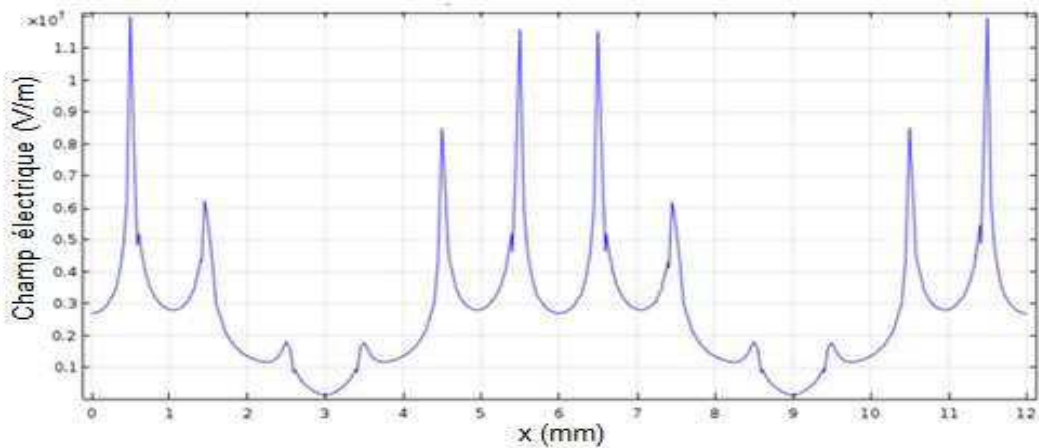
Figure III.14. a) Distribution 2-D du champ électrique, $V= 2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t= 0$ s.

D'après les résultats de la (figure III.14), on constate d'un côté, que la valeur du champ électrique atteint sa maximale au niveau des extrémités des électrodes de sorte que le profil de la distribution du champ indique que sa valeur est de 8.2×10^6 V/m. aussi, le champ électrique entre les électrodes est significativement élevé par rapport au niveau de la surface d'électrode elle-même. Les valeurs du champ électrique sont 2.9×10^6 V/m et 0.5×10^6 V/m entre les électrodes et au niveau d'électrode elle-même respectivement.

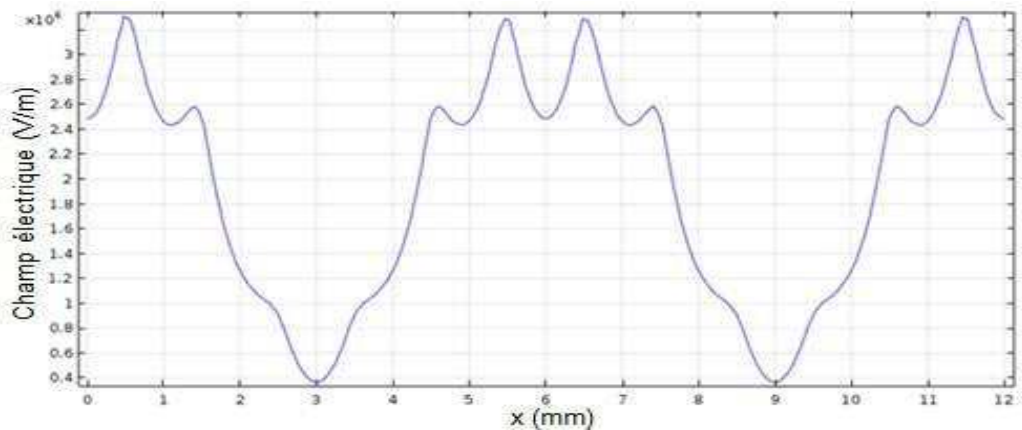
Par ailleurs, l'effet de la largeur électrode sur la distribution du champ électrique est clair. Le champ électrique pour une largeur d'électrode de 5mm au niveau de la surface d'électrode est de 0.5×10^6 V/m et de 0.42×10^7 V/m, 0.28×10^7 V/m, 0.15×10^7 V/m, entre les électrode est de 0.28×10^7 V/m, 0.29×10^7 V/m, 0.29×10^6 V/m, 0.29×10^6 V/m, au niveau des extrémités d'électrodes est de 1.2×10^7 V/m, 1×10^7 , 0.9×10^7 V/m, 8.2×10^6 V/m pour des largeurs d'électrodes de 0.5mm, 1mm, 2 mm et 5 mm respectivement pour un écartement inter électrode de 1mm.

III.3.3. Champ électrique pour différentes hauteurs au-dessus de la surface des électrodes

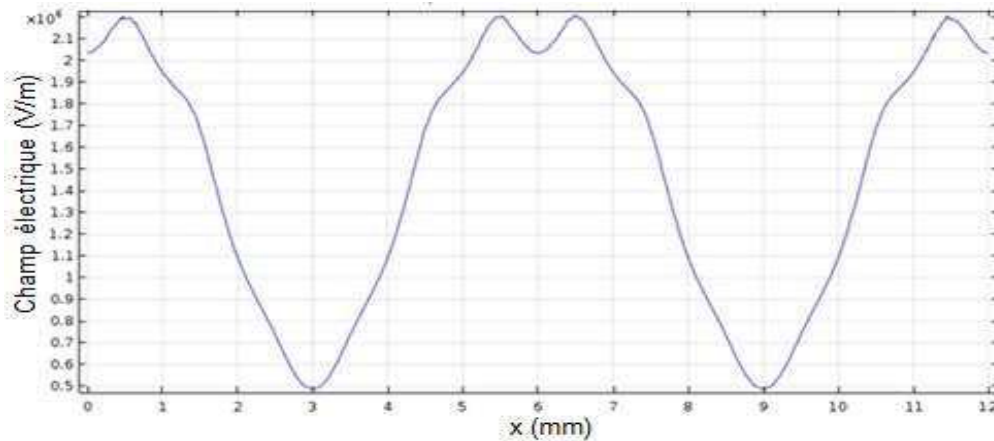
L'objectif de cette partie, est d'analyser l'intensité du champ électrique pour des différentes valeurs d hauteurs pour une configuration de (1mm, 1mm).



(a)



(b)



(c)

Figure III.15. Distribution 2-D du champ électrique, $V = 2000V$, b) le profil numérique du champ électrique suivant l'axe des abscisses $E(x)$ à l'instant $t = 0$ s. (a) $y = 1.6$ mm, (b) $y = 1.8$ mm, (c) $y = 2$ mm.

D'après les résultats tracés sur la (figure III.15), on constate que le champ électrique atteint toujours sa valeur maximale au niveau des extrémités des électrodes. Par ailleurs, les résultats numériques montrent que le champ électrique est beaucoup plus élevé au niveau des électrodes et diminue significativement en s'éloignant d'elles suivant l'axe des Y.

III.4. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons étudié la distribution du champ électrique numériquement, dans le but de comprendre le comportement hydrodynamique des particules métalliques. Nous avons étudié l'influence de deux paramètres sur la distribution du champ électrique qui sont la largeur de l'électrode et l'écartement inter électrodes. Les résultats obtenus ont montré que :

- ✓ Le champ électrique est beaucoup plus élevé au niveau des extrémités du COM pour toutes les largeurs et les écartements- inter électrodes.
- ✓ Le champ électrique est plus élevé entre les électrodes que sur le niveau de l'électrode elle-même.
- ✓ Le champ électrique est plus élevé pour les petites largeurs d'électrodes.
- ✓ Le champ électrique est plus élevé pour un petit écartement inter électrodes.
- ✓ L'amplitude du champ électrique peut être contrôlée en modifiant la largeur des électrodes ou l'écartement entre elles.

- ✓ L'intensité du champ électrique est beaucoup plus élevée au niveau des électrodes et diminue en s'éloignant d'elles.

Dans le chapitre suivant une étude expérimentale sur les particules métalliques et de plastiques en utilisant un COM vibrant sera réalisée.

IV.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la faisabilité de la séparation électrostatique d'un mélange (métal /plastique) utilisant la technique des ondes mobiles. Une étude expérimentale est réalisée sur un convoyeur à ondes mobiles (COM), fixé sur un vibreur électromagnétique.

Ce chapitre comprend deux parties ; la première partie, quand le convoyeur est statique, en se basant sur le déplacement des particules diélectriques et l'effet de la charge initiale sur leur comportement. Dans la deuxième partie, quand le convoyeur est vibrant, en se basant sur le comportement des particules métalliques qui restent attachées sur la surface du convoyeur, en étudiant les différents paramètres qui influent sur leur comportement.

La caractéristique du dispositif est caractérisée par le déplacement forcé des particules de plastique à cause des vibrations, tandis que les particules de métal sont fixées sur la surface du COM, en présence de la force d'attraction qui leur est appliquée.

IV.2. Montage expérimental et protocole de mesure

Le COM triphasé a été mis au point, à l'aide d'une carte électronique de ($300 \times 150 \text{ mm}^2$), sur laquelle des électrodes parallèles en cuivre de 1 mm de largeur et 150 mm de longueur séparés par un intervalle égal à 2 mm (figure IV.1). Un film d'adhésif isolant recouvre le convoyeur, pour minimiser le risque d'étincelles entre les électrodes.

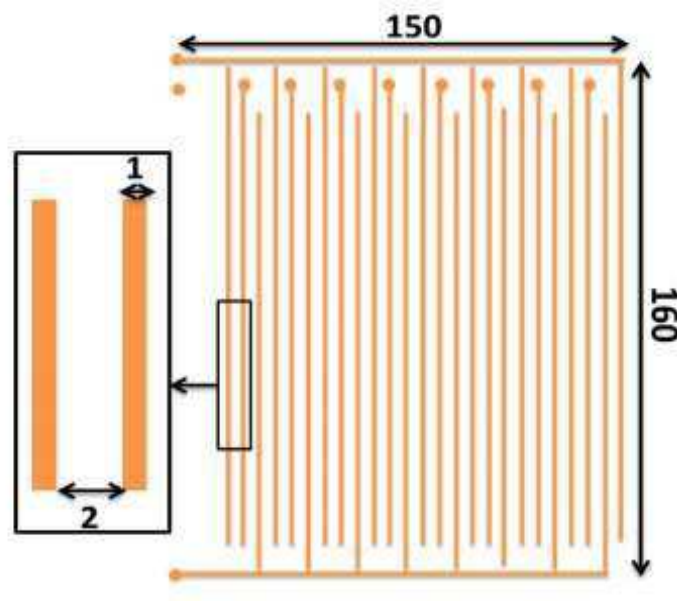
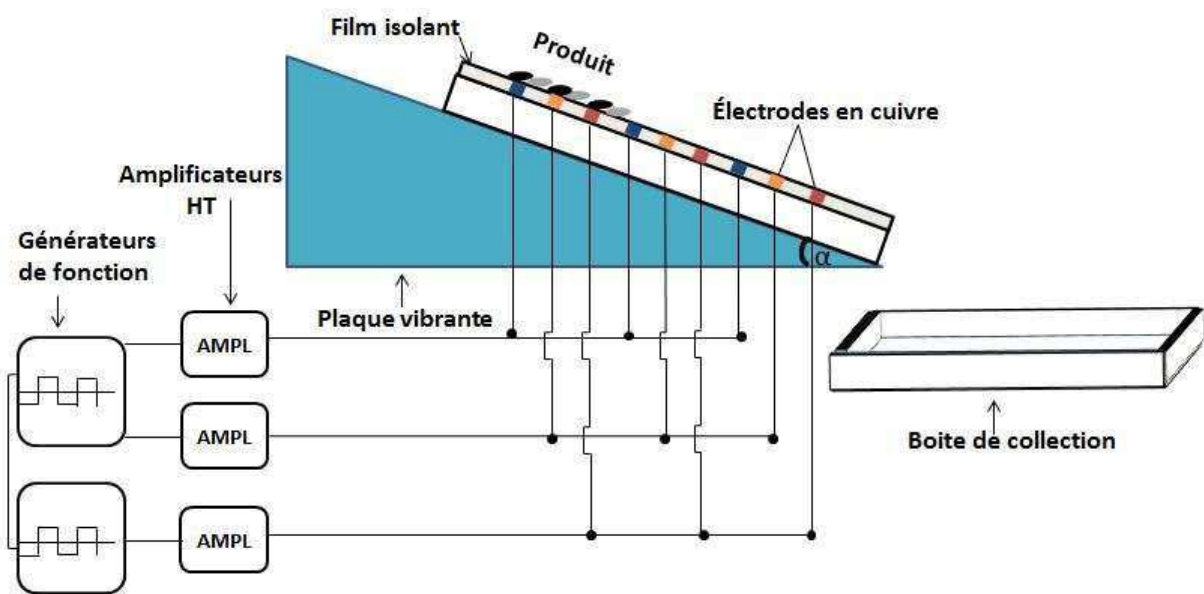


