

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES  
Faculté de Génie Electrique  
Département d'Électrotechnique

## THESE

Présentée par :

**ALI BIDA AHMED**

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat en sciences**

**Option : Réseaux Electriques et Haute Tension**

Intitulé de la thèse :

*Utilisation de la technique des ondes mobiles  
pour le déplacement des matériaux pulvérulents.  
Application pour la séparation électrostatique  
des particules*

Présenté devant le jury composé de :

Pr. HADJERI Samir	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Pr. TILMATINE Amar	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Directeur de thèse
Pr. MILOUA Farid	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Co-Directeur de thèse
Pr. OUIDDIR Rabah	Professeur (USTO ORAN)	Examineur
Dr. HAMMADI Nacera	MCA (USTO ORAN)	Examinatrice
Dr. REMAOUN Sidi-Mohamed	MCA (USTO ORAN)	Examineur

Soutenu en : 2020



## ***Remerciements***

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

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

Je suis très reconnaissante à Monsieur le professeur HADJERI Samir d'avoir accepté la présidence du jury de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à Mme. Nacera HAMMADI, M Rabeih OUIDDIR et Mr Sidi-Mohamed REMAOUN, pour avoir accepté d'examiner la thèse.

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

A tous un grand merci.

## *Table des matières*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Généralités sur la technique des rideaux électriques .....</b>	<b>4</b>
1.1. Introduction.....	5
1.2. Manipulation des particules par champ électrique .....	6
1.2.1. Principe des rideaux électriques .....	6
A. Rideaux électriques multi-phases .....	6
B. Rideaux électriques à ondes stationnaires .....	7
1.2.2. Technologie de l'EDS pour les rideaux électriques .....	9
1.3. Manipulation des particules par la diélectrophorèse.....	10
1.3.1. Principe de la diélectrophorèse.....	11
1.4. Analyse des forces exercées sur les particules .....	11
1.4.1. Solutions analytiques.....	12
1.4.1.1. Distribution du champ électrique.....	12
1.4.1.2. Forces diélectrophorétiques multipolaires (DEP).....	13
1.4.2. Analyse numérique.....	15
1.4.2.1. Vérification numérique de la solution analytique.....	15
A. Influence de l'épaisseur diélectrique.....	20
B. Influence de la permittivité relative.....	21
C. Influence de l'espacement inter-électrodes et de la largeur des électrodes.....	23
1.4.2.3. Discussion sur les forces multipolaires du DEP.....	25
1.4.2.4. Comparaison entre les forces d'adhérence et les forces de répulsion.....	29
A. Force gravitationnelle.....	30
B. Force de Coulomb .....	30
C. Force d'image .....	30
D. Force d'adhésion .....	31
1.5. Conclusion.....	36
<b>Chapitre 2 : Synthèse sur les travaux et les applications des convoyeurs à rideaux électriques .....</b>	<b>38</b>
2.1. Introduction.....	39
2.2. Entraînement de particules par rideaux électriques.....	39
2.2.1. Expérience de Masuda et al.....	40
2.2.2. Expérience de F. W. Schmidlin, Taniguchi et Adachi.....	41
2.3. Séparation électrostatique des particules.....	43
2.3.1. Techniques développés par Kawamoto et al.....	43

2.3.1.1. Système de séparation de particules à plaque inclinée .....	43
2.3.1.2. Système de séparation à tube incliné.....	44
2.3.1.3. Système de séparation centrifuge .....	45
2.3.1.4. Système de séparation spirale .....	45
2.3.1.5. Système de séparation à rouleaux.....	46
2.3.2. Résultats des travaux expérimentaux de Kawamoto	
2.4. Applications spatiales .....	49
2.4.1. Nettoyage des panneaux solaires dans l'espace .....	49
2.4.1.1. Expérience de Calle <i>et al.</i> .....	50
a. Les écrans électrodynamiques EDS.....	50
b. Les films d'ITO : oxyde d'indium dopé à l'étain [68-69].....	51
c. Types de convoyeurs .....	52
2.4.1.2. Résultats expérimentaux obtenus avec les EDS .....	54
2.4.1.3. Expériences de P. Atten <i>et al.</i> .....	55
2.4.2. Dépoussiérage des combinaisons spatiales.....	57
2.4.2.1. Expériences de Kawamoto et al. pour les combinaisons spatiales.....	85
2.4.2.2. Expériences de Manyapu <i>et al.</i> .....	60
2.5. Nettoyage des panneaux solaires dans des conditions terrestres .....	63
2.5.1. Nouvelles méthodes de nettoyage.....	66
2.5.2. Expériences de Calle, Sharma et Mazumder.....	68
2.5.3. Expériences de Kawamoto et Shibata .....	73
2.6. Etudes théoriques et numériques.....	75
2.7. Conclusion.....	85
<b>Chapitre 3 : Etude expérimentale du convoyeur à ondes mobiles.....</b>	<b>86</b>
3.1. Introduction.....	87
3.2. Montage expérimental.....	88
3.3. Conception du convoyeur à ondes mobiles.....	89
3.4. Conception d'électrodes.....	90
3.5. Protocole de mesure.....	91
3.5.1. Echantillon utilisé.....	91
a. Poly chlorure de vinyle (PVC).....	91
b. Propriétés du PVC.....	91
3.6. Étude de l'efficacité de déplacement des particules de PVC.....	94
3.6.1. Effet de la taille des particules.....	94
3.6.2. Sens de déplacement des particules.....	96
3.6.3. Influence de la fréquence.....	98
3.6.4. Analyse de la vitesse de déplacement des particules.....	100

3.6.5. Influence de la tension.....	101
3.6.6. Influence de l'humidité .....	105
3.6.7. Influence de la charge électrique des particules .....	107
3.6.8. Analyse numérique du champ électrique.....	108
3.7. Influence de la charge acquise par décharge couronne.....	109
3.7.1. Chargement par décharge couronne.....	109
3.8. Etude du déplacement des particules après chargement par décharge couronne .....	111
3.9. Conclusion.....	118
<b>Chapitre 4 : Analyse expérimentale d'une nouvelle force d'attraction appliquée sur les particules de métal.....</b>	<b>119</b>
4.1. Introduction.....	120
4. 2. Caractérisation des matériaux.....	121
4. 3. Propriétés des matériaux utilisés .....	121
a. Cuivre.....	121
b. Bronze.....	122
c. Acier.....	122
4. 4. Analyse expérimentale d'une nouvelle force d'attraction appliquée sur des pièces métalliques.....	123
4.4.1 Dispositif expérimental.....	123
4.4.2 Pièces de métal utilisées.....	125
4.4.3 Procédure expérimentale.....	126
4. 5. Analyse des forces.....	127
4. 6. Influence et détermination des paramètres électriques.....	130
4. 7. Distribution du potentiel sur le convoyeur.....	138
4. 8. Introduction d'une technique de séparation utilisant un COM vibrant.....	139
4.8.1 Expériences de séparation de mélanges de particules micronisées en utilisant un convoyeur plan statique.....	140
4.8.2 Expériences de séparation de mélanges de particules millimétriques en utilisant un convoyeur plan vibrant.....	142
4.9. Conclusion.....	142
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>144</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>147</b>

# *Liste des abréviations*

EDS	Ecran électrodynamique
DEP	Diélectrophorèse
FEA	Analyse éléments finis (Finite Element Analysis)
ANA	Solutions analytiques
DRE	Efficacité d'élimination de la poussière (Dust Removal Efficiency)
RMS	Racine carrée moyenne (Root Mean Square)
HR	Humidité relative
DBD	Décharge à barrière diélectrique
PVC	Polychlorure de vinyle
ITO	Oxyde d'indium dopé à l'étain
CNT	Flexibles en nanotube de carbone
PU	Polyuréthane
PET	Polyéthylène téréphtalate
ETFE	Ethylène tétrafluoroéthylène
AZO	Oxyde de zinc dopé à l'aluminium
Ag-NW	Nanofils d'argent
DRE	Efficacité de dépoussiérage (Dust Removal Efficiency)
OPR	Rendement de restitution de la puissance (Output Power Restoration)
SRR	Rendement de la réflectivité spéculaire (Specular Reflectivity Restoration)
FTP	Particules transportées vers l'avant (Particles transported forward)
BTP	Particules transportées vers l'arrière (Particles transported in back)
NTP	Particules non transportées (Particles not transported)
DBD	Décharge à barrière diélectrique
JSC-1A	Poussière similaire à celle de la lune
OPV	Cellules photovoltaïques organiques (Organic Photovoltaic Cells)

# Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Section transversale d'un rideau électrique triphasé.....	7
<b>Figure 1.2.</b> Rideau électrique à ondes stationnaires .....	8
<b>Figure 1.3.</b> Coupe transversale de la configuration EDS avec une couche de revêtement diélectrique transparent des électrodes.....	12
<b>Figure 1.4.</b> Formes d'onde de tension rectangulaires triphasées avec un rapport cyclique de 50% sur une période de temps $T_t$ .....	16
<b>Figure 1.5.</b> Résultats de la simulation numérique utilisant un logiciel d'analyse par éléments finis pour le (a) potentiel électrique (unité : V) et (b) la norme de champ électrique $ E $ (unité : V / m) et le champ vectoriel électrique dans une période spatiale fondamentale pour le modèle EDS.....	17
<b>Figure 1.6.</b> Comparaison des résultats analytiques (ANA) avec des simulations numériques utilisant un logiciel d'analyse par éléments finis (FEA).....	19
<b>Figure 1.7.</b> L'impact de l'épaisseur de la couche diélectrique $\delta$ dans le maximum normalisé des composants de champ électrique et E. La largeur d'électrode et l'espacement inter-électrode sont fixés à 100 $\mu\text{m}$ et 700 $\mu\text{m}$ , respectivement. La permittivité relative de la couche diélectrique est de $\epsilon_d = 3$ . Les tensions des phases A, B et C sont fixées à 1 kV, 0 et 1 kV, respectivement.....	21
<b>Figure 1.8.</b> Maximum normalisé de $ E $ en fonction de la permittivité relative $\epsilon_d$ (a) et de la partie agrandie de la courbe (b).....	22
<b>Figure 1.9.</b> Les impacts de (a) l'espacement inter-électrodes $g$ et (b) la largeur d'électrode $w$ sur le maximum de la norme de champ électrique (unité : MV / m) sur la surface EDS dans une période spatiale fondamentale. Les tensions des phases A, B et C sont établies respectivement à 1 kV, 0 et 1 kV. L'épaisseur et la permittivité relative du revêtement diélectrique sont 50 $\mu\text{m}$ et 3.....	23
<b>Figure 1.10.</b> Forces DEP du premier ordre dans les directions $x$ et $y$ : (haut) $ F_x^{(1)} $ (unité: nN) et (bas) $ F_y^{(1)} $ (unité: nN) pour les trois cas de 1, 2 et 3 de la tension combinaisons, comme mis en évidence sur la figure 1.4. L'épaisseur du revêtement diélectrique et le rayon de la particule de poussière sphérique sans perte sont de 50 et 5 $\mu\text{m}$ , respectivement. La largeur des électrodes et l'espacement entre les électrodes sont respectivement de 100 et 700 $\mu\text{m}$ . La permittivité relative de la couche diélectrique transparente et de la particule est supposée être respectivement de 3 et 4. L'amplitude de la tension est de 1 kV.....	26
<b>Figure 1.11.</b> L'impact de l'épaisseur du matériau diélectrique transparent sur l'amplitude de la composante verticale de la force DEP du premier ordre (unité : nN) .....	27
<b>Figure 1.12.</b> Magnitudes des composantes verticales de la force DEP du premier ordre $ F_y^{(1)} $ et de la force de Coulomb en fonction du rayon des particules, pour quatre tensions appliquées différentes.....	29
<b>Figure 1.13.</b> (a) Particule de poussière de rayon $R$ se trouvant juste au-dessus de l'électrode sous tension, (b) l'ensemble des forces exercées sur la particule dans la direction $y$ . (c) formation du ménisque d'eau entre la particule et la surface.....	29
<b>Figure 1.14.</b> Comparaison des forces d'attraction et de répulsion exercées sur la particule en fonction du rayon de la particule lorsque la particule se trouve au-dessus de l'électrode sous tension.....	32
<b>Figure 1.15.</b> Comparaison entre la composante verticale de la force de Coulomb et la force de van der Waals idéale (sans rugosité de surface) et non idéale (avec rugosité de surface) et la force capillaire pour plusieurs valeurs d'humidité relative différentes.....	36
<b>Figure 2.1.</b> Schéma du dispositif de déplacement des particules de Masuda avec une tension appliquée est de l'ordre de 5 à 10 kV [46].....	40
<b>Figure 2.2.</b> Schéma du système d'impression développé par Schmidlin, équipé d'un convoyeur électrostatique à ondes progressives. Composants : (10) ceinture photoconductrice. (25) station de charge avec décharge couronne. (26) électrode mise sous tension DC négative. (27) fil décharge couronne négative. (C) station de développement contenant le convoyeur à onde progressive (38) [47].....	42
<b>Figure 2.3.</b> Système de séparation de particules électrostatique incliné à plaque .....	44
<b>Figure 2.4.</b> Système de séparation à tube incliné.....	44
<b>Figure 2.5.</b> Système de séparation centrifuge. (a) 1/4 segment et (b) convoyeur centrifuge (système 270°).....	45
<b>Figure 2.6.</b> Convoyeur en forme spirale.....	46
<b>Figure 2.7.</b> Système de séparation à rouleaux.....	47
<b>Figure 2.8.</b> Distributions granulométriques des particules avant et après séparation électrostatique en utilisant le système à rouleau pour différents valeurs de gap et de tension appliquée.....	48

<b>Figure 2.9.</b> Photographie de particules avant et après le fonctionnement du système de séparation à rouleaux (1,0 kV). a) Initiale ; (b) attaché au rouleau et (c) non attaché.....	48
<b>Figure 2.10.</b> Bouclier anti-poussière électrodynamique (Electrodynamical Dust Shield-EDS) transparent avec électrodes parallèles en oxyde d'indium-étain transparent [63].....	50
<b>Figure 2.11.</b> Photographies de l'EDS transparent de 20 cm de diamètre pour la fenêtre PEM pendant les tests en laboratoire. La poussière de stimulant JSC-1A a été déposée de manière relativement uniforme, comme indiqué sur la gauche. La photo de droite montre l'EDS après activation .....	52
<b>Figure 2.12.</b> Différents substrats et modèles d'électrodes développés pour l'EDS.....	53
<b>Figure 2.13.</b> Réponse du panneau solaire à un dépôt de poussière JSC-1A de 50 à 75 µm et à son élimination. Le nettoyage a été accompli en utilisant des convoyeurs avec quatre espacements d'électrodes différents : 0.48 mm, 0.55 mm, 0.6 mm et 0.67 mm [64].....	54
<b>Figure 2.14.</b> Distribution granulométrique de la poudre simulant la poussière de Mars (Salten Skov) .....	55
<b>Figure 2.15.</b> Schéma de la chambre à vide et des systèmes de contrôle de la pression (air ou CO <sub>2</sub> ) et d'injection de poudre [74] .....	57
<b>Figure 2.16.</b> Photographies d'une combinaison spatiale Apollo 17 LMP A7LB : (a) le haut du torse, (b) le haut du dos, (c) le devant des jambes et (d) des bottes de maintien intégrées [57] .....	58
<b>Figure 2.17.</b> (a) Système de nettoyage électrostatique pour éliminer la poussière lunaire du tissu d'une combinaison spatiale. (b) Photographie des électrodes intégrées dans le tissu d'une combinaison spatiale [84].....	59
<b>Figure 2.18.</b> Efficacité de nettoyage du tissu d'une combinaison spatiale. Conditions : (a) gap 6 mm, sans vibration, dans l'air. (b) gap 12 mm, sans vibration, dans l'air. (c) gap 6 mm, 900V, dans l'air. (d) gap 6 mm, 900 V, sans vibration [84] .....	60
<b>Figure 2.19.</b> (a) Résultats des essais statiques. Etat des échantillons avant et après activation de l'EDS. (b) Taille et répartition des particules de poussière avant et après activation de l'EDS [86-87].....	62
<b>Figure 2.20.</b> (a) Panneaux solaires (b) miroirs des concentrateurs solaires [88].....	63
<b>Figure 2.21.</b> L'évolution des pertes quotidiennes d'irradiation HL au cours de l'année [90].....	64
<b>Figure 2.22.</b> Perte de puissance quotidienne des centrales solaires dans différentes parties du monde [88].....	65
<b>Figure 2.23.</b> Exemples de salissures Présentation de différents types de salissures avec des photographies exemplaires de salissures par (A) de la poussière minérale dans une zone désertique, (B) des excréments d'oiseaux, (C) des algues, des lichens, des mousses ou des champignons et (D) du pollen dans des milieux humides et climats modérés, (E) échappement du moteur d'une zone industrielle et (F) émissions agricoles.....	65
<b>Figure 2.24.</b> Présentation des différentes technologies de nettoyage triées par catégorie : manuelle, semi-automatique (y compris les solutions montées sur camion et les robots portables) et entièrement automatique .....	67
<b>Figure 2.25.</b> Photographie d'un écran EDS avec des électrodes transparent (transparence >79%) A. Représentation schématisée d'une vue en 3-D d'un EDS associé à un module photovoltaïque. B. Photographie d'un EDS. C. photographie d'un EDS assemblé à un module photovoltaïque.....	68
<b>Figure 2.26.</b> Déplacement des particules sur un EDS intégré au-dessus d'un miroir [102].....	69
<b>Figure 2.27.</b> Photographies montrant les dispositifs expérimentaux pour mesurer (a) OPR et (b) SRR. (a) Panneaux solaires stratifiés en film EDS. (b) Miroir solaire laminé avec un film EDS [104]	70
<b>Figure 2.28.</b> DRE, OPR et SRR pour différents dispositifs EDS mesurés dans les conditions : humidité relative HR = 30- 50 %, température _ 20- 25 °C, angle d'inclinaison _ 30° [104].....	71
<b>Figure 2.29.</b> Coupe de la configuration de l'EDS avec deux couches diélectriques transparentes et des électrodes réfléchissantes stratifiées sur un miroir solaire [104].....	72
<b>Figure 2.30.</b> (a) Schéma de principe d'un convoyeur électro statique utilisant une onde stationnaire et la gravité pour éliminer le sable d'un panneau solaire. (b) Dessin en coupe du convoyeur [106].....	73
<b>Figure 2.31.</b> Consommation électrique du système de nettoyage électrostatique.....	74
<b>Figure 2.32.</b> Distribution du champ électrique sur la surface du convoyeur électrique en une période.....	76
<b>Figure 2.33.</b> Trajectoires d'une particule chargée faible (a) ou élevée (b) à différentes positions initiales le long de la surface du convoyeur électrique .....	77
<b>Figure 2.34.</b> Variation des fractions de particules transportées vers l'avant (symboles carrés), vers l'arrière (symboles triangulaires) et non transportées (symboles delta) en fonction de la fréquence, à la fois avec interaction particule-particule (traits pleins) et sans interaction particule-particule (lignes en pointillé) [111].....	79
<b>Figure 2.35.</b> Densités spectrales de puissance du mouvement des particules (spectre de fréquence du mouvement temporel) pour une excitation à 2 Hz. Ligne continue : expérimentale ; ligne pointillée : simulation [113].....	82

<b>Figure 2.36.</b> Densités spectrales de puissance du mouvement des particules (spectre de fréquence du mouvement) pour une excitation à 5 Hz. Ligne continue : expérimentale ; ligne pointillée : simulation [91].....	82
<b>Figure 2.37.</b> Exemple des trajectoires des particules obtenues par modélisation numérique. (a) Kawamoto <i>et al.</i> [52]. (b) Horenstein <i>et al.</i> [115-116]. (c) Zhang Jie <i>et al.</i> [117].....	84
<b>Figure 3.1.</b> Représentation schématique du montage expérimental.....	88
<b>Figure 3.2.</b> Représentation photographique du dispositif expérimental.....	89
<b>Figure 3.3.</b> Schéma descriptif de convoyeur à ondes mobiles triphasé.....	90
<b>Figure 3.4.</b> Particules de PVC sphériques.....	92
<b>Figure 3.5.</b> Déplacement des particules suivant les ondes mobiles.....	93
<b>Figure 3.6.</b> Variation de la masse déplacée en fonction du temps pour plusieurs valeurs de la taille granulométrique des particules (U=2 kV, f= 50 Hz) .....	95
<b>Figure 3.7.</b> Déplacement des particules dans les deux sens.....	96
<b>Figure 3.8.</b> Sens de déplacement des particules sur le convoyeur .....	97
<b>Figure 3.9.</b> Masse des particules déplacées en fonction de la taille de particule PVC.....	98
<b>Figure 3.10.</b> Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la fréquence et trois dimensions différentes des particules (U= 2 kV).....	100
<b>Figure 3.11.</b> Forme du signal de la tension triphasée appliquée.....	102
<b>Figure 3.12.</b> Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension et trois dimensions différentes des particules (f= 50).....	103
<b>Figure 3.13.</b> Variation de la masse déplacée en fonction de la tension appliquée.....	104
<b>Figure 3.14.</b> Variation de la masse déplacée des particules en fonction de la fréquence, pour deux valeurs d'humidité différentes (U= 2 kV ; Taille granulométrique 125 $\mu\text{m}$ ) .....	105
<b>Figure 3.15.</b> Forces cohésives en fonction du diamètre de particule [131].....	106
<b>Figure 3.16.</b> Exemple de pont liquide [133].....	107
<b>Figure 3.17.</b> Variation de la masse déplacée en fonction du rapport « charge/masse, pour deux valeurs différentes de la fréquence (U=2 kV ; taille granulométrique 125 $\mu\text{m}$ ).....	108
<b>Figure 3.18.</b> (à gauche) Configuration du champ E pour un signal carré triphasé, tracé. (Droite) configuration du Potentiel électrostatique.....	109
<b>Figure 3.19.</b> Principe de chargement par décharge couronne.....	110
<b>Figure 3.20.</b> Dispositif expérimental du chargement par décharge couronne .....	111
<b>Figure 3.21.</b> Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension de chargement couronne et différentes valeurs de la tension $V_{\text{COM}}$ appliquée au convoyeur (f=50 Hz).....	113
<b>Figure 3.22.</b> Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension de chargement couronne et différentes valeurs de la tension $V_{\text{COM}}$ appliquée au convoyeur (f=100 Hz).....	115
<b>Figure 3.23.</b> Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension de chargement couronne et différentes valeurs de la tension $V_{\text{COM}}$ appliquée au convoyeur (f=150 Hz).....	117
<b>Figure 4.1.</b> Schéma descriptif du montage expérimental.....	124
<b>Figure 4.2.</b> Photographie du dispositif mécanique utilisé.....	124
<b>Figure 4.3.</b> Le convoyeur fixé sur une plaque vibrante .....	125
<b>Figure 4.4.</b> Pièces métalliques utilisées.....	126
<b>Figure 4.5.</b> Forces appliquées sur la pièce métallique.....	127
<b>Figure 4.6.</b> Description schématique de la charge d'induction et de la force d'attraction appliquée sur les pièces métalliques. A) Vue de dessus ; b) vue latérale.....	129
<b>Figure 4.7.</b> Variation de l'angle de décrochage en fonction de la tension appliquée .....	130
<b>Figure 4.8.</b> Variation de l'angle de décrochage en fonction de la tension appliquée pour les trois pièces avec deux valeurs d'humidités (RH=35%, RH=77%).....	132
<b>Figure 4.9.</b> Variation de l'angle de décrochage pour deux valeurs d'humidité différentes.....	133
<b>Figure 4.10.</b> Variation de l'angle de décrochage en fonction de la fréquence.....	134
<b>Figure 4.11.</b> Variation de l'angle de décrochage en fonction de la tension appliquée pour deux pièces d'acier galvanisé de mêmes dimensions et de masses différentes (1,6g, 1,3g).....	135
<b>Figure 4.12.</b> Variation de l'angle de décrochage en fonction des dimensions des pièces carrées de cuivre.....	136
<b>Figure 4.13.</b> Variation de l'angle de décrochage en fonction de la forme du signal (fréquence constante égale à 900 Hz).....	137
<b>Figure 4.14.</b> Forme de signaux de la tension appliqué au convoyeur à ondes mobiles.....	137
<b>Figure 4.15.</b> Distribution du potentiel sur le convoyeur en présence d'une pièce. a) Pièce métallique ; b) pièce en PVC.....	139
<b>Figure 4.16.</b> Variation de la Pureté du produit de cuivre après séparation en fonction de la fréquence (U=1,4 kV).....	141

## ***Liste des tableaux***

Tableau 1.1 Liste des paramètres utilisés dans la comparaison des forces .....	32
Tableau 4.1. Valeurs des masses des différentes tailles de feuille de cuivre.....	136

## ***Introduction générale***

La manipulation des matériaux pulvérulents est un procédé largement utilisé dans plusieurs applications industrielles. Le déplacement, la collecte, la classification et le filtrage des particules restent toujours un sujet d'actualité dans le domaine de la recherche et développement. Ces applications couramment utilisées peuvent servir dans plusieurs activités telles que : la peinture et le poudrage électrostatiques, les industries pharmaceutique et agroalimentaire, l'électrophotographie, la séparation électrostatique de granules, etc. [1]. Les méthodes électrostatiques utilisées dans de tels procédés sont très avantageuses par rapport aux méthodes mécaniques car elles ne nécessitent pas de pièces mobiles et elles sont caractérisées par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

Pour manipuler ces objets, on prend en considération l'effet de la force de Coulomb pour le contrôle du mouvement des particules au moyen de leurs charges, comme dans le cas des précipitateurs et séparateurs électrostatiques [2-4]. Les particules peuvent être chargées par l'utilisation des décharges à effet couronne ou par polarisation diélectrique [5-11], ou par des effets tribo-électriques qui se produisent lorsque les particules entrent en collision les unes avec les autres ou avec les parois des dispositifs dédiés [8, 9].

Les convoyeurs électrostatiques, connus aussi sous les noms : rideaux électriques (electric curtain [13]), écran électrodynamique (electrodynamic screen [14]) ou bouclier anti-poussière électrodynamique (electrodynamic dust shield [15]) pour certaines applications, se présentent comme un moyen avantageux pour manipuler des particules sur des surfaces. L'intérêt de la communauté électrostatique pour ces dispositifs ne cesse de s'agrandir.

Les convoyeurs électrostatiques sont composés d'une série d'électrodes parallèles disposées sur un support diélectrique, noyées dans un film mince et alimentées par un système de tension électrique polyphasée. Si le champ électrique est suffisamment élevé lors de l'application de la tension, la force de Coulomb et la force diélectrophorétique peuvent vaincre les forces d'attraction et

d'adhésion électrostatiques et mécaniques et entraînent le mouvement des particules.

Dans les années soixante-dix, Masuda a lancé une série d'études expérimentales et théoriques sur le comportement des particules sur les rideaux électriques. La réalisation de plusieurs dispositifs permettant d'identifier les divers phénomènes produisant la charge des particules dans lequel ces particules d'aérosols chargées se déplacent à travers la surface du convoyeur sous l'effet des champs alternatifs non uniformes. Masuda *et al.* ont également étudié la séparation de petites particules immergées dans un milieu liquide en utilisant un champ électrique à ondes progressives pour des applications en biologie [16].

Le travail présenté dans cette thèse consiste à étudier les paramètres qui affectent l'efficacité de déplacement des particules. Par ailleurs, quelques effets de facteurs les plus importants ont été analysés, tels que la taille des particules, la fréquence, l'amplitude, le nombre de phases et la forme du signal.

D'un autre côté, l'objectif de l'étude expérimentale sur les convoyeurs à ondes mobiles est totalement différent des applications basées sur le déplacement des particules : il s'agit d'une étude expérimentale effectuée sur l'influence de plusieurs facteurs du convoyeur à ondes mobiles sur la force d'attraction exercée par ces derniers sur des particules métalliques qui les retiennent attachées sur la surface.

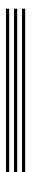
Cette thèse s'articule autour de quatre chapitres. **Le premier** chapitre synthétise les principales notions concernant la description de la technique des ondes mobiles. Dans la deuxième section de ce chapitre, une étude détaillée sur la technologie des écrans électrodynamiques EDS est présentée car elle offre une solution très intéressante pour atténuer les modules photovoltaïques de la poussière à l'aide des forces électrostatiques. Dans cette partie, nous détaillons un modèle analytique de la répartition des forces électrostatiques sur un écran transparent ainsi que les paramètres influents tels que la largeur des électrodes, l'espacement inter-électrodes, l'épaisseur et la permittivité relative du revêtement diélectrique.

Le **deuxième chapitre** est consacré à l'étude bibliographique sur l'évolution de la recherche dans le domaine des convoyeurs à ondes progressives et stationnaires, pour des applications terrestres et spatiales. Les différents types de convoyeurs ont été présentés dans cette section, leurs conceptions et leurs fonctions ont été ainsi décrites.

Le **troisième chapitre** porte sur l'étude expérimentale de l'efficacité de déplacement des particules avec un dispositif utilisant une configuration de convoyeurs à ondes progressives triphasées. Dans un premier temps, les résultats des études préliminaires sur la classification, la granulométrie et la charge des particules sont discutés. Ensuite, les paramètres influençant l'efficacité de déplacement des particules, tels que leur taille et leur charge, ou encore l'amplitude et la fréquence de la tension appliquée, sont étudiés.

Le **quatrième chapitre** est dédié à l'étude d'une force d'attraction électrique nouvellement observée sur les convoyeurs à rideaux électriques, appliquée sur les particules de métal en particulier. Un dispositif expérimental est réalisé avec un système qui permet son inclinaison jusqu'à un angle de  $180^\circ$ , pour analyser l'effet de la force d'attraction sur trois pièces de forme carrée en cuivre, bronze et acier.

## Généralités sur la technique des rideaux électriques



## 1. Introduction

Une particule représente une très petite parcelle très ténue d'une substance ou d'un corps matériel. Même si nous n'y prêtons guère attention, elles sont omniprésentes dans notre vie quotidienne. Elles apparaissent dans une grande majorité de produits que nous utilisons chaque jour tel que les poudres (café, sucre, farine, épices...), les produits cosmétiques, les produits pharmaceutiques, les produits pour la construction (ciments, plâtres,...) et les polluants atmosphériques. L'existence de la matière particulaire est presque universelle : poudres, sables, argiles, limons, smog, fumée, cendres, pigments de peintures, latex, minéraux. Littéralement, une particule est définie comme une très petite partie, parcelle d'une chose matérielle (Larousse). Selon la norme ISO 22412 [17], la NIST (National Institute of Standards and Technology) définit une particule par l'affirmation suivante : toute phase condensée tridimensionnelle discontinue dans un système dispersé peut généralement être considérée comme une particule ; par exemple, des gouttelettes dans une émulsion ou des matières solides dispersées dans un liquide [18].

Une particule peut être une macromolécule (une molécule ayant une masse moléculaire relativement élevée) ou un ensemble de molécules, naturelles ou synthétiques, organiques ou inorganiques. Plus généralement, les particules peuvent être tout simplement des morceaux minuscules d'un matériau en vrac, comme par exemple les oxydes métalliques, les sucres ou les poudres pharmaceutiques. Les particules se trouvent généralement dispersées dans un autre milieu. On peut distinguer différents modes de dispersion selon les phases physiques des particules et du milieu environnant. Les modes les plus répandus sont : les poudres sèches, les suspensions colloïdales (particules solides dispersées dans un milieu liquide), les aérosols (des gouttelettes ou des particules solides en dispersion dans une phase gazeuse) et les émulsions (particules d'un liquide dispersées dans un autre milieu liquide). Les dispersions des particules en mode liquide ou gazeux suscitent plus d'intérêt chez les scientifiques et les industriels [19].

## 1.2. Manipulation des particules par champ électrique

La manipulation des particules est un procédé largement utilisé dans plusieurs applications industrielles. Trouver des méthodes innovantes, peu coûteuses et efficaces pour les classer, contrôler, filtrer, échantillonner, déplacer et transporter reste toujours un sujet d'actualité dans le domaine de la recherche et développement.

L'utilisation du champ électrique pour les phénomènes électrostatiques afin de manipuler les particules présente un atout avantageux par rapport aux méthodes mécaniques. Car un simple champ électrique autour de cette particule peut la faire déplacer de part et d'autre selon des critères bien déterminés.

En outre, le phénomène de l'électromécanique des particules s'exprime par la théorie qui s'intéresse aux forces et aux couples exercés sur des particules ou des ensembles de particules de taille inférieure à environ  $10^{-3}\text{m}$  sous l'action d'un champ électrique, ainsi que la mécanique et la dynamique induite par ces forces [20]. Le champ électrique peut être imposé par des moyens externes, par exemple des électrodes dans des microsystemes, ou par d'autres particules voisines chargées, polarisées, ou magnétisées.