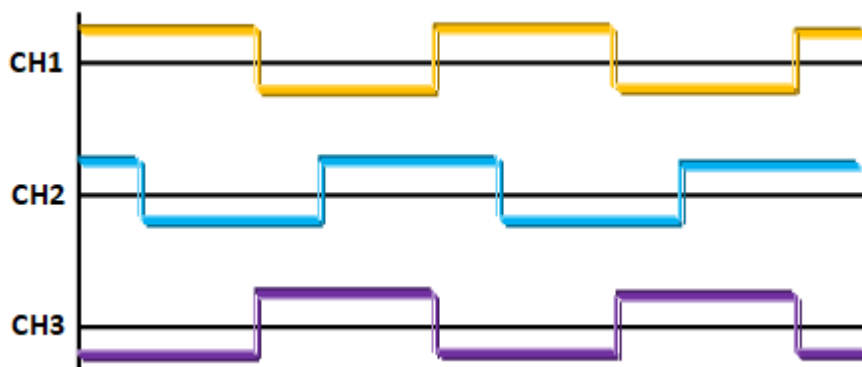
Figure IV.1. Description schématique du COM triphasé.

Le COM est fixé sur une plaque vibrante électromagnétique avec un angle d'inclinaison de 25° (figure IV.2). Chaque phase est alimentée par un amplificateur de tension (modèle Trek 2220, 2 kV, 20 mA).

Deux générateurs de fonctions synchronisées (SDG Siglent 5122) contrôlent les amplificateurs sont utilisés pour faire varier le déphasage, la fréquence et le niveau de tension appliqués à chaque électrode. Les signaux carrés de tension en courant alternatif appliqués aux électrodes du COM ont été visualisés à l'aide d'un oscilloscope numérique à mémoire (Gwinstek GDS-3154).



a) Description schématique du COM vibrant



b) Formes du signal appliqué aux électrodes (Déphasage de 120°)

Figure IV.2. Convoyeur triphasé vibrant

IV.3. Protocole expérimental

IV.3.1 Échantillons de particules

Des échantillons de particules de plastique et de cuivre avec des tailles moyennes granulométriques comprises entre 0,35 mm et 2 mm provenant des déchets des câbles électriques. Les échantillons préparés à l'aide d'un tamis vibrant ont été utilisés pour toutes les expériences dans cette étude (figure IV.3).



Figure IV.3. Photographie du tamiseur à vibrations FRITSCH

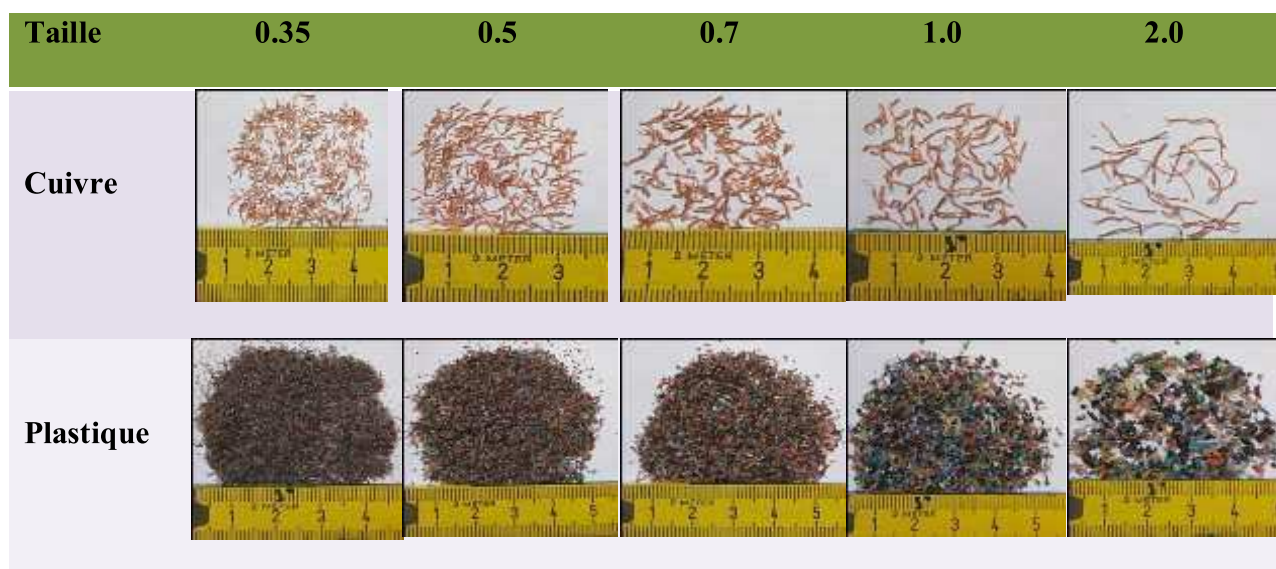


Figure IV.4. Échantillons de cuivre et de plastique utilisés

Le produit granulaire est déposé sur la surface du convoyeur. On met en marche les amplificateurs HT, puis l'alimentation du vibreur. Les particules de plastique qui ont été forcées de se déplacer à cause des vibrations ont été récupérées dans le collecteur placé juste au-dessous du COM vibrant, tandis que les particules de métal sont restées attachées à la surface du convoyeur, en raison de la force d'attraction qui leur est appliquée.

Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions de température ambiante stable ($T = 28\text{ }^{\circ}\text{C} - 32\text{ }^{\circ}\text{C}$) et d'humidité (33 %-37 %). De plus, chaque expérience a été répétée deux fois et la valeur moyenne a été utilisée pour le tracé.

Deux séries d'expériences ont été réalisées :

II.3.2. COM statique (avec le vibreur désactivé)

Les particules de plastique de la taille de μm se sont déplacées en raison de la force diélectrophorétique, alors que les particules métalliques micronisées sont restées immobiles sur la surface du COM.

II.3.2.1. Échantillon de particules plastiques de mono-produit

Un échantillon de particules de plastique de 1 g a été déposé, d'une façon monocouche sur une portion rectangulaire du convoyeur. À la fin de chaque expérience, la masse des particules récupérées a été mesurée à l'aide d'une balance électronique de précision de 1 mg équilibre (Kern ALG 220-4NM), (figure IV.5).



Figure IV.5. Balance Kern ALG 220-4NM.

IV.3.2.2. Échantillon de produit binaire de particules de plastique/métal

Un échantillon de particules de plastique de 2 g et de métal égal de 2 g, a été déposé en monocouche sur une portion rectangulaire, en amont du convoyeur. L'efficacité de la séparation a été estimée à l'aide de formules suivantes:

La pureté et les taux de récupération des produits séparés ont été calculés comme suit :

$$R_P = \left(\frac{M_d}{M_{Ptot}} \right) * 100 \quad (IV-1)$$

$$P_P = \left(\frac{M_d}{M_{col}} \right) * 100 \quad (IV-2)$$

Où

M_d : la masse récupérée des particules de plastique dans le collecteur.

M_{Ptot} : la masse totale des particules plastiques déposées sur le COM.

M_{col} : la masse totale des particules de plastique et de cuivre récupérées dans le collecteur.

Les taux de récupération et de pureté des particules de cuivre, respectivement R_{Cu} et P_{Cu} , ont été calculés comme suit:

$$R_{Cu} = \left(\frac{M_{Cu}}{M_{Cutot}} \right) * 100 \quad (IV-3)$$

$$P_{Cu} = \left(\frac{M_{Cu}}{M_{COM}} \right) * 100 \quad (IV-4)$$

Où:

M_{Cu} : masse de particules de cuivre restant sur le COM.

M_{Cutot} : masse totale des particules de cuivre déposées sur le COM.

M_{COM} : la masse totale des particules de cuivre et de plastique restant sur le COM.

IV.3.3. Convoyeur à ondes mobiles vibrant

Les particules de plastique de tailles millimétriques, se déplacent en raison des vibrations mécaniques. Tandis que, les particules métalliques de tailles millimétriques restent attachées

sur la surface du COM malgré la force des vibrations. Cet attachement est dû à la force d'attraction appliquée sur elles.

IV.3.3.1. Échantillon de particules métalliques de mono-produit

Un échantillon de particules métalliques de 1 g a été déposé, sur une portion rectangulaire définie en amont du convoyeur.

À la fin de chaque expérience, la masse des particules restant sur la surface du convoyeur a été mesurée.

IV.3.3.2. Échantillon de produit binaire de particules de plastique/métal

L'échantillon de mélange de particules de masse égal à 2 g (50 % de plastique et 50% de métal), a été déposé en monocouche sur une portion rectangulaire définie en amont du convoyeur. Après chaque expérience de séparation, les particules de plastique ont été récupérées à l'intérieur du collecteur placé sous le COM vibrant. Les taux de récupération et de pureté de la séparation, ont été calculés [104].

IV.3.4. Processus de chargement par la décharge couronne

Le chargement des particules de plastique par la décharge couronne a été effectué, pour analyser l'effet de la charge électrique des particules sur leur mouvement et l'efficacité de la séparation du mélange. Le dispositif expérimental utilisé pour le chargement des particules est illustré sur la (figure IV.6).

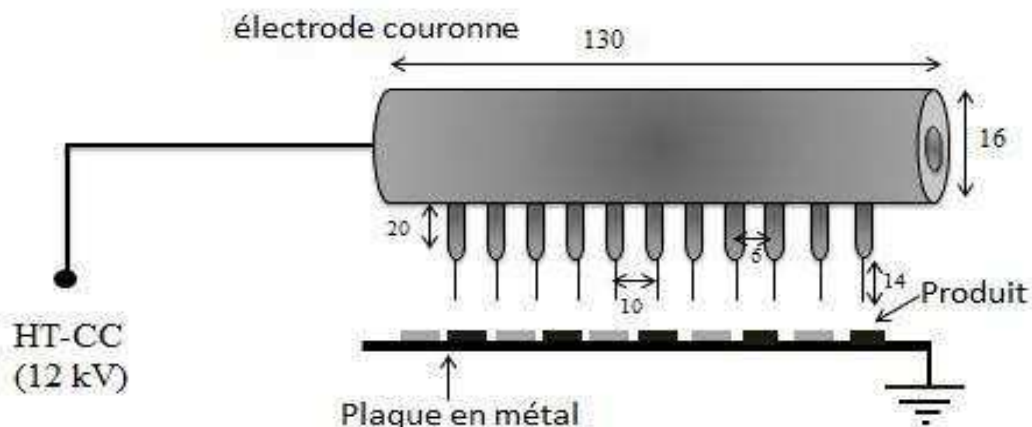


Figure IV.6. Représentation schématique du dispositif expérimental du chargement corona

C'est une électrode cylindrique, composée de 11 pointses, connectée à une alimentation électrique à haute tension (Spellman, 40 kV, 9 mA) avec un courant continu. La charge à effet

corona a été réalisée avec des valeurs constantes d'une tension appliquée de 12 kV et un courant de 90 μA .

Après avoir étudié l'effet de la distance inter électrodes sur le chargement des particules, les extrémités de la pointe ont été placées à une distance de 15 mm au-dessus d'une plaque métallique mise à la terre sur laquelle les particules ont été déposées. Une cage de Faraday reliée à un électromètre sensible (Keithley 6514) a été utilisée pour mesurer la charge électrique des particules après le chargement avec la décharge couronne.