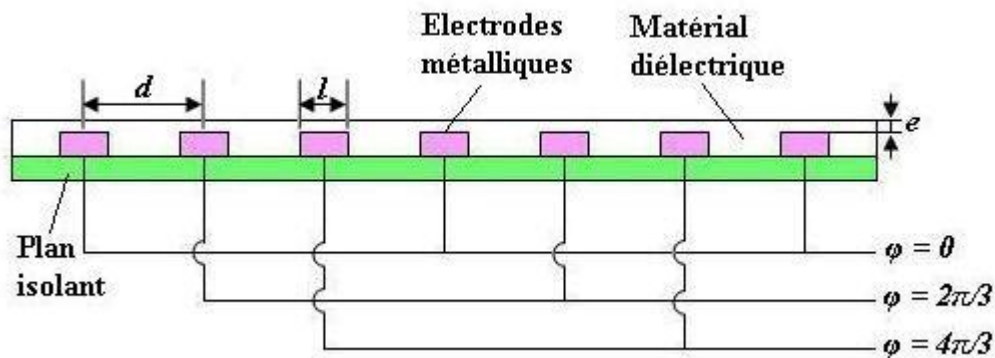
L'application d'un champ électrique alternatif à une suspension de particules peut engendrer également le déplacement à la fois des particules et du fluide de différentes façons [21]. Afin de comprendre comment les particules et les fluides se déplacent dans les microsystemes, il est important d'être en mesure de déterminer les caractéristiques des forces et/ou des couples qui régissent le comportement sous différentes conditions modélisées de la façon la plus réaliste possible.

### 1.2.1. Principe des rideaux électriques

#### A. Rideaux électriques multi-phases

Electric curtain, en anglais ou « rideau électrique » est une technique intéressante développée pendant les années 1970 par Masuda pour le confinement et le transport d'aérosols chargés [22]. Dans le dispositif triphasé

(Figure 1.1), les électrodes sont connectées et réalisent un ensemble de trois « peignes » intercalés alimentés par des tensions périodiques ayant un déphasage de  $2\pi/3$  et qui génèrent un champ progressif (appelé « traveling-wave electric curtain » en anglais) dans la direction perpendiculaire aux axes des électrodes [23].



**Figure 1.1.** Section transversale d'un rideau électrique triphasé.

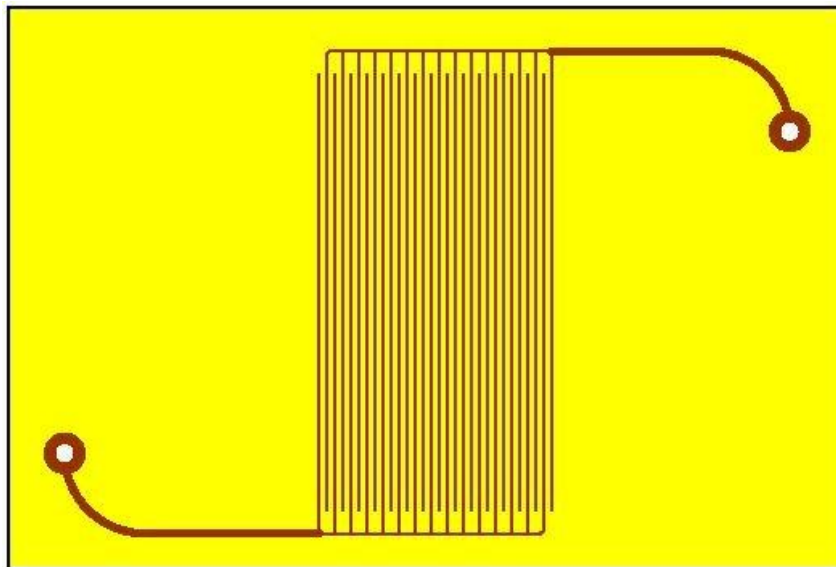
Le rideau électrique polyphasé crée un champ électrique tournant au-dessus de la surface isolante, où on constate un mouvement cyclique des particules chargées. Mais le champ électrique diminue en s'éloignant du plan des électrodes de façon que le cycle n'est pas fermé ; sur une période du champ alternatif, l'analyse du mouvement d'une particule chargée a établi que plusieurs forces exercées sur la particule ont une composante verticale qui peut compenser la force de gravitation ainsi que la force d'image. La direction de ces forces dépend généralement du signe de la charge [24]. La force résultante est proportionnelle à la charge de la particule et au champ électrique et dépend aussi du gradient de champ. Ceci explique le balayage horizontal des particules chargées qui sortent ainsi de la zone soumise au champ.

## B. Rideaux électriques à ondes stationnaires

D'autres recherches ont également développé une autre technique plus simple où deux « peignes » intercalés sont alimentés par une tension monophasée (Figure 1.2), l'un est connecté à la tension alternative et l'autre est relié à la terre.

Dans ce cas, le champ électrique est oscillant (« standing-wave » en anglais) et, en un point, le champ a une direction définie et une amplitude oscillant à la période imposée. Une particule chargée unique a donc un mouvement oscillatoire.

Pour le dispositif horizontal, il apparaît une force résultante verticale qui peut repousser la particule chargée ; mais, pour une amplitude suffisamment faible du mouvement des particules, la composante horizontale moyennée spatialement est nulle et une particule unique devrait être piégée dans la région autour de la position initiale, entre les deux électrodes les plus proches. Si l'amplitude du champ est plus élevée, le mouvement peut être beaucoup plus complexe et un déplacement assez aléatoire de particules finissant par quitter la zone soumise au champ est généralement observé. Ce processus pourrait être utilisé pour étudier et construire de nouveaux types de précipitateurs et de séparateurs électrostatiques.



**Figure 1.2.** Rideau électrique à ondes stationnaires

Dans ce contexte, les chercheurs ont dégagé plusieurs hypothèses sur l'origine de la charge des particules qui se trouve sur les rideaux électriques à ondes stationnaires. En premier lieu, l'effet triboélectrique qui offre aux particules des charges supplémentaires qui peuvent les repousser de la surface du convoyeur.

D'autre part, on ne sait pas si le mouvement des particules est une conséquence de leur charge antérieure ou s'il est à l'origine de leur charge (par collision ou contact). En deuxième lieu, une analyse bien détaillée sur le dépoussiérage qui n'est pas attendu pour un champ électrique oscillant stationnaire.

D'abord, il y a beaucoup de particules qui sautent plus ou moins au hasard et les interactions attractive et répulsive entre elles vraisemblablement ont un effet résultant non nul. Deuxièmement, même si nous considérons une particule unique chargée, le mouvement périodique supposé le long d'une petite partie d'une ligne de champ est une image asymptotique simplifiée valable pour un temps suffisamment grand.

Le régime transitoire du mouvement d'une particule dépend de sa taille et de sa charge et aussi de la fréquence de la tension appliquée. Par ailleurs, pour une force électrique élevée et/ou une faible fréquence du champ, l'amplitude de la quasi-oscillation d'une particule chargée peut être plus grande que la distance entre axes des électrodes adjacentes ; la combinaison avec la charge et les fluctuations du champ peuvent amener à un déplacement de la position moyenne de la particule (moyennée sur une période) et à des sauts de temps en temps d'une zone d'inter-électrode à une autre. Autrement, la petite échelle et le mouvement du gaz plus ou moins au hasard induit par les particules qui sautent peuvent jouer un rôle et contribuer à une sorte de diffusion, éventuellement

### **1.2.2. Technologie de l'EDS pour les rideaux électriques**

L'énorme potentiel des installations de récupération d'énergie solaire, à fournir une énergie propre avec une empreinte carbone minimale, est entravée par l'accumulation de poussière sur les surfaces optiques : l'effet dit «la salissure». Ce facteur de limitation des performances sévère diminue l'efficacité du capteur solaire par l'absorption et la diffusion de la lumière incidente [25-27]. La baisse des performances pourrait se produire progressivement au cours du temps d'exposition, en raison de l'accumulation de poussière atmosphérique ; où brusquement en raison d'une tempête de poussière, dans laquelle la perte

d'efficacité peut atteindre 60% en moins de 6 h [28]. La technologie de l'écran électrodynamique (EDS) offre une solution intéressante pour éliminer les particules de poussière des surfaces optiques à l'aide de forces électrostatiques.

L'atténuation des pertes de salissures dans les capteurs solaires, à l'aide de jets d'eau à haute pression, souvent mélangés à des détergents, est la méthode la plus couramment pratiquée dans les centrales solaires à grande échelle [29-31]. La rareté des ressources en eau, les grandes quantités d'eau utilisées, les dépenses de dépoussiérage et le coût de la main-d'œuvre sont les principaux facteurs prohibitifs associés aux méthodes de nettoyage à base d'eau. En variante, la technologie des écrans électrodynamiques (EDS) permet le dépoussiérage automatique à l'aide de forces électrostatiques. L'EDS est constitué d'un ensemble d'électrodes parallèles, transparentes ou opaques, déposées sur un substrat en verre et noyé par un mince film diélectrique transparent.

Lorsque des impulsions triphasées à basse fréquence (5-10 Hz) et haute tension sont appliquées aux électrodes, les particules de poussière accumulées sur la surface EDS sont chargées électrostatiquement et repoussées par les forces électrostatiques. La force de Coulomb  $qE$  est la force prédominante parmi les forces de répulsion. Par conséquent, dans cette partie, nous détaillons un modèle analytique de la répartition des forces électrostatiques sur un écran transparent ainsi que les paramètres influents, à savoir, la largeur des électrodes, l'espacement inter-électrodes, l'épaisseur et la permittivité relative du revêtement diélectrique dans la distribution du champ électrique. La distribution du champ électrique générée par l'EDS n'étant pas uniforme, la poussière accumulée, qu'elle soit chargée ou neutre, subisse des forces diélectrophorétiques (DEP) [32].

### 1.3. Manipulation des particules par la diélectrophorèse

Dans les années 1950, Herbert Pohl s'intéressa aux forces induites sur des particules diélectriques par un champ électrique non uniforme. Il introduit dès lors le terme de « diélectrophorèse » (DEP), dérivé du mot grec *phorein* qui traduit le fait qu'une particule est transportée en fonction de ses propriétés diélectriques. Les premières recherches de Pohl se focalisaient sur des applications industrielles

comme la séparation de microparticules de carbone noir et des échantillons de polychlorure de vinyle (PVC) [32].

Dans les années 60 et 70, il concentra ses efforts théoriques et expérimentaux sur des applications biologiques comme la séparation de cellules ou de bactéries. Le principal problème lié aux expériences de diélectrophorèse était la création d'un gradient de champ électrique suffisamment intense pour manipuler les microparticules sans atteindre la tension de claquage du diélectrique environnant. En effet, les tensions utilisées lors de ces expériences étaient de l'ordre de plusieurs dizaines de kilovolts, ce qui nécessitait par ailleurs des moyens matériels conséquents. En 1978, Pohl publia son livre consacré à l'étude de la diélectrophorèse [32] qui fait toujours figure de référence.

### 1.3.1. Principe de la diélectrophorèse

La diélectrophorèse (DEP) est une technique électrocinétique décrivant le mouvement de déplacement de particules électriquement polarisées sous l'action d'un champ électrique non uniforme en amplitude. Ce mouvement induit est relié aux propriétés diélectriques intrinsèques des particules, ce qui constitue un point fort de la technique de DEP pour la manipulation, l'analyse, la caractérisation, ou encore la séparation et le tri de différents types de particules.

Les expressions analytiques pour les forces DEP multipolaires jusqu'au troisième ordre sont dérivées, basées sur les solutions de forme fermée de la distribution du champ électrique. Les expressions analytiques des forces DEP multipolaires permettent d'étudier l'impact des paramètres de conception EDS sur ces forces. Aussi, elles peuvent être utilisées dans l'équation du mouvement pour la modélisation de la trajectoire des particules, ce qui semblait une tâche redoutable auparavant [33].

### 1.4. Analyse des forces exercées sur les particules

Le but ultime des convoyeurs à rideaux électriques est d'assurer à chaque point donné sur la surface, la somme des forces de répulsion est supérieure à celles d'attraction dans l'équilibre des forces exercées sur la particule. En d'autres

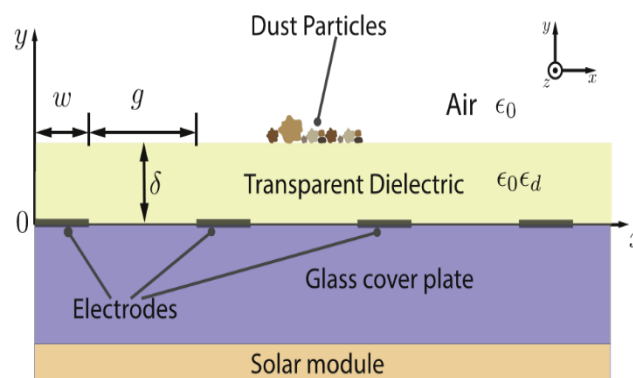
termes, pour qu'une particule déplace de la surface EDS, la force de coulomb exercée doit dominer toutes les forces d'attraction qui maintiennent la particule sur la surface. Les forces d'attraction comprennent la force de van der Waals et la force capillaire. Pour une comparaison préliminaire de ces deux forces avec les autres forces, dans lesquels une particule sphérique est en contact avec une surface, les deux étant parfaitement lisses. En outre, nous abordons le rôle important de l'humidité relative dans l'augmentation de la force capillaire et par conséquent les performances inférieures de l'EDS dans le processus de dépoussiérage.

### 1.4.1. Solutions analytiques

#### 1.4.1.1. Distribution du champ électrique

La figure 1.3, montre la coupe transversale d'une configuration EDS avec un revêtement diélectrique transparent des électrodes. L'épaisseur de la couche diélectrique et sa permittivité relative sont représentées respectivement par  $\delta$  et  $\epsilon_d$ . En outre, la largeur des électrodes et l'espacement inter-électrodes sont respectivement  $w$  et  $g$ . On suppose que la hauteur des électrodes est négligeable par rapport à l'épaisseur de la couche diélectrique [34]. L'EDS est alimenté par une tension triphasée, la période spatiale fondamentale  $T_s$  s'écrit :

$$T_s = 3(w + g) \quad (1.1)$$



**Figure 1.3.** Coupe transversale de la configuration EDS avec une couche de revêtement diélectrique transparent des électrodes

Puisque nous supposons qu'il n'y a pas de charge nette dans l'espace au-dessus de la couche diélectrique, c'est-à-dire que les particules de poussière déposées n'ont pas initialement une charge électrique nette, nous pouvons écrire l'équation de Laplace pour le potentiel électrique sur la surface EDS  $\phi(x, y)$  en coordonnées cartésiennes:

$$\frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(x, y)}{\partial y^2} = 0, \quad 0 \leq x \leq T_s, \quad \delta \leq y < \infty \quad (1.2)$$

Puisque les électrodes sont placées périodiquement dans la direction  $x$  avec une période spatiale fondamentale  $T_s$ , le potentiel électrique à  $y = 0$  peut être exprimé en termes d'une série de Fourier comme :

$$\phi(x, 0) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos(\Omega_0 kx) + b_k \sin(\Omega_0 kx) \quad (1.3)$$

Sayyah et al. [35] ont fourni les expressions analytiques complètes pour les distributions de champ électrique dans un EDS avec deux couches empilées de revêtements diélectriques. En suivant la même approche, nous obtenons les solutions pour les distributions de champ électrique dans la couche diélectrique et sur la surface EDS. En désignant les vecteurs unitaires dans les directions  $x$  et  $y$  comme  $a_x$  et  $a_y$ , respectivement, le champ électrique dans la couche diélectrique  $E_d$  et dans l'air ( $y \geq \delta$ )  $E_a$  s'écrit :

$$\begin{aligned} E_d(x, y) = & \Omega_0 \left\{ \sum_k \frac{\sinh [k\Omega_0(y-\delta)]}{\sinh (k\Omega_0\delta)} [-ka_k \sin(\Omega_0 kx) + \right. \\ & kb_k \cos(\Omega_0 kx)] + \sum_k \frac{\sinh(k\Omega_0 y)}{\sinh (k\Omega_0\delta)} [kg_k \sin(\Omega_0 kx) - kh_k \cos(\Omega_0 kx)] \left. \right\} a_x + \\ & \Omega_0 \left\{ \sum_k \frac{\cosh [k\Omega_0(y-\delta)]}{\sinh (k\Omega_0\delta)} [ka_k \cos(\Omega_0 kx) + kb_k \sin(\Omega_0 kx)] - \right. \\ & \left. \sum_k \frac{\sinh(k\Omega_0 y)}{\sinh (k\Omega_0\delta)} [kg_k \cos(\Omega_0 kx) - kh_k \sin(\Omega_0 kx)] \right\} a_y \end{aligned} \quad (1.4)$$

Et

$$\begin{aligned} E_a(x, y) = & \left\{ \Omega_0 \sum_k e^{-\Omega_0(y-\delta)} [kg_k \sin(\Omega_0 kx) - kh_k \cos(\Omega_0 kx)] \right\} a_x \\ & + \left\{ \Omega_0 \sum_k e^{-\Omega_0(y-\delta)} [kg_k \cos(\Omega_0 kx) + kh_k \sin(\Omega_0 kx)] \right\} a_y \end{aligned} \quad (1.5)$$

Dans lequel les coefficients de Fourier  $g_k$  et  $h_k$  sont obtenus à partir des équations. (1.6) et (1.7), respectivement, en supposant que les coefficients de Fourier  $a_k$  et  $b_k$  sont fournis :

$$g_k = \frac{\varepsilon_d}{\sinh(k\Omega_0\delta) + \varepsilon_d \cosh(k\Omega_0\delta)} a_k \quad (1.6)$$

$$h_k = \frac{\varepsilon_d}{\sinh(k\Omega_0\delta) + \varepsilon_d \cosh(k\Omega_0\delta)} b_k \quad (1.7)$$

Comme on peut le voir dans l'équation (1.5), la distribution du champ électrique dépend de l'épaisseur de la couche diélectrique  $\delta$ , de la largeur des électrodes et de l'espacement inter-électrodes car  $\Omega_0 = 2\pi/3(w + g)$  et les coefficients de Fourier  $g_k$  et  $h_k$ . Ces derniers sont ainsi des fonctions de la permittivité relative de la couche diélectrique.

#### 1.4.1.2. Forces diélectrophorétiques multipolaires (DEP)

Comme indiqué dans la section précédente, la distribution du champ électrique sur la surface EDS est un champ électrique non uniforme dans l'espace. Lorsqu'une particule, neutre ou chargée, s'approche ou se dépose simplement sur la surface de l'EDS, elle est exposée au champ électrique non uniforme appliqué dans l'espace au-dessus de l'EDS. Dans cette partie, les charges électriques sont redistribuées différemment aux deux interfaces de la particule et du milieu (air). Cette charge est appelée charge interfaciale de Maxwell/Wagner [35].

Ce phénomène de polarisation apparaît lorsque plusieurs diélectriques sont soumis à un champ électrique externe dans leur milieu de suspension. Les interfaces de ces diélectriques vont jouer un rôle particulier dans le phénomène de polarisation. Supposons que ces diélectriques sont caractérisés par des permittivités et des conductivités électriques différentes. D'une manière générale, un milieu hétérogène, constitué de plusieurs de ces diélectriques, présente une permittivité électrique globale qui devient dépendante de la fréquence : on parle alors de dispersion diélectrique interfaciale. Cette dépendance fréquentielle est la conséquence de l'accumulation de charges à l'interface entre les diélectriques. En général, le phénomène de polarisation interfaciale est dominant lorsqu'un des

milieux diélectriques est de petite dimension par rapport aux autres et qu'il possède une conductivité électrique bien plus faible que celle des autres.

Le dipôle induit subit des intensités différentes du champ électrique aux deux extrémités en raison de la non-uniformité du champ et ce déséquilibre des forces donne lieu au mouvement des particules. C'est ce qu'on appelle l'effet de diélectrophorèse (DEP).

## 1.4.2. Analyse numérique

### 1.4.2.1. Vérification numérique de la solution analytique

La solution pour la distribution du champ électrique peut être utilisée pour formuler le problème d'une activation EDS monophasée ou polyphasée. Nous supposons que l'EDS est connecté à une alimentation triphasée qui génère des formes d'onde rectangulaires avec un rapport cyclique de 50%. Les formes d'onde de tension dans une période de temps sont représentées sur la figure 1.4, dans laquelle les phases A, B et C forment six combinaisons différentes de tensions, numérotées de 1 à 6.

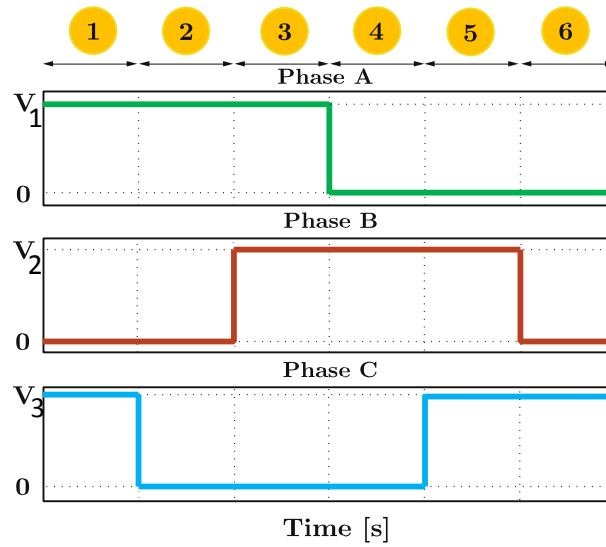
Les coefficients de Fourier  $a_k$  et  $b_k$ , introduits dans l'équation (1.3), sont obtenus à partir des éléments suivants :

$$a_k = \frac{2}{T_s} \int_{T_s} \phi_d(x, 0) \cos(\Omega x) dx \quad (1.8)$$

$$b_k = \frac{2}{T_s} \int_{T_s} \phi_d(x, 0) \sin(\Omega x) dx \quad (1.9)$$

Dans laquelle  $\phi_d(x, 0)$  est le potentiel électrique à  $y = 0$  et  $\Omega = k \Omega_0$ . En supposant un changement de la valeur de la tension linéaire entre des électrodes adjacentes, les expressions des coefficients de Fourier  $a_k$  et  $b_k$  sont obtenues comme suit :

$$a_k = \frac{1}{\pi g \Omega_0 k^2} \{ (V_2 - V_1) [\cos(k \Omega_0 (w + g)) - \cos(k \Omega_0 w)] + (V_3 - V_2) [\cos(2k \Omega_0 (w + g)) - \cos(k \Omega_0 (2w + g))] + (V_1 - V_3) [1 - \cos(k \Omega_0 (3w + 2g))] \} \quad (1.10)$$

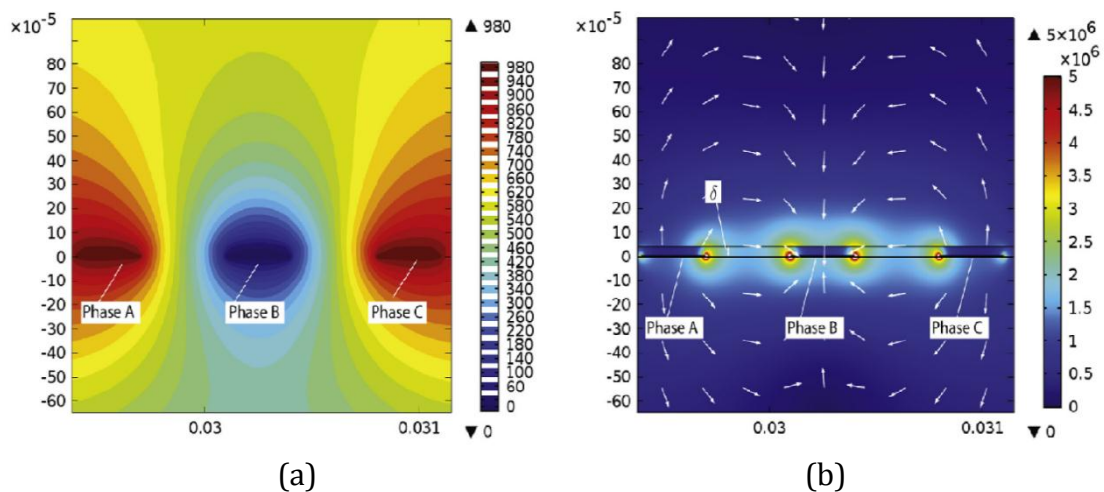


**Figure 1.4.** Formes d'onde de tension rectangulaires triphasées avec un rapport cyclique de 50% sur une période de temps  $T_t$

$$b_k = \frac{1}{\pi g \Omega_0 k^2} \{ (V_2 - V_1) [\sin(k \Omega_0 (w + g)) - \sin(k \Omega_0 w)] + (V_3 - V_2) [\sin(2k \Omega_0 (w + g)) - \sin(k \Omega_0 (2w + g))] + (V_1 - V_3) [\sin(k \Omega_0 (3w + 2g))] \} \quad (1.11)$$

Dans lequel  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  désignent respectivement les tensions de chaque phase à chaque instant de temps. Les tensions  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  commutent entre 0 et  $V$ , comme indiqué sur la figure 1.4. Une fois que les coefficients de Fourier  $a_k$  et  $b_k$  sont calculés, les coefficients  $g_k$  et  $h_k$  sont obtenus à partir des équations (1.6) et (1.7), en conséquence. Il convient de souligner à nouveau que les tensions  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  étant des fonctions du temps  $t$ , les coefficients de Fourier  $a_k$  et  $b_k$  sont également des fonctions du temps. Ce point doit être implicitement pris en compte en travaillant avec les coefficients de Fourier.

Afin de valider les solutions analytiques fournies dans la section précédente pour la distribution du champ électrique, le modèle EDS avec une couche de revêtement diélectrique transparent a été développé dans le logiciel COMSOL® Multiphysics® par l'analyse éléments finis (FEA) (Finite Element Analysis). La figure 1.5 montre les résultats pour le potentiel électrique et la norme de champ électrique, c'est-à-dire  $E = (E_x^2 + E_y^2)^{0.5}$ , ainsi que le champ vectoriel électrique dans une période spatiale fondamentale. Le potentiel électrique maximum et minimum est de 974 et 44 V, respectivement, sur la surface EDS. Comme on peut s'y attendre, les vecteurs de champ électrique sur la figure 1.5 (b) proviennent des électrodes excitées (première et troisième) et se terminent dans l'électrode avec un potentiel nul (deuxième électrode). La composante normale du champ électrique  $E_y$  atteint sa valeur maximale de 2.062 MV / m sur la surface EDS juste au-dessus de la fin de la première et du début de la troisième électrode dans la période pendant laquelle les deux électrodes sont alimentées à 1 kV. La valeur minimale de  $E_y$  est de -2.67 MV / m, juste au-dessus des pointes de la deuxième électrode qui est à potentiel électrique nul. Le maximum de la norme de champ électrique atteint 3.11 MV / m en fin de seconde électrode.



**Figure 1.5.** Résultats de la simulation numérique utilisant un logiciel d'analyse par éléments finis pour le (a) potentiel électrique (unité : V) et (b) la norme de champ électrique  $|E|$  (unité : V / m) et le champ vectoriel électrique dans une période spatiale fondamentale pour le modèle EDS [34]

Les unités représentées dans la figure 1.5 des axes vertical et horizontal sont en mètres. La hauteur des électrodes est considérée comme étant de 5  $\mu\text{m}$ . Les tensions des phases A, B et C sont respectivement de 1 kV, 0 et 1 kV. La largeur d'électrode, l'espacement interélectrode et l'épaisseur du revêtement diélectrique sont considérés comme étant respectivement de 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$  et 50  $\mu\text{m}$ . La permittivité relative du revêtement diélectrique est de 3.

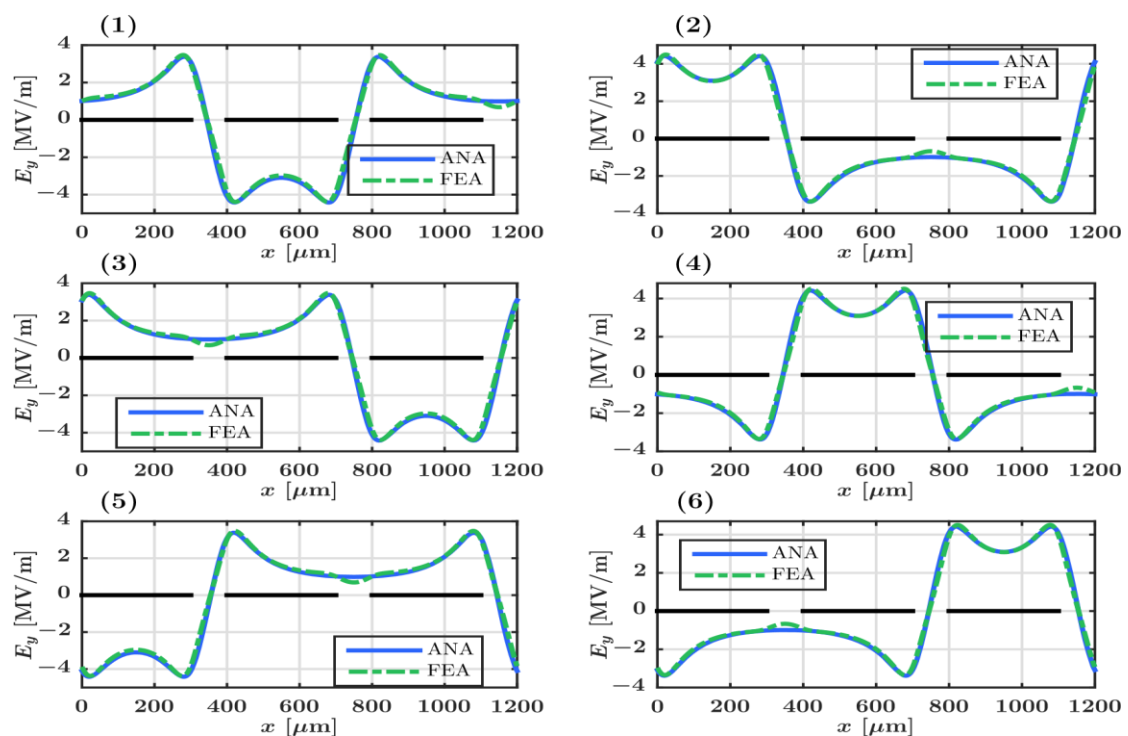
La composante normale du champ électrique  $E_y$ , a été calculée pour six cas différents des combinaisons de tension, mis en évidence sur la figure 1.5, en utilisant les solutions analytiques (ANA). Les résultats ont été comparés à l'analyse par éléments finis (FEA) donne la figure 1.6. Les positions des trois électrodes dans une période spatiale fondamentale le long de l'axe des  $x$  sont mises en évidence par des barres noires. Pour obtenir les composantes du champ électrique à partir de la méthode ANA, les coefficients de Fourier  $a_k$  et  $b_k$  ont été initialement calculés pour chaque cas de combinaison de tension à partir des équations. (1.10) et (1.11). Ensuite, les coefficients de Fourier  $g_k$  et  $h_k$  sont calculés selon les équations. (1.6) et (1.7). Les composantes du champ électrique sur la surface EDS (c'est-à-dire  $y = \delta$ ) peuvent être calculées en utilisant l'expression pour la distribution du champ électrique dans l'air comme fourni dans l'équation (1.5). Le maximum  $E_y$  atteint 3,49 MV / m dans les cas 1, 3 et 5 ; tandis que dans les cas 2, 4 et 6, le maximum  $E_y$  est de 4,52 MV / m. Comme on peut le voir, les résultats analytiques sont en très bon accord avec les résultats de la simulation numérique. Afin d'examiner l'exactitude des solutions analytiques, nous définissons le paramètre «pourcentage d'erreur» comme

$$l'erreur \% = \frac{|FEA-ANA|}{FEA} \times 100\% \quad (1.11)$$

Le pourcentage d'erreur de valeur maximale dans une période spatiale fondamentale de la figure 1.6 est de 1,6%, 3,6%, 2,9%, 5,9%, 6,7% et 5,5% pour les cas 1 à 6, respectivement. L'écart le plus significatif entre les deux méthodes se produit lorsque les électrodes adjacentes sont toutes les deux à un potentiel nul ou les deux à 1 kV. La différence entre les résultats des deux méthodes est attribuable au fait que la variation de tension entre les électrodes adjacentes a été

considérée comme linéaire dans l'approche analytique, tandis que la méthode FEA fournit un profil de tension plus précis.

Dans le cas 2 de la figure 1.6, le procédé analytique suppose un potentiel électrique nul le long de l'axe  $x$  entre les deuxième et troisième électrodes, toutes deux ayant un potentiel nul. Cependant, le profil de tension fourni par le procédé FEA augmente de 0 dans la deuxième électrode à 31,1 V puis diminue à nouveau à zéro lorsqu'il atteint la troisième électrode. Sur des lignes similaires, dans le cas 3 de la figure 1.6, lorsque la première et la deuxième électrode sont à un potentiel électrique de 1 kV, le profil de tension fourni par le procédé FEA montre une diminution du potentiel électrique entre les électrodes susmentionnées jusqu'à 957,2 V alors que la tension est supposée être toujours à 1 kV le long de l'axe des  $x$  dans la méthode ANA. Les modèles analytiques existants discutés fournissent de meilleures approximations de la tension et plus proches de la méthode FEA [36-38]. Fournir un modèle détaillé du profil de tension améliorera la précision de la méthode analytique, ce qui peut être un sujet de recherche prometteur pour des études ultérieures.

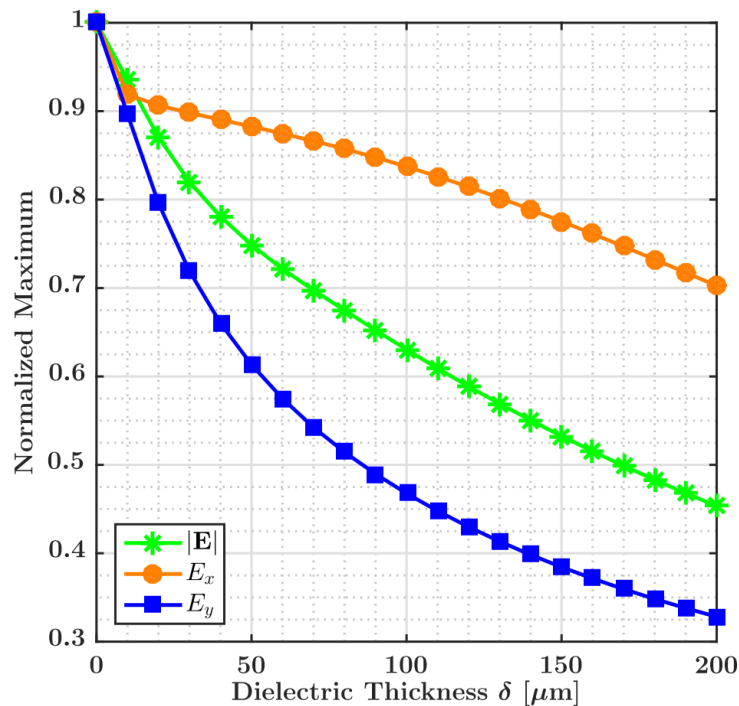


**Figure 1.6.** Comparaison des résultats analytiques (ANA) avec des simulations numériques utilisant un logiciel d'analyse par éléments finis (FEA) [34]

Les paramètres utilisés dans la figure 1.6 sont les suivants : pour  $w = 300 \mu\text{m}$  et  $g = 100 \mu\text{m}$  dans une période spatiale fondamentale  $T_s = 1200 \mu\text{m}$  pour six combinaisons de tension différentes. La composante normale du champ électrique (unité :  $\text{MV} / \text{m}$ ) sur la surface EDS est illustrée par rapport à  $x$ . Les positions des première, deuxième et troisième électrodes sont respectivement à  $[0, 300 \mu\text{m}, 400 \mu\text{m}, 700 \mu\text{m}]$  et  $[800 \mu\text{m}, 1100 \mu\text{m}]$ . L'amplitude des impulsions de tension est fixée à  $1 \text{ kV}$ . L'épaisseur du revêtement diélectrique est de  $50 \mu\text{m}$  et sa permittivité relative est de 3.

### A. Influence de l'épaisseur diélectrique

Comme prévu dans l'équation (1.5), la distribution du champ électrique dans l'air dépend explicitement de l'épaisseur de la couche diélectrique  $\delta$ . La figure 1.7 montre comment le maximum normalisé de  $|E|$ ,  $E_y$  et  $E_x$  sur la surface EDS dans une période spatiale fondamentale dépend de l'épaisseur du revêtement diélectrique. La normalisation sur la figure 1.7 est effectuée par rapport à la distribution du champ électrique à  $y = 0$  lorsqu'il n'y a pas de revêtement diélectrique : les électrodes sont exposées directement à l'air. Bien que lorsque l'épaisseur diélectrique augmente, le maximum normalisé dans les trois courbes diminue considérablement : la baisse de  $E_y$  est plus significative, suivie de  $|E|$  et  $E_x$ . Lorsque  $\delta$  augmente de 0 à  $200 \mu\text{m}$ ,  $|E|$ ,  $E_y$  et  $E_x$  diminuent jusqu'à environ 54%, 30% et 68%, respectivement. Lorsque l'épaisseur diélectrique augmente de 0 à  $50 \mu\text{m}$ , les  $|E|$ ,  $E_y$  et  $E_x$  subissent des pertes d'environ 25%, 12% et 38,7%, respectivement. Cette diminution est moins importante pour des valeurs plus élevées de  $\delta$ . Par exemple, lorsque  $\delta$  augmente de  $100 \mu\text{m}$  à  $150 \mu\text{m}$ , les pertes correspondantes dans  $|E|$ ,  $E_y$  et  $E_x$  sont respectivement de 15,5%, 7,4% et 17,8%.



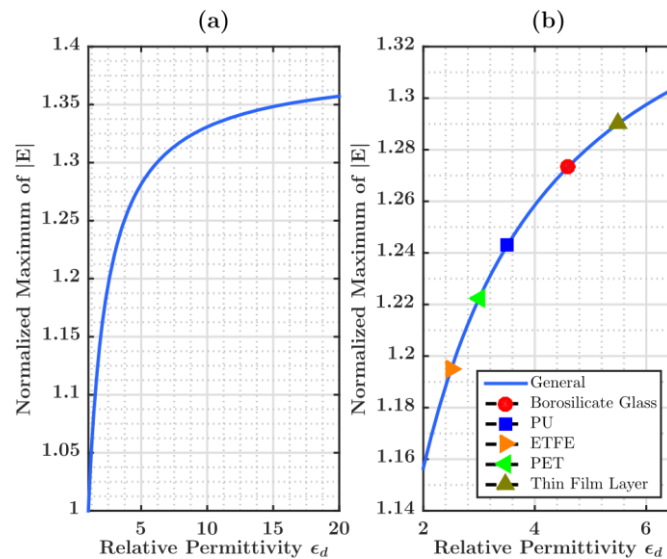
**Figure 1.7.** L'impact de l'épaisseur de la couche diélectrique  $\delta$  dans le maximum normalisé des composants de champ électrique et  $E$ . La largeur d'électrode et l'espacement inter-électrode sont fixés à  $100 \mu\text{m}$  et  $700 \mu\text{m}$ , respectivement. La permittivité relative de la couche diélectrique est de  $\epsilon_d = 3$ . Les tensions des phases A, B et C sont fixées à  $1 \text{ kV}$ ,  $0$  et  $1 \text{ kV}$ , respectivement

## B. Influence de la permittivité relative

La figure 1.8 (a) montre les valeurs maximales normalisées du champ électrique  $|E|$  sur la surface EDS dans une période spatiale fondamentale en fonction de la permittivité relative. La normalisation se fait par rapport à  $\epsilon_d = 1$  : la couche diélectrique est de l'air. Comme on peut l'observer les valeurs normalisées de  $|E|$  augmentent lorsque la permittivité diélectrique du revêtement diélectrique augmente. La pente de la courbe est élevée aux valeurs inférieures de la permittivité relative, alors qu'elle diminue très rapidement après avoir dépassé la permittivité relative de 10.

Cinq matériaux diélectriques candidats différents utilisés pour l'EDS, à savoir le verre borosilicate, le polyuréthane (PU), l'éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE), le polyéthylène téréphtalate (PET) et une couche de film mince sont mis

en évidence sur la figure 1.8 (b). L'utilisation de ces matériaux donne lieu à des augmentations de 19%, 22%, 24%, 27% et 29% du maximum normalisé de champ électrique. L'intensité, respectivement, par rapport à l'air. Bien que la figure 1.8 (a) montre le comportement du maximum de  $|E|$  en fonction de la permittivité relative, le maximum des composantes tangentielle et normale de la distribution du champ électrique a des comportements similaires.



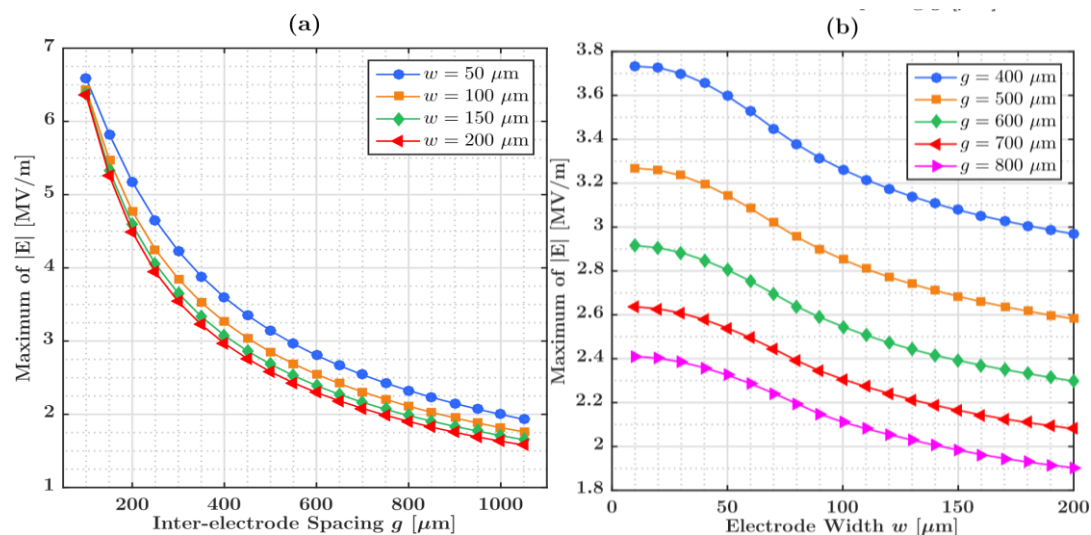
**Figure 1.8.** Maximum normalisé de  $|E|$  en fonction de la permittivité relative  $\epsilon_d$  (a) et de la partie agrandie de la courbe (b)

L'épaisseur du revêtement diélectrique a été considérée comme 100  $\mu\text{m}$ . Les tensions des phases A, B et C sont établies à 1 kV, 0 et 0, respectivement. La largeur des électrodes et l'espacement inter-électrodes sont respectivement de 100  $\mu\text{m}$  et 700  $\mu\text{m}$ . Les permittivités relatives pour le verre borosilicaté, le PU, l'ETFE, le PET et une couche de film mince (verre borosilicaté) sont respectivement de 4,6, 3,5, 2,5, 3 et 5,5.

Le comportement observé sur la figure 1.8 (a) est justifiable en utilisant le concept de capacité. Les deux électrodes adjacentes dans la configuration EDS forment un condensateur dans lequel le milieu diélectrique du condensateur équivalent est constitué de la couche diélectrique transparente et de l'air. Puisque la constante diélectrique est une mesure de la façon dont le matériau concentre le flux électrique, l'augmentation de la permittivité relative de la couche diélectrique transparente augmentera l'intensité du champ électrique sur la surface EDS.

### C. Influence de l'espacement inter-électrodes et de la largeur des électrodes

La distribution du champ électrique sur la surface EDS dépend de la largeur des électrodes et de l'espacement inter-électrodes par rapport aux coefficients de Fourier  $a_k$  et  $b_k$ , puis  $g_k$  et  $h_k$ , et  $\Omega_0 = 2\pi / 3 (w + g)$  en équation (1.5). Les impacts des paramètres susmentionnés sur le maximum de l'amplitude du champ électrique  $|E|$  sur la surface EDS dans une période spatiale fondamentale ont été représentés sur la figure 1.9. Comme on peut le voir sur la figure 1.9 (a), à mesure que la largeur d'électrode augmente, le maximum de  $|E|$  diminue pour une valeur spécifique de  $g$  ; cette diminution est plus significative pour des valeurs plus petites de  $w$ . Par exemple, lorsque  $g = 600 \mu\text{m}$  et  $w$  passe de 50 à 100, 100 à 150, puis 150 à 200  $\mu\text{m}$ , les pourcentages de diminution sont respectivement de 9%, 6% et 4%. La figure 1.9 (b) fournit le maximum de  $|E|$  en fonction de  $w$  pour quatre valeurs de  $g$ . L'effet du changement de  $g$  est plus significatif. Lorsque  $w = 100 \mu\text{m}$  et  $g$  passe de 100 à 200, 200 à 300, puis 300 à 400  $\mu\text{m}$ , les pourcentages de diminution sont respectivement de 25,8%, 19,5% et 15,1%.



**Figure 1.9.** Les impacts de (a) l'espacement inter-électrodes  $g$  et (b) la largeur d'électrode  $w$  sur le maximum de la norme de champ électrique (unité : MV / m) sur la surface EDS dans une période spatiale fondamentale. Les tensions des phases A, B et C sont établies respectivement à 1 kV, 0 et 1 kV. L'épaisseur et la permittivité relative du revêtement diélectrique sont 50  $\mu\text{m}$  et 3.

Lors de la conception de la géométrie d'électrode d'un film EDS, les deux considérations les plus importantes sont :

- (1) une transmittance optique élevée du film et des électrodes.
- (2) une efficacité de dépoussiérage élevée (DRE) (dust removal efficiency) du film pour fournir un champ électrique mobile.

Ce dernier sur la surface EDS doit être suffisamment solide pour charger et repousser les particules par la force de Coulomb, et atténuer la couche de poussière de la surface.

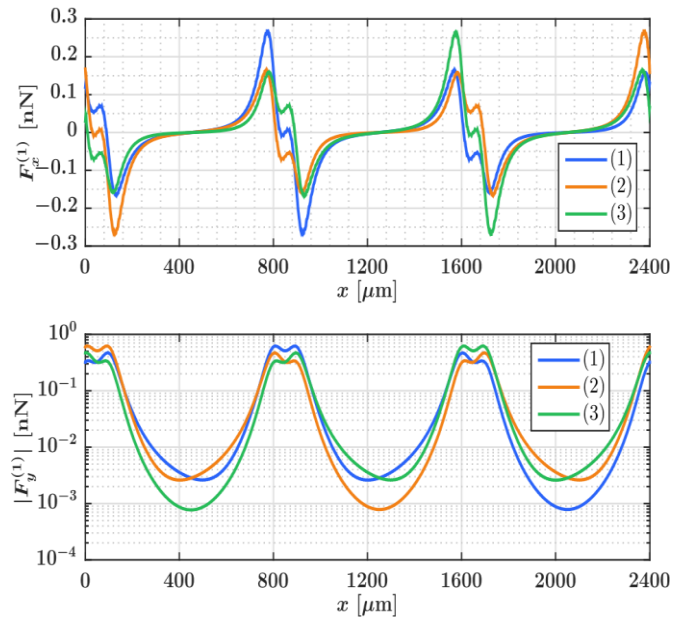
Ce sont des exigences contradictoires. Une transparence élevée du film EDS nécessite que la largeur d'électrode  $w$  soit aussi petite que possible et que l'espacement inter-électrode  $g$  soit aussi grand que possible. Par exemple, si les électrodes n'occupent que 10% de la surface de l'EDS et que les électrodes sont transparentes à 90%, il n'y aura qu'une perte de transmission de 1% causée par la stratification du film EDS sur un module solaire.

D'autre part, pour une charge efficace des particules conférées par l'activation de l'électrode par des impulsions à haute tension, l'intensité du champ électrique doit avoir une force suffisante sur toute la surface du film EDS pour éliminer la couche de poussière par la force de Coulomb sans atteindre le diélectrique. Champ de panne provoquant une décharge couronne. Si  $w$  est trop petit, il y aura un champ électrique local intense entourant les électrodes noyées entre la couche diélectrique au détriment de l'abaissement de la composante  $E_y$  du champ sur la surface dans les régions d'espacement entre les électrodes adjacentes. Si  $g$  est trop grand, l'efficacité de dépoussiérage diminue particulièrement pour les petites particules.

Bien que les caractéristiques électrostatiques et optiques soient importantes dans la conception de l'EDS, cette étude ne traite que des performances électrostatiques de l'EDS dans le processus de dépoussiérage.

### 1.4.3. Discussion sur les forces multipolaires du DEP

Les forces DEP du premier ordre sont calculées à l'aide de l'équation (1.15). La figure 1.10 montre les forces DEP de premier ordre exercées sur une particule avec un rayon de  $5 \mu\text{m}$  dans une période spatiale fondamentale pour les cas de 1, 2 et 3 des combinaisons de tension. Les forces DEP pour les cas 4, 5 et 6 sont identiques à 1, 2 et 3, respectivement. Les forces DEP illustrées pour les trois cas sont identiques sauf pour un décalage de  $w + g = T_s / 3$  le long de l'axe  $x$ . Puisque  $F_y^{(1)}$  est négatif, c'est-à-dire qu'il pointe toujours vers  $y$  ou vers la surface EDS, nous considérons le  $|F_y^{(1)}|$ . La valeur négative de la composante verticale de la force DEP de premier ordre  $F_y^{(1)}$  est cohérente avec le fait que la particule de poussière fait l'expérience d'une force DEP positive. Comme on peut le voir à partir de l'équation (1.5), la valeur de  $E_y$  diminue de manière monotone à mesure que  $y$  augmente. Cependant, la valeur de  $E_x$  diminue et augmente continuellement le long de l'axe des  $x$  dans une période spatiale fondamentale. Depuis le gradient de la composante du champ électrique détermine la direction de la force DEP, le  $F_y^{(1)}$  change de signe en continu dans une période spatiale fondamentale tandis que  $F_y^{(1)}$  pointe toujours vers la surface EDS.



**Figure 1.10.** Forces DEP du premier ordre dans les directions  $x$  et  $y$ : (haut)  $|F_x^{(1)}|$  (unité: nN) et (bas)  $|F_y^{(1)}|$  (unité: nN) pour les trois cas de 1, 2 et 3 de la tension combinaisons,

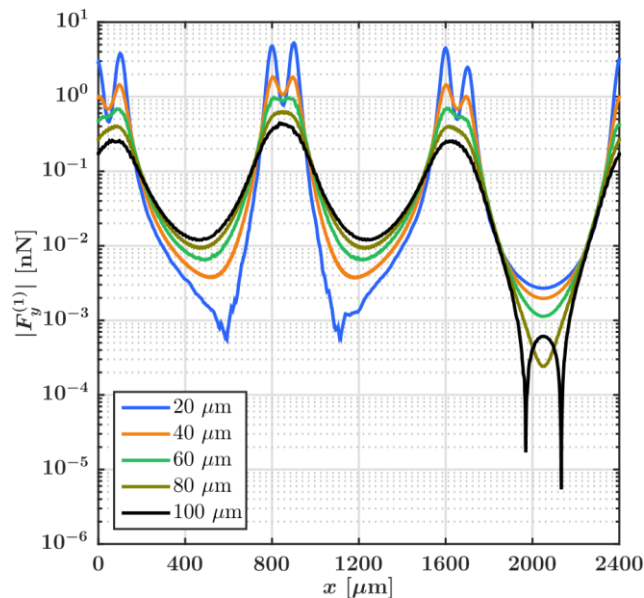
Comme mis en évidence sur la figure 1.4. L'épaisseur du revêtement diélectrique et le rayon de la particule de poussière sphérique sans perte sont de 50 et 5  $\mu\text{m}$ , respectivement. La largeur des électrodes et l'espacement entre les électrodes sont respectivement de 100 et 700  $\mu\text{m}$ . La permittivité relative de la couche diélectrique transparente et de la particule est supposée être respectivement de 3 et 4. L'amplitude de la tension est de 1 kV

Sur la figure 1.10, les valeurs maximale et minimale de  $F_x^{(1)}$  sont respectivement de 0,54 nN et -0,54 nN. L'amplitude de la composante verticale de la force DEP de premier ordre atteint ses valeurs maximale et minimale de 1,25 nN et 1,56 pN, respectivement. La valeur moyenne de la composante verticale de la force DEP de premier ordre que L'expérience des particules de poussière le long de l'axe  $x$  dans une période spatiale fondamentale est de 0,21 nN. À des fins de comparaison, si nous supposons que la densité de la particule est de 2300  $\text{kg} / \text{m}^3$ , le poids de la particule est calculé à 11,8 pN.

Semblable à l'étude sur l'effet de l'épaisseur diélectrique sur l'intensité du champ électrique sur la surface EDS, nous examinons comment l'épaisseur du film

diélectrique  $\delta$  affecte les forces DEP de premier ordre qu'une particule de poussière de test subit dans une période spatiale fondamentale sur la surface EDS. La figure 1.11 illustre comment le  $|F_y^{(1)}|$  change le long de l'axe des  $x$  pour différentes valeurs de  $\delta$ . Comme la largeur des électrodes et l'espacement inter-électrodes sont considérés respectivement comme étant de 100 et 700  $\mu\text{m}$ , les premières, deuxième et troisième électrodes sont situées à [0, 100  $\mu\text{m}$ , 800  $\mu\text{m}$ , 900  $\mu\text{m}$ ] et [1600  $\mu\text{m}$ , 1700  $\mu\text{m}$ ], respectivement.

En notant les positions des électrodes, il est clair que chaque fois que la particule de poussière d'essai est à l'extrémité extrême d'une électrode, elle subit la force DEP maximale. De plus, lorsqu'il se déplace le long de l'axe  $x$ , sur son chemin vers le centre d'une électrode, il subit une force DEP continuellement décroissante ; et il ressent une force DEP en constante augmentation tout en se déplaçant du centre vers la pointe. Ce comportement est clairement reconnaissable quand  $\delta = 20 \mu\text{m}$ , et dans une certaine mesure quand  $\delta = 40 \mu\text{m}$ . Cependant, il devient moins saillant lorsque  $\delta$  augmente et atteint 100  $\mu\text{m}$ .

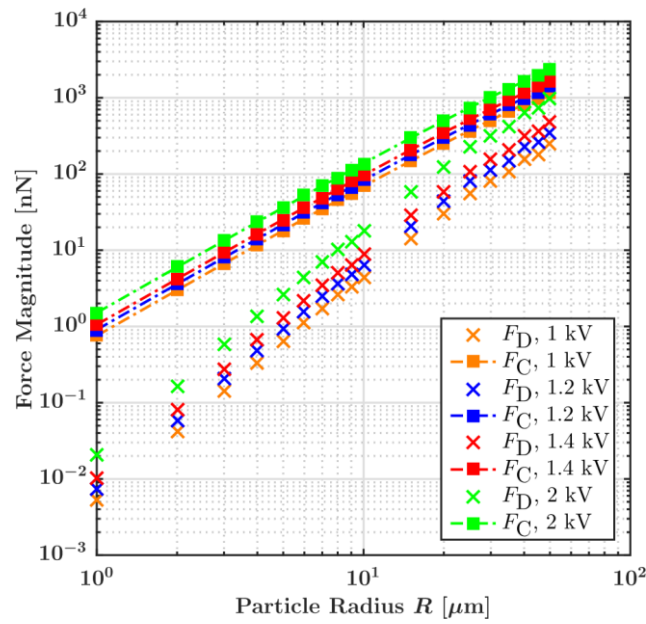


**Figure 1.11.** L'impact de l'épaisseur du matériau diélectrique transparent sur l'amplitude de la composante verticale de la force DEP du premier ordre (unité : nN)

Sur la figure 1.11, lorsque  $\delta$  augmente, les valeurs maximale et minimale de la force DEP diminuent continuellement. Mais cette diminution est plus importante lorsque  $\delta$  passe de 20  $\mu\text{m}$  à 40  $\mu\text{m}$ , que lorsqu'il passe de 80  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ . On constat dans les expériences  $|F_y^{(1)}|$  une diminution de 53,7% lorsque  $\delta$  passe de 20 à 40  $\mu\text{m}$ , alors que cette diminution est de 28% lorsque  $\delta$  passe de 80  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$ . Les pointes de la courbe pour 100  $\mu\text{m}$  sont attribuables au fait que le  $|F_y^{(1)}|$  est très proche de 0. La particule de poussière d'essai avec un rayon de 5  $\mu\text{m}$  subit une valeur moyenne de force DEP de premier ordre de 0,47, 0,26, 0,17 et 0,12 nN pour  $\delta = 20, 40, 60$  et 80  $\mu\text{m}$ , respectivement.

La figure 1.12 représente le comportement de la composante verticale de la force DEP du premier ordre et de la force de Coulomb en fonction du rayon des particules pour quatre tensions appliquées différentes. Pour calculer la force de Coulomb, nous avons supposé que la particule est chargée positivement à son niveau de charge de saturation de  $q = 4\pi R^2 \sigma_s$ , où  $R$  est le rayon de la particule et  $\sigma_s = 27\mu\text{C}/\text{m}^2$  [39-40]. Il est à noter que la direction de la composante verticale de la force DEP du premier ordre tend vers  $-y$  tandis que la force de Coulomb pointe vers  $+y$ . Lorsque la tension appliquée est de 1, 1.2, 1.4 et 2 kV, le maximum de l'amplitude du champ électrique atteint respectivement 2.26, 2.7, 3.16 et 4.5 MV / m sur la surface EDS. Lorsque la tension appliquée passe de 1 kV à 2 kV, la force de Coulomb montre une augmentation de 100%, ce qui est complètement attendu car l'intensité du champ électrique suit le modèle de tension de manière linéaire, tandis que la force DEP a une augmentation de 300%.

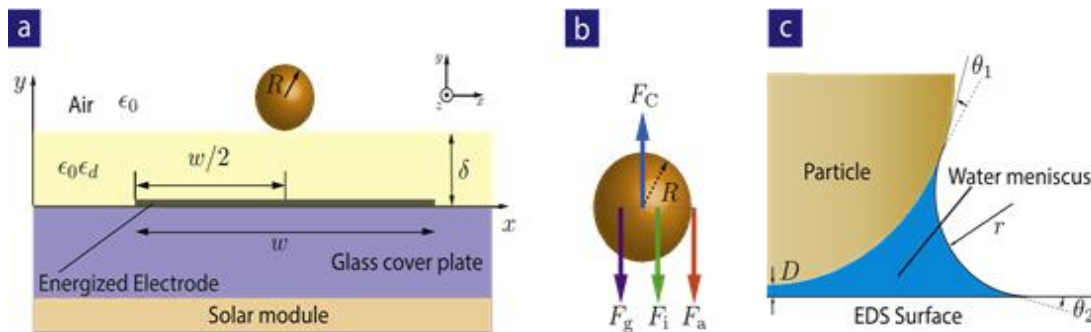
La largeur des électrodes et l'espacement inter-électrodes sont respectivement de 100  $\mu\text{m}$  et 700  $\mu\text{m}$ . L'épaisseur du revêtement diélectrique est de 50  $\mu\text{m}$  et sa permittivité relative est de 3. Le potentiel électrique des électrodes A, B et C sont respectivement  $V$ , 0 et  $V$ , où  $V$  est la tension appliquée. La particule de test est positionnée juste au-dessus de l'électrode sous tension C.



**Figure 1.12.** Magnitudes des composantes verticales de la force DEP du premier ordre  $|F_y^{(1)}|$  et de la force de Coulomb en fonction du rayon des particules, pour quatre tensions appliquées différentes

**1.4.4. Comparaison entre les forces d'adhérence et les forces de répulsion**

Étant donné que le but de l'emploi d'EDS est d'atténuer la poussière des surfaces optiques des capteurs solaires, une comparaison entre les forces d'adhérence et les forces de répulsion est de la plus haute importance pour l'évaluation des performances de l'EDS.



**Figure 1.13.** (a) Particule de poussière de rayon  $R$  se trouvant juste au-dessus de l'électrode sous tension, (b) l'ensemble des forces exercées sur la particule dans la direction  $y$ . (c) formation du ménisque d'eau entre la particule et la surface

Pour effectuer cette comparaison, nous considérons la figure 1.13 (a), dans laquelle la particule se trouve juste au-dessus de l'électrode sous tension, où elle subit le maximum de la force DEP de premier ordre dans la direction  $y$ . Puisque l'électrode est sous tension, la distribution du champ électrique juste au-dessus de l'électrode sur la surface EDS subit le maximum de  $E_y$  dans la direction  $+y$ . Le diagramme du corps libre des forces verticales exercées sur la particule est illustré sur la figure 1.13 (b). On suppose que la particule est chargée positivement et que toutes les forces représentées sont exercées sur le centre de la particule. Les forces exercées abordées sur la sont calculées comme suit :

**A. Force gravitationnelle  $F_g$  :** la force gravitationnelle d'une particule sphérique de rayon  $R$  est calculée comme suit :

$$F_g = \frac{4}{3}\pi\rho R^3 g \quad (1.12)$$

Dans laquelle  $\rho$  est la densité de la particule et  $g$  est l'accélération gravitationnelle.

**B. Force de Coulomb  $F_c$  :** la composante verticale de la force de Coulomb exercée sur la particule est obtenue à partir de l'expression  $F_c = qE_y$ , dans laquelle  $E_y$  est la composante verticale de la distribution du champ électrique calculée au centre de la particule et  $q$  est la charge électrique de la particule. Nous supposons que la particule est chargée positivement à son niveau de saturation. La charge électrique de la particule est obtenue à partir de l'expression suivante :

$$q = 4\pi R^2 \sigma_s \quad (1.13)$$

Dans laquelle  $\sigma_s$  est la charge de saturation de surface de la particule et  $R$  est le rayon de la particule.

**C. Force d'image  $F_i$  :** la force d'image est calculée à partir de l'expression suivante :

$$F_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_d} \frac{q^2}{[2(\delta+R)]^2} \quad (1.14)$$

Dans laquelle  $\epsilon_d$  est la permittivité relative de la couche diélectrique,  $\delta$  est l'épaisseur de la couche diélectrique, et  $q$  est la charge de la particule obtenue à

partir de l'équation (1.13). Il est à noter que cette expression est valable que si la taille de la particule est bien inférieure à la largeur de l'électrode. Si la taille des particules est comparable à la largeur de l'électrode, l'équation (1.14) est simplement une approximation de la force d'image exacte.

**D. Force d'adhésion  $F_a$  :** la force d'adhésion est considérée comme la somme des deux forces lorsque la particule est en contact avec la surface : la force de van der Waals et la force capillaire, notées respectivement  $F_{vdw}$  et  $F_{cap}$ . L'expression mathématique de la force de van der Waals, entre une particule parfaitement lisse et une surface sans rugosité, est calculée à partir de l'expression suivante [40] :

$$F_{vdw} = \frac{A_h R}{6D^2} \quad (1.15)$$

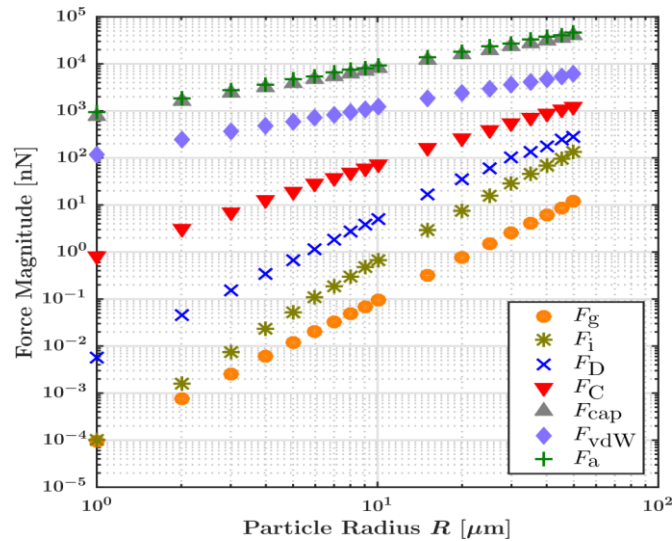
Dans laquelle  $R$  est le rayon de la particule adhérente,  $D = 0,3-0,4$  nm est la séparation à l'équilibre entre deux surfaces solides et  $A_h$  est la constante de Hamaker. Les valeurs typiques de la constante de Hamaker sont de l'ordre de  $10^{-19}$  dans le vide. La force capillaire  $F_{cap}$ , telle que représentée sur la figure 1.13 (c), est obtenue à partir de la formule suivante [41] :

$$F_{cap} = 2\pi r [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2)] \quad (1.16)$$

Où  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont les angles de contact de la particule et de la surface, respectivement, et  $\gamma_w$  la tension superficielle de l'eau. Il est à noter que l'équation (1.16) n'est qu'une approximation de la force capillaire qui est indépendante de l'humidité relative. Comme cela a été montré dans différentes études expérimentales, comme [42], la force capillaire augmente significativement avec l'humidité relative. Cependant, à des fins de comparaison initiale des forces, nous utilisons l'expression simplifiée de la force capillaire fournie dans l'équation (1.16).

La figure 1.14 illustre le comportement des différentes forces exercées sur la particule en fonction du rayon de particule  $R$ . Les paramètres numériques utilisés pour calculer les forces sont fournis dans le tableau 1.1. En constatant que la force capillaire est la principale force d'adhérence, suivie de la force de van der Waals. La somme de ces forces, appelée force d'adhésion. La force de Coulomb

agissant comme force de répulsion est d'environ trois ordres de grandeur inférieure à la force d'adhésion. Lorsque  $\delta$  augmente, la force d'image, la force DEP et la force de Coulomb diminuent, tandis que la force gravitationnelle, la force capillaire et la force de van der Waals ne changent pas, en supposant que la rugosité de surface ne change pas avec l'augmentation de l'épaisseur diélectrique.



**Figure 1.14.** Comparaison des forces d'attraction et de répulsion exercées sur la particule en fonction du rayon de la particule lorsque la particule se trouve au-dessus de l'électrode sous tension

**Tableau 1.1** Liste des paramètres utilisés dans la comparaison des forces

Variable	Description	Valeur
$g$	Accélération gravitationnelle	9.8 m/s <sup>2</sup>
$r$	Densité de la particule	2300 kg/m <sup>3</sup>
$\epsilon_d$	Permittivité relative du diélectrique	3
$\delta$	Épaisseur de la couche diélectrique	40 $\mu\text{m}$
$A_h$	Constant de Hamaker	6.5 $10^{20}$ J
$D$	Distance d'équilibre entre deux surfaces solides	0.3 nm
$\gamma_w$	Tension superficielle de l'eau à température ambiante	0.073 N/m
$\theta_1, \theta_2$	Angle de contact particule / surface	$\pi/6$ rad
$\epsilon_p$	Permittivité relative de la particule	4
$\sigma_s$	Charge de saturation de surface de la particule	27 $\mu\text{C}/\text{m}^2$

La figure 1.15 indique que l'EDS n'est pas capable de supprimer une taille de particule avec la conception actuelle, même lorsque la particule acquiert une charge de surface maximale possible et une composante de champ électrique verticale maximale. En d'autres termes, la force d'adhérence est beaucoup plus forte que la force de répulsion. En outre, notre modèle simplifié pour la force de van der Waals et la force capillaire considérée sur la figure 1.15 suppose une particule sphérique parfaitement lisse en contact avec une surface lisse, sans aucune aspérité.