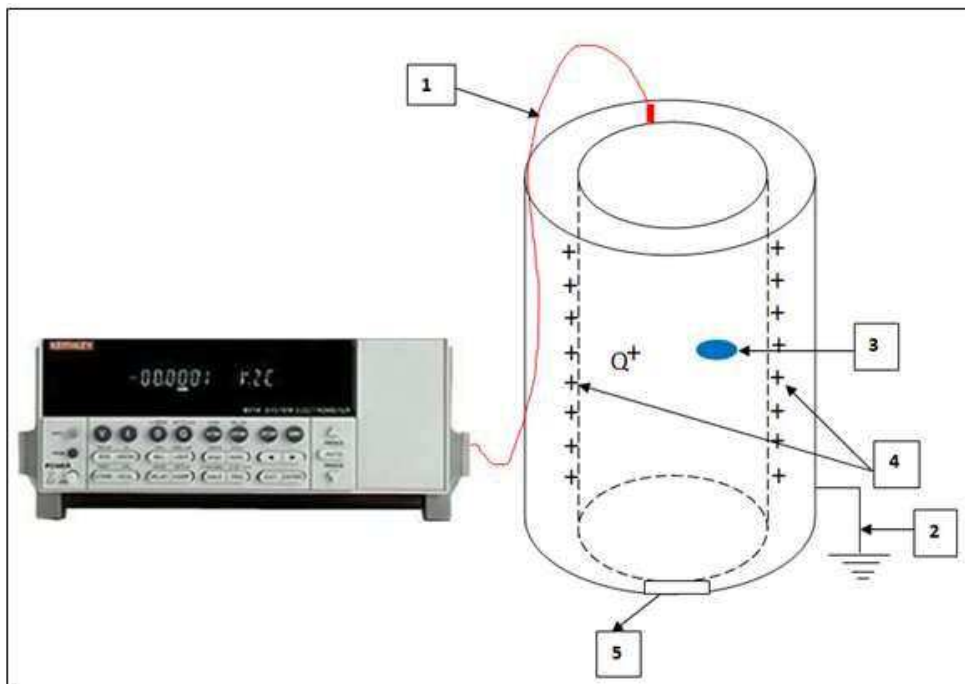


Figure IV.7. Système de mesure de charge par la Cage de Faraday (1) cylindre intérieur ; (2) cylindre extérieur ; (3) une particule chargée positivement ; (4) répartition de la charge sur la surface extérieure ; (5) isolant

La cage de Faraday est l'un des dispositifs les plus courants utilisés, pour mesurer la charge des particules. Elle est constituée de deux cylindres conducteurs concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre, non seulement pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées, mais aussi pour réduire toutes perturbations électriques extérieures (figure IV.7).

Le produit dont on doit mesurer la charge est introduit dans le cylindre intérieur. Ce dernier est isolé de la terre et connecté à **un électromètre**, dont le rôle est de mesurer la charge électrique qui s'y répartit sur la surface extérieure par répulsion électrostatique (les charges de même signe se repoussent le plus loin possible sur la surface). Les résultats sont exprimés en termes de charge massique des échantillons (nC/g).

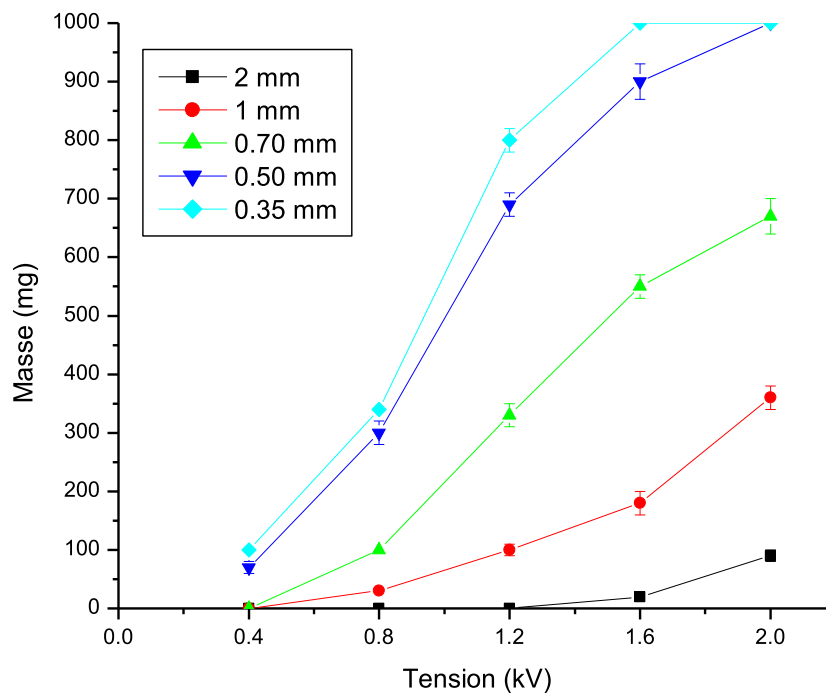
L'*électromètre* est un instrument adapté pour mesurer les différents niveaux d'électricité que le corps peut avoir, mais quelle que soit la force de l'électricité, il peut être jugé par l'impression d'étincelles [98].

IV.4. Résultats et discussion

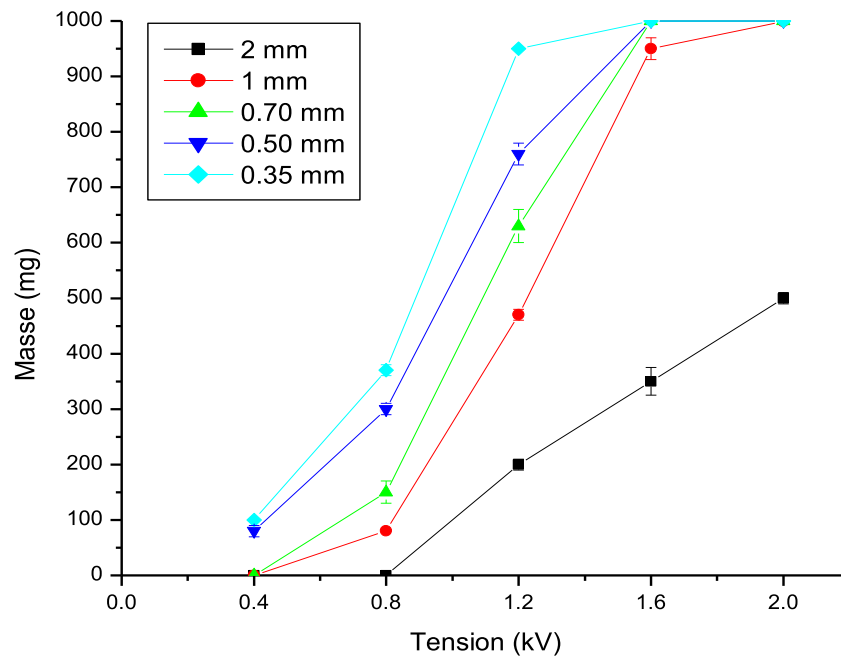
IV.4.1. Convoyeur statique

IV.4.1.1. Mono produit

Dans cette partie, l'effet de la tension sur l'efficacité du déplacement des particules de plastique est étudié, pour différentes tailles entre 0.35 mm et 2 mm, de plus l'effet de la charge initiale des particules sur l'efficacité du déplacement est étudié en fonction de la tension appliquée.



(a)



(b)

Figure IV.8. Variation de la masse de plastique déplacée sur le COM statique en fonction de la tension appliquée ($f = 30$ Hz)

a) Sans chargement corona des particules; b) Avec chargement corona des particules.

La (figure IV.8) illustre les résultats représentant la variation de la masse des particules de plastique récupérées dans le collecteur du COM statique en fonction de la tension appliquée, avec et sans chargement corona à une fréquence de 30 Hz.

La masse déplacée augmente avec la tension appliquée, en raison de la force diélectrophorétique qui dépend du champ électrique.

La (figure IV.8a) montre que sans chargement corona, presque toute la masse des particules de taille (0,35-0,5) mm a été déplacée pour une tension de 2 kV. Par ailleurs, la masse déplacée a considérablement diminué pour les particules de taille (0.7 -2) mm et presque nulle pour les particules de taille de 2 mm.

En outre, la (figure IV.8b) montre que la charge corona des particules a entraîné une amélioration significative de l'efficacité du déplacement pour une tension de 2 kV. Toutes les particules ont été totalement déplacées après le chargement corona, sauf pour les granulés de 2 mm, la force de gravité est plus élevée que la force électrique [104].

IV.4.1.2. Effet de la charge initiale sur le déplacement des particules de plastique

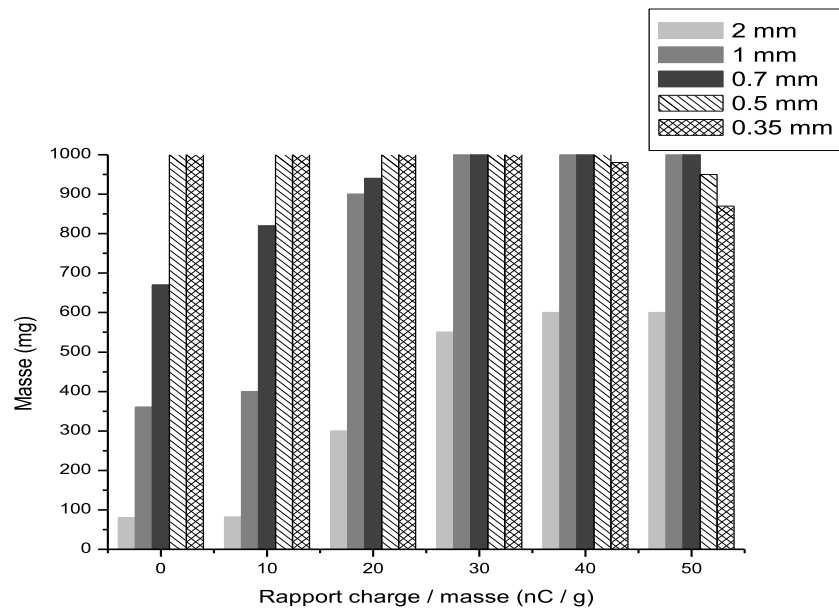


Figure IV.9. Variation de la masse déplacée de particules de plastique sur le COM statique en fonction de la charge pour différentes tailles de particules ($V = 2 \text{ kV}$)

La (figure IV.9) représente la variation de la masse de particules de plastiques en mouvement sur le COM statique, en fonction de la charge corona, pour différentes tailles de particules (tension de 2 kV). L'effet de la charge est particulièrement important pour les particules de taille millimétriques.

Le déplacement des granules de 2 mm est inférieur à 100 mg, pour une charge électrique de 10 nC/g, alors que la masse dépasse 50 % pour une charge électrique de 40 nC/g. De même, pour les particules de 1 mm, la masse déplacée est passée de 400 mg à 1000 mg, lorsque la charge électrique varie de 10 nC/g à 30 nC/g. Une augmentation remarquable de la vitesse de déplacement a été observée, en plus de l'augmentation de la masse déplacée avec la charge électrique. Par ailleurs, la taille des particules a un effet important sur la charge acquise. Par exemple, les particules micronisées se chargent rapidement par rapport aux particules millimétriques.

En revanche, l'effet inverse s'est produit pour les particules micronisées (0,35 mm et 0,5 mm). La masse déplacée a légèrement diminuée lorsque la charge électrique dépasse 40 nC/g. Ceci s'explique, par l'augmentation de la force électrique de l'image, qui est proportionnelle au carré de la charge de particules. La charge électrique moyenne acquise par les particules de plastiques est $(30 \pm 5) \text{ nC/g}$.

IV.4.1.3. Produit binaire

Les résultats obtenus (figure IV.10), représentent la variation du taux de récupération des particules de plastique, en utilisant un COM statique en fonction de la tension appliquée pour différentes tailles de particules avec et sans chargement Corona.