En pratique, la particule et la surface possèdent des aspérités qui affectent les modèles idéaux exprimés en équations. (1.15) et (1.16) de manière significative. Ce point a reçu beaucoup d'attention de la part des chercheurs dans le domaine de la rétention de surface des particules et de la remise en suspension. Selon Rabinovich et al. [43], une rugosité de surface moyenne quadratique (RMS, root mean square) d'environ 1 ou 2 nm diminue les forces d'adhésion pour un modèle idéal d'un ordre de grandeur ou plus.

Afin d'avoir un modèle plus détaillé et réaliste des forces d'adhésions exercées sur la particule, nous considérons une couche mince de verre borosilicate disponible dans le commerce, un candidat prometteur comme couche diélectrique transparente supérieure de l'EDS, ayant une rugosité de surface connue. Selon sa fiche technique, la rugosité moyenne notée  $R_a$  et la rugosité crête à vallée, notée  $R_{pv}$ , sont respectivement  $<0,5$  nm et  $<20$  nm. Il est à noter que  $R_a$  est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts de hauteur de profil par rapport à la ligne moyenne, enregistrées dans la longueur d'évaluation. La racine carrée moyenne de la rugosité de surface, notée RMS, est définie comme la moyenne des écarts de hauteur de profil par rapport à la ligne moyenne, enregistrées dans la longueur d'évaluation. En supposant que la fonction de hauteur de profil a un motif sinusoïdal avec une période spatiale particulière le long de l'axe horizontal, la relation entre les valeurs  $R_a$  et RMS est obtenue comme suit :

$$\text{RMS} = 1,1 R_a \quad (1.17)$$

Par conséquent, pour la couche mince de verre borosilicaté, le RMS  $<0,55$  nm.

Selon le modèle développé par Rabinovich et al. [43], la force de van der Waals entre une particule et une surface avec une rugosité nanométrique, en termes de notations et symboles est exprimée comme suite :

$$F_{vdW} = \frac{A_h R}{6D^2} \left[ \frac{R_{pv}^2}{R_{pv}^2 + 63.95RR_a} + \frac{D^2}{(D+2R_a)^2} \right] \quad (1.18)$$

Où  $A_h$  est la constante de Hamaker de la surface,  $R$  est le rayon de la particule, et  $D \approx 0,3$  nm. La constante de Hamaker d'un matériau donné est liée à son énergie de surface via l'équation suivante [43] :

$$A_h = 1.44 \times 10^{-18} \gamma \quad (1.19)$$

Où  $\gamma$  est l'énergie de surface du matériau en J / m<sup>2</sup>. L'énergie de surface du verre borosilicaté est considérée comme étant de 0,04 J / m<sup>2</sup>. Par conséquent, sa constante de Hamaker est  $A_h = 5,75 \times 10^{-20} j$ .

$$F_c = 4\pi\gamma WR \cos\theta \left[ 1 - \frac{R_a}{r \cos\theta} \right] \quad (1.20)$$

Le modèle proposé pour la force capillaire, lorsque la rugosité de surface de la surface est prise en compte, est exprimé comme [43] :

$$r = \frac{\gamma w V}{N_a k T \ln(p/p_s)} \quad (1.21)$$

Dans laquelle  $V = 18 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup> / mol est le volume molaire d'eau,  $\gamma w = 0,073$  N / m est la tension superficielle de l'eau à température ambiante,  $N_a$  est la constante d'Avogadro,  $k$  est la constante de Boltzmann,  $T$  est la température en Kelvins, et  $p / p_s$  est le HR avec  $p$  la pression de vapeur et  $p_s$  la pression de vapeur saturée. À température ambiante, l'équation (1.21) est exprimée comme

$$r = \frac{5.27 \times 10^{-10}}{\ln(p/p_s)} \quad (1.22)$$

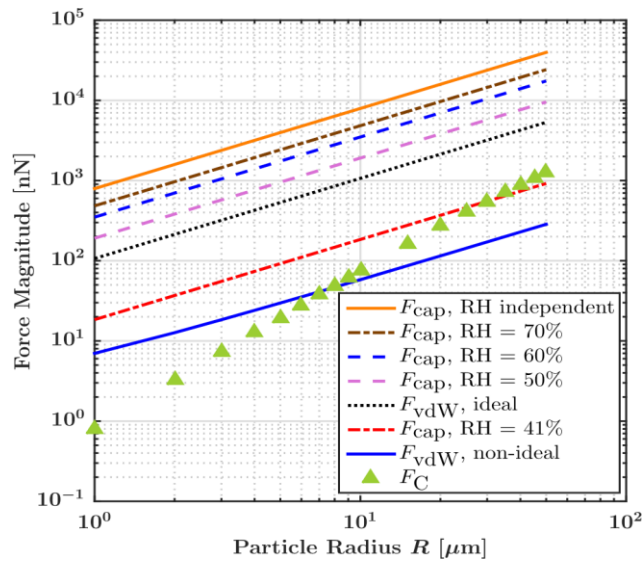
Le critère pour la formation du ménisque entre les deux surfaces est que le terme à l'intérieur de la parenthèse dans l'équation (1.20) doit être positif, c'est-à-dire:

$$R_a \leq r \cos\theta \quad (1.23)$$

En supposant  $\theta_1 = \theta_2 = \pi/6$ , la condition pour la formation du ménisque et par conséquent la présence d'une force capillaire est  $HR \geq 41\%$ . Pour des valeurs d'humidité relative inférieures à 40%, il n'y a pas de ménisque entre la particule et la surface et par conséquent pas de force capillaire.

La figure 1.15 fournit une comparaison entre la composante verticale de la force de Coulomb, la force de van der Waals modifiée et la force capillaire pour différentes valeurs de HR. On constate que la force de van der Waals chute de plus d'un ordre de grandeur, par rapport au cas idéal, lorsque la rugosité de surface est considérée et calculée via l'équation (1.23). Bien que la force de Coulomb commence de 0,93 à 1,35 ordre de grandeur inférieure aux courbes de la force de van der Waals modifiée et de la force capillaire pour  $RH = 41\%$ , respectivement, elle les dépasse après  $R = 8$  mm et  $R = 30$  mm, respectivement.

Lorsque l'HR augmente de 41% à 70%, la force capillaire augmente et s'approche de la courbe de force capillaire, calculée à partir de l'équation (1.21), dans laquelle il est indépendant de RH. L'augmentation de l'amplitude de la force capillaire est beaucoup plus importante lorsque l'HR passe de 41% à 50% plutôt que 50% à 60% ou 60% à 70%. La force capillaire augmente de plus d'un ordre de grandeur lorsque l'HR passe de 41% à 50% tandis que la force capillaire subit une augmentation d'environ 0,1 d'ordre de grandeur lorsque l'HR passe de 60% à 70%.



**Figure 1.15.** Comparaison entre la composante verticale de la force de Coulomb et la force de van der Waals idéale (sans rugosité de surface) et non idéale (avec rugosité de surface) et la force capillaire pour plusieurs valeurs d'humidité relative différentes

## 1.5. Conclusion

Les moyens d'enlèvement de poussière peuvent être classés en quatre catégories : Naturel, mécanique, électromécanique et électrique. Nous avons présenté dans cette partie le moyen le plus simple d'enlèvement électrique ou la séparation des particules en utilisant la technique électrostatique des rideaux électriques, qui ne nécessite aucune pièce en mouvement.

Cette stratégie est possible pour limiter la détérioration des performances des panneaux solaires par exemple. Actuellement, la technique la plus envisageable est celle des écrans transparents EDS, le principe de fonctionnement de cette technique est basé sur le même principe des rideaux électriques à ondes stationnaires ou à ondes mobiles dans le cadre d'enlèvement des couches minces de poussière très fines.

Enfin, les études dans ce chapitre montrent clairement des solutions analytiques pour le potentiel électrique et la distribution du champ électrique

dans une configuration d'écran électrodynamique (EDS) avec une couche de revêtement diélectrique transparent.

Le chapitre suivant est consacré à la synthèse sur les travaux et les applications des convoyeurs à rideaux électriques où on s'intéresse à l'évolution des principaux travaux de recherche concernant la manipulation des particules sur une surface diélectrique par ondes progressives et stationnaires.



## **Synthèse sur les travaux et les applications des convoyeurs à rideaux électriques**

## 2.1. Introduction

Cette chronique bibliographique présente l'évolution de la recherche dans le domaine électrostatique où on s'intéresse aux principaux travaux de recherche concernant la manipulation des particules sur une surface diélectrique par ondes progressives et stationnaires. Vu la diversité des techniques et des méthodes d'analyse et de caractérisation en fonction des applications dans la littérature, les travaux seront classés par applications et présentés par ordre chronologique.

Compte tenu du grand nombre des recherches qu'il était possible de recenser, il nous a paru utile de compléter la chronique par un signalement des ouvrages et les articles parus dans le champ qui nous intéresse au cours des dernières années.

En outre, cette revue bibliographique présente plusieurs sections. Dans chaque section, la problématique, les méthodes et les résultats liés à une application spécifique sont présentés succinctement.

Des applications et des méthodes majeures sont par ordre chronologique, elle repose sur une analyse systématique de la source et de la nature de la poussière en question : le confinement et le transport de matières particulaires, l'électrophotographie, les applications dans l'espace, et le dépeussierage des panneaux solaires.

## 2.2. Entraînement de particules par rideaux électriques

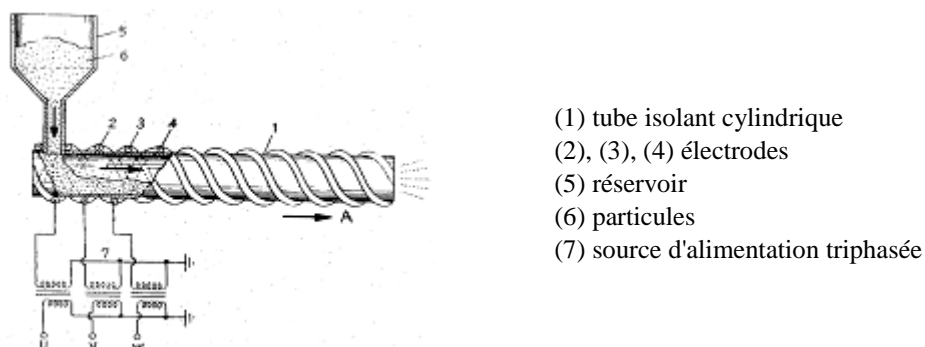
Les rideaux électriques sont composés d'une série d'électrodes parallèles intégrées sur ou dans un support diélectrique et alimentées par des potentiels électriques polyphasés. Un nombre important de conjectures ont été avancées dans ce domaine, une explication claire de la façon dont les forces complexes exercées lors de l'excitation des ondes mobiles sur les rideaux électriques peuvent conduire à un déplacement net de particules est donnée par plusieurs recherches effectuées dans ce contexte. Certains facteurs permettaient une représentation précise des forces qui agies par des collisions multi-particules soit l'adhésion des particules avec d'autres particules ou avec la surface du diélectrique. Les interactions des champs électriques des particules sont incluses à la fois avec le

champ induit par les électrodes et avec les champs induits par d'autres particules chargées.

### 2.2.1. Expérience de Masuda et al.

La collecte des particules submicroniques en utilisant les forces électriques a été développée dans les années 1970 par Masuda et al. de l'université de Tokyo. Des travaux préliminaires ont été effectués sur la mise en œuvre de rideaux électriques pour transporter des particules chargées en utilisant des ondes électrostatiques progressives et stationnaires [44]. Les brevets US Pat. N°3872361 [45] et US Pat. N°3778678 [46] au nom de Masuda décrivent un appareil dans lequel l'écoulement de matériaux particuliers dans un tube est contrôlé électrodynamiquement en utilisant des électrodes sous forme d'anneaux espacés axialement, incurvées concentriquement et allongées tout au long du trajet.

Le dispositif est illustré sur la figure 2.1. Chaque électrode est espacée axialement de ses voisines d'une distance supérieure ou égale à son diamètre. Les trois électrodes successives sont connectées à des bornes des sources hautes tensions alternatives déphasées de  $2\pi/3$ . Dans cette configuration, un potentiel électrique sous forme d'onde progressive est produit, cela permet de repousser les particules chargées axialement vers l'intérieur et tend à les propulser le long du trajet. Dans cet appareil, les particules sont chargées par mécanisme triboélectrique par contact/frottement avec les parois de tube cylindrique. Lors d'un essai utilisant de la poudre de lycopodium d'un diamètre moyen de  $15\ \mu\text{m}$ , une vitesse de transport des particules enregistrée est de  $15\ \text{cm/s}$  [46].



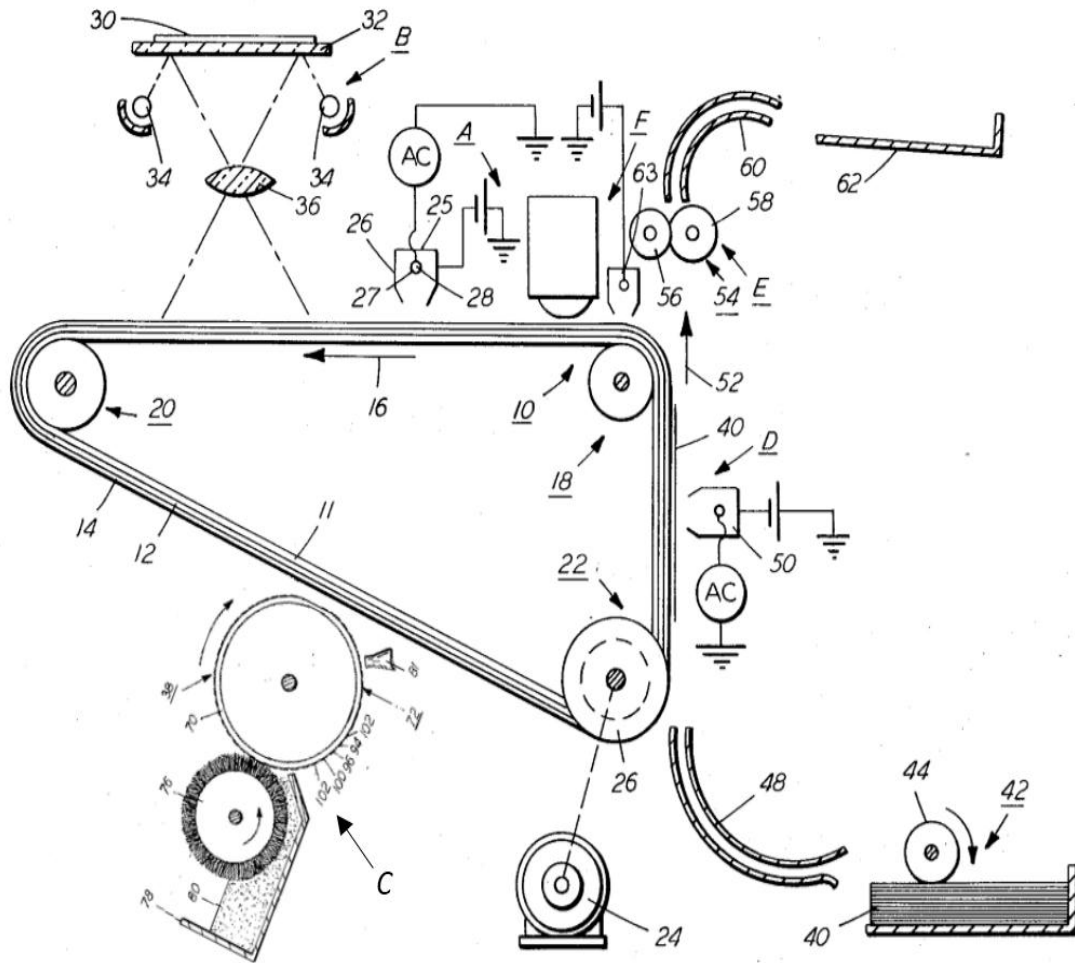
**Figure 2.1.** Schéma du dispositif de déplacement des particules de Masuda avec une tension appliquée est de l'ordre de 5 à 10 kV [46]

Dans le brevet américain 3 801 869, Masuda a décrit également une cabine dans laquelle un matériau particulaire chargé électriquement est pulvérisé sur une pièce à usiner ayant une charge opposée, de sorte que les particules soient attirées électrostatiquement vers la pièce à usiner. La particularité de cette cabine est d'avoir des électrodes, parallèles et espacées, embarquées dans ses parois. Chaque électrode est connectée à une borne d'une source haute tension alternative, donc les électrodes adjacentes sont connectées à des sources de tensions déphasées, ce qui permet de créer un champ variable dans l'espace et dans le temps à proximité des parois. Le but est d'empêcher les particules dispersées d'adhérer sur les parois, pour ne pas affecter négativement la qualité de la peinture notamment dans des opérations de peintures successives avec différentes couleurs [47].

### 2.2.2. Expérience de F. W. Schmidlin, Taniguchi et Adachi

En 1987, F. W. Schmidlin a déposé un premier brevet (US. Pat. N° 4647179A), dans lequel il a proposé un appareil innovant de transport de toner destiné à être utilisé pour former des images en poudre sur une surface de numérisation [47]. Cette invention utilise un convoyeur à ondes mobiles pour déplacer les particules de toner vers une surface d'imagerie. Le convoyeur comprend un ensemble d'électrodes linéaires espacées parallèlement et connecté à un système de tensions alternatives quadriphasées.

C'était la première fois qu'un tel système de déplacement des particules est intégré dans un processus d'imprimerie xérographique. Dans ce processus, lors de l'application du toner sur les images électrostatiques, il est nécessaire de transporter le toner de sa boîte à la surface chargée.



**Figure 2.2.** Schéma du système d'impression développé par Schmidlin, équipé d'un convoyeur électrostatique à ondes progressives. Composants : (10) ceinture photoconductrice. (25) station de charge avec décharge couronne. (26) électrode mise sous tension DC négative. (27) fil décharge couronne négative. (C) station de développement contenant le convoyeur à onde progressive (38) [47]

La figure 2.2 illustre le schéma de la machine d'impression électrophotographique incorporant l'invention de Schmidlin. Dans cette machine, une courroie photoconductrice (10) est entraînée par trois rouleaux (18, 20) et (22) vers la direction (16). Initialement une partie de la courroie passe par la station de charge A dans laquelle un chargeur avec décharge couronne (25) charge la couche (12) de la courroie à un potentiel négatif. Ensuite, la partie chargée de la bande photoconductrice avance dans la station d'exposition B, où une image électrostatique latente est formée sur la courroie à partir d'un document original.

Puis, la courroie photoconductrice (10) fait avancer l'image électrostatique jusqu'à la station de développement C. Au niveau de cette station, un convoyeur à ondes progressives (38) placé sur un tambour fait avancer les particules de toner au contact des images électrostatiques formées sur la courroie photoconductrice (10). Les images électrostatiques attirent par conséquent les particules du toner chargées provenant du convoyeur formant ainsi des images imprimées [48].

Sur la même période, d'autres chercheurs comme Taniguchi et al. ainsi que Adachi et al. [49-51] ont aussi confirmé entre 1991 et 2005 que le convoyeur à ondes progressives peut être une bonne alternative au système de toner classique qui permet d'assurer une transportation et une alimentation stable du toner sans qu'il y ait une adhésion forte entre le toner et le convoyeur.

### **2.3. Séparation électrostatique des particules**

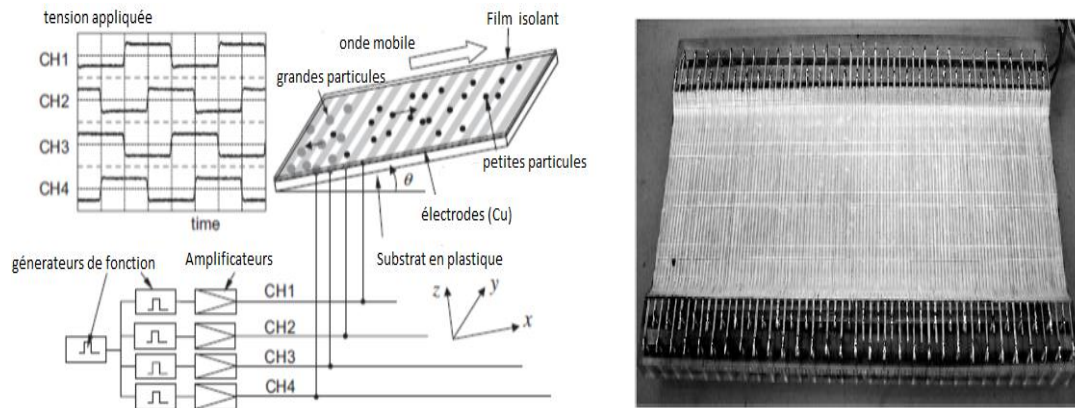
Nous allons présenter dans cette section les techniques de séparation des particules utilisant le principe des rideaux électriques.

#### **2.3.1. Techniques développés par Kawamoto et al.**

##### **2.3.1.1. Système de séparation de particules à plaque inclinée**

D'autre part, des travaux pertinents sur la séparation et la classification des particules de toner en fonction de leur taille en utilisant des ondes électriques progressives ont été développés par Kawamoto et al. entre les années 2006 et 2008. Ces chercheurs ont développé plusieurs techniques de classification électrostatique des particules de toner en exploitant l'équilibre entre les forces électrostatiques et gravitationnelles. Les cinq systèmes sont exploités : [52-54]

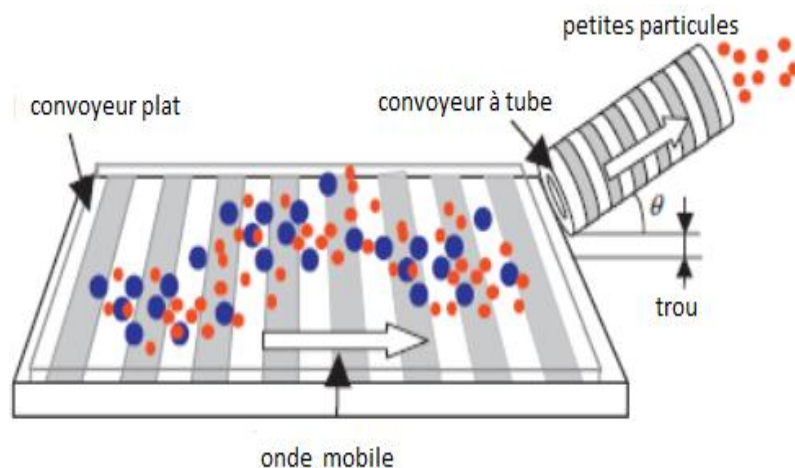
Le premier système utilise un équilibre de la force électrostatique et de la force gravitationnelle. Un convoyeur électrostatique est constitué d'électrodes parallèles, incliné par l'angle  $\theta$  à la position horizontale. Lorsque les valeurs de tension et de fréquence appropriées sont appliquées. Les particules se séparent par taille en fonction de leurs caractéristiques ; où les petites particules sont transportées vers le haut contre la gravité, tandis que les grandes particules seront susceptibles de tomber (Figure 2.3).



**Figure 2.3.** Système de séparation de particules électrostatique incliné à plaque

### 2.3.1.2. Système de séparation à tube incliné

D'autres procédés utilisent la combinaison des deux convoyeurs, le premier plat horizontal et le deuxième à tube incliné (Figure 2.4).

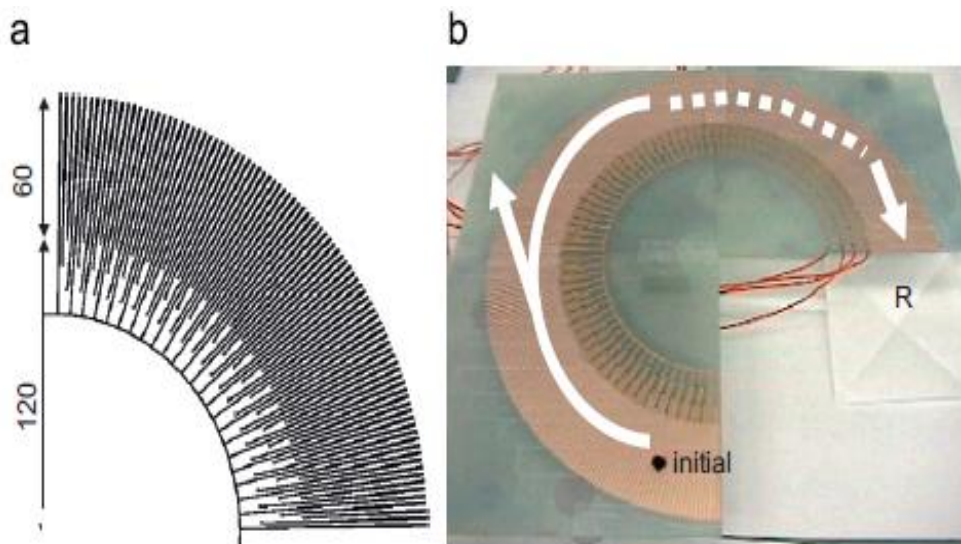


**Figure 2.4.** Système de séparation à tube incliné

Le convoyeur à tubes est composé de bagues métalliques et d'anneaux isolants alternativement empilés. Les deux anneaux de 5 mm de diamètre intérieur et 0.8 mm d'épaisseur. La longueur totale du tube est de 57 mm. Le tube est incliné à un angle  $\theta$  de la position horizontale et situé au-dessus du convoyeur à plaque plate linéaire. On constate que la séparation des particules est réalisée par ce système lorsqu'on applique une tension rectangulaire à quatre phases commune pour les deux convoyeurs [54].

### 2.3.1.3. Système de séparation centrifuge

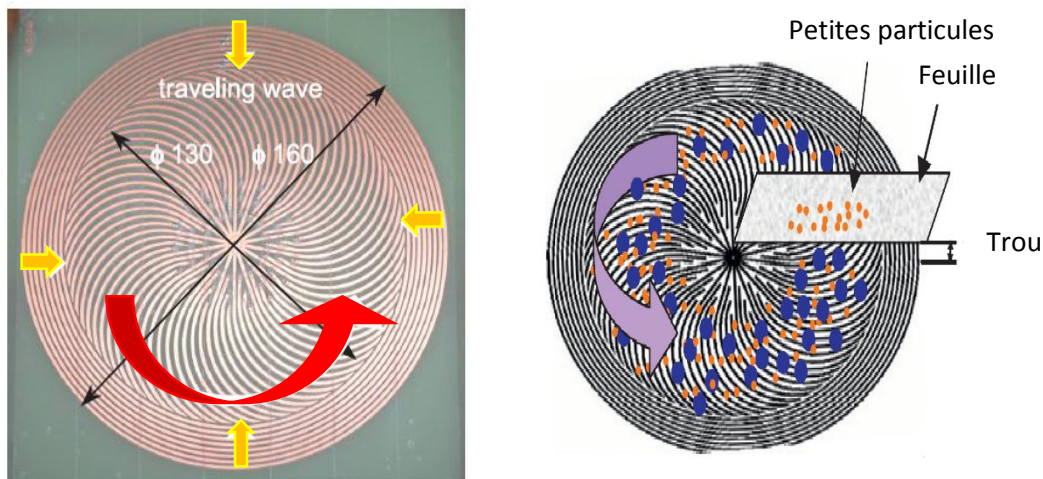
Kawamoto a aussi utilisé une autre configuration des convoyeurs électrostatiques de forme circulaire a pour but d'appliquer le principe de la spectroscopie de masse. Lorsque des particules sont introduites dans un champ circulaire d'onde mobile créée par un convoyeur circulaire montré à la figure 1.5 [54]. Les particules seraient séparées par taille où on peut constater que les grandes particules ont été distribuées et arrivent jusqu'à la fin du convoyeur, par contre les petites particules ont été sorties du convoyeur, et donc la séparation a été réalisée.



**Figure 2.5.** Système de séparation centrifuge. (a) 1/4 segment et (b) convoyeur centrifuge (système 270°)

### 2.3.1.4. Système de séparation spirale

Un système de séparation vortex illustré sur la figure 2.6 est mis au point, basé sur la constatation que l'altitude de vol dépend du diamètre des particules. Le convoyeur est composé d'électrodes de vortex internes et d'électrodes de cercle concentriques externes.



**Figure 2.6.** Convoyeur en forme spirale

Le champ mobile appliqué aux électrodes concentriques de l'extérieur vers l'intérieur pour empêcher le déversement de particules du convoyeur. Une feuille est placée au-dessus du convoyeur pour collecter de petites particules qui volent à haute altitude [54].

### 2.3.1.5. Système de séparation à rouleaux

La dernière configuration réalisée par kawamoto dans ce contexte est constituée par un système à rouleaux qui utilise la différence d'altitude de vol entre l'équilibre de la force de Coulomb et de la force gravitationnelle. Il se compose de deux parties. L'une est un réseau d'électrodes parallèles qui transporte les particules grâce à l'onde mobile électrostatique, identique à celle du convoyeur linéaire, et un autre est un rouleau de séparation chargé situé sur le côté supérieur du réseau représenté sur la figure 2.7 [54].

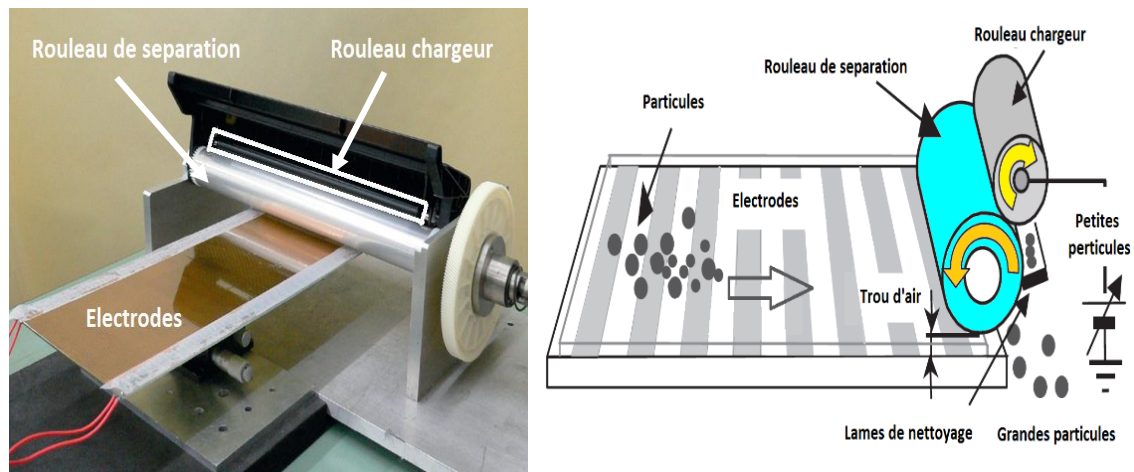
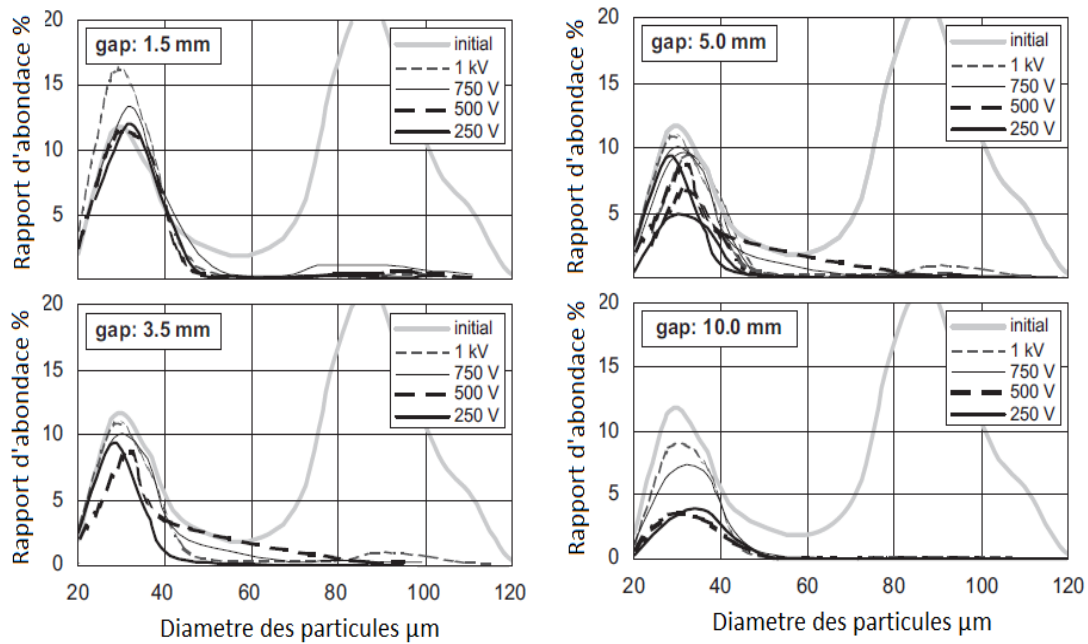


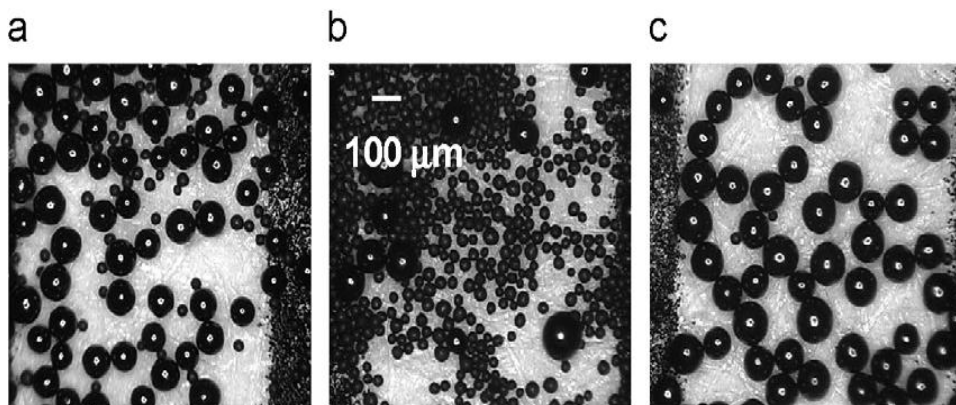
Figure 2.7. Système de séparation à rouleaux

### 2.3.2. Résultats des travaux expérimentaux de Kawamoto

La figure 2.8 illustre quelques résultats de la distribution de taille des particules qui s'attachent au rouleau en fonction de la tension appliquée et du gap. Dans ce système, la fréquence des signaux de tension est fixée à 5 Hz et les particules de toner se chargent par friction avec le film isolant sur le convoyeur. Bien que cette fréquence semble très faible, Kawamoto affirme que le déplacement des particules à cette fréquence est synchronisé avec l'onde électrique. Les résultats montrent que lorsque la tension est appliquée, seules les petites particules qui ont une taille inférieure à  $50 \mu\text{m}$  ont été récupérées au niveau du rouleau (Figure 2.9) [54].



**Figure 2.8.** Distributions granulométriques des particules avant et après séparation électrostatique en utilisant le système à rouleau pour différents valeurs de gap et de tension appliquée



**Figure 2.9.** Photographie de particules avant et après le fonctionnement du système de séparation à rouleaux (1,0 kV). a) Initiale ; (b) attaché au rouleau et (c) non attaché

Bien que le rendement soit réduit pour réaliser les performances de séparation élevées avec les quatre techniques précédentes, un rendement relativement élevé a été réalisé sans réduire les performances de séparation avec le système de rouleaux. Cette technique devrait être utilisée pour séparer le toner et les particules porteuses utilisées en électrophotographie.

## 2.4. Applications spatiales

La poussière atmosphérique est considérée comme l'un des principaux problèmes des robots ainsi que les missions humaines effectuées sur Mars. La poussière peut causer plusieurs problèmes de mission, y compris l'obscurcissement de l'énergie solaire sur les panneaux, risques pour la santé dus à l'inhalation et à l'ingestion de poussière. Aussi, la couche de poussière déposée sur les équipements électroniques peut causer une éventuelle décharge électrostatique par les particules chargées et par conséquent l'usure accrue des composants mécaniques.

Différentes agences notamment la National Aeronautics and Space Administration (NASA) des États-Unis et l'Agence Spatiale ont établi des stratégies pour remédier à ces problèmes liés à la capacité de protéger les surfaces des équipements et les astronautes de la poussière afin de réussir des missions spatiales [55-58].

Les convoyeurs électrostatiques à ondes progressives et stationnaires ont obtenu un grand intérêt dans le domaine de l'espace pour deux applications principales. La première est le dépoussiérage des panneaux solaires dans les futures installations lunaires et martiennes. La deuxième application est aussi liée au dépoussiérage mais cette fois-ci pour les combinaisons spatiales portées par les cosmonautes. Dans les prochains paragraphes, nous présentons succinctement les principaux travaux sur ces deux applications [59-62].

### 2.4.1. Nettoyage des panneaux solaires dans l'espace

Les agences spatiales lancent régulièrement des engins spatiaux automatisés ayant pour objectif l'étude scientifique de Mars. Cet afflux d'engins, équipés d'instruments scientifiques de plus en plus sophistiqués et adaptables, a permis de recueillir énormément de données et d'effectuer de nombreuses découvertes. Les modules électronique et informatique utilisés par ces engins robotisés envoyés sur cette planète ont une alimentation en énergie fournie par des panneaux solaires. Mais sur Mars, l'atmosphère est très poussiéreuse, des particules de petite taille, de 1 à 10  $\mu\text{m}$ , étant soulevées par des tempêtes et des vents de grande vitesse.

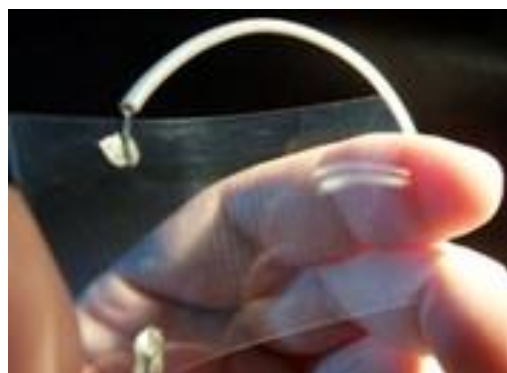
Ces particules diffusent le rayonnement solaire et se déposent par sédimentation sur les panneaux solaires ; l'énergie que les panneaux fournissent diminue progressivement (de 0,28 % par jour martien lors de la mission Pathfinder) et ceci limite fortement la durée de vie des modules. Ce problème du dépôt de poussière devra être résolu avec l'utilisation de la technique électrostatique de dépoussiérage, cette technique est très intéressante car elle évite le recours à des pièces mobiles (balayage mécanique par exemple) qui sont délicats à utiliser dans les ambiances spatiales.

#### 2.4.1.1. Expérience de Calle *et al.*

##### A. Les écrans électrodynamiques EED

Dès les années 2000, Calle *et al.* ont conduit plusieurs études pour évaluer l'efficacité de ce qu'ils appellent bouclier anti-poussière électrodynamique (Electrodynamic Dust Shield ou EDS) pour le dépoussiérage des panneaux photovoltaïques dans des conditions lunaires et Martiennes [63-67].

Plusieurs prototypes d'EDS ont été conçus et fabriqués en utilisant différentes techniques avec des substrats rigides ou souples, opaques ou transparents, et avec des électrodes métalliques rigides ou souples, opaques ou transparentes, montées en parallèles ou sous formes spirales, etc. La figure 2.10 présente un des prototypes constitué d'un écran diélectrique transparent avec des électrodes transparentes flexibles ITO [63].



**Figure 2.10.** Bouclier anti-poussière électrodynamique (Electrodynamic Dust Shield-EDS) transparent avec électrodes parallèles en oxyde d'indium-étain transparent [63]

**B. Les films d'ITO : oxyde d'indium dopé à l'étain [68-69]**

L'ITO est un alliage ternaire d'oxyde d'indium dopé à l'étain et est constitué d'environ 90% d'oxyde d'indium pour 10% d'oxyde d'étain. C'est actuellement le matériau de référence dans le secteur des électrodes transparentes en raison de ses propriétés remarquables. Il possède une très bonne conductivité avec une résistance surfacique de l'ordre de  $10 \Omega/\square$  et une excellente transmittance dans le visible (>90%).

Cette électrode possède d'excellentes propriétés optoélectroniques et sa robustesse n'est plus à prouver. La présence d'électrodes transparentes dans des objets du quotidien grandit donc de jour en jour, nécessitant des matériaux adaptés et une production de couches transparentes et conductrices capables de répondre aux exigences des marchés demandeurs.

Dès lors qu'il a été remarqué que des couches minces pouvaient présenter la propriété peu commune de conductivité électrique associée à une transparence optique, les opportunités imaginées ont été nombreuses. Les avancées technologiques récentes n'ont fait que renforcer les travaux portant sur ces matériaux au comportement très intéressant. Après avoir donné la définition d'une électrode transparente, son intégration dans des dispositifs sera décrite. L'architecture, le photovoltaïque et bien sûr les écrans en ont trouvé l'utilité et devraient contribuer à leur développement continu. Puis l'électronique organique, aux possibilités inespérées avec les matériaux employés jusqu'à présent, sera présentée car c'est également dans cette catégorie que s'inscrivent les modules OPV (Organic Photovoltaic Cells).

Les électrodes transparentes pour l'électronique organique aussi appelée électronique plastique [69], l'électronique organique est en plein développement depuis le début des années 1980. Les molécules à la base de l'électronique organique sont les semi-conducteurs organiques. Dans les années 70, les recherches du groupe d'Hideki Shirakawa sur la synthèse puis les propriétés du polyacétylène ont mis en évidence la possibilité de synthétiser des matériaux organiques conducteurs puis semi-conducteurs [70].

Plusieurs expériences en été mené par des chercheurs sous les conditions lunaires avec une poussière similaire à celle de la lune JSC-1A. La composition de cette poussière est approximativement la suivante :  $\text{SiO}_2$  (47%),  $\text{AL}_2\text{O}_3$  (16%),  $\text{CaO}$  (10%),  $\text{MgO}$  (10%),  $\text{FeO}$  (8%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (3%) et  $\text{TiO}_2$  (2%). Avec différentes gammes de taille de particules pour tester l'efficacité du système de dépoussiérage, ces particules ont été obtenues auprès de la NASA KSC.

Dans ce cadre, Calle et al. ont effectué des expériences dans une chambre à vide à une pression de  $10^{-6}$  kPa. L'efficacité du nettoyage a été réalisée en utilisant des panneaux solaires de  $5 \times 5 \text{ cm}^2$ , (Figure 2.11).

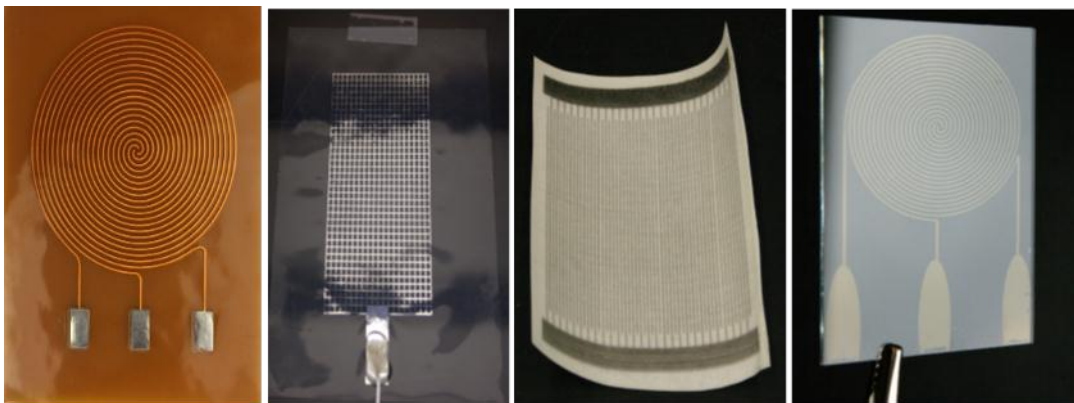


**Figure 2.11.** Photographies de l'EDS transparent de 20 cm de diamètre pour la fenêtre PEM pendant les tests en laboratoire. La poussière de stimulant JSC-1A a été déposée de manière relativement uniforme, comme indiqué sur la gauche. La photo de droite montre l'EDS après activation

### C. Types de convoyeurs

On outre, le Kennedy Space Center (KSC) a concentré ses efforts sur quatre variantes de l'EDS, illustrées dans la figure 2.12. Chacun de ces systèmes a été développé comme résultat direct des conclusions des rapports de mission Apollo, où les astronautes ont noté un certain nombre de problèmes d'équipement causés par la poussière lunaire. En effet, l'origine des problèmes enregistrés est due à la température élevée sur l'équipement en raison de la couverture de poussière [71-74].

- La configuration cuivre/Kapton est conçue pour être enduite de peinture thermique et fixée aux radiateurs thermiques des engins spatiaux.
- Les écrans en argent/éthylène/propylène (FEP) ont également été développés pour les radiateurs thermiques mais ne nécessitent pas de peinture thermique.
- Une configuration nanotube/tissu de carbone a été développée pour les combinaisons spatiales, où les astronautes ont noté une adhérence substantielle de la poussière.
- Les astronautes d'Apollo ont également noté que les visières et autres équipements optiques étaient marqués par la poussière lunaire abrasive. L'oxyde d'étain indium transparent (ITO) /la configuration du verre a été développée pour protéger ces systèmes.



(a) Cu/Kapton EDS

(b) Ag/FEP EDS

(c) CNT/fabric EDS

(d) ITO/glass EDS

**Figure 2.12.** Différents substrats et modèles d'électrodes développés pour l'EDS

Le Kennedy Space Center a développé des convoyeurs en utilisant une électrode (Figure 2.12.b), deux électrodes (Figure 2.12.c) et trois électrodes (Figure 2.12.a) et (Figure 2.12.d).

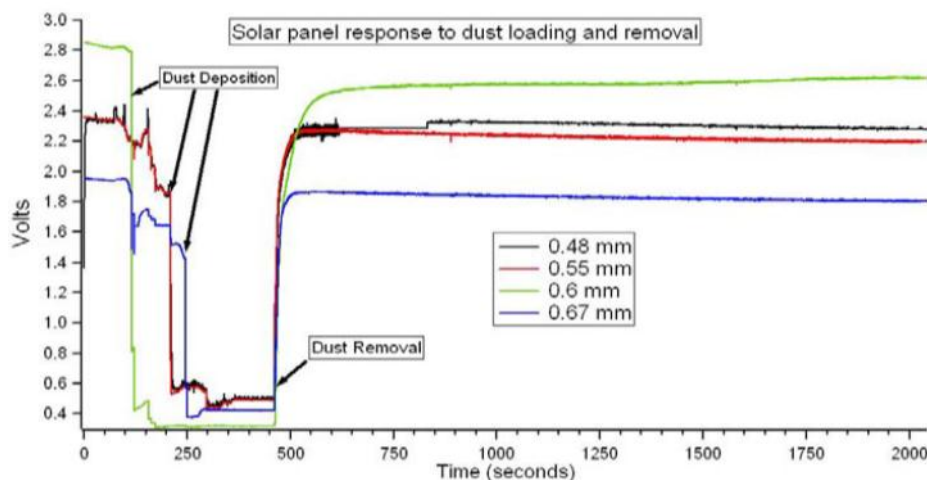
Dans la configuration à une électrode indépendante (monophasée), une onde stationnaire est créée, par opposition à l'onde progressive. Pour deux blindages d'électrode indépendantes (biphasés), les signaux haute tension envoyés au blindage sont 180 degrés déphasés les uns par rapport aux autres de sorte que lorsqu'une électrode est activée, l'autre est au repos. Dans la

configuration à trois électrodes indépendantes (triphasées), les trois signaux haute tension sont déphasés de 120 degrés les uns par rapport aux autres.

#### 2.4.1.2. Résultats expérimentaux obtenus avec les EDS

La figure 2.13 montre l'évolution des tensions fournies par les quatre panneaux solaires en fonction du temps. Les quatre panneaux sont équipés par des EDS avec différents espaces inter-électrodes : 0.48 mm, 0.55 mm, 0.6 mm et 0.67 mm. Il faut distinguer trois étapes dans cette expérience, nettement visibles sur les courbes de tension. La première est l'acquisition de la tension avec des panneaux propres.

La chute de la tension observée sur les courbes, durant la deuxième étape, traduit l'effet du dépôt des particules de JSC-1A sur les panneaux en utilisant un tamis. Finalement, après activation des EDS, les particules déposées sur les panneaux sont éliminées de la surface active, permettant ainsi l'augmentation des tensions fournies et la récupération de l'efficacité des panneaux solaires.



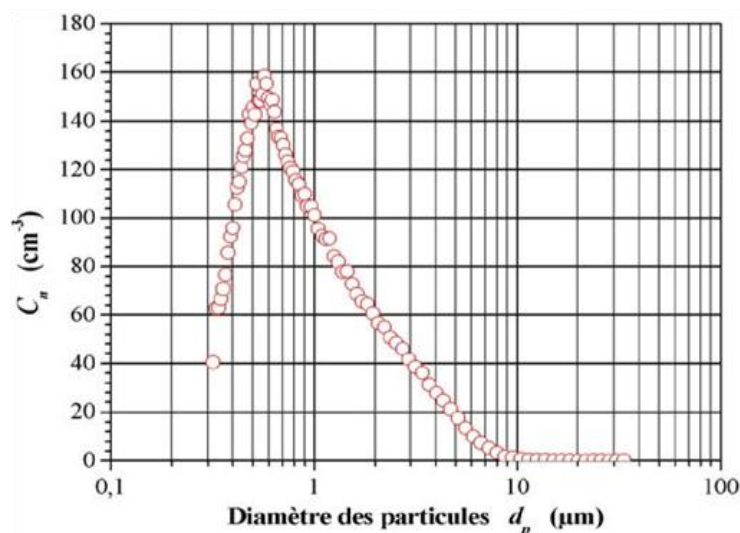
**Figure 2.13.** Réponse du panneau solaire à un dépôt de poussière JSC-1A de 50 à 75  $\mu\text{m}$  et à son élimination. Le nettoyage a été accompli en utilisant des convoyeurs avec quatre espacements d'électrodes différents : 0.48 mm, 0.55 mm, 0.6 mm et 0.67 mm [64]

D'autres recherches pertinentes ont été effectuées durant les vingt dernières années afin d'apporter des améliorations et développements du système EDS non seulement dans des conditions spatiales, mais aussi dans des

conditions terrestres. En particulier celle des équipes de Mazumder et de Kawamoto.

### 2.4.1.3. Expériences de P. Atten *et al.*

L'équipe de P. Atten a effectué aussi dans le même contexte un travail très intéressant avec le soutien de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) [74-75]. Ce travail a porté sur le dépoussiérage des panneaux solaires dans des conditions similaires à celles de la planète Mars (gaz carbonique avec 95% de CO<sub>2</sub>, pression entre 5 et 10 mbar, température moyenne ambiante varie de -140°C à 20°C, taille typique des suspensions de 0,1 à 10 µm (Figure 2.14), et concentration de la poussière inférieure 1000 particules/cm<sup>3</sup> [76-79] en utilisant deux approches électrostatiques. La première consiste à enlever la couche déposée en utilisant un convoyeur à ondes stationnaires. L'autre approche consiste à empêcher, autant que possible, le dépôt de particules sur le panneau en utilisant la précipitation électrostatique. L'idée est de repousser les particules, judicieusement chargées par décharge couronne, en les collectant sur une électrode extérieure qui entoure le panneau. Cette technique préventive est plus coûteuse énergétiquement, car elle impose un fonctionnement continu de l'électrofiltre. Alors que la première méthode permet au dispositif de fonctionner de façon intermittente, par exemple un balayage par semaine [79].

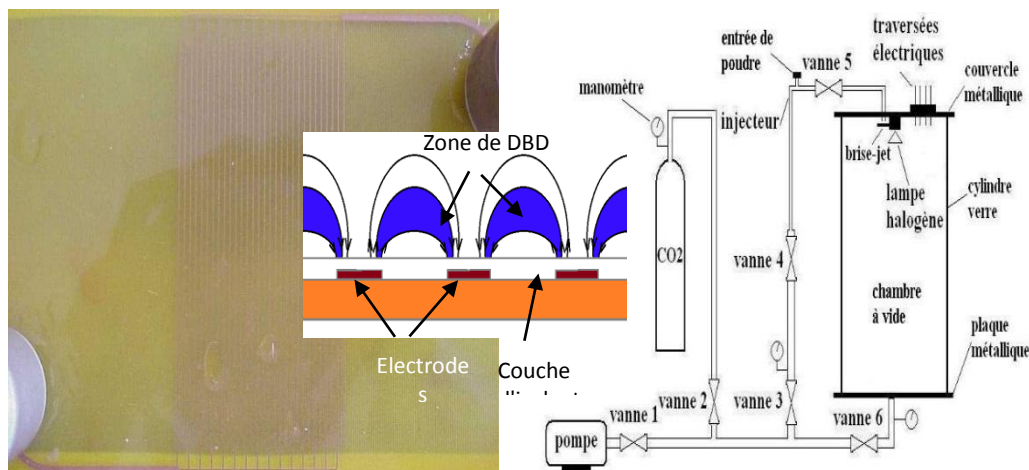


**Figure 2.14.** Distribution granulométrique de la poudre simulant la poussière de Mars (Salten Skov)

La première approche utilisée dans cette opération de dépoussiérage est d'avoir des particules suffisamment chargées. Dans le cas des particules isolantes caractérisées par un temps de relaxation de charge élevé, la manipulation des particules par des champs électriques élevés est possible grâce à leur charge résiduelle. La particularité du dispositif d'Atten est que le mécanisme principal du chargement des particules se produit donc lorsque la tension appliquée dépasse la valeur seuil d'apparition des décharges [74].

Le but est de créer une décharge à barrière diélectrique (DBD) de surface sur les électrodes couvertes par une couche diélectrique. Le rôle de la décharge est de charger les particules, à un niveau suffisant, pour que la force de Coulomb surpasse les forces d'adhésion notamment la force de van de Waals, qui est difficile à réaliser pour les particules fortement adhérentes à basse pression [74]. La photographie du rideau électrique biphasé et le schéma du montage expérimental utilisé sont illustrés sur la figure 2.15.

Il est à noter que la largeur des électrodes et le gap sont fixés à 0,7 mm et 2,5 mm, respectivement, et que les électrodes sont recouvertes par une couche isolante 0,2 mm d'épaisseur. Les expériences sont effectuées dans une chambre à vide contenant du CO<sub>2</sub> permettant d'imiter l'atmosphère de Mars. Les tests ont été effectués sur plusieurs types de particules (PE, PVC, Calcite CaCO<sub>3</sub>) avec différentes gammes de taille, ainsi qu'une poudre permettant de simuler la poussière de Mars qui provient de Salten Skov au Danemark. C'est un sol sédimentaire naturel contenant une forte concentration en oxydes de fer (environ 60% en poids) avec comme composition minéralogique : 73% de goéthite, 14% d'hématite et 13% de maghémite [76]. La suspension présente une distribution large (diamètre équivalent) centrée autour de 0,7  $\mu\text{m}$ .



**Figure 2.15.** Schéma de la chambre à vide et des systèmes de contrôle de la pression (air ou CO<sub>2</sub>) et d'injection de poudre [74]

Dans l'air à la pression ambiante (pression = 1 bar), il a été établi que le rideau électrique à ondes stationnaires peut éliminer totalement les couches déposées de particules ou d'agglomérats. Dans des gaz sous basse pression, tels que l'atmosphère de Mars, il a été démontré que le rideau électrique peut également agir sur des particules ou des agglomérats de grande taille et sur des particules soumises à forces d'adhésion relativement faibles. Cependant, comme la tension seuil d'apparition de la DBD est faible et le libre parcours moyen prend des valeurs assez grandes pour une pression de 10 mbar, la force de Coulomb n'est pas suffisamment élevée pour éliminer les petites particules (< quelques micromètres) fortement adhérentes. En résumé, la charge naturelle des particules Martienne par triboélectricité, induite par le vent et les tempêtes, n'est pas suffisante pour éliminer toutes les particules adhérentes sur les panneaux solaires dans un environnement Martien.

#### 2.4.2. Dépoussiérage des combinaisons spatiales

Au cours des missions Apollo effectués dans les années 1960 et 1970, les constats sur les lieux ont révélé que la poussière lunaire est exécrément abrasive et omniprésente. En l'espace de quelques heures de travail à l'extérieur du module lunaire, toutes les combinaisons des astronautes, de la tête aux pieds, se sont recouvertes d'une fine pellicule de poussière grise collant comme du talc, griffant des objets et corrodant les joints (Figure 2.16). Ces effets néfastes de la poussière

lunaire sur les combinaisons spatiales ont conduit la NASA à utiliser les convoyeurs électrostatiques. Cette technique a été identifiée par la NASA comme une solution extrêmement pertinente pour les futures missions d'exploration planétaire à long terme [81]. En effet, la poussière lunaire s'est avérée très gênante, car les particules de poussière pouvaient pénétrer dans le tissu de la combinaison spatiale, les joints d'étanchéité et les équipements électriques [82]. Même à l'intérieur du module lunaire, les astronautes d'Apollo ont été exposés à cette poussière après avoir retiré leur combinaison spatiale, ce qui a provoqué une gêne oculaire et des symptômes respiratoires occasionnels [83], [57].



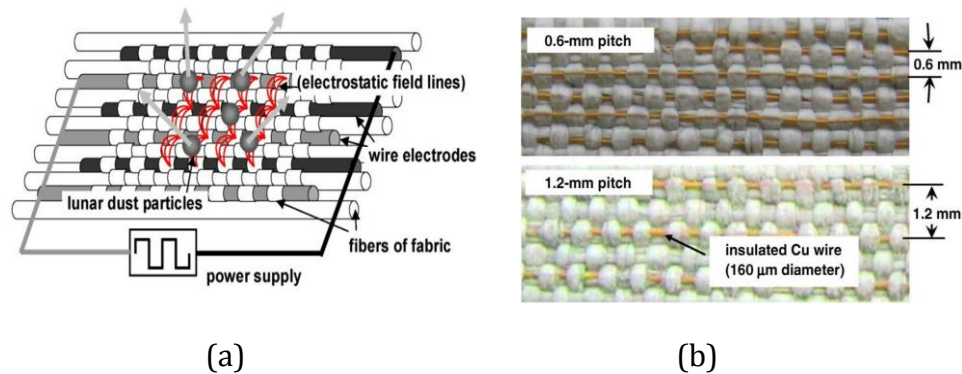
**Figure 2.16.** Photographies d'une combinaison spatiale Apollo 17 LMP A7LB

#### 2.4.2.1. Expériences de Kawamoto et al. pour les combinaisons spatiales

La poussière lunaire est composée de fines particules qui portent des charges électriques transmises par les vents solaires et les rayons ultraviolets. Par conséquent, l'utilisation des forces électrostatiques pour manipuler ces particules peut être très efficace. Une des premières études sur ce sujet est celle effectuée par Kawamoto et al. en 2011 [84].

Les auteurs ont cousu des électrodes de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre dans la couche extérieure du tissu de la combinaison spatiale dans une zone de 30 x 20 mm. Les électrodes étaient isolées par un film de polyester de 30 % d'épaisseur. Étant donné que le tissu est isolant, l'application d'une haute tension entre les électrodes

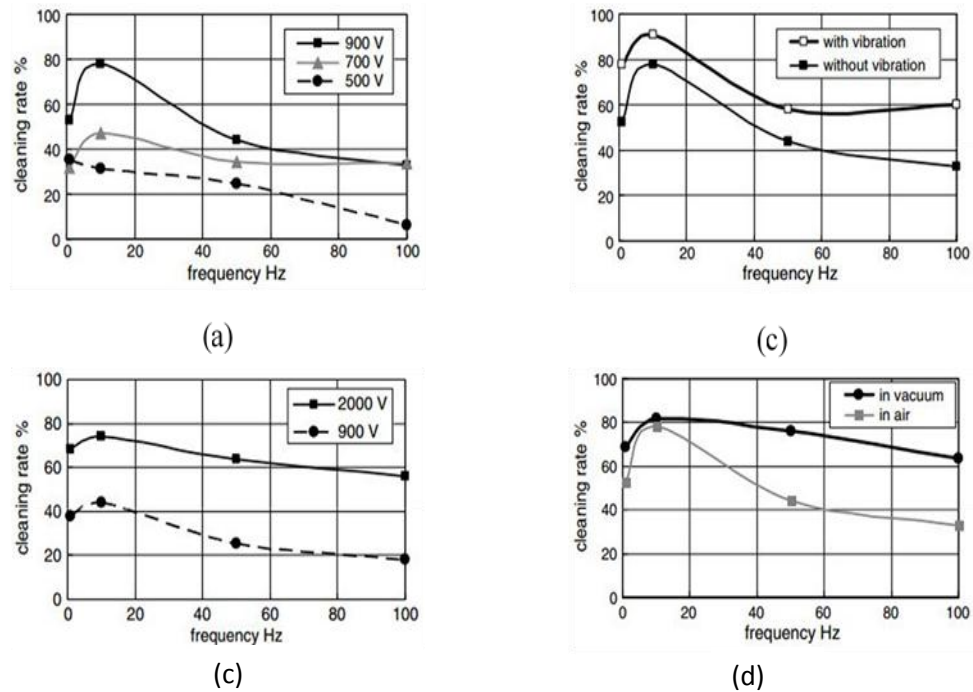
parallèles permet de générer un champ électrostatique important. La figure 2.17 représente un schéma représentatif et des images des tissus sous investigation.



**Figure 2.17.** (a) Système de nettoyage électrostatique pour éliminer la poussière lunaire du tissu d'une combinaison spatiale. (b) Photographie des électrodes intégrées dans le tissu d'une combinaison spatiale [84]

Dans cette étude, les auteurs ont alimenté le système par une tension rectangulaire monophasée, permettant de générer une onde stationnaire. Ainsi, les particules ne se déplacent pas dans une direction préférentielle, mais elles sont repoussées de la surface dans toutes les directions.

La figure 2.18 représente l'efficacité de nettoyage des tissus en fonction de la fréquence pour différentes situations expérimentales. Les résultats sont très prometteurs, car ils montrent que l'efficacité peut atteindre des valeurs très élevées (plus de 80%) si des valeurs appropriées de la tension et de la fréquence sont appliquées. De plus, le système est aussi plus efficace à vide et en présence des vibrations. Bien que le système ait démontré une efficacité élevée dans certaines conditions, Kawamoto a estimé qu'il n'est pas capable d'éliminer parfaitement les petites particules, principalement piégées entre les fibres du tissu.



**Figure 2.18.** Efficacité de nettoyage du tissu d'une combinaison spatiale.

Conditions : (a) gap 6 mm, sans vibration, dans l'air. (b) gap 12 mm, sans vibration, dans l'air. (c) gap 6 mm, 900V, dans l'air. (d) gap 6 mm, 900 V, sans vibration [84]

En effet, la force d'adhésion pourrait être supérieure à la force de Coulomb pour les petites particules. Par exemple, les particules entre 10 et 20  $\mu\text{m}$  ne peuvent pas être éliminées sans vibration. De plus, il a été difficile d'éliminer les particules de moins de 10  $\mu\text{m}$  de diamètre qui étaient piégées entre les fibres, même avec des vibrations mécaniques.

#### 2.4.2.2. Expériences de Manyapu *et al.*

Récemment, d'autres chercheurs ont essayé d'apporter des améliorations à ce système. Manyapu *et al.* [84-85] ont examiné l'utilisation d'une nouvelle technique intégrée dans la couche extérieure de la combinaison spatiale afin de réduire la contamination par la poussière. Les auteurs ont employé deux technologies spécifiques développées par la NASA pour les surfaces rigides : une technologie active de type EDS (Electrodynamic Dust Shield) [64] présentée précédemment, et une technologie passive de revêtement dite WFM (Work Function Matching Coating). Mais, au lieu d'utiliser des électrodes métalliques

rigides fabriquées en cuivre, en ITO ou en argent comme avec les EDS classiques, ils ont proposé d'utiliser des fibres flexibles en nanotube de carbone (CNT).

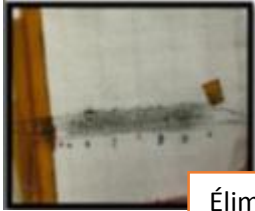


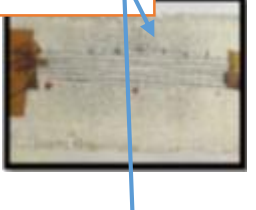
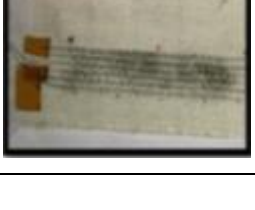
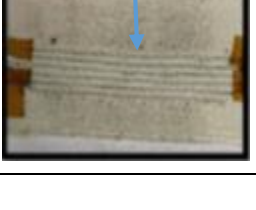
Au cours des activités spatiales, les combinaisons subissent des mouvements répétés qui courbent, plient ou tordent leurs matériaux, en particulier au niveau des jambes ou des bras, d'où l'importance d'utiliser des matériaux d'électrodes extrêmement flexibles et pratiquement sans fatigue. Les nanotubes de carbone possèdent des propriétés exceptionnelles de résistance mécanique, de conductivité électrique et thermique avec une faible densité massique (de l'ordre de  $1,6 \text{ g/cm}^3$  au lieu de  $8,96 \text{ g/cm}^3$  pour le cuivre), ce qui en fait des matériaux multifonctionnels idéaux combinant les meilleures propriétés des polymères, des fibres de carbone et des métaux [84]. Les électrodes sont alimentées par un système de tensions triphasées de forme sinusoïdale, ce qui produit une onde du potentiel électrique progressive.

Deux types d'essais ont été effectués, des essais statiques où les particules sont déposées initialement sur la surface, et des essais dynamiques où les particules tombent sur la surface pendant que l'EDS est activé. Pour les essais statiques, 10 mg de poussière ont été déposés sur la zone active à nettoyer avant l'activation de l'EDS.

Les observations visuelles et les images microscopiques ont révélé que les zones dites actives deviennent plus propres après l'activation du système EDS. Des résultats similaires ont été obtenus avec les essais dynamiques. La figure 2.19.a, montre une illustration des images avant-après traitement pour des essais statiques sur des échantillons intégrant 6 électrodes espacées de 1mm. Pour quantifier la quantité de poussière repoussée sur l'échantillon, une analyse par comptage de particules a été réalisée sur les images microscopiques.