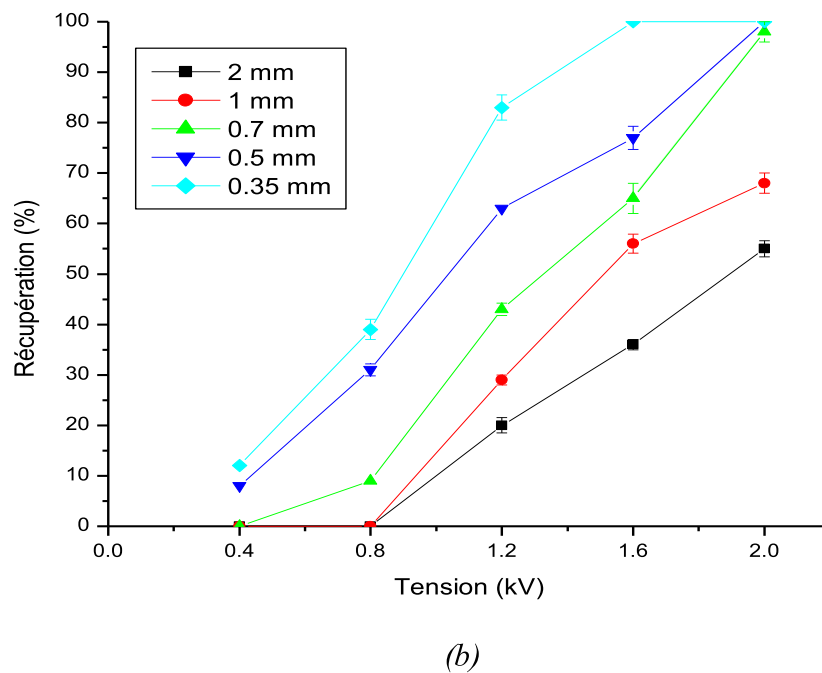
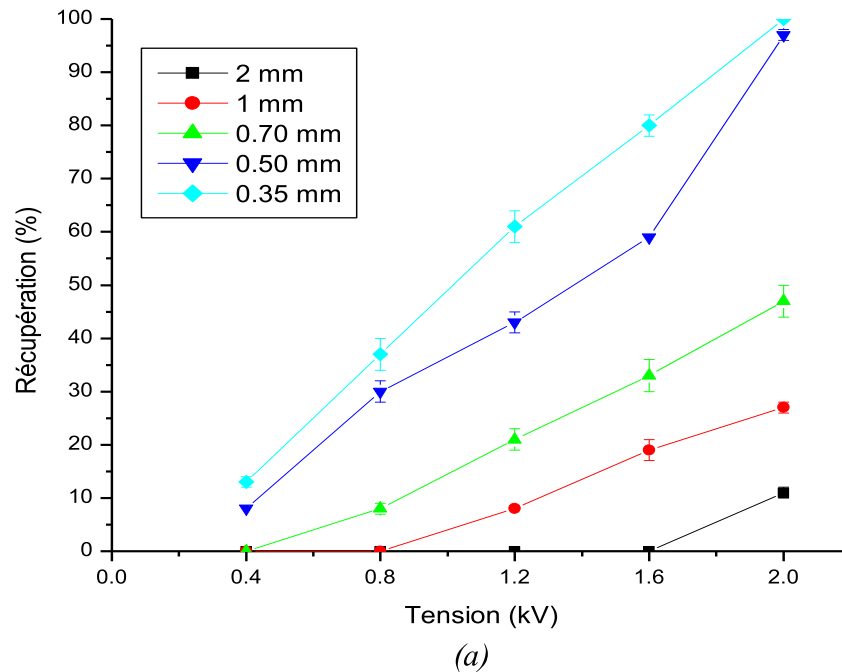
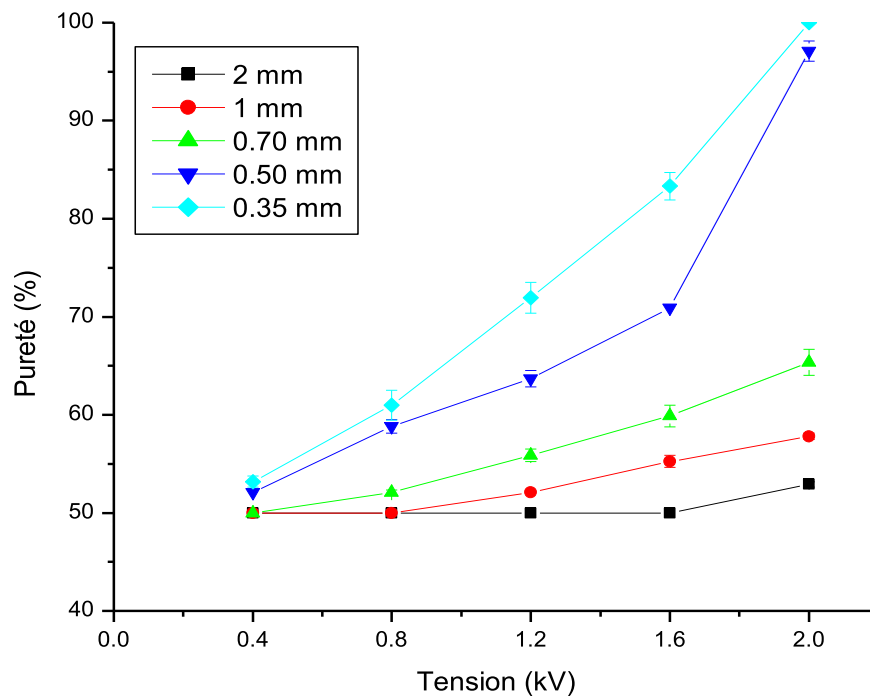


Figure IV.10. Variation du taux de récupération du plastique à l'aide du COM statique en fonction de la tension appliquée a) Sans chargement; b) Avec chargement corona.

La masse des particules de plastiques récupérées augmente avec la tension appliquée, avec un taux de récupération de 100 %, pour une tension de 2 kV en utilisant des particules de 0,35 mm et 0,5 mm. L'effet de charge a été significatif pour les particules de 0,7 mm, dont la récupération varie de 46 % à 100 % après le chargement corona.

On peut expliquer ce résultat, par le fait que l'augmentation de la charge initiale des particules de plastique, entraîne une augmentation de la force de coulomb qui est proportionnelle avec la charge. Par conséquent, l'augmentation de la force répulsive entre le convoyeur et les particules.

De même, l'augmentation de la récupération due à la charge électrique a été obtenue pour les granules de taille millimétriques sans atteindre 100 %. Cela s'explique, que la charge acquise par les particules millimétriques n'est pas suffisante pour le déplacement de toute la masse, parce que la force de gravité est dominante par rapport à la force de coulomb. De même, si on augmente la charge des particules, on reste sur le même rendement et l'efficacité reste constante (figure IV.10b).



(a)

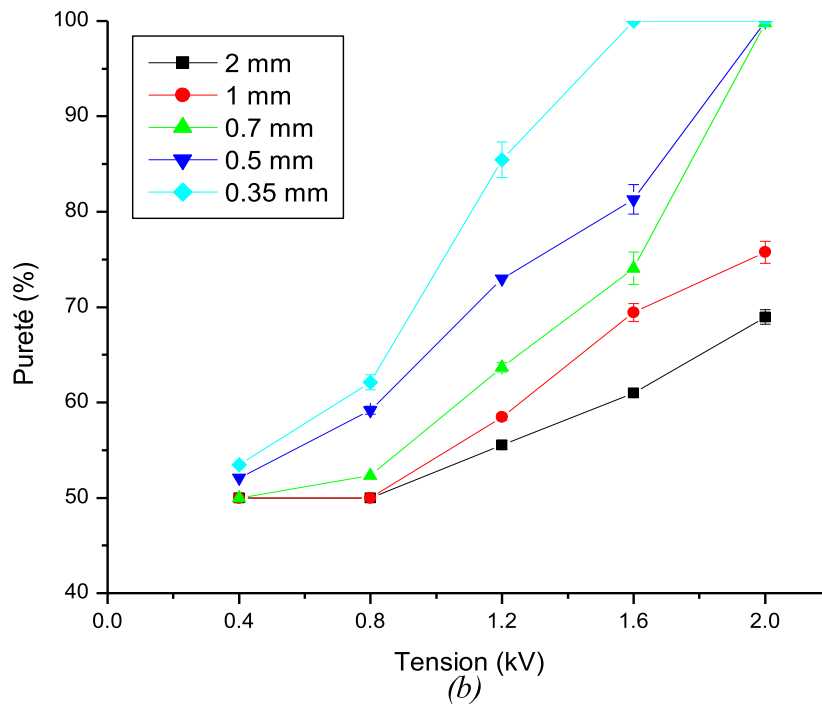


Figure IV.11. Variation du taux de pureté des particules de cuivre à l'aide du COM statique en fonction de la tension appliquée a) Sans chargement corona; b) avec chargement corona

La (figure IV.11) représente la variation du taux de pureté des particules de cuivre en fonction de la tension appliquée sans et avec chargement corona, en utilisant un convoyeur statique.

D'après les résultats, on constate que le taux de pureté des particules de plastique récupérées est 100 %, pour toutes les tailles, étant donné que toutes les particules de cuivre sont restées immobiles à la surface du COM statique.

Par conséquent, le taux de récupération des particules de cuivre est 100 % pour toutes les expériences utilisant le COM statique, alors que leur taux de pureté varie en fonction du niveau de tension (figure IV. 11). Le niveau de pureté atteint presque 100 % pour les particules de petite taille (0,35 mm, 0,5 mm et 0,7 mm) pour une tension de 2 kV, pour les particules chargées par corona.

IV.4.2. Convoyeur vibrant

IV.4.2.1. Mono produit

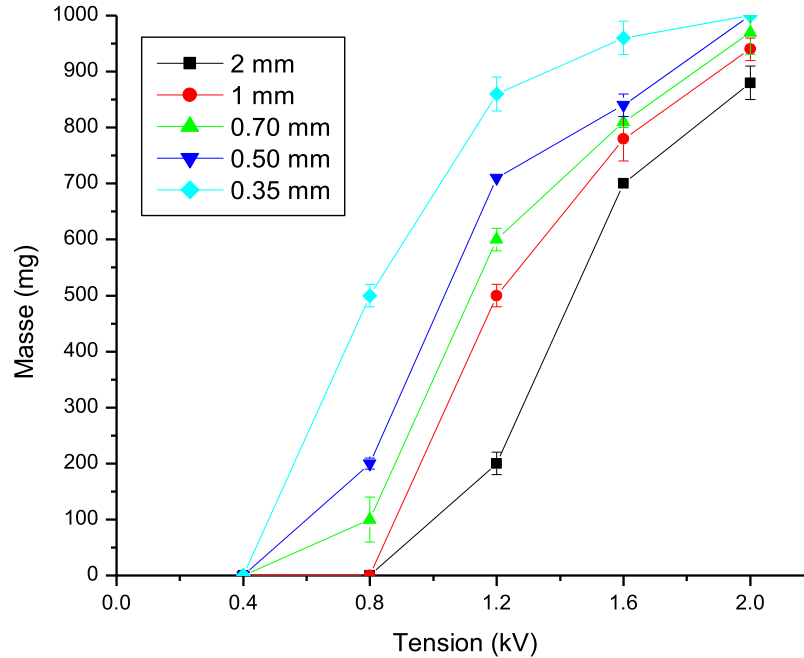


Figure IV.12. Variation de la masse des particules de cuivre restant attachées à la surface du COM vibrant en fonction de la tension appliquée ($f = 30$ Hz).

Les résultats présentés à la (figure IV.12), représentent la masse de particules de cuivre attachée à la surface du COM vibrant, en fonction de la tension appliquée ($f = 30$ Hz). Ainsi, les granules de cuivre s'attachent à la surface en raison d'une force d'attraction, contrairement aux particules plastiques. Cette force d'attraction a provoquée, la fixation des particules indépendamment de leur taille. Cet effet est plus important pour les particules de taille inférieure au millimètre.

Sur les 1000 mg de granules de cuivre déposés sur le convoyeur, presque toutes les particules micronisées (0,35 mm, 0,5 mm et 0,7 mm) sont restées sur la surface, pour une tension de 2kV. En revanche, pour les particules millimétriques (1 mm et 2 mm), une masse de 900 mg est attachée à la surface du COM.

IV.4.2.2. Produit binaire

L'effet de la taille des particules sur les performances de la séparation est étudié dans cette partie. Le débit de vibration et la fréquence sont fixés à 5g /s et 30Hz respectivement.

Toutes les particules de plastique d'un COM vibrant se sont déplacées en présence de la vibration. Le taux de récupération égal à 100 % pour toutes les expériences. Par conséquent, la pureté des particules de cuivre restant sur la surface est de 100%, parce que les granulés de plastique ont quitté la surface du convoyeur. Les figures (IV.13 et IV. 14) représentent la variation de la récupération des particules de cuivre et la pureté des particules de plastique respectivement.

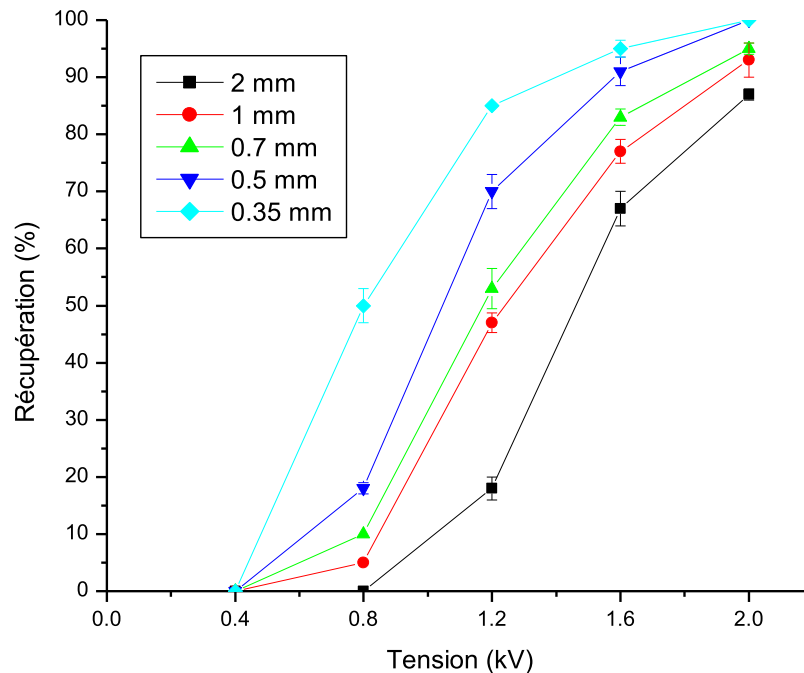


Figure IV.13. Variation du taux de récupération des particules de cuivre à l'aide du COM vibrant en fonction de tension appliquée ($f=30$ Hz).

La (figure IV.13), montre que le taux de récupération des particules de cuivre augmente avec le niveau de tension. Ceci s'explique, par l'augmentation de la tension qui entraîne une augmentation de la force d'attraction qui est responsable de l'attachement des particules métalliques sur la surface du COM. Pour une tension de 2 kV, la récupération est 100% pour les particules (0,35 et 0,5) mm, et on atteint plus de 85% pour les particules entre (0.7 et 2) mm, pour lesquels la force de gravité est plus élevée que la force électrique, avec une pureté de 100 %.

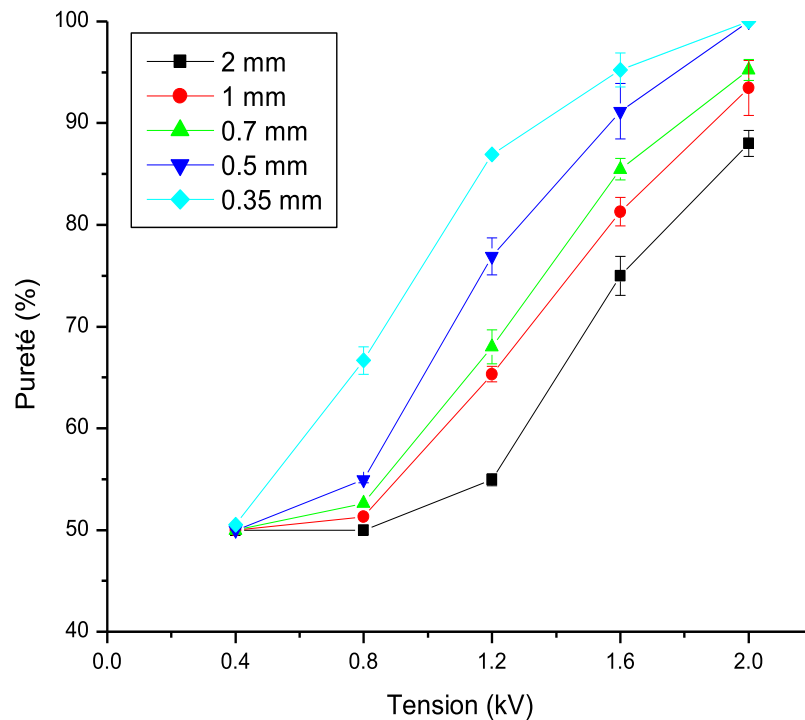


Figure IV.14. Variation du taux de pureté des particules de plastique à l'aide du COM vibrant en fonction de la tension appliquée ($f=30$ Hz).

La (figure IV.14), illustre la variation du taux de pureté des particules de plastique à l'aide du COM vibrant, en fonction de la tension appliquée ($f=30$ Hz). On remarque qu'il y a une relation directement proportionnelle entre la récupération de cuivre et la pureté de plastique. La pureté de plastique augmente avec l'augmentation de la récupération de cuivre.

Les résultats montrent que tous les produits de plastique récupérés avec des valeurs de pureté élevées à 80 % pour les particules entre (0.7 et 2) mm. Pour ces tailles, la masse de cuivre récupérée n'est pas totale, ce qui diminue la pureté de plastique. La récupération du cuivre est 100 % pour les particules de (0,35 et 0,5) mm, pour une tension de 2 kV.

IV.4.3. Effet de l'amplitude de la vibration

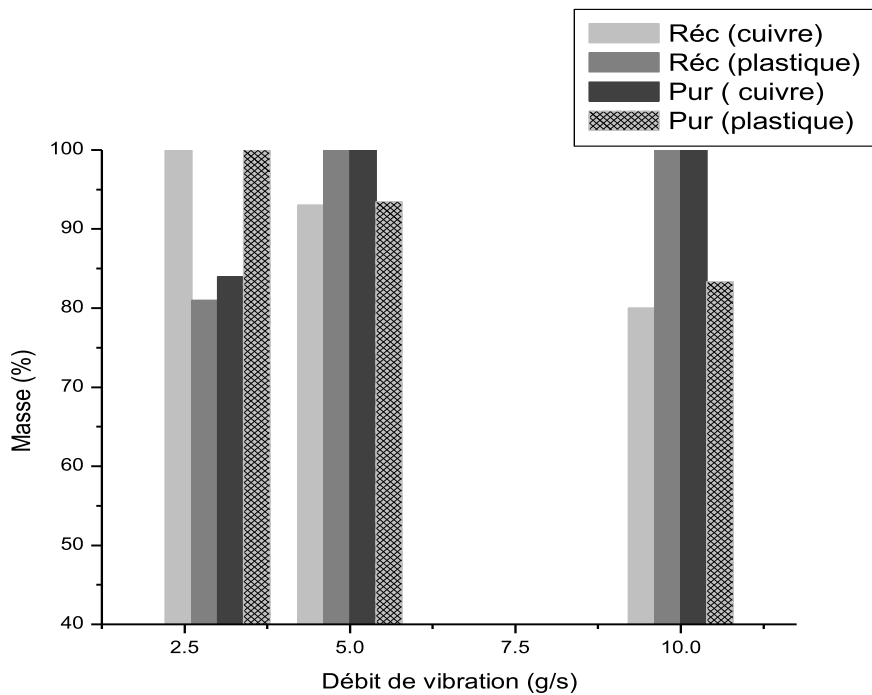


Figure IV.15. Variation de la récupération et de la pureté des particules de cuivre et de plastique en fonction de la tension ; l'amplitude de vibration = (3, 5, 10 g/s) ; $f=30\text{Hz}$.

Les résultats obtenus, présentés à la (figure IV.15), représentent la variation de la récupération et la pureté des particules de cuivre et de plastique en fonction de l'amplitude de vibration.

D'après les résultats de la (figure IV.15), on constate une relation inversement proportionnelle entre la récupération des particules de cuivre et l'amplitude de vibration.

Pour une tension de 2 kV, la récupération est 100 %, avec une pureté de 85% pour une amplitude de vibration de 3g/s. La faible pureté des particules de cuivre pour une tension de 2 kV après la vibration de COM est due à la faible récupération des particules de plastique qui est seulement 80 %. On peut exprimer ce résultats que l'amplitude de la vibration n'est pas suffisante pour la récupération de toute la masse des particules de plastique et elles restent attachées sur les particules de cuivre.

Pour une amplitude de vibration de 5g/s, les performances de la séparation sont beaucoup plus élevées par rapport à une amplitude de 3g/s ; puisque plus de 90% de la masse de cuivre a été récupérée avec une pureté de 100%. Par ailleurs la récupération des particules de plastique est toujours optimale puisque 100% de la masse a été récupérée avec une pureté maximale presque de 95% pour une tension appliquée de 2 kV.

Les performances de séparation pour amplitude de vibration de 10 g/s ont montré que la masse de cuivre récupérée diminue considérablement, lorsque l'amplitude de la vibration augmente. Ce qui devient supérieure à la force d'attraction appliquée aux particules métalliques. La récupération diminue d'environ 15% par rapport à l'amplitude de 5g/s. La diminution de la récupération des particules de cuivre est suivie par la diminution de la pureté des particules de plastique récupérées dans la boîte collectrice.

IV.4.4. Effet de la fréquence

Dans cette partie, l'effet de la fréquence sur les performances de la séparation en termes de récupération et pureté des particules métalliques et de plastiques est étudié.

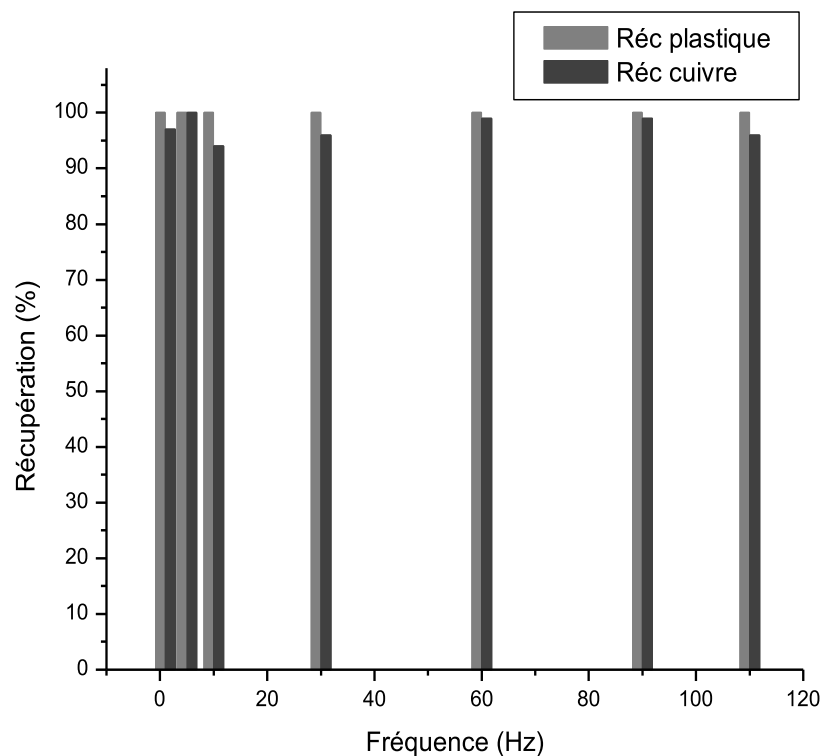


Figure IV.16. Variation du taux de récupération des particules de cuivre et de plastique à l'aide du COM vibrant en fonction de fréquence électrique appliquée.