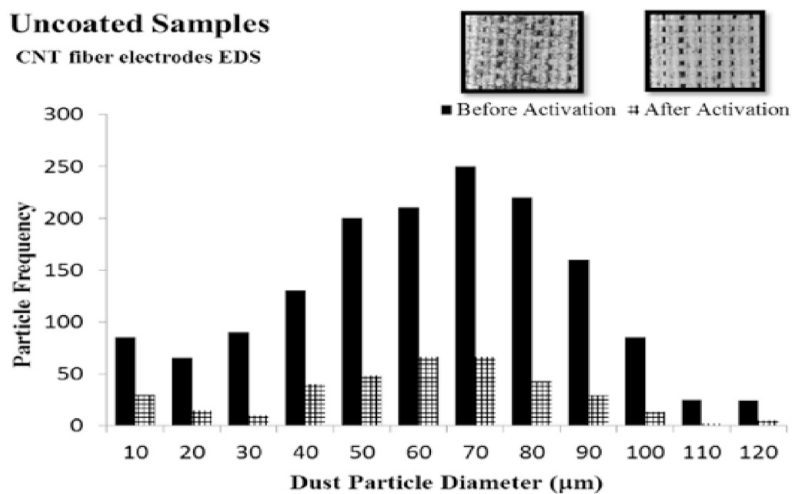
La figure 2.19.b présente les distributions granulométriques des particules de poussière avant et après l'activation de l'EDS.

Les résultats de ces expériences montrent que le système intégré de dépoussiérage est capable d'enlever de 80 à 95 % de la poussière du tissu de la combinaison spatiale démontrant ainsi la validité du concept.

Avants l'activation	Après l'activation	Description
		<b>échantillon non revêtu</b> 6 cnt electrode 1 mm espacement 50-75µm JSC-1A 1000 V, 10 Hz
		<b>échantillon revêtu</b> 6 cnt electrode 1 mm espacement 50-75µm JSC-1A 1000 V, 10 Hz
		<b>échantillon revêtu</b> 6 cnt electrode 1 mm espacement 50-75µm JSC-1A 1400 V, 10 Hz

Élimination de la  
poussière dans  
zone active

(a)



(b)

**Figure 2.19.** (a) Résultats des essais statiques. Etat des échantillons avant et après activation de l'EDS. (b) Taille et répartition des particules de poussière avant et après activation de l'EDS [86-87]

L'objectif de cette recherche est de développer un système de nettoyage de la poussière intégré aux combinaisons spatiales pour protéger les combinaisons contre les effets dangereux de la poussière lunaire pour les futures missions de longue durée. L'étude explore la faisabilité d'un système de dépoussiérage passif et actif combiné utilisant un nouveau matériau de fibre flexible CNT haute performance de concert avec de nouvelles techniques pour intégrer la technologie active EDS et la technologie passive WFM Coating dans le tissu de la couche extérieure de la combinaison spatiale [86-87].

## 2.5. Nettoyage des panneaux solaires dans des conditions terrestres

Les saletés et la poussière qui s'accumulent sur les panneaux solaires peuvent impacter sur leurs performances. Diverses études sur les panneaux solaires ont démontré que leur fonctionnement et leurs rendements pouvaient même diminuer jusqu'à 15 % annuellement, à cause de ces débris qui s'encrassent, ces particules couvrent une partie importante de la surface optique du système et diminuent l'irradiance entrante vers les cellules causant ainsi des pertes de puissance dans le cas des modules PV et des pertes de réflexion dans le cas des miroirs des concentrateurs solaires (Figure 2.20.a). (Figure 2.20.b) [88].

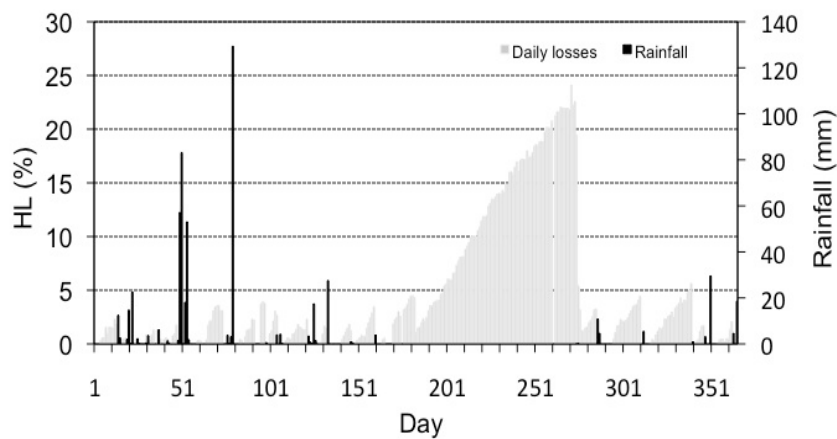


**Figure 2.20.** (a) Panneaux solaires (b) miroirs des concentrateurs solaires [88]

Un bon entretien optimisera donc leurs fonctionnements et leurs productions d'énergie pour fournir l'électricité, en plus de la productivité la durée de vie du panneau solaire pourrait aussi écourter considérablement. Ce type de particules déposées dépend de plusieurs paramètres géographiques (zones

industrielle, saharienne, aride et semi-aride, etc...) et environnementaux (température, vent, humidité, pollution, etc...) [89].

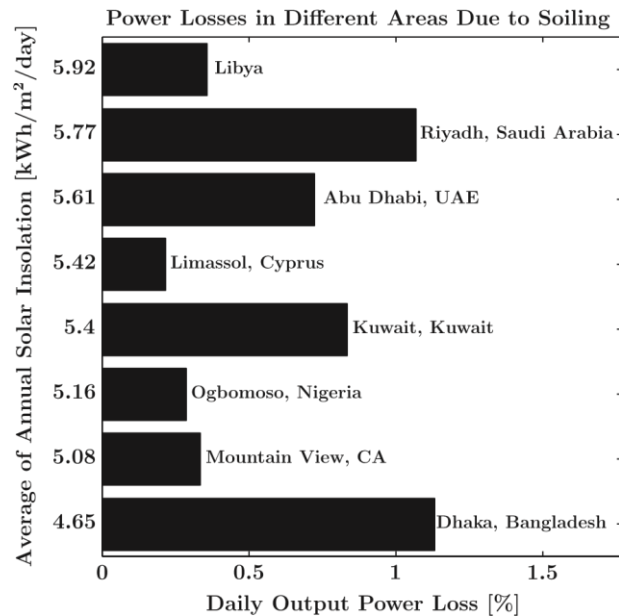
J. Zorrilla-Casanova et al. ont montré que les pertes produites par la présence de poussière dépendent fortement des précipitations. En période de pluie, un bon nettoyage de la cellule sale se produit et elle retrouve ses performances initiales, cependant, pendant de longues périodes sans pluie, comme l'été, l'accumulation de poussière peut provoquer des pertes quotidiennes supérieures à 20% (Figure 2.21) [90].



**Figure 2.21.** L'évolution des pertes quotidiennes d'irradiation HL au cours de l'année [90]

Arash Sayyah et al. ont effectué d'autres travaux sur l'effet de salissure à travers le monde, se référant à la contamination particulière des surfaces optiques, s'est avéré avoir un impact néfaste sur les performances des capteurs solaires. La figure 2.22 montre les pertes de puissance de sorties quotidiennes dans différentes parties du monde causées par l'accumulation de poussière sur les surfaces des capteurs solaires. Bien que ces régions reçoivent un fort rayonnement solaire (NASA Solar Insolation, 2008). En revanche, la salissure comprend non seulement l'accumulation de poussière, mais également la contamination de surface par les produits végétaux, la suie, le sel, les déjections

d'oiseaux et la croissance d'espèces organiques, ce qui affecte négativement les performances optiques (Figure 2.23).



**Figure 2.22.** Perte de puissance quotidienne des centrales solaires dans différentes parties du monde [88]



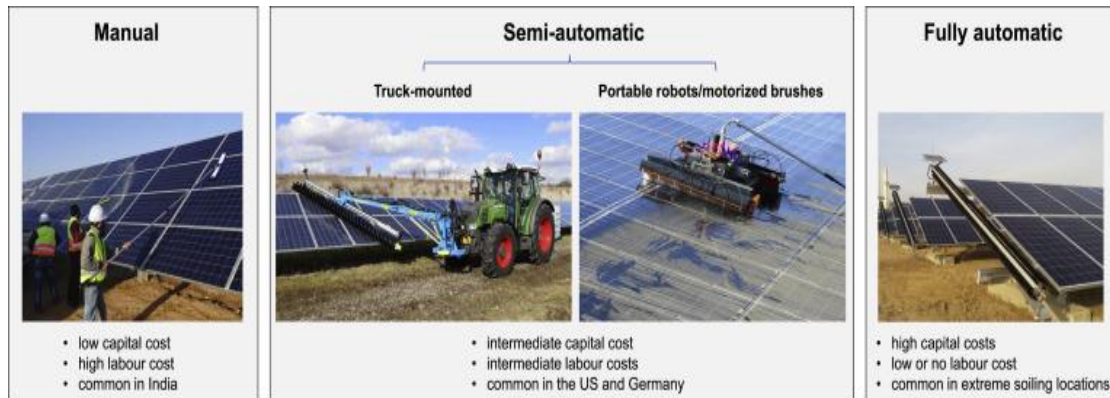
**Figure 2.23.** Exemples de salissures Présentation de différents types de salissures avec des photographies exemplaires de salissures par (A) de la poussière minérale dans une zone désertique, (B) des excréments d'oiseaux, (C) des algues, des lichens, des mousses ou des champignons et (D) du pollen dans des milieux humides et climats modérés, (E) échappement du moteur d'une zone industrielle et (F) émissions agricoles

En outre, il est très important de quantifier les pertes d'énergies produites par les poussières dans les zones sèches où ces pertes pourraient atteindre des valeurs importantes et ainsi produire une diminution substantielle de l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Dans ces cas, un nettoyage régulier des modules serait nécessaire, augmentant ainsi les coûts de maintenance [89].

### 2.5.1. Nouvelles méthodes de nettoyage

Les processus de nettoyage automatisés, en particulier ceux qui ne nécessitent pas d'eau, sont les plus souhaitables pour maintenir la haute efficacité des installations solaires dans des environnements poussiéreux. La plupart des procédés appliqués à ce jour utilisent des mécanismes mécaniques et motorisés complexes, qui ne sont pas encore bien établis comme évolutifs, économiques ou fiables. Il est souvent difficile ou peu pratique de disposer d'une équipe de techniciens pour maintenir le fonctionnement des robots de nettoyage, notamment dans les installations autonomes des zones reculées. Les opérations de nettoyage à grande échelle avec de l'eau suivie d'un lavage au détergent nécessitent de grandes quantités d'eau chaque année, l'utilisation de véhicules spécialement conçus et une équipe d'exploitation expérimentée. De telles méthodes sont coûteuses et difficiles à mettre en œuvre lorsque l'eau douce est rare. Dans de nombreuses centrales solaires à grande échelle, le nettoyage doit être effectué à l'aide d'eau de mer dessalée, ce qui entraîne une charge énergétique supplémentaire.

Le coût de l'eau et de la main-d'œuvre a le potentiel d'être un facteur considérablement prohibitif, comme l'ont souligné Ju et Fu [91]. La nature aride de l'emplacement du site exacerbe l'utilisation des ressources en eau, qui peuvent être nécessaires pour d'autres fonctions vitales dans la communauté environnante. Une analyse de Sheratte (1979) montre que la main-d'œuvre représente environ 45,7% du coût total du nettoyage à un CSP usine au Naval Weapons Center (NWC) à China Lake, CA. Une méthode de pulvérisation à haute pression est utilisée dans cette installation [92] (Figure 2.24).



**Figure 2.24.** Présentation des différentes technologies de nettoyage triées par catégorie : manuelle, semi-automatique (y compris les solutions montées sur camion et les robots portables) et entièrement automatique

Face à ces problématiques, une approche alternative pour le nettoyage par les forces électrostatiques en utilisant le concept du convoyeur à ondes progressives ou stationnaires pour le dépoussiérage a pris une grande ampleur ces dernières années. Car, ce dispositif ne nécessite pas de ressources en eau ni de mouvements mécaniques pour éliminer les particules de poussière, ce qui réduit les coûts de maintenance. Il s'agit d'une technologie qui a une consommation d'énergie très faible voire négligeable, qui peut être fournie en utilisant le panneau lui-même [93-95].

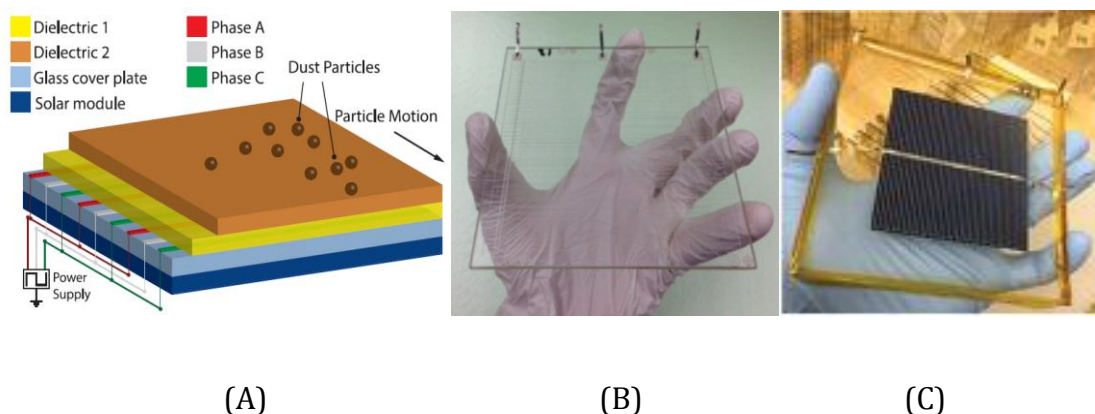
Plusieurs articles ont été publiés dans ce sujet. En commençant le nettoyage des panneaux solaires par les forces électrostatiques en utilisant les écrans électrodynamiques EDS. Le principe fondamental de telle solution de nettoyage a été introduit par Masuda et al. dès les années 1970. Et qui ont montré qu'une onde de champ électrique en mouvement pouvait déplacer des particules d'aérosol chargées dans une direction transversale.

La méthode a depuis été améliorée et préconisée par les chercheurs pour éliminer la poussière des panneaux solaires. Le processus de dépoussiérage ne nécessite ni eau ni pièces mobiles et peut-être mis en œuvre aussi souvent que nécessaire sans interrompre le fonctionnement de la centrale photovoltaïque [22], [96].

### Expériences de Calle, Sharma et Mazumder

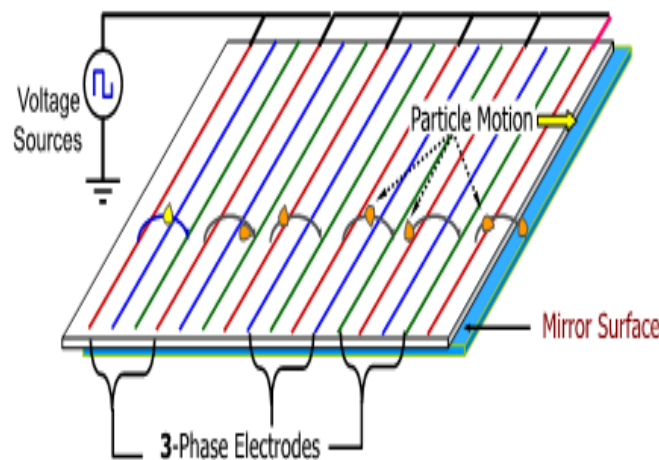
Calle et al. (2009), Atten et al. (2009), Sharma et al. (2009), Mazumder et al. (2006), ont utilisé aussi des électrodes transparentes (avec une largeur, une forme et un espacement appropriés entre électrodes) ; intégrés dans un film polymère transparent résistant aux UV ; avec un traitement de la surface supérieure en film polymère pour obtenir une structure de surface anti-réfléchissante, cet ensemble recouvre les modules photovoltaïques ou sur la face avant des miroirs solaires. Mazumder propose d'utiliser une résine de fluoropolymère (telle que Tefzel ®, fabriquée par DuPont) pour répondre à la plupart des exigences : transparence supérieure à 90 % sur la plage du rayonnement solaire, résistant aux UV, d'excellentes propriétés de charge par contact, résistant aux rayures, faible indice de réfraction et résistant à l'humidité.

Pour un bon dépôt d'électrodes sur des surfaces de verre ou de polymère, les électrodes peuvent être constituées de préférence d'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO), de nanotubes de carbone (CNT), de nanofils d'argent (Ag-NW) ou d'oxyde de zinc dopé à l'aluminium (AZO). Ces matériaux fournissent la conductivité requise, la transmittance optique nécessaire, la durabilité et la commodité du dépôt pour les grandes installations. La figure 2.25 illustre un des prototypes d'EDS de l'équipe de Mazumder à l'échelle de laboratoire [97-103].



**Figure 2.25.** Photographie d'un écran EDS avec des électrodes transparent (transparence >79%) A. Représentation schématique d'une vue en 3-D d'un EDS associé à un module photovoltaïque. B. Photographie d'un EDS. C. photographie d'un EDS assemblés à un module photovoltaïque

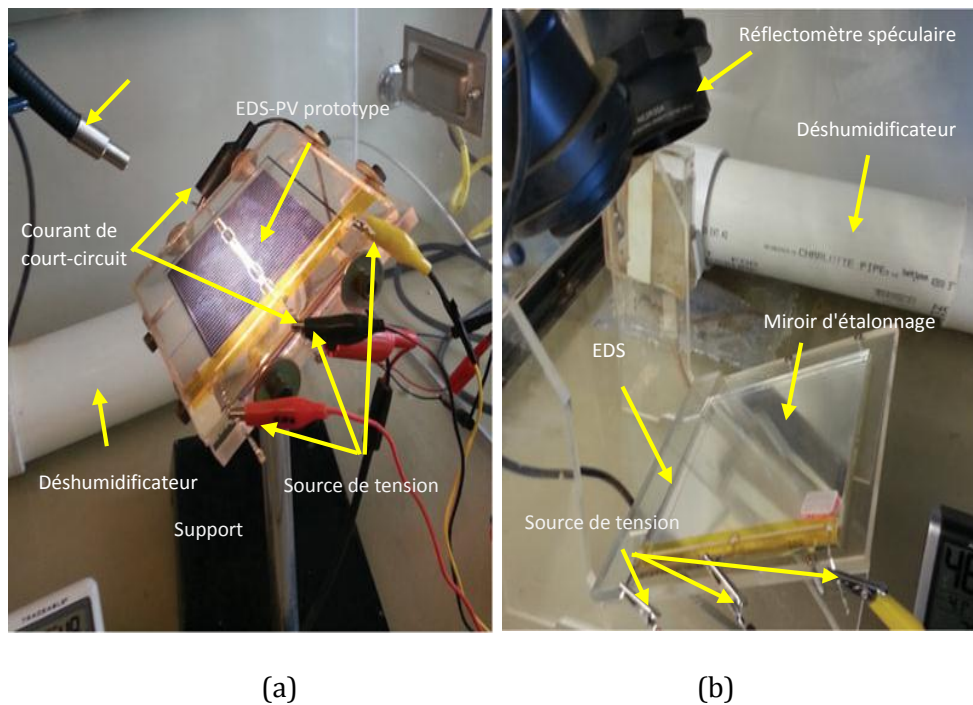
Les électrodes sont alimentées par une source de tension triphasée basse fréquence d'environ 1 kV d'amplitude. Un champ électrique variable c'est produit à la surface du film diélectrique. Ce champ électrique non uniforme exerce des forces coulomb et diélectrophorétique sur les particules qui se trouvent sur la surface des modules photovoltaïques. Les particules chargées sont transportées par la force de Coulomb suivant les ondes progressives latéralement (Figure 2. 26).



**Figure 2.26.** Déplacement des particules sur un EDS intégré au-dessus d'un miroir [102]

Mazumder a effectué des mesures par la méthode gravimétrique à partir du rapport  $(m_0 - m_r)/m_0$ . Où  $m_0$  est la masse de poussière déposée sur l'EDS par rapport à la masse de poussière  $m_r$  restant sur le film après activation de l'EDS.

Pour tester l'efficacité de nettoyage et de dépolluage, les travaux ont été mesurés en utilisant le dispositif illustré dans la figure 2.27 (a), où on constate que les panneaux solaires stratifiés en film EDS sont positionnés à un angle d'inclinaison souhaité et placés dans une chambre d'essai climatisée pour mesurer le courant de court-circuit dans différentes conditions. La figure 2.27 (b), montre le réflectomètre spéculaire sans contact utilisé pour mesurer la réflexion spéculaire d'un miroir solaire laminé avec un film EDS [104].



**Figure 2.27.** Photographies montrant les dispositifs expérimentaux pour mesurer (a) OPR et (b) SRR. (a) Panneaux solaires stratifiés en film EDS. (b) Miroir solaire laminé avec un film EDS [104]

Étant donné que la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) reste pratiquement constante pour un rayonnement et une longueur d'onde de rayonnement donnés (550 nm), le rapport des courants de court-circuit ( $I_{sc}$  restauré) / ( $I_{sc}$  initial) donne le rendement de restitution de la puissance [104]. Le courant de court-circuit  $I_{sc}$  est mesuré pour trois conditions :

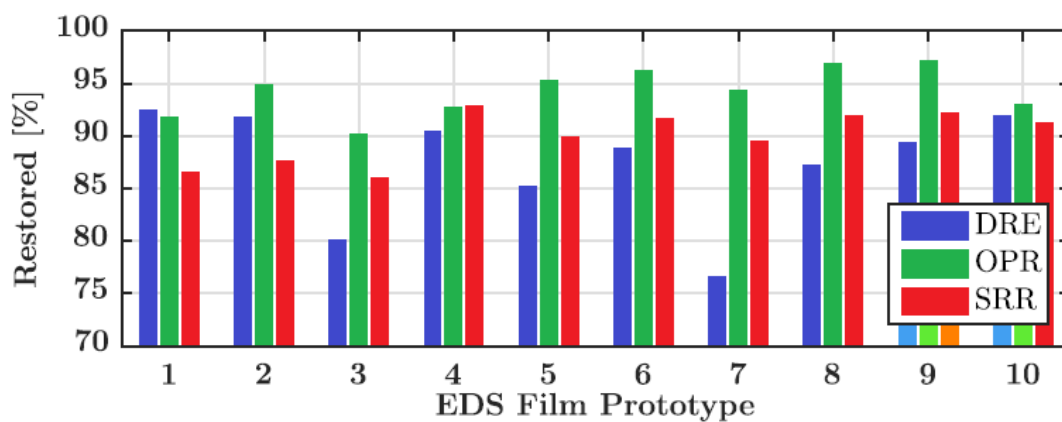
- 1) Avec le panneau solaire EDS propre ( $I_{sc}$  initial).
- 2) La perte de  $I_{sc}$  ( $\Delta I_{sc}$ ) après dépôt de poussière.
- 3) Le courant  $I_{sc}$  restauré après activation de l'EDS pendant 1 min.

De même, le rendement de la réflectivité spéculaire dans le cas du miroir solaire a été déterminé par le rapport entre la réflectivité après activation de l'EDS et la réflectivité initiale (avant dépollution).

Les résultats de l'efficacité de 10 parmi 22 prototypes d'EDS, sans ordre particulier, sont présentés sur la figure 2.28. L'efficacité de dépolluérage moyenne est de 88,1 % avec un écart type  $\sigma = 4,9$  %. Le rendement de restitution

de puissance moyen pour tous les échantillons est de 95,5 % avec  $\sigma = 1,8$  %. Le rendement de la réflectivité moyenne est de 88,9 % avec  $\sigma = 2,15$  %.

Les résultats montrent que la puissance de sortie d'un panneau solaire est beaucoup moins sensible à la concentration en masse de poussière sur la surface du film EDS par rapport au rendement de la réflectivité spéculaire des miroirs solaires. La lumière réfléchiée par le miroir vers le récepteur se déplace deux fois à travers la couche de poussière, et seule la lumière réfléchiée de manière spéculaire peut atteindre le récepteur.



**Figure 2.28.** DRE, OPR et SRR pour différents dispositifs EDS mesurés dans les conditions : humidité relative HR = 30– 50 %, température \_ 20– 25 °C, angle d'inclinaison \_ 30° [104]

Avec ;

*DRE* Efficacité de dépoussiérage (Dust Removal Efficiency)

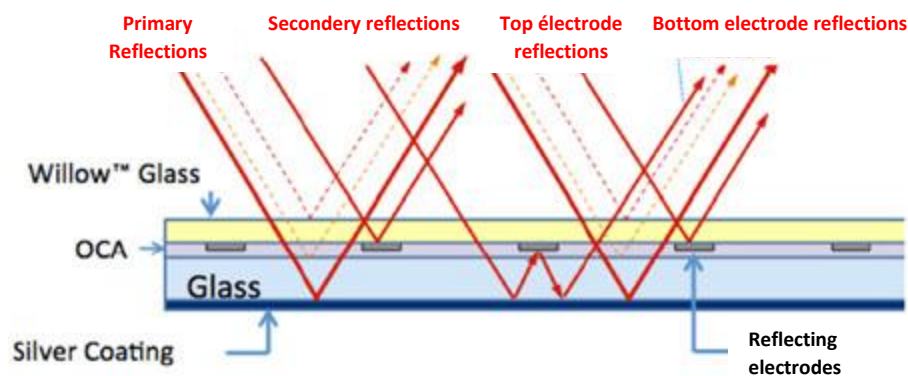
*OPR* rendement de restitution de la puissance (Output Power Restoration)

*SRR* rendement de la réflectivité spéculaire (Specular Reflectivity Restoration)

Les besoins en eau pour le nettoyage des modules PV et des miroirs CSP constituent une limitation possible à l'installation de centrales électriques à grande échelle dans les zones désertiques et semi-arides. Des études expérimentales effectuées par Mazumder et Horenstein. Montrent qu'un film EDS transparent peut être utilisé pour stratifier des modules solaires

photovoltaïques et des miroirs CSP pour une fonction d'auto-nettoyage sans nécessiter d'eau.

Il est également possible d'utiliser des électrodes conductrices réfléchissantes pour éliminer la couche de poussière des miroirs solaires et maintenir ainsi une efficacité de réflexion spéculaire élevée (Figure 2.29). Étant donné que la puissance de sortie fournie par les capteurs solaires dépend directement de leur efficacité optique, il est possible de maintenir un rendement élevé des capteurs solaires dans les régions désertiques.



**Figure 2.29.** Coupe de la configuration de l'EDS avec deux couches diélectriques transparentes et des électrodes réfléchissantes stratifiées sur un miroir solaire

[104]

La conception, la production et le fonctionnement optimaux du film EDS ont besoin d'électrodes conductrices transparentes pour leurs applications dans les modules PV et d'électrodes conductrices réfléchissantes pour les miroirs CSP. La disponibilité des matériaux d'électrode avec des formulations adaptées aux processus d'impression à haut débit et leur durabilité en extérieur constitue les défis actuels de la technologie EDS. Le DRE pour une large gamme de distribution granulométrique nécessite une géométrie d'électrode optimale en fonction des propriétés des matériaux d'électrode.

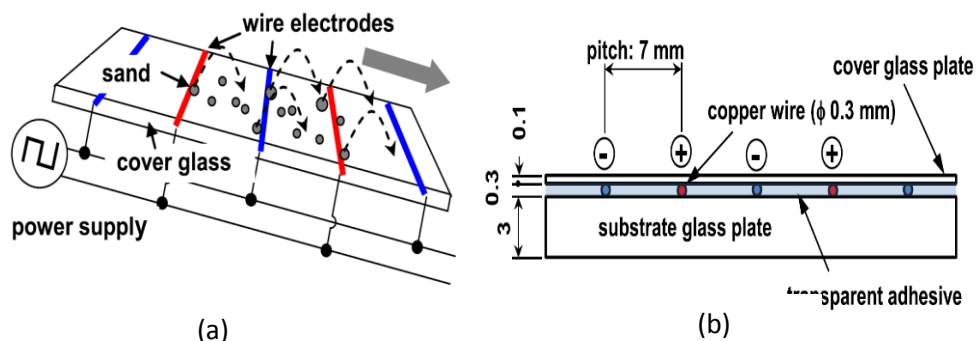
Les études d'efficacité SR ont montré que l'encre argentée réfléchissante fonctionnerait le mieux pour restaurer les valeurs SR initiales des miroirs dans

des conditions propres. Différentes méthodes d'encapsulation de matériaux d'électrode Ag nécessitent des recherches supplémentaires en ce qui concerne leur durabilité, leur stabilité électrique et leurs performances. La technologie de film EDS fournit une méthode de nettoyage sans eau à un faible coût d'exploitation et de maintenance.

### 2.5.2. Expériences de Kawamoto et Shibata

Cependant, Kawamoto et Shibata ont proposé comme alternatif d'utiliser des fils conducteurs fins (diamètre = 0.3 mm ) et les monter en parallèle sur un substrat de verre en utilisant un adhésif transparent, en laissant un écartement large entre les électrodes (gap = 7 mm ) (Figure 2.30). Vu que la technologie EDS ne convient pas pour une utilisation dans les mégas systèmes solaires commerciaux car elle nécessite des électrodes ITO d'un coût prohibitif, les extrémités des électrodes doivent être tridimensionnelles pour éviter l'intersection des phases, et l'alimentation électrique et les interconnexions nécessaires sont relativement compliquées et coûteuses [105].

Pour atténuer ces problèmes, kawamoto et al. ont développé un système amélioré qui consiste en une plaque de verre anti-sable avec des électrodes en fil parallèle intégrées dans une plaque de verre de protection d'un panneau solaire et une alimentation haute tension qui génère une tension rectangulaire monophasée.



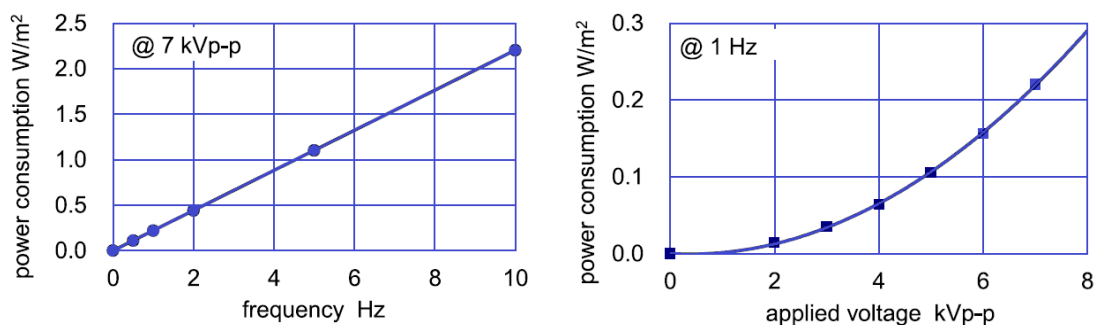
**Figure 2.30.** (a) Schéma de principe d'un convoyeur électro statique utilisant une onde stationnaire et la gravité pour éliminer le sable d'un panneau solaire. (b) Dessin en coupe du convoyeur [106]

L'idée dans cette application est de pousser les particules dans l'air sous l'effet de l'onde stationnaire, et se servir ensuite de la gravité pour les éliminer. Par conséquent, les particules font des sauts guidés par la gravité comme le montre la figure 2.30.a. Afin d'implanter le système sur un PV, [106].

Ce rapport décrit un principe de base et les performances du système, et comment les performances du système ont été encore améliorées en améliorant la configuration de l'électrode.

La consommation de l'énergie électrique de ce système de nettoyage est illustrée à la figure 2.31, où l'axe des ordonnées représente la puissance consommée de l'appareil par unité de surface de la plaque à nettoyer. Comme le courant transitoire circule immédiatement après le changement de polarité, la consommation d'énergie donc est proportionnelle à la fréquence.

En revanche, la consommation électrique est proportionnelle au carré de la tension appliquée si aucune rupture d'isolement ne se produit [106]. Étant donné que la limite de tension pour la rupture d'isolement est de 8,4 kVp-p pour les électrodes à pas de 7 mm et que la fréquence optimale est inférieure à 10 Hz, la consommation d'énergie n'est que de 0,2 W/m<sup>2</sup> dans des conditions de fonctionnement de 7 kVp-p et 1 Hz. Aussi, la durée de fonctionnement du système représente un facteur important qui influence la consommation d'énergie, il dépend du schéma opérationnel, c'est-à-dire du nombre et de la période des cycles opérationnels.



**Figure 2.31.** Consommation électrique du système de nettoyage électrostatique

Par exemple, si le système fonctionne pendant 30 minutes par jour, la consommation d'énergie n'est que de  $0,1 \text{ Wh/m}^2$  par jour. La consommation électrique de ce système est extrêmement faible par rapport à la puissance de sortie du panneau solaire. Cette technologie devrait augmenter l'efficacité effective des mégas centraux solaires construits dans les déserts à basses latitudes.

Kawamoto *et al.* ont étudié aussi les effets de multiples paramètres comme l'angle d'inclinaison, la fréquence, la densité massique des particules sur la surface, ou encore l'espace inter-électrodes.

## 2.6. Etudes théoriques et numériques

Après avoir effectué des travaux expérimentaux sur les convoyeurs électrostatiques dans des conditions réelles de fonctionnement, d'autres travaux importants sur la modélisation théorique et numérique ont été effectués par des chercheurs afin de valider les résultats expérimentaux issus de l'ensemble des publications sur ce sujet.