La (figure IV.16) représente la récupération des particules de cuivre et de plastique en fonction de la fréquence pour la taille de 1 mm, pour un débit de vibration de 5g/s et une tension de 2 kV.

D'après les résultats obtenus, on constate que la fréquence n'a pas un grand effet sur la récupération de cuivre. On remarque, que la masse récupérée est 100% pour une fréquence de

5 Hz. Par ailleurs, pour les particules de plastique, toute la masse a été récupérée. Cependant, les résultats montrent que la fréquence appliquée a un effet significatif sur la vitesse des particules, de sorte que la récupération pour des fréquences de (1 - 20) Hz, dure plus d'une minute.

Ce mouvement lent est causé par la grande valeur de la période T. C'est-à-dire que les particules marqueront un temps d'arrêt sur chaque électrode qu'elles arrivent. Leur charge augmentera, de sorte que la force d'image sera suffisamment grande pour faire adhérer certaines particules à la surface des électrodes du convoyeur.

Pour des fréquences de (30-60) Hz, le temps de la récupération est de quelques secondes. On outre, pour des fréquences supérieures à 60Hz, le temps de la récupération augmente et le déplacement des particules devient lent.

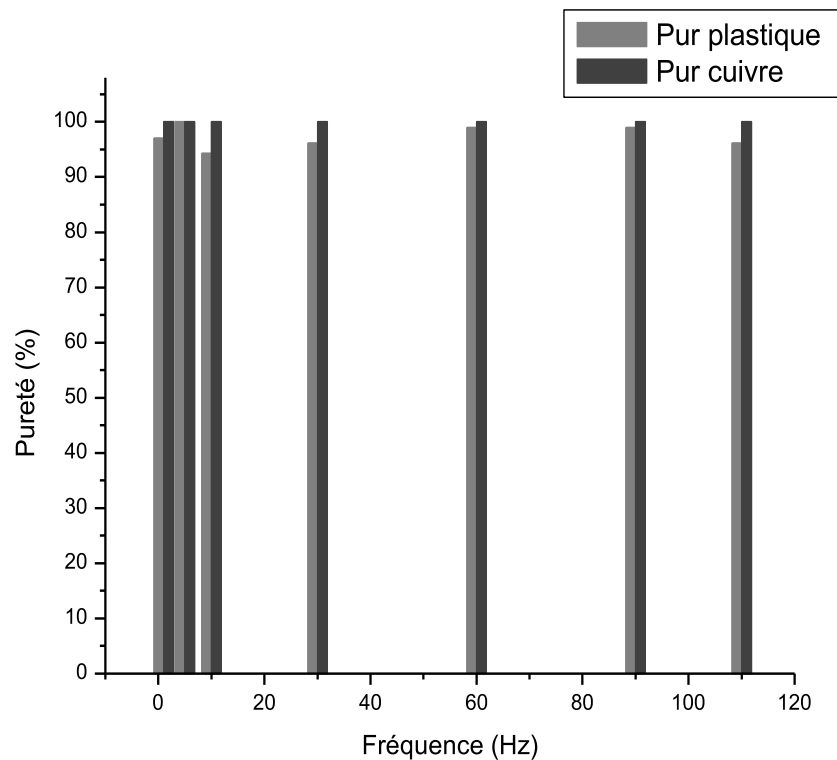


Figure IV.17. Variation du taux de pureté des particules de cuivre et de plastique à l'aide du COM vibrant en fonction de fréquence électrique appliquée.

La (figure IV.17) représente la pureté de cuivre et de plastique en fonction de la fréquence. D'après les résultats de la (figure IV.17), on constate que la pureté de cuivre est 100%, puisque toute la masse du plastique est récupérée. Par ailleurs, la pureté du plastique atteint à 100% pour une fréquence de 5 Hz.

IV.5. Conclusion

Dans le présent chapitre, une force d'attraction nouvellement observée appliquée sur les particules de cuivre de taille μm et mm ont été analysées. Le COM a été fixé sur un alimentateur vibrant permettant la séparation du métal et du plastique mélanges granulaires. Les particules de plastique ont été déplacées par la vibration du COM, alors que les particules de cuivre sont restées attachées à la surface en raison de la force d'attraction.

Les résultats ont montré l'existence d'une force d'attraction appliquée sur des particules métalliques qui dépend principalement sur l'amplitude de la tension appliquée et la faisabilité de la séparation de particules métalliques et plastiques.

- ✓ Une efficacité de séparation élevée a été obtenue avec une pureté de 100% pour le métal.
- ✓ l'augmentation de la tension appliquée a un effet positif sur le déplacement et la l'attraction des particules diélectriques et métalliques respectivement.
- ✓ La taille des particules a un effet sur la force électrophorétique et la force d'adhésion qui sont respectivement responsables du déplacement et de la l'attraction des particules diélectriques et métalliques. Les deux forces sont plus élevées pour les particules micronisées et plus faibles pour les grosses particules par rapport à leurs poids.
- ✓ Il ya une relation directement proportionnel entre le déplacement et la vitesse et la charge initial de la particule diélectrique. Un effet inverse a été observé si la charge dépasse une certaine valeur. Ceci s'explique par la dominance de la force d'image pour une charge plus élevée.
- ✓ Indépendamment de la polarité de la charge des particules diélectriques, l'efficacité et la direction des particules ne changent pas.

Il serait intéressant d'associer le COM vibrant à un système de contrôle pour assurer un fonctionnement continu de l'appareil pour application industrielle. Le présent travail ne sert qu'à valider la technique de séparation à l'échelle du laboratoire. Cependant, à grande échelle le convoyeur doit être développé pour confirmer s'il peut être utilisé au niveau industriel.

CONCLUSION GENERALE

Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, et pour protéger l'environnement des résidus de ces déchets, multiples recherches ont été réalisées par des laboratoires Internationaux et Algériens sur la séparation électrostatique des matériaux des mélanges (plastique/métal), (plastique/plastique) et(métal/métal).

L'objectif de ce travail, a été focalisé sur la réalisation et la présentation de deux nouvelles techniques de séparation électrostatique d'un mélange métal/plastique en utilisant un COM, conçu et mis au point au sein du laboratoire d'APELEC de l'université Djilali Liabes de Sidi bel Abbas. La première technique c'est une installation simple, qui comprend un COM et un aspirateur d'air fixé perpendiculairement au COM. La deuxième technique consiste à un COM fixé sur une plaque vibrante de sorte que, son fonctionnement est basé sur les vibrations mécaniques.

Les principaux Résultats sont comme suit :

Concernant la première technique, l'étude comparative effectuée sur les COM a montré que :

- ✓ l'existence d'une force d'attraction appliquée sur les particules métalliques dépend de l'amplitude de la tension appliquée.
- ✓ La force d'attraction exercée aux particules métalliques est affectée par les paramètres géométriques des COM, de sorte que les meilleurs résultats ont été menés en utilisant des COM avec des petites largeurs et des petits écartements inter-électrodes.
- ✓ L'amélioration de l'intensité de la force d'attraction est due à l'accroissement du champ électrique engendré par la tension appliquée.
- ✓ La faisabilité de la séparation (mélanges plastique/ métal) par la technique des ondes mobiles à l'aide d'un aspirateur d'air a été confirmé à travers les résultats expérimentaux.

Concernant la deuxième technique, Les résultats expérimentaux ont montré que:

- ✓ L'augmentation de la charge initiale a un effet positif sur l'efficacité et la vitesse du déplacement des particules diélectriques, ainsi sur les performances

Conclusion générale

de la séparation. En revanche, l'effet inverse s'est produit en dépassant une certaine valeur de charge.

- ✓ La tension électrique appliquée affecte positivement l'attachement des particules métalliques d'un côté et l'efficacité du déplacement des particules diélectriques d'un autre côté. L'efficacité élevée de séparation a été obtenue en appliquant des tensions élevées à des fréquences de 30 Hz à 50Hz.
- ✓ Il a été montré que, la vitesse de vibration est un paramètre très important qui affecte les performances de la séparation et qui doit être pris en considération.

Afin de bien comprendre le comportement des particules métalliques sur la surface des COM, une modélisation numérique du champ électrique a été faite par le logiciel Comsol 5.2a, les résultats ont montré que :

- ✓ L'étude comparative entre les différents COM a montré que le champ électrique créé par la tension appliquée est beaucoup plus intense au niveau des extrémités des électrodes qu'au niveau de la surface et entre les électrodes.
- ✓ La force d'attraction exercée sur les particules métalliques peut être contrôlée et augmentée en utilisant des COM avec des petites largeurs et écartements inter-électrodes pour avoir des meilleures performances de séparation.

Perspectives

La séparation électrostatique a été étudiée sur des mélanges granulaires de type métal/plastique. Il serait intéressant d'étudier la séparation électrostatique d'autres types de mélange ; métal/métal, plastique/plastique.

Ce travail peut être complété dans le future par la réalisation des convoyeurs avec des systèmes automatiques pour faciliter le processus de séparation et assurer la continuité du processus, et enfin de réaliser et développer des séparateurs à l'échelle industrielle.

LISTE DES ABREVIATIONS

ECC : Electric curtain convoyer

AC : Alternating Current

EDS : Electrodynamic Dust Shield

ITO : Oxyde d'indium et d'étain

JSC-1A : Johnson Space Centrer Number One

COM : convoyeur à ondes mobiles

COS : Convoyeur à ondes stationnaire

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Goodship, V., Stevels, A., & Huisman, J. (Eds.). (2019). *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*. Woodhead Publishing.
- [2] McCann, D., & Wittmann, A. (2015). Solving the e-waste problem (step) green paper: E-waste prevention, take-back system design and policy approaches. United Nations University/Step Initiative.
- [3] Robinson, B. H. (2009). E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *Science of the total environment*, 408(2), 183-191.
- [4] Cui, J., & Forsberg, E. (2003). Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of hazardous materials*, 99(3), 243-263.
- [5] Williams, J. A. S. (2006). A review of electronics demanufacturing processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(3), 195-208.
- [6] Chancerel, P., Meskers, C. E., Hagelüken, C., & Rotter, V. S. (2009). Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Industrial Ecology*, 13(5), 791-810.
- [7] Y. Higashiyama, K. Asano, Recent progress in electrostatic separation technology, Part. Sci. Technol. 16 (1) (1998) 77–90.
- [8] Hugo Marcelo Veit, Taina Rose Diehl, Anderson Paulo Salami, Joel da Silva Rodrigues, Andrea Moura Bernardes, Jorge Alberto Soares Tenório, Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap, Waste Manag. 25 (1) (2005) 67–74..
- [9] Alexandru Iuga, Laur Calin, Vasile Neamtu, Adrian Mihalcioiu, Lucian Dascalescu, Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device, J. Electrostat. 63 (6–10) (2005) 937–942.
- [10] Lucian Dascalescu, Amar Tilmatine, Florian Aman, Michaela Mihailescu, Optimization of electrostatic separation processes using response surface modeling, IEEE Trans. Ind. Appl. 40 (1) (2004) 53–59.

- [11] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu, Optimisation of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device, in: *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 301, IOP Publishing, 2011 no. 1, p. 012067.
- [12] D.K. Yanar, B.A. Kwetkus, Electrostatic separation of polymer powders, *J. Electrostat.* 35 (2–3) (1995) 257–266.
- [13] Ho-SeokJeon, Chul-Hyun Park, Bong-Gyoo Cho, Jai-Koo Park, Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging, *Separ. Sci. Technol.* 44 (1) (2009) 190–202.
- [14] J.S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*, CRC Press, 1995.
- [15] AlexandruIuga, Adrian Samuila, Roman Morar, MihaiBilici, Lucian Dascalescu, Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment, *Part. Sci. Technol.* 34 (1) (2016) 45–54.
- [16] SimonaNicoara, L. Calin, A. Iuga, N. Serban, Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose, *Environ. Prog.* 6 (2006) 341–346.
- [17] Amar Tilmatine, Karim Medles, Salah-Eddine Bendimerad, Fodil Boukholda, Lucien Dascalescu, Electrostatic separators of particles: application to plastic/ metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures, *Waste Manag.* 29 (1) (2009) 228–232
- [18] Brahami, Y., Tilmatine, A., Bendimerad, S. E., Miloudi, M., Zelmat, M. E. M., &Dascalescu, L. (2016). Tribo-aero-electrostatic separation of micronized mixtures of insulating materials using “back-and-forth” moving vertical electrodes. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(2), 669-704.
- [19]Miloudi, M., Medles, K., Mokdad, R., Kachi, M., &Dascalescu, L. (2016). Installations for the neutralization of granular insulating materials obtained by electrostatic separation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(2), 645-650.
- [20]Aksa, W., Medles, K., Rezoug, M., Ouiddir, R., Bendaoud, A., &Dascalescu, L. (2015). Modeling and optimization of a separator for granular mixtures composed of multiple insulating materials. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6), 4743-4751.

Bibliographie

- [21] Miloudi, M., Dascalescu, L., Li, J., Medles, K., & Tilmatine, A. (2015). Improved overall performances of a tribo-aero-electrostatic separator for granular plastics from waste electric and electronic equipment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(5), 4159-4165.
- [22] Miloudi, M., Dascalescu, L., Li, J., El-Mossouess, S., & Medles, K. (2013). Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(5), 1510-1515.
- [23] Boukhoulida, M. F., Miloudi, M., Medles, K., Rezoug, M., Tilmatine, A., & Dascalescu, L. (2013). Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(6), 2375-2381.
- [24] Benhafssa, A. M., Medles, K., Boukhoulida, M. F., Tilmatine, A., Messal, S., & Dascalescu, L. (2015). Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(5), 4166-4172.
- [25] Fekir, D. E., Miloudi, M., Miloua, F., Medles, K., & Dascalescu, L. (2017). New propeller-type tribocharging device with application to the electrostatic separation of granular insulating materials. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 2416-2422.
- [26] Rezoug, M., Ouiddir, R., Aksa, W., Medles, K., Bilici, M., & Dascalescu, L. (2014). Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(2), 1161-1167.
- [27] Rezoug, M., Aksa, W., Boukhoulida, M. F., Medles, K., & Dascalescu, L. (2019). A novel tribo-electrostatic device for the treatment of granular waste plastics mixtures. *International Journal of Environmental Studies*, 76(2), 225-235.
- [28] Iuga, A., Morar, R., Samuila, A., & Dascalescu, L. (2001). Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 148(2), 47-54.
- [29] Iuga, A., Morar, R., Samuila, A., & Dascalescu, L. (1998). Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 148(2), 47-54

Bibliographie

- [30] Dascalescu, L., Samuila, A., Mihalcioiu, A., Bente, S., & Tilmatine, A. (2005). Robust design of electrostatic separation processes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(3), 715-720.
- [31] Catinean, A., Dascalescu, L., Lungu, M., Dumitran, L. M., & Samuila, A. (2020). Improving the recovery of copper from electric cable waste derived from automotive industry by corona-electrostatic separation. *Particulate Science and Technology*, 1-8.
- [32] Zegloul, T., Touhami, S., Richard, G., Miloudi, M., Dahou, O., & Dascalescu, L. (2016). Optimal operation of a plate-type corona-electrostatic separator for the recovery of metals and plastics from granular wastes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 2506-2512.
- [33] Richard, G., Touhami, S., Zegloul, T., & Dascalescu, L. (2017). Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator. *Waste Management*, 60, 112-122.
- [34] Samuila, A., Dascalescu, L., Calin, L., Bilici, M., & Catinean, A. (2020, March). Recent researches in electrostatic separation technologies for the recycling of waste electric and electronic equipment. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2218, No. 1, p. 030001). AIP Publishing LLC.
- [35] Dascalescu, L., Vlad, S., Iuga, A., & Levin, P. L. (2001). Electrostatics of conductive particles in contact with a plate electrode affected by a non-uniform electric field. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(1), 60.
- [36] Messal, S., Zegloul, T., Benhafssa, A. M., & Dascalescu, L. (2016). Belt-type corona-electrostatic separator for the recovery of conductive and nonconductive products from micronized wastes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), 1424-1430.
- [37] Calin, L., Catinean, A., Bilici, M., & Samuila, A. (2020). A Corona-Electrostatic Technology for Zinc and Brass Recovery from the Coarse Fraction of the Recycling Process of Spent Alkaline and Zinc-Carbon Batteries. *Journal of Cleaner Production*, 123477.
- [38] Masuda, S., Washizu, M., & Iwadare, M. (1987). Separation of small particles suspended in liquid by nonuniform traveling field. *IEEE Transactions on Industry Applications*, (3), 474-480.

Bibliographie

- [39] Masuda, S., Washizu, M., & Nanba, T. (1989). Novel method of cell fusion in field constriction area in fluid integration circuit. *IEEE transactions on industry applications*, 25(4), 732-737.
- [40] Melcher, J. R., Warren, E. P., & Kotwal, R. H. (1989). Theory for pure-traveling-wave boundary-guided transport of tribo-electrified particles. *Particulate science and technology*, 7(1-2), 1-21.
- [41] Melcher, J. R., Warren, E. P., & Kotwal, R. H. (1989). Traveling-wave delivery of single-component developer. *IEEE transactions on industry applications*, 25(5), 956-961.
- [42] Machowski, W., & Balachandran, W. (1997). Electrodynamic control and separation of charged particles using travelling wave field technique. *Journal of electrostatics*, 40, 325-330.
- [43] Machowski, W., & Balachandran, W. (1998). Dispersion and transport of cohesive lactose powder using travelling wave field technique. *Powder technology*, 99(3), 251-256.
- [44] Masuda, S., & Matsumoto, Y. (1973). Theoretical characteristics of standing-wave electric curtains. *Electrical Engineering in Japan*, 93(1), 71-77.
- [45] Masuda, S. K. K. H., Fujibayashi, K., Ishida, K., & Inaba, H. (1972). Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain. *Electrical Engineering in Japan*, 92(1), 43-52.
- [46] Schmidlin, F. W. (1991). A new nonlevitated mode of traveling wave toner transport. *IEEE transactions on industry applications*, 27(3), 480-487.
- [47] Kawamoto, H., & Seki, K. (2004, January). Mechanism on traveling-wave transport of particles. In *NIP & Digital Fabrication Conference (Vol. 2004, No. 2, pp. 1019-1026)*. Society for Imaging Science and Technology.
- [48] Schmidlin, F. W. (1995). Modes of traveling wave particle transport and their applications. *Journal of Electrostatics*, 34(2-3), 225-244.
- [49] Thompson, M. D., Gartstein, Y., & LeStrange, J. T. (1999, January). Aspects of toner transport on a traveling wave device. In *NIP & Digital Fabrication Conference (Vol. 1999, No. 1, pp. 262-265)*. Society for Imaging Science and Technology.

Bibliographie

- [50] Schmidlin, F. (1999, January). Advances in traveling wave toner transport. In NIP & Digital Fabrication Conference (Vol. 1999, No. 1, pp. 302-305). Society for Imaging Science and Technology.
- [51] Taniguchi, K., Morikuni, S., Watanabe, S., Nakano, Y., Sakai, T., Yamamoto, H., & Yamamoto, Y. (2000, January). Improved driving characteristics for the toner transportation system. In NIP & Digital Fabrication Conference (Vol. 2000, No. 2, pp. 740-742). Society for Imaging Science and Technology.
- [52] Kober, R. (2000, January). Traveling wave transport of conductive toner particles. In NIP & Digital Fabrication Conference (Vol. 2000, No. 2, pp. 736-739). Society for Imaging Science and Technology.
- [53] Kober, R. (2002, January). Simulation of traveling wave toner transport. In NIP & Digital Fabrication Conference (Vol. 2002, No. 2, pp. 453-457). Society for Imaging Science and Technology.
- [54] Kawamoto, H. (2008). Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field. *Journal of Electrostatics*, 66(3-4), 220-228.
- [55] Mazumder, M., Horenstein, M. N., Stark, J. W., Girouard, P., Sumner, R., Henderson, B., ...& Sharma, R. (2013). Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators. *IEEE Transactions on industry applications*, 49(4), 1793-1800.
- [56] Javed, W., Guo, B., Wubulikasimu, Y., & Figgis, B. W. (2016, October). Photovoltaic performance degradation due to soiling and characterization of the accumulated dust. In 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE) (pp. 580-584). IEEE.
- [57] Guo, B., & Javed, W. (2017). Efficiency of electrodynamic dust shield at dust loading levels relevant to solar energy applications. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(1), 196-202.
- [58] Andrea, Y., Pogrebnaya, T., & Kichonge, B. (2019). Effect of industrial dust deposition on photovoltaic module performance: Experimental measurements in the tropical region. *International Journal of Photoenergy*, 2019.

Bibliographie

- [59] Sayyah, A., Horenstein, M. N., & Mazumder, M. K. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 107, 576-604.
- [60] Moharram, K. A., Abd-Elhady, M. S., Kandil, H. A., & El-Sherif, H. (2013). Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels. *Energy Conversion and Management*, 68, 266-272.
- [61] Assi, A., Hassan, A., Al-Shamisi, M., & Hejase, H. (2012, November). Removal of air blown dust from photovoltaic arrays using forced air flow of return air from air conditioning systems. In *2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [62] Du, X., Jiang, F., Liu, E., Wu, C., & Ghorbel, F. H. (2019). Turbulent airflow dust particle removal from solar panel surface: Analysis and experiment. *Journal of Aerosol Science*, 130, 32-44.
- [63] Guo, B., Javed, W., Pett, C., Wu, C. Y., & Scheffe, J. R. (2018). Electrodynamic dust shield performance under simulated operating conditions for solar energy applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 185, 80-85.
- [64] Kawamoto, H., & Shibata, T. (2015). Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels. *Journal of Electrostatics*, 73, 65-70.
- [65] Kawamoto, H., & Guo, B. (2018). Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels. *Journal of Electrostatics*, 91, 28-33.
- [66] Kawamoto, H., & Kato, M. (2018, June). Electrostatic cleaning equipment for dust removal from solar panels of mega solar power generation plants. In *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)* (pp. 3648-3652). IEEE.
- [67] Kawamoto, H. (2019). Electrostatic cleaning equipment for dust removal from soiled solar panels. *Journal of Electrostatics*, 98, 11-16.
- [68] Mazumder, M. K., Sharma, R., Biris, A. S., Zhang, J., Calle, C., & Zahn, M. (2007). Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices. *Particulate Science and Technology*, 25(1), 5-20.

Bibliographie

- [69]Mazumder, M. K., Horenstein, M. N., Joglekar, N. R., Sayyah, A., Stark, J. W., Bernard, A. A., ... & Lloyd, A. H. (2016). Mitigation of dust impact on solar collectors by water-free cleaning with transparent electrodynamic films: progress and challenges. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1342-1353.
- [70]Mazumder, M. K., Horenstein, M. N., Joglekar, N. R., Sayyah, A., Stark, J. W., Bernard, A. A., ... & Lloyd, A. H. (2017). Mitigation of dust impact on solar collectors by water-free cleaning with transparent electrodynamic films: progress and challenges. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1342-1353.
- [71]Calle, C. I., Mazumder, M. K., Immer, C. D., Buhler, C. R., Clements, S., Lundeen, P., ... & Mantovani, J. G. (2006, October). Electrodynamic dust shield for surface exploration activities on the moon and Mars. In *57th International Astronautical Congress* (pp. A5-2).
- [72]Calle, C. I., McFall, J. L., Buhler, C. R., Snyder, S. J., Arens, E. E., Chen, A., ... & Trigwell, S. (2008, June). Dust particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces with applications to NASA exploration missions. In *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics* (Vol. 2008). ESA Minneapolis, MN.
- [73] Landis, G., Kerslake, T., Scheiman, D., & Jenkins, P. (2004, November). Mars solar power. In *2nd International Energy Conversion Engineering Conference* (p. 5555).
- [74]Landis, G. A., & Jenkins, P. P. (1997, September). Dust on Mars: Materials adherence experiment results from Mars Pathfinder. In *Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997* (pp. 865-869). IEEE.
- [75]Landis, G. A. (1996). Dust obscuration of Mars solar arrays. *Acta Astronautica*, 38(11), 885-891.
- [76]Mazumder, M. K., Sharma, R., Biris, A. S., Zhang, J., Calle, C., & Zahn, M. (2007). Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices. *Particulate Science and Technology*, 25(1), 5-20.
- [77]Calle, C. I., Buhler, C. R., Johansen, M. R., Hogue, M. D., & Snyder, S. J. (2011). Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration. *Acta Astronautica*, 69(11-12), 1082-1088.