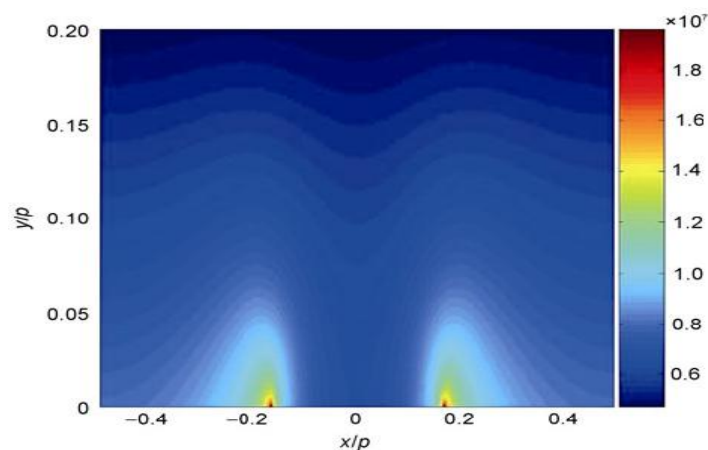
Ces études ont pour objets pour mieux comprendre les mécanismes de mouvement des particules, ainsi pour optimiser le fonctionnement du système.

Dans les années 1970 et 1980 Masuda *et al.* [22] [44], ont mené plusieurs études théoriques, ils ont simulés numériquement la trajectoire des particules dans son système de confinement et de transport des aérosols. Dans son modèle, Masuda a adapté une approximation linéaire de l'équation du mouvement, avec l'hypothèse d'une faible amplitude d'oscillation des particules. D'autres études théoriques ont fait l'objet de déplacement des particules sur une surface en utilisant des électrodes linéaires parallèles alimentées par un système de tensions sinusoïdales triphasées. Il a été démontré l'existence d'harmoniques spatiaux dans la modélisation du potentiel électrique où on constat que les deux premiers harmoniques ont des amplitudes les plus importantes d'une part, et elles se propagent dans deux directions opposées.

A la fin des années 90, Machowski et Balachandran [107-108] ont réalisé une modélisation des trajectoires des particules, dont les résultats de modélisation du champ électrique et du calcul analytique indiquent clairement que la géométrie

des électrodes a une influence significative sur le processus de transport et de séparation de la poudre. Les études ont révélé que le spectre des harmoniques spatiales est composé principalement des premiers et deuxièmes composants. L'amplitude des deux harmoniques peut être contrôlée par la géométrie des électrodes et le rapport entre la largeur des électrodes et le gap. Les électrodes de forme triangulaires produisent une distribution des harmoniques moins favorable par rapport aux électrodes cylindriques, carrés ou rayure. De plus, les particules peuvent déplacer dans la direction opposée à celle de l'onde fondamentale suivant la valeur de la fréquence.

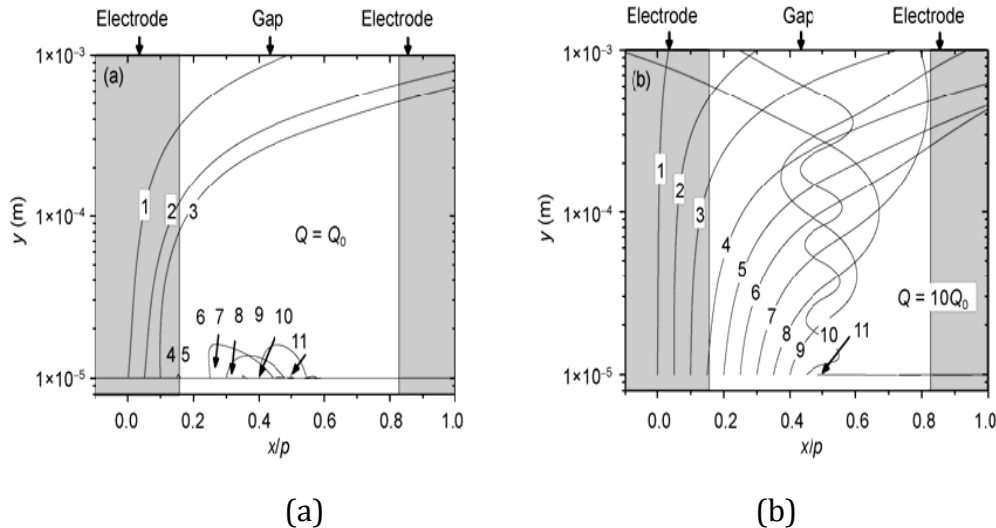
Les mécanismes d'élimination des particules dans un rideau électrique à ondes stationnaires ont été étudiés à la fois numériquement et expérimentalement par Sun et al. (2012) [109]. Dans ces études, Sun montre la distribution totale du champ électrique sur la surface convoyeur électrique en une période. Dans le calcul, les paramètres utilisés sont les suivants ;  $a = 0,2$  mm,  $p = 0,6$  mm,  $U_0 = 1500$  V. ou il a constaté que le champ électrique atteint une valeur maximale au voisinage du bord de l'électrode en raison de la discontinuité du potentiel, et il se décompose de manière exponentielle le long de la direction verticale (Figure 2.32).



**Figure 2.32.** Distribution du champ électrique sur la surface du convoyeur électrique en une période

Les charges électriques sont induites soit par une charge photoélectrique, soit par des collisions de particules, la répartition des charges étant aléatoire

parmi les particules [109]. À partir des équations bien déterminées en on voit que la charge électrique joue un rôle crucial dans le mouvement des particules. Où les particules avec une charge électrique élevée sautent plus facilement de la surface du rideau.



**Figure 2.33.** Trajectoires d'une particule chargée faible (a) ou élevée (b) à différentes positions initiales le long de la surface du convoyeur électrique

Les figures 2.33 (a) et (b) montrent la simulation sur les trajectoires d'une particule avec une charge  $Q=Q_0$  et avec  $Q = 10 Q_0$  située à différentes positions initiales sur la surface du convoyeur, et  $Q_0 = 3,64 \cdot 10^{-15} \text{ C}$ , tirée de la valeur mesurée expérimentalement par Kawamoto [52]. Le rayon des particules est  $r = 10 \mu\text{m}$  [53], et la densité est de  $2,9 \text{ g/cm}^3$ , la fréquence  $f = 50 \text{ Hz}$ . La particule est initialement placée à différentes positions sur la surface du convoyeur au cours d'une même période, puis sa trajectoire est calculée pendant le chargement. Comme le montre la figure 2.33 (a), la particule faiblement chargée ne peut sauter de la surface que lorsqu'elle est initialement placée aux positions marquées par 1, 2 et 3, qui sont à proximité de l'électrode. Lorsqu'elle est placée aux emplacements 4–11, c'est-à-dire près du bord et de l'écart des électrodes, la particule faiblement chargée ne peut rouler que le long de la surface du convoyeur.

Cependant, une particule hautement chargée peut sauter directement de la surface à presque toutes les positions initiales, sauf au milieu de l'espace entre les électrodes, comme le montre la figure 2.33 (b). Habituellement, les particules à

fortes charges électrostatiques sont peu nombreuses, et une fraction de particules pouvait potentiellement s'accumuler sur les bords des électrodes, affectant par conséquent les performances du rideau électrique.

Liu et Marshall ont utilisé la méthode de modélisation par éléments discrets pour étudier les effets sur les performances du rideau électrique des interactions particules-particules ainsi que de l'adhésion des particules à la surface diélectrique. Cette méthode est développée pour la simulation du transport des particules par ondes progressives sur un rideau électrique. Liu et Marshall ont montrés ainsi que les collisions particule – particule ont une influence importante sur le transport des particules via les rideaux électriques à différentes fréquences d'ondes [110].

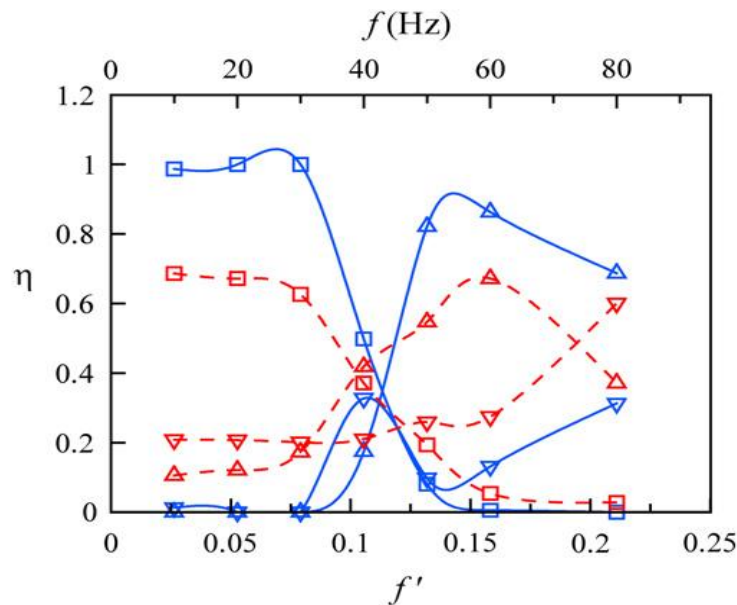
L'effet de l'interaction inter-particules due aux collisions et aux interactions électrostatiques des particules peut être examiné en excluant les deux types d'interactions de la simulation et en comparant les résultats avec ceux des calculs avec les interactions incluses. La figure 2.34 montre que les particules transportées vers l'avant (FTP), particules transportées vers l'arrière (BTP) et particules non transportées (NTP), en fonction de la fréquence à la fois avec et sans interactions de particules.

La comparaison indique des tendances qualitatives similaires avec et sans interaction entre les particules ; cependant, il existe des différences quantitatives importantes. Plus précisément, pour le cas sans interactions de particules, ou il existe un nombre significatif de particules transportées vers l'arrière même à basses fréquences, et de même il reste des particules transportées vers l'avant à des fréquences élevées. Lorsque les interactions de particules sont incluses, ces deux fractions se rapprochent de zéro.

La raison de cette différence est que lorsque la plupart des particules se déplacent dans une direction, les collisions de particules agissent pour empêcher un petit nombre de particules de se déplacer dans la direction opposée. Ainsi, par exemple, si la plupart des particules avancent à basse fréquence et qu'une petite fraction essaie de reculer, la collision avec les particules transportées vers l'avant

poussera les particules transportées vers l'arrière sur des orbites alternatives jusqu'à ce qu'elles trouvent une orbite dans laquelle elles sont transportées vers l'avant [111].

La fraction de particules NTP est systématiquement plus élevée sans interactions de particules que celle observée dans les calculs avec interactions de particules en raison de l'effet des collisions de particules sur l'induction de déplacement net, à l'exception du pic de la fraction de NTP proche de la fréquence de transition dans les calculs avec interactions, ce qui a été noté précédemment comme étant dû à la collision d'un nombre presque égal de particules transportées vers l'avant et vers l'arrière.



**Figure 2.34.** Variation des fractions de particules transportées vers l'avant (symboles carrés), vers l'arrière (symboles triangulaires) et non transportées (symboles delta) en fonction de la fréquence, à la fois avec interaction particule-particule (traits pleins) et sans interaction particule-particule (lignes en pointillé) [111]

Le déplacement des particules par ondes mobiles sur un rideau électrique est étudié par Liu et Marshall avec une méthode hybride élément discret/élément frontière. Le comportement du transport des particules, en matière de profil de

distribution de la vitesse de déplacement, la variation de la vitesse de transport et de la hauteur de lévitation en fonction de la charge des particules, est étudié sous différentes fréquences et niveaux d'adhésion. Il a été constaté que le mode prédominant de mouvement des particules passe du mode de saut à basse fréquence au mode surf pour une fréquence moyenne à un niveau d'adhésion relativement bas, dégénéralant en un mouvement irrégulier à une fréquence plus élevée. D'autres constatent lors d'établissements des études ou le transport des particules est spécialement effectué par des collisions à des niveaux de fréquence moyenne, pour lesquels des particules avec des charges relativement élevées se déplacent en mode de surf synchrone sur la surface diélectrique dans des bandes à haute concentration.

Ces bandes de particules entraînent d'autres particules à faibles charges, de sorte que ces particules peuvent également être efficacement transportées. À haute fréquence, il existe un nombre substantiel de particules transportées à la fois dans les directions avant et arrière. Les particules qui se déplacent vers l'avant ont une charge de valeur plus élevée que les particules qui se déplacent vers l'arrière. Puisque la hauteur de lévitation augmente avec l'amplitude de la charge des particules, il pourrait être possible d'utiliser ses deux caractéristiques des cas à haute fréquence pour la séparation des particules en fonction de leur niveau de charge.

Comme le rideau électrique est alimenté à l'aide d'un panneau solaire, une analyse de rendement énergétique et de contrôle en utilisant un rideau électrique transparent est établie par Qian et al. (2012) pour l'atténuation de la poussière sur le panneau photovoltaïque. Étant donné que le taux de consommation d'énergie requis pour le fonctionnement du rideau électrique peut être considérablement plus élevé que le taux de capture d'énergie d'un panneau solaire, un schéma de commande pour l'activation et la désactivation du rideau électrique est nécessaire pour obtenir une capture d'énergie nette optimale, au lieu de maintenir un fonctionnement constant du rideau électrique pour atténuer la poussière sur le panneau photovoltaïque.

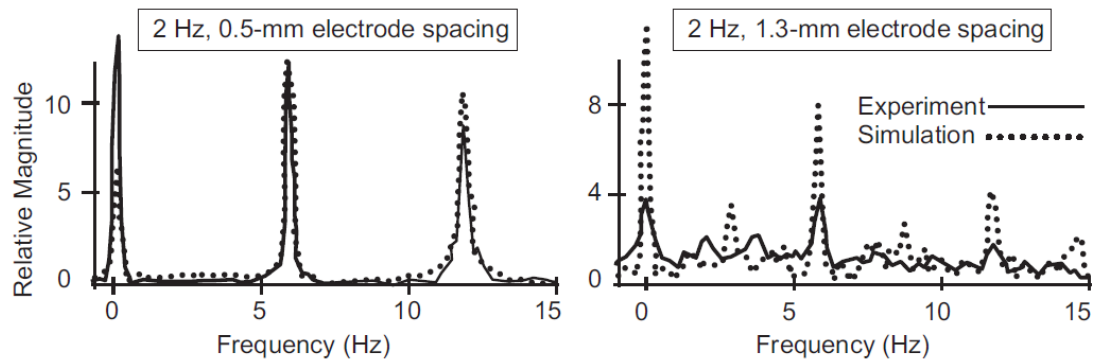
Un modèle théorique et numérique a été développé par ces chercheurs dans lequel le rideau électrique est activé lorsque la tension de sortie du panneau diminue jusqu'à une valeur  $V'_{on}$  de la tension de sortie du panneau propre et désactivé lorsque la tension de sortie dépasse une seconde valeur de tension de sortie  $V'_{off}$ . Cette mise à l'échelle fournit une base à partir de laquelle s'étendre à des modèles de calcul plus complexes ou interpréter les résultats d'études expérimentales de contrôle de l'atténuation de la poussière des rideaux électriques [112].

Horenstein et al. ont analysé les trajectoires des particules sous l'influence de différentes forces à l'aide d'un programme de simulation. (2013). Un programme de simulation a été développé pour calculer les trajectoires des particules sur un écran électrodynamique (EDS). Un résultat inattendu a été la présence d'un mouvement de particules à la fois ordonné et chaotique sur une gamme de particules et de paramètres de fonctionnement. Pour valider le modèle de simulation et pour commencer le processus d'explication de ces deux modes de comportement, les trajectoires de particules de test réelles ont été suivies via une vidéo haute définition [113].

Une autre façon de comparer la théorie avec l'expérience est de prendre la transformée de Fourier des trajectoires par rapport à la fréquence temporelle du mouvement des particules. Figures. Les figures 2.35 et 2.36 montrent les densités spectrales de puissance mesurées du mouvement pour chacun des paramètres. Ici, la «puissance», utilisée dans son traitement du signal, plutôt que dans son contexte électrique, décrit le spectre de fréquences du mouvement en fonction du temps.

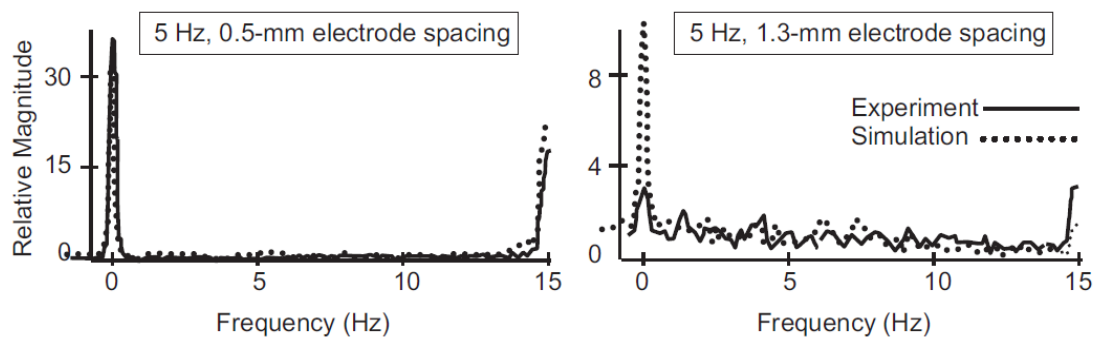
À une excitation de 2 Hz, triphasée, un rapport de probabilité élevé se produit à 6 Hz, comme on pouvait s'y attendre. Le rapport de probabilité apparaît également à 12 Hz de mouvement des particules dans la simulation et l'expérience. Cette composante de fréquence plus élevée du mouvement des particules pourrait être causée par le simple rebondissement des particules qui frappent l'écran avec une force de rappel suffisante pour surmonter les forces

d'images au point d'atterrissage de la particule. Cela pourrait également s'expliquer par une particule qui est soulevée vers la fin de la durée de «marche» d'une électrode, puis atterrit sur une nouvelle électrode qui s'allume. Cette combinaison de forces entraînerait également un mouvement à six fois la fréquence d'excitation d'un ensemble triphasé.



**Figure 2.35.** Densités spectrales de puissance du mouvement des particules (spectre de fréquence du mouvement temporel) pour une excitation à 2 Hz.

Ligne continue : expérimentale ; ligne pointillée : simulation [113]



**Figure 2.36.** Densités spectrales de puissance du mouvement des particules (spectre de fréquence du mouvement) pour une excitation à 5 Hz. Ligne

continue : expérimentale ; ligne pointillée : simulation [91]

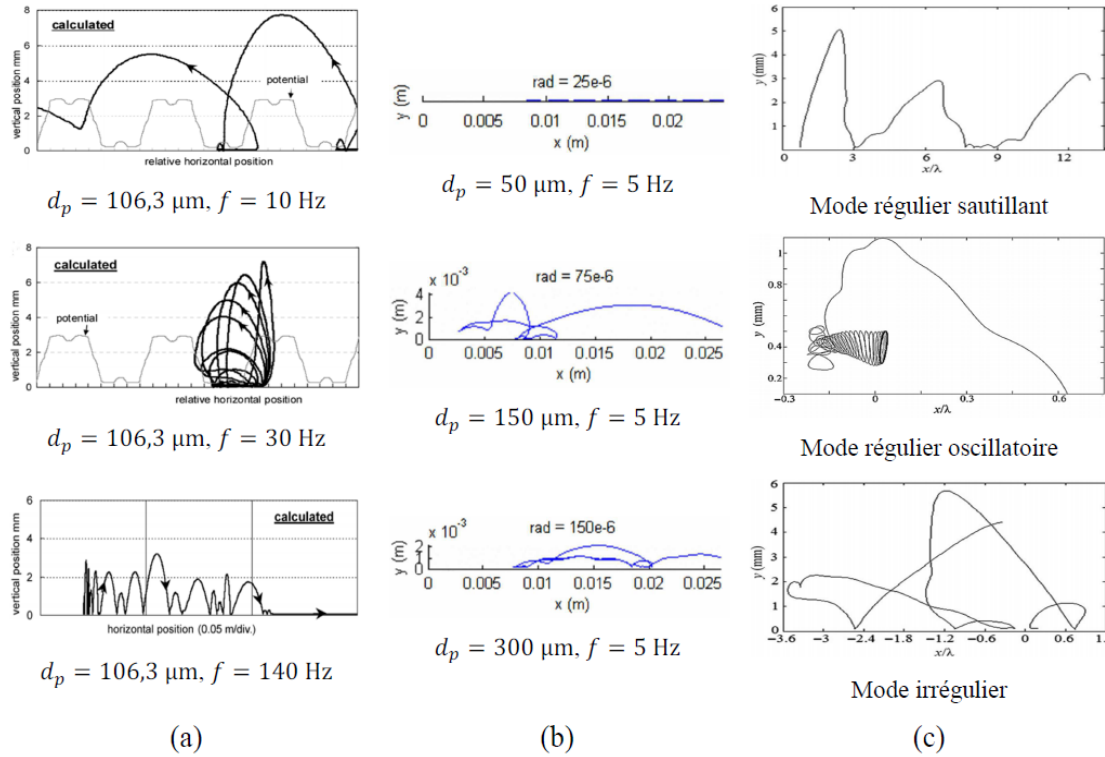
L'ensemble de données de 5 Hz montre qu'à faible espacement, l'accord entre la théorie et l'expérience est bon. À un espacement plus élevé, cependant, seule une tendance générale sur une large gamme de fréquences peut être corrélée. De manière inattendue, le pic observé expérimentalement à 15 Hz est

absent de l'ensemble de données simulé pour un espacement de 1,3 mm. Les études spectrales de densité de puissance fournissent une vérification encourageante du modèle théorique.

L'analyse statistique et spectrale des deux ensembles de données effectuées par Horenstein et al. montre une similitude, ce qui prouve que la méthode de modélisation est exacte. Les travaux futurs chercheront à affiner le modèle afin de démontrer la corrélation entre la théorie et l'expérience sur une large gamme de particules et de paramètres de fonctionnement. Une telle méthode de simulation peut servir d'outil essentiel dans l'optimisation du fonctionnement de l'EDS pour un rendement maximal d'élimination des particules.

En outre, les calculs des mouvements des particules sur un rideau électrique soumis à des ondes stationnaires sont effectués à la fois sans et avec des interactions des particules par Liu et Marshall, dans lequel le transport des particules est bien approximé par un processus brownien unidimensionnel, mais la vitesse de propagation des particules vers l'extérieur est de 20 à 30% inférieures pour le cas avec interactions que celui sans mouvement en mode surf [114].

A partir des années 2000, les travaux sur la modélisation numérique des trajectoires des particules sont devenus plus rares au détriment de travaux expérimentaux. Cette tendance a été renforcée par les multitudes d'applications possibles, en particulier dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Néanmoins, il est possible de trouver quelques modèles intéressants, qui ont permis de tracer les trajectoires des particules et étudier les modes de mouvement des particules, pour certains validés expérimentalement (Figure 2.37) [114].



**Figure 2.37.** Exemple des trajectoires des particules obtenues par modélisation numérique. (a) Kawamoto *et al.* [52]. (b) Horenstein *et al* [115-116]. (c) Zhang Jie *et al.* [117]

Ces trajectoires ont été obtenues par modélisation numérique dans différentes conditions pour des convoyeurs à ondes progressives triphasées. Les forces, appliquées sur les particules, prises en considération dans les modèles étaient : la force de Coulomb, la force diélectrophorétique, la force image, la force gravité, la force de traînée, ainsi que la force d'adhésion de van der Waals. Néanmoins, les chercheurs ont confirmé que la force de Coulomb est la force prédominante par rapport aux autres types de forces, et que la direction du transport des particules ne coïncidait pas toujours avec celle de l'onde progressive. Elle dépend de la fréquence de l'onde progressive, du diamètre des particules et de la valeur du champ électrique.

Les trajectoires des particules de différentes tailles ont un comportement chaotique dans certains cas les particules sautent sporadiquement en rebondissant d'une électrode à l'autre et ne migre que lentement dans la direction de l'onde (vers la droite dans ce cas). Ce comportement est plus prononcé pour les

grosses particules ( $d = 150 \mu\text{m}$  et  $300 \mu\text{m}$ ). Pour les petites particules, le mouvement a tendance à être plus fluide dans la direction de propagation de l'onde.

## 2.7. Conclusion

L'application des convoyeurs électrostatiques à ondes progressives et stationnaires s'est révélée très efficace dans la maîtrise et la manipulation efficacement des particules micrométriques. Elle repose sur l'utilisation de la force électrostatique avec une consommation faible en énergie électrique, les méthodes électrostatiques utilisées dans de tels procédés sont très avantageuses par rapport aux méthodes mécaniques car elles ne nécessitent pas de pièces mobiles et leur coût énergétique est extrêmement bas.

Depuis plusieurs années, ils suscitent des préoccupations toujours plus grandes parmi la communauté scientifique en vue de les utiliser dans plusieurs applications industrielles telles que : peinture, fabrication de médicaments, électrophotographie, séparation de mélanges granulaires, ou encore le dépoussiérage des panneaux et des concentrateurs solaires. La revue bibliographique des principaux travaux dans la littérature nous a permis de connaître l'évolution des techniques et le mécanisme de déplacement des particules via les convoyeurs électrostatiques ainsi que les principaux paramètres qui influent sur leurs fonctionnements soit sur le plan terrestre ou spatial.

Dans Le chapitre suivant, un dispositif expérimental a été réalisé et proposé afin d'effectuer des expériences pour la manipulation des particules. Ce dispositif permettra, par ailleurs, de réaliser plusieurs mesures en parallèle afin de mieux cerner le phénomène de déplacement des particules par le convoyeur à ondes mobiles, et étudier les principaux facteurs qui influent sur le fonctionnement de ce procédé.

## Etude expérimentale du convoyeur à ondes mobiles



### 3.1. Introduction

Le nettoyage des surfaces est aujourd'hui un nouveau challenge pour divers domaines industriels notamment : nettoyage des pièces électriques et électronique dans l'industrie électronique et nettoyage des panneaux solaires photovoltaïques afin d'augmenter leurs rendements de fonctionnement.

Notre étude est focalisée sur une nouvelle technique pour résoudre ce problème basé sur un nouveau procédé destiné au déplacement des particules par le convoyeur à ondes mobiles.

Le convoyeur à ondes mobiles est constitué d'une série d'électrodes parallèles intégrées dans une couche diélectrique afin d'éviter le claquage, connectée à des tensions alternatives avec des déphasages appropriés ; génère un champ électrique qui se propageant sur la surface du convoyeur et soulève les particules le long du plan des électrodes avec une force perpendiculaire à leurs axes.

Le déplacement des matériaux pulvérulents de taille micrométrique dans un convoyeur à ondes mobiles (COM) dépend de l'amplitude et de la fréquence du système polyphasé de tensions appliquées aux électrodes du dispositif.

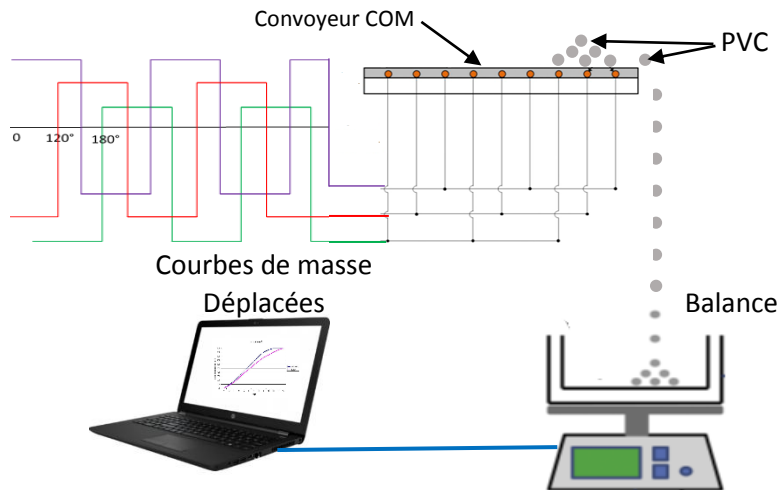
L'objectif de ce travail est d'étudier le mécanisme de déplacement des particules diélectriques fines utilisant un convoyeur à ondes mobiles. Dans la première partie de cette étude, un banc expérimental est mis en place pour évaluer l'efficacité du déplacement des particules en fonction de leur taille et pour visualiser leur mouvement. L'efficacité du déplacement est évaluée sur la base du rapport de la masse de particules déplacée à la masse totale de particules déposées en variant les critères tels que la tension appliquée, la fréquence et l'humidité.

Dans la deuxième partie de cette étude, nous discutons des résultats expérimentaux basés sur l'équilibre des forces exercé sur les particules dans un tel dispositif. Les particules étudiées sont de la poudre de PVC blanches sphériques ayant des tailles comprises entre 90 et 500  $\mu\text{m}$  sont chargées négativement et posées sur le convoyeur COM pour voir l'influence de la charge sur le mouvement des particules.

### 3.2. Montage expérimental

La technique de dépoussiérage avec rideau électrique a reçu une vaste attention et recherche pour ses propres avantages. Le mécanisme de dépoussiérage avec le convoyeur a été proposé sur la base de sa structure en elle-même, les forces agissantes sur les particules dans la direction des ondes mobiles, la distribution de l'intensité du champ électrique au-dessus de la plateforme des électrodes et la structure des électrodes.

Le montage expérimental utilisé dans cette étude est illustré dans la figure 3.1, il permet de mesurer la masse des particules déplacées par le convoyeur à ondes mobiles lors de l'activation du champ électrique.



**Figure 3.1.** Représentation schématique du montage expérimental

Ce convoyeur est alimenté par trois tensions triphasées alternatives de forme carrée ayant un déphasage de  $120^\circ$  entre elles générées par trois amplificateurs de tension (TREK 2220) délivrant une tension de 2 kV avec un courant de 20 mA. Ces amplificateurs sont commandés avec deux générateurs de fonctions (SIGLENT SDG 5122) synchronisés.

Ce montage permet de faire varier le déphasage, la fréquence, l'amplitude et la forme de signal des tensions appliquées (Figure 3.2).



**Figure 3.2.** Représentation photographique du dispositif expérimental

Avec :

- (1) Générateurs de fonctions,
- (2) Amplificateurs HT,
- (3) Oscilloscope,
- (4) Support,
- (5) Convoyeur triphasé,
- (6) Balance,

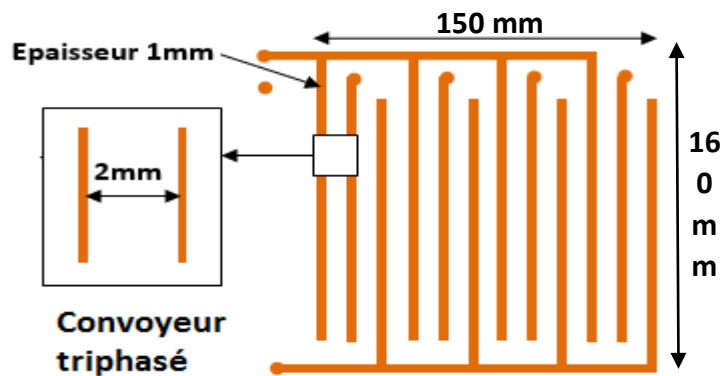
Les signaux sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope à mémoire (Gwinstek GDS-3154).

### 3.3. Conception du convoyeur à ondes mobiles

Afin de répéter les expériences de Masuda et d'effectuer des études sur les rideaux électriques à ondes mobiles. Plusieurs ensembles d'électrodes ont été construits en cuivre en forme de peignes, non pas par la technique classique de fabrication des circuits imprimés à partir des plaques (couche de cuivre sur résine époxy), mais avec une autre technique, ou les électrodes sont intercalées

et réalisées sur une plaque de Polyméthacrylate de méthyle (PMMA-plexiglas®), de dimensions 30×15 cm, sur laquelle ont été fixées des électrodes parallèles identiques en fil nu de cuivre de diamètre 1 mm et de longueur de 15 cm, séparées par un intervalle égal à 2 mm (Figure 3.3).

L'ensemble est ensuite recouvert avec un enduit en vernis isolant acrylique de façon à empêcher l'étincelle entre des électrodes adjacentes.



**Figure 3.3.** Schéma descriptif de convoyeur à ondes mobiles triphasé

Les électrodes sont regroupées et connectés à un des trois amplificateurs de tensions avec un déphasage de  $2\pi/3$ .

### 3.4. Conception d'électrodes

Une répartition uniforme du champ électrique implique un meilleur nettoyage de la couche de poussière, ainsi la forme en coupe des électrodes à un rôle important. D'habitude ils sont carrées ou rectangulaires, mais la forme en coupe cylindrique est censée fournir la distribution de surface la plus souhaitable du champ électrique. D'autres aspects importants à considérer lors de la conception des électrodes telles que les matériaux avec lesquelles vont être produits. Les caractéristiques principales des matériaux doivent avoir une conductivité électrique élevée et la possibilité de se développer en couches minces.

### 3.5. Protocole de mesure

Le protocole expérimental est le suivant : pour chaque point de mesure, une masse de 5 g de ces particules de PVC sphériques «Poly Vinyl Chloride».

#### 3.5.1. Echantillon utilisé

##### a. Poly chlorure de vinyle (PVC)

Le PVC est une matière plastique plus utilisée dans le monde, après le polyéthylène [118].

Le poly (chlorure de vinyle), dont le symbole international PVC découle de l'appellation anglaise « Poly Vinyl Chloride », est une matière thermoplastique de synthèse composée de carbone, d'hydrogène et de chlore. Le carbone et l'hydrogène proviennent du pétrole (43 %) tandis que le chlore est originaire du sel (NaCl) (57 %). Comme tous les polymères, le PVC est une longue chaîne composée d'éléments identiques ou monomères. Il s'agit du monomère de chlorure de vinyle ( $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ ). Une molécule de PVC contient 750 à 1500 monomères [119].