Bibliographie

- [78]Calle, C. I., Buhler, C. R., McFall, J. L., & Snyder, S. J. (2009). Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions. *Journal of Electrostatics*, 67(2-3), 89-92.
- [79]Kawamoto, H., & Miwa, T. (2011). Mitigation of lunar dust adhered to mechanical parts of equipment used for lunar exploration. *Journal of Electrostatics*, 69(4), 365-369.
- [80]Calle, C. I., Mackey, P. J., Hogue, M. D., Johansen, M. R., Yim, H., Delaune, P. B., & Clements, J. S. (2013). Electrodynamic dust shields on the international space station: Exposure to the space environment. *Journal of Electrostatics*, 71(3), 257-259.
- [81]Kawamoto, H., Uchiyama, M., Cooper, B. L., & McKay, D. S. (2011). Mitigation of lunar dust on solar panels and optical elements utilizing electrostatic traveling-wave. *Journal of Electrostatics*, 69(4), 370-379.
- [82]Zouaghi, A., Zouzou, N., & Dascalescu, L. (2017, October). Effect of travelling wave electric field on fine particles motion on an electrodynamic board. In *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-6). IEEE.
- [83]Zouaghi, A., & Zouzou, N. (2019). Impact of spatial harmonic waves on dielectric particles displacement in standing and traveling wave electric fields. *Journal of Electrostatics*, 98, 25-33.
- [84]Zouaghi, A., Zouzou, N., & Dascalescu, L. (2019). Assessment of forces acting on fine particles on a traveling-wave electric field conveyor: Application to powder manipulation. *Powder Technology*, 343, 375-382.
- [85]Belgacem, A., Tilmatine, A., Bellebna, Y., Miloua, F., Zouzou, N., & Dascalescu, L. (2018). Experimental analysis of the transport and the separation of plastic and metal micronized particles using travelling waves conveyor. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(2), 435-440.
- [86]Mahi, I., Messafeur, R., Belgacem, A., Bellebna, Y., Louati, H., & Tilmatine, A. (2018). New separation method of metal/plastic micronized particles using travelling wave conveyors. *International Journal of Environmental Studies*, 75(5), 788-799.

Bibliographie

- [87]Atten, P., Pang, H. L., &Reboud, J. L. (2009). Study of dust removal by standing-wave electric curtain for application to solar cells on Mars.IEEE Transactions on Industry Applications, 45(1), 75-86.
- [88]Honegger, T. (2011). Electrocinétique tridimensionnelle de particules colloïdales en géométrie microfluidique et application à la manipulation de cellules (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- [89] Jones, T. B. (2003). Basic theory of dielectrophoresis and electrorotation. IEEE Engineering in medicine and Biology Magazine, 22(6), 33-42.
- [90] Gascoyne, P. R., & Vykoukal, J. (2002). Particle separation by dielectrophoresis. Electrophoresis, 23(13), 1973.
- [91] Zimmermann, U., & Neil, G. A. (Eds.). (1996). Electromanipulation of cells. CRC press.
- [92]MacQueen, L. A., Buschmann, M. D., & Wertheimer, M. R. (2008). Gene delivery by electroporation after dielectrophoretic positioning of cells in a non-uniform electric field.Bioelectrochemistry, 72(2), 141-148.
- [93]Eguchi, M., Imasato, H., &Yamakawa, T. (2012, June). Separation of blood cells by employing dielectrophoresis and traveling-wave electric fields.In World Automation Congress 2012 (pp. 1-6). IEEE.
- [94]Morgan, H., Green, N. G., Hughes, M. P., Monaghan, W., & Tan, T. C. (1997). Large-area travelling-wave dielectrophoresis particle separator. Journal of micromechanics and Microengineering, 7(2), 65.
- [95]van den Driesche, S., Rao, V., Puchberger-Enengl, D., Witariski, W., &Vellekoop, M. J. (2010).Continuous separation of viable cells by travelling wave dielectrophoresis.Procedia Engineering, 5, 41-44.
- [96]Rossi, B., & Greisen, K. (1941). Cosmic-ray theory. Reviews of Modern Physics, 13(4), 240.
- [97] Morgan, H., & Green, N. G. (2003). AC electrokinetics: colloids and nanoparticles (No. 2). Research Studies Press.
- [98] Jones, T. B. (1995). Electromechanics of particles (1995). Cambridge, Cambridge.

Bibliographie

- [99] Alibida, A., Zelmat, S., Zelmat, M. E., Neagoe, M. B., Miloua, F., Dascalescu, L., & Tilmatine, A. (2020). Experimental analysis of a new attraction force applied on metal particles. *Particulate Science and Technology*, 38(4), 505-510.
- [100] Tilmatine, A., Alibida, A., Zelmat, S., Louati, H., Bellebna, Y., & Miloua, F. (2018). On the attraction force applied on metal pieces in a traveling wave conveyor. *Journal of Electrostatics*, 96, 64-68.
- [101] Louati, H., Tilmatine, A., Ouiddir, R., Alibida, A., & Zouzou, N. (2020). New separation technique of metal/polymer granular materials using an electrostatic sorting device. *Journal of Electrostatics*, 103, 103410.
- [102] Louhadj, S., Hammadi, N., Touhami, S., Louati, H., Hadjali, A., Kimi, I. E., & Tilmatine, A. (2020). Experimental analysis of the attraction force applied on metal particles using a double-side electrical curtain. *Journal of Electrostatics*, 105, 103448.
- [103] Hadj Ali, A. (2017). Etude de la trajectoire des particules dans un précipitateur électrostatique. Mémoire de master, université Mustafa Stambouli Mascara.
- [104] Hadj Ali, A., Zelmat, M. E., Touhami, S., Louhadj, S., Benmimoun, Y., Louati, H., & Tilmatine, A. (2020). Using a vibrating electrical curtain conveyor for separation of plastic/metal particles. *Powder Technology*, 373, 267-273.

Résumé

Les convoyeurs à ondes mobiles qui sont largement utilisées pour le déplacement des particules diélectrique, ont prouvé leur faisabilité dans la séparation électrostatique d'un mélange (métal/plastique). L'objectif de notre travail est de réaliser deux techniques de séparation d'un mélange des particules (métal/plastique). La première technique, une étude expérimentale a été réalisée en utilisant un convoyeur à ondes mobiles triphasé (COM) fixé sur un alimentateur électromagnétique vibrant. Le COM vibrant a été utilisé pour la séparation des granules de plastique et de métal de différentes tailles entre 0.35 mm et 2 mm, provenant des déchets des câbles électriques, de sorte que les particules métalliques restent attachées sur la surface du COM en raison de la force d'attraction appliquée sur elles tandis que les particules de plastique se déplacent en raison de la force des vibrations. La deuxième technique se base sur la force d'aspiration en utilisant un aspirateur d'air, de sorte que les particules métalliques restent attachées sur la surface du COM sous l'effet de la force d'attraction électrique, tandis que les particules de plastique sont aspirées par l'aspirateur. Par ailleurs, une étude expérimentale a été effectuée sur les particules métalliques en étudiant l'influence de plusieurs paramètres tels que la tension, la largeur d'électrode et l'écartement inter-électrodes. Concernant la partie numérique, une modélisation numérique du champ électrique a été faite pour différentes configurations du COM. Les résultats obtenus ont bien expliqué le comportement des particules métalliques sur la surface de différentes configurations des COM. Par ailleurs, le calcul du champ électrique a montré que le champ électrique est intense pour des petites largeurs et écartements inter -d' électrodes.

Mots clés : séparation électrostatique- ondes mobiles- force d'attraction- pureté- particules micronisées- champ électrique

Abstract

Traveling wave conveyors, which are widely used for the displacement of dielectric particles, have proven their feasibility in electrostatic separation of a mixture (metal/plastic). The objective of our work is to realize two techniques of separation of a mixture of particles (metal/plastic). The first technique in an experimental study carried out on a three-phase electric curtain (COM) conveyor attached to a vibrating electromagnetic feeder. The vibrating COM was used for the separation of plastic and metal pellets of different sizes between 0.35 and 2 mm, come from the electric cables so that the metal particles remain attached to the surface of the COM due to the attraction force applied on them while the plastic particles move due the vibration force. The second technique is based on their operation on the air suction force using a vacuum cleaner so that the metal particles remain attached to the surface of the COM under the effect of the electric attraction force, while the plastic particles were aspirated, an experimental study was also carried out on the metal particles by studying the influence of several parameters such as, voltage, electrode width and inter-electrodespacing. Concerning the numerical part a numerical modeling of the electric field was made for the different configurations of the COM. the results of the modelling have well explained the behaviour of metal particles on the surface of different COM configurations, moreover, the

calculation of the electric field has shown that the electric field is intense for small electrode widths and spacing.

Keywords: electrostatic separation - travelling waves - force of attraction - purity - micronized particles - electric field.

ملخص

أثبتت ناقلات الموجة المتحركة التي تستخدم على نطاق واسع في تحريك الجسيمات العازلة ، جدواها في الفصل الكهروستاتيكي لخليط (معدن / بلاستيك). الهدف من عملنا هو تحقيق طريقتين للفصل من خليط من الجسيمات (معدن / بلاستيك) . التقنية الأولى هي دراسة تجريبية أجريت على ناقل ستارة كهربائي ثلاثي الأطوار (COM) متصل بوحدة تغذية كهرومغناطيسية تهتز. تم استخدام ناقل ستارة كهربائي المهتز لفصل الحبيبات البلاستيكية والمعدنية ذات الأحجام المختلفة بين 0.35-2 مم ، وتأتي من الكابلات الكهربائية بحيث تظل الجزيئات المعدنية متصلة بسطح بسبب قوة الجذب المطبقة عليها أثناء تتحرك جزيئات البلاستيك بسبب قوة الاهتزاز. التقنية الثانية والتي تعتمد على تشغيلها على قوة شفط الهواء باستخدام مكنسة كهربائية بحيث تظل الجزيئات المعدنية ملتصقة بسطح ناقل ستارة كهربائي تحت تأثير قوة التجاذب الكهربائي بينما يتم امتصاص جزيئات البلاستيك في بواسطة المكنسة الكهربائية ، علاوة على ذلك ، تم تعيين دراسة تجريبية على جزيئات المعدن من خلال دراسة تأثير العديد من المعلمات مثل الجهد وعرض القطب والتباعد بين الأقطاب. فيما يتعلق بالجزء العددي ، تم عمل نمذجة رقمية للمجال الكهربائي للتكوينات المختلفة لـ ناقل ستارة كهربائي. أوضحت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال النمذجة بوضوح سلوك الجسيمات المعدنية على سطح تكوينات ناقل ستارة كهربائي المختلفة ، علاوة على ذلك ، أظهر حساب المجال الكهربائي أن المجال الكهربائي مكثف بالنسبة للعروض الصغيرة والتباعد بين الأقطاب.

الكلمات المفتاحية: الفصل الكهروستاتيكي - الموجات المتحركة - قوة الجذب - النقاوة - الجسيمات الدقيقة - المجال

الكهربائي