La production industrielle du PVC remonte au début des années 1930. C'est un plastique très présent dans notre vie quotidienne car l'ensemble de ses propriétés mécaniques et physiques et son aptitude à être modifié selon les besoins en font un matériau adapté à de multiples usages. Le PVC est présent dans tous les secteurs économiques : bâtiment, emballage, électricité, électronique, biens de consommation, santé, transports. C'est la troisième matière plastique employée dans le monde (20 % de la consommation mondiale totale des plastiques, soit de l'ordre de 28 millions de tonnes) [120].

##### b. Propriétés du PVC

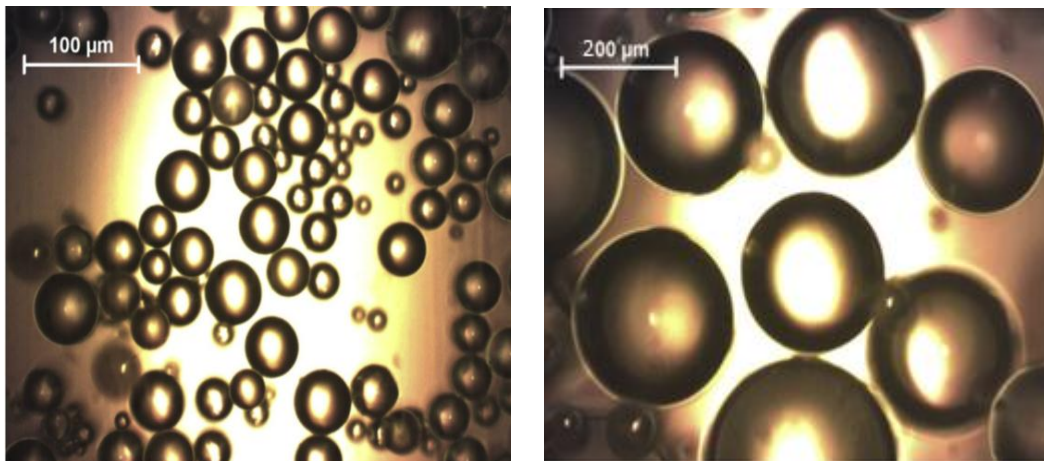
###### ▪ Propriétés mécaniques

Le PVC offre une excellente rigidité jusqu'au voisinage de sa température de transition vitreuse, il offre une excellente résistance à l'abrasion, mais il est relativement fragile au choc à basse température ( $-10\text{ }^\circ\text{C}$ ) [121].

**▪ Propriétés thermiques**

- Conductivité thermique : Elle est d'environ  $0.2 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{u}^{-1}$ .
- Pouvoir calorifique : Il est de  $17 \text{ KJ / kg}$  environ, pour le PVC rigide et de valeur supérieure mais variable suivant la formulation pour le poly chlorure de vinyle plastifié [122].

Les échantillons de polychlorure de vinyle (PVC) sont classés comme fonction de leur taille en cinq classes utilisant un appareil de tamisage automatique (Endecotts modèle Octagon 200). La figure 3.4 illustre deux images de deux classes de tailles différentes :  $100 \mu\text{m}$  et  $200 \mu\text{m}$ . Les images sont prises à l'aide d'un microscope optique avec un facteur de grossissement de  $\times 10$ .

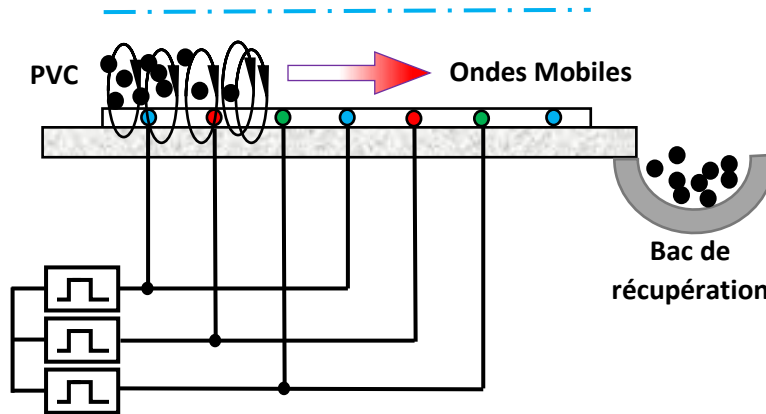


**Figure 3.4.** Particules de PVC sphériques

Les particules en PVC sont étalées en monocouche sur une même portion rectangulaire délimitée au centre du convoyeur à onde mobile. Une fois le système est alimenté par une tension suffisant la poudre déposée présente une agitation intense, et par conséquent les particules se déplacent à une vitesse moyenne horizontale non nulle, le long du convoyeur et tombent sur la balance électronique, la masse de la poudre déplacée est collectée au niveau de la balance et mesurée en temps réel à l'aide d'un système relié à l'ordinateur pour visualiser la courbe de déplacement des particules.

Au cours de ce processus, les particules peuvent acquérir une charge électrostatique initiale par friction avec la plaque du convoyeur ainsi que par

collisions interparticules. Cette charge initiale est nécessaire pour leur mouvement sous l'action du champ électrique (Figure 3.5).



**Figure 3.5.** Déplacement des particules suivant les ondes mobiles

Les particules bougent dans le sens du champ électrique et tombent dans un seau déposé sur une balance de précision (OHAUS), cette dernière est reliée à un PC afin d'effectuer les mesures en temps réel.

Les quantités physiques des particules déplacées dans le sens des ondes mobiles sont enregistrées pour chaque expérience, l'outil informatique nous a facilité la tâche de mesure ces quantités de particules déposées sur la balance (OHAUS). Dans cette optique, le temps enregistré lors de déplacements des particules est effectué à l'aide le logiciel informatique livré avec la balance de précision.

Chaque expérience est répétée trois fois à une température ambiante ( $24^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ) et une humidité relative entre 40 et 50 %, qui sont l'humidité relative de la salle d'expérimentation mesurée pendant l'étude.

Une plage d'humidité élevée pourrait affecter les résultats expérimentaux en induisant une charge de particules plus faible et / ou une dissipation de charge plus importante et une force d'adhésion plus importante entre les particules et le convoyeur.

### 3.6. Étude de l'efficacité de déplacement des particules de PVC

#### 3.6.1. Effet de la taille des particules

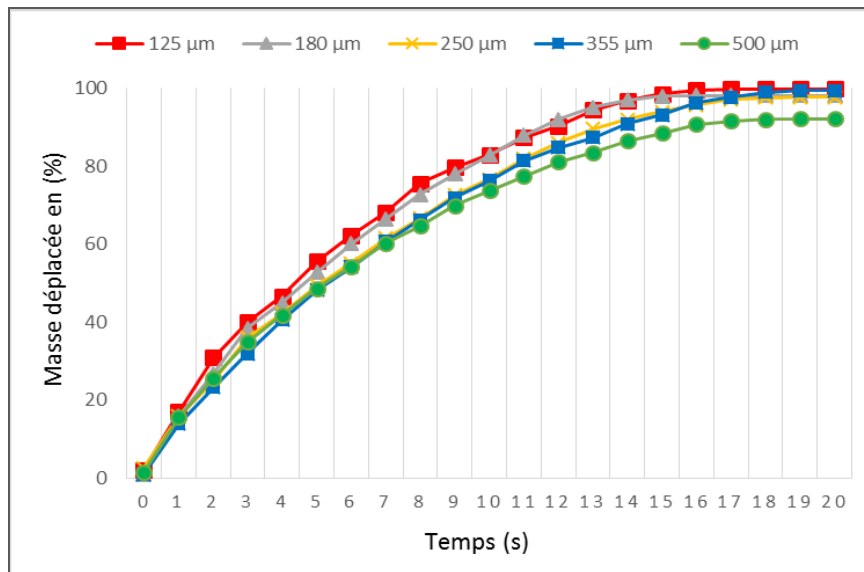
Nous nous intéressons ici à l'effet de la taille granulométrique des granules sur l'efficacité du déplacement des particules au-dessus du convoyeur à ondes mobiles. Les particules micronisées de plastique sont déposées sur la surface du convoyeur triphasé, l'efficacité de déplacement est exprimée par la variation de la déplacée après l'application de la tension polyphasée à une fréquence bien déterminée pour chaque taille de particule.

Les résultats obtenus avec les convoyeurs triphasés, représentant la variation de la masse déplacée (en pourcents) en fonction du temps.

La masse déplacée est exprimé par le rapport suivant :

$$\text{Masse déplacée en (\%)} = \frac{\text{masse déplacés (g)}}{5 \text{ (g)}} \times 100 \quad (3.1)$$

La figure 3.6 représente la variation de la masse déplacée en fonction du temps, pour l'analyse de l'impact de la taille des particules sur l'efficacité de déplacement du système. Dans cette expérience, la tension et la fréquence appliquées ont été maintenues constantes, respectivement égales à 2 kV et 50 Hz. La plage de taille des particules de PVC étudiée varie entre 125 et 500  $\mu\text{m}$ . Les études préliminaires qui ont été effectuées ont révélé que la présence de la barrière de l'isolant acrylique a un effet mineur sur l'efficacité de déplacement des particules. Cependant, il réduit le risque de décharges électriques qui peuvent se produire entre les électrodes.



**Figures 3.6.** Variation de la masse déplacée en fonction du temps pour plusieurs valeurs de la taille granulométrique des particules ( $U=2$  kV,  $f= 50$  Hz)

Les résultats montrent que lorsque la taille des particules augmente, l'efficacité de déplacement diminue. L'efficacité est plus élevée pour de petites particules, et peut même atteindre 100 % pour les particules inférieures de 250  $\mu\text{m}$ . Pour les tailles de particules étudiées, les forces de Van der Waals sont négligeables par rapport aux forces électrostatiques et de pesanteur.

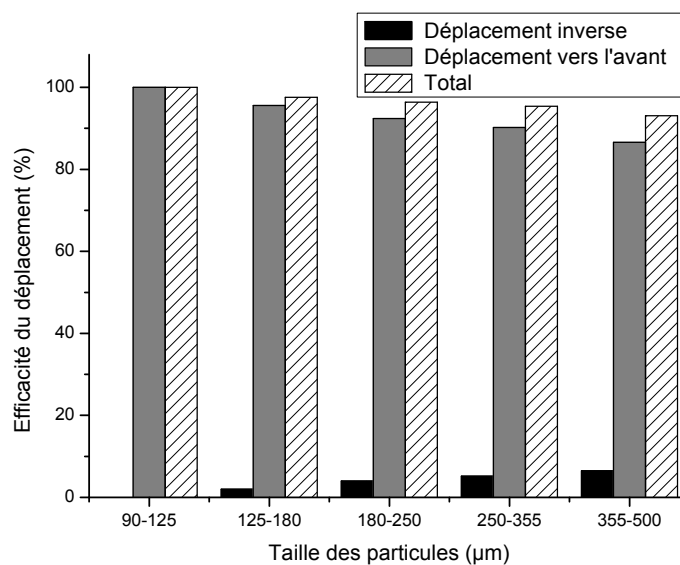
On remarque aussi que l'importance de ses forces dépend de la taille des particules et les distances qui les séparent. Les propriétés d'écoulement des matériaux granulaires sont en fonction des interactions particulières. Chaque particule se déplace en fonction de son poids, mais elles seront gênées dans leur mouvement par des contacts, soit avec les autres particules, soit avec les parois.

Les phénomènes d'adhésion et de cohésion peuvent être expliqués par les forces de Coulomb qui s'exercent soit entre deux particules, soit entre une particule et la paroi [123].

En résumé, le déplacement des particules est meilleur et plus facile pour les particules de petites dimensions car les forces électrostatiques sont plus grande que la force de gravitation.

### 3.6.2. Sens de déplacement des particules

Une autre observation importante est que la plupart des particules suivent la direction du champ électrique, et seule une petite quantité de particules se déplace dans la direction opposée. Ce phénomène est plus prononcé avec de grosses particules. La figure 3.7 montre le phénomène de déplacement des particules dans les deux sens sous l'action du champ électrique sur le convoyeur à ondes mobiles pour une tension de 1,8 kV et une fréquence de 50 Hz.

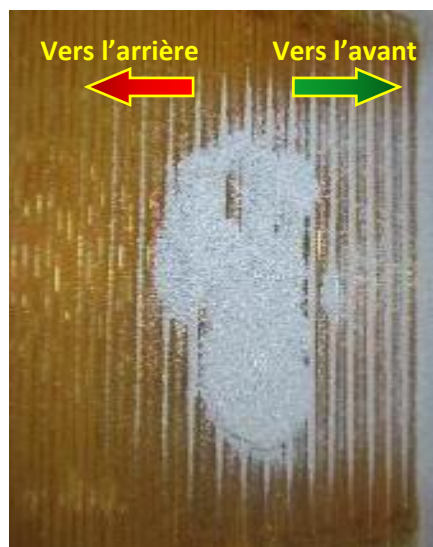


**Figure 3.7.** Déplacement des particules dans les deux sens

La distribution du potentiel électrique sur la surface crée des ondes harmoniques qui se déplacent vers la direction inverse. Masuda et al. [124] a précisé que l'effet des ondes harmoniques ayant un ordre supérieur à 3 peut être négligé en raison de leurs faibles amplitudes, donc seules les deux premières harmoniques peuvent être considérées. La première, qui est la fondamentale, a la plus grande amplitude et se propage vers l'avant, tandis que la seconde se propage vers la direction opposée [123-129]. La deuxième onde harmonique a une amplitude inférieure et une fréquence plus élevée par rapport à la première onde ; cela explique pourquoi la masse de particules dirigées en sens inverse est très faible.

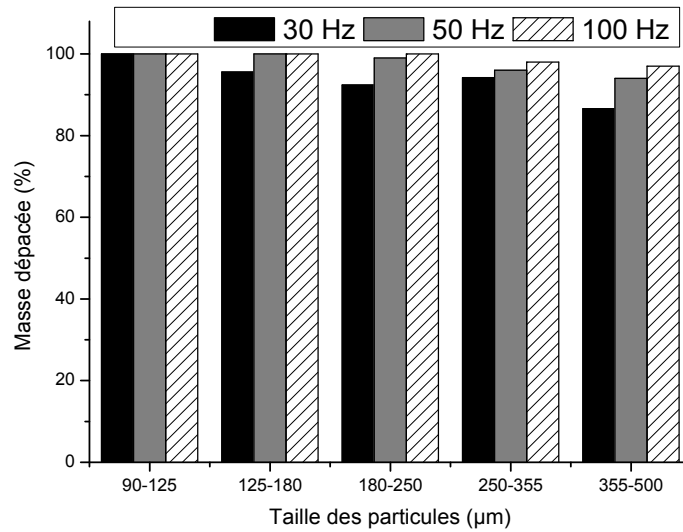
Un autre phénomène qui peut affecter la direction des particules est le rebond des particules à la surface de la plaque et les collisions entre particules (Figure 3.8). Les grosses particules ont une masse plus élevée, donc elles peuvent acquérir une énergie cinétique plus élevée à cause des collisions.

Par conséquent, si les particules rebondissent et se déplacent vers le sens inverse de l'onde mobile, la force de Coulomb ne peut pas inverser le sens de mouvement des particules, sauf si la charge était suffisamment élevée.



**Figure 3.8.** Sens de déplacement des particules sur le convoyeur

Les expériences effectuées précédemment en variant la taille des particules de masse de 5 g tout en gardant la tension fixe de 2 kV avec une humidité 50-55 % et ce pour convoyeur triphasé, confirment que les particules de petite taille déplacent à 100 %. La figure 3.9, représente de la masse des particules déplacée (en pourcents) en fonction de la taille de la particule pour les fréquences 30 Hz, 50 Hz et 100 Hz.

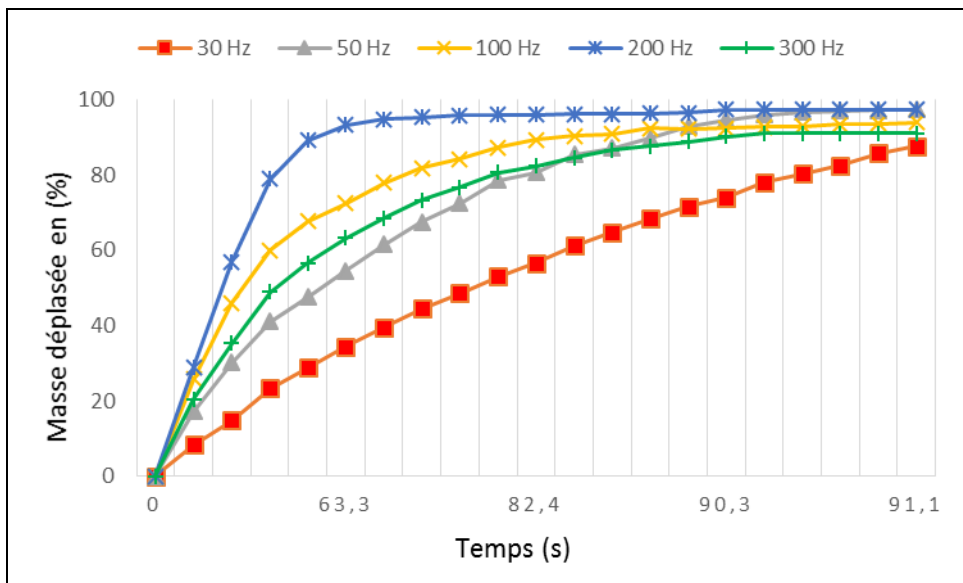


**Figure 3.9.** Masse des particules déplacées en fonction de la taille de particule PVC

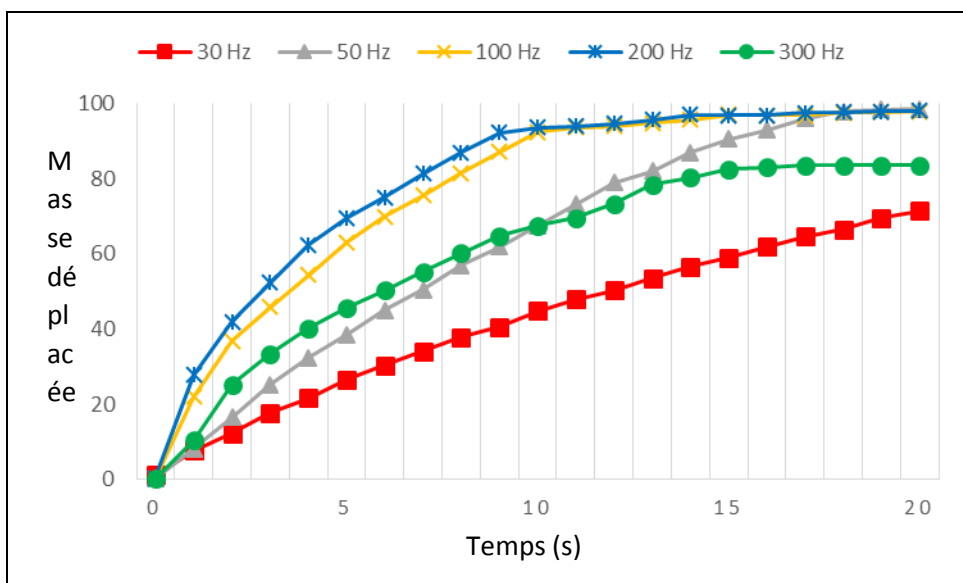
### 3.6.3. Influence de la fréquence

Le déplacement des matériaux dans un convoyeur à ondes mobiles dépend de plusieurs facteurs, tels que la tension, la fréquence, la taille des matériaux et le choix de déphasage du convoyeur. L'objectif du travail suivant est d'analyser le déplacement des particules de PVC en fonction de ces facteurs.

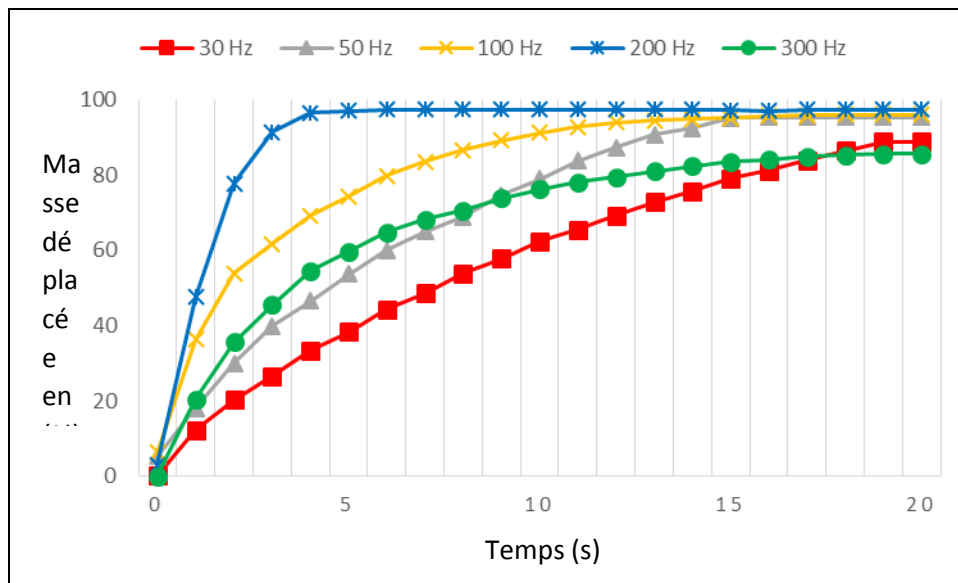
Dans ce cadre, nous avons effectué plusieurs expériences en variant la fréquence pour plusieurs tailles de particules de PVC respectivement 500 μm, 355 μm et 250 μm avec un échantillon de 5g pour chaque essai, et ce pour le convoyeur triphasé à une tension de 2 kV. La figure 3.10 représente l'évolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la fréquence, chaque figure correspondant à une taille granulométrique différente de 500 μm, 355 μm et 250 μm, respectivement.



a) Taille des particules 500 μm



b) Taille des particules 355 μm



c) Taille des particules 250  $\mu\text{m}$

**Figure 3.10.** Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la fréquence et trois dimensions différentes des particules ( $U = 2 \text{ kV}$ )

#### 3.6.4. Analyse de la vitesse de déplacement des particules

Un autre paramètre est consacré à l'évolution du déplacement des particules pour étudier la vitesse de déplacement des particules en fonction de la fréquence.

Nous remarquons que la masse des particules déplacées augmente en fonction de la fréquence jusqu'à 200 Hz puis diminue pour des valeurs supérieures à 200 Hz. La totalité de la masse se déplace pour les valeurs de la fréquence entre 100 Hz et 200 Hz avec un mouvement de plus en plus rapide des particules dès l'augmentation de la fréquence, ceci est probablement dû à la synchronisation entre l'inertie des particules et la relaxation de la polarisation qui serait optimale pour une valeur de 200 Hz.

Cette expérience confirme le fait que le déplacement des petites particules de taille inférieure de 250  $\mu\text{m}$  à 100 % est très rapide et ne dure que quelques secondes. Par contre, pour les particules de dimensions supérieures à 500  $\mu\text{m}$ , la durée de déplacement peut aller au-delà de la minute pour déplacer toutes les

particules. Ceci est dû à la masse des granules qui s'oppose à la force diélectrophorétique pour les granules de dimensions plus grandes.

### 3.6.5. Influence de la tension

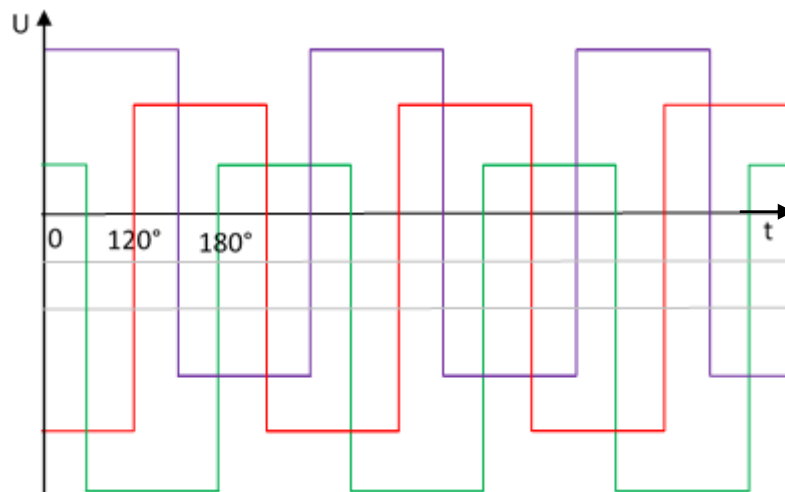
Les tensions équilibrées multi-phasées provenant d'une source programmable sont fournies à une série d'électrodes parallèles du convoyeur. A la surface des électrodes, un champ électrique de déplacement est créé autour des électrodes qui varie en synchronisation avec la tension appliquée.

Les forces dynamiques de cette onde générée par un champ de déplacement non uniforme dominant les forces d'adhésion et de gravitation agissant sur les particules chargées et les transportent dans une direction dans le plan perpendiculaire aux électrodes d'une manière progressive d'une l'électrode à l'autre.

La force du champ électrique agissant sur les particules dépend de la tension appliquée. En conséquence, la régulation de l'amplitude offre un moyen d'agir sur le déplacement des granules.

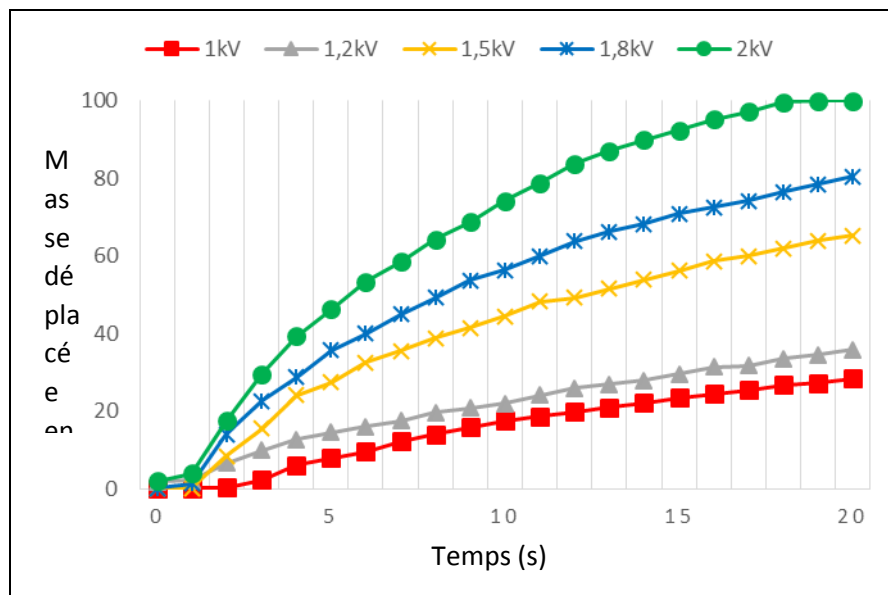
La tension est l'un des facteurs les plus importants qui influe sur le fonctionnement du convoyeur et le mouvement des particules. Dans Les expériences suivantes, nous avons varié la tension pour différentes tailles de particules en PVC, en utilisant des masses d'échantillons de 5 g pour chaque expérience, avec une fréquence fixe de 50 Hz.

La tension triphasée appliquée fournie par les amplificateurs de haute tension est de la forme carrée et d'amplitude réglable qui a été variée de 1.2 kV à 2 kV avec un déphasage fixe de  $120^\circ$  (Figure 3.11).

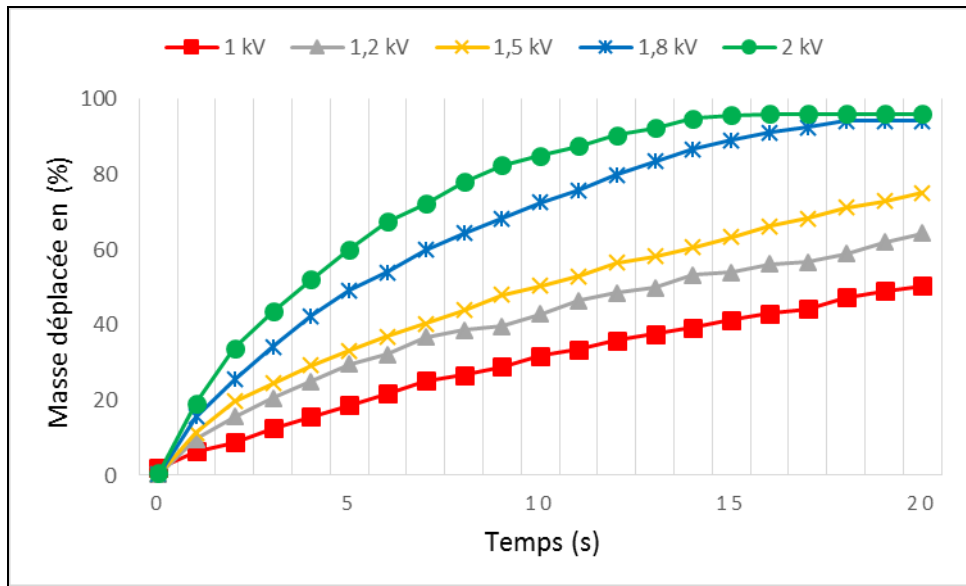


**Figure 3.11.** Forme du signal de la tension triphasée appliquée

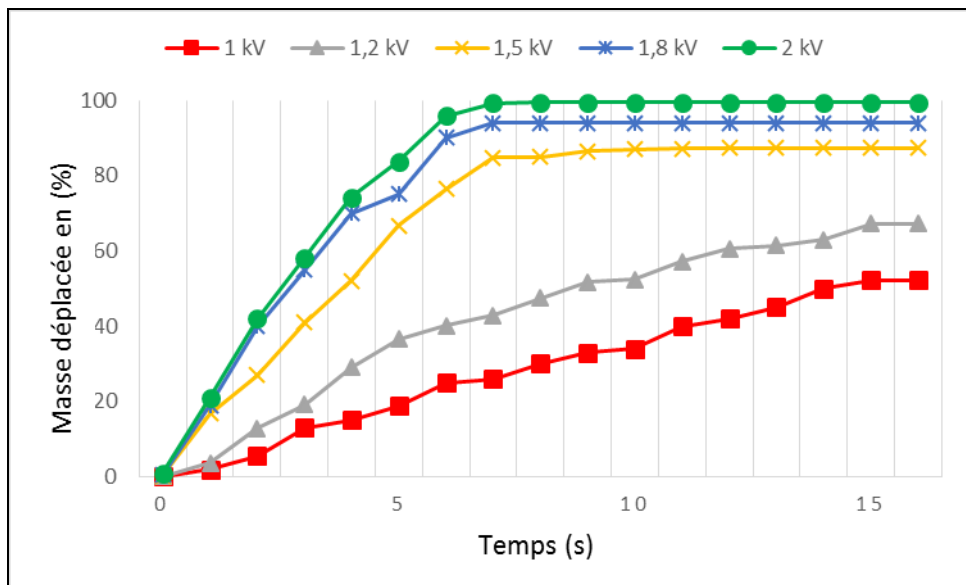
La figure 3.12 représente l'évolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension, chaque figure correspondant à une taille granulométrique différente de 500  $\mu\text{m}$ , 355  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$ , respectivement.



a) Taille des particules 500  $\mu\text{m}$



b) Taille des particules 355 μm



c) Taille des particules 250 μm

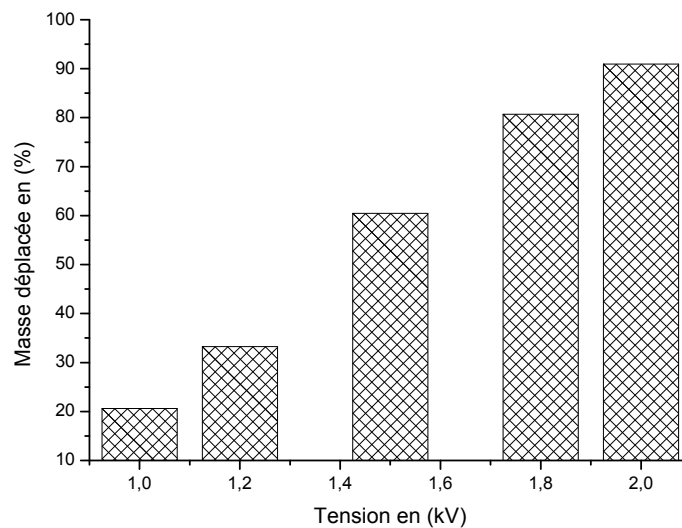
**Figure 3.12.** Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension et trois dimensions différentes des particules ( $f= 50$  Hz)

Les résultats représentés à la figure 3.12 montrent que la masse et la vitesse de déplacement des particules augmente significativement avec l'accroissement de la tension appliquée. La totalité des particules se déplace en

quelques secondes seulement pour une tension de 2 kV. Par contre, pour les valeurs de tension inférieures, le déplacement des particules nécessite des durées plus élevées pouvant aller jusqu'à 20 s.

Pour des valeurs de tension inférieures à 1 kV, le déplacement des particules devient très lent jusqu'à l'arrêt définitif où les particules restent collées sur le convoyeur et ce pour les trois tailles de particules. Il se produit une mise en agitation de la poudre déposée sur la couche isolante du convoyeur, on observe un déplacement d'une partie seulement des particules.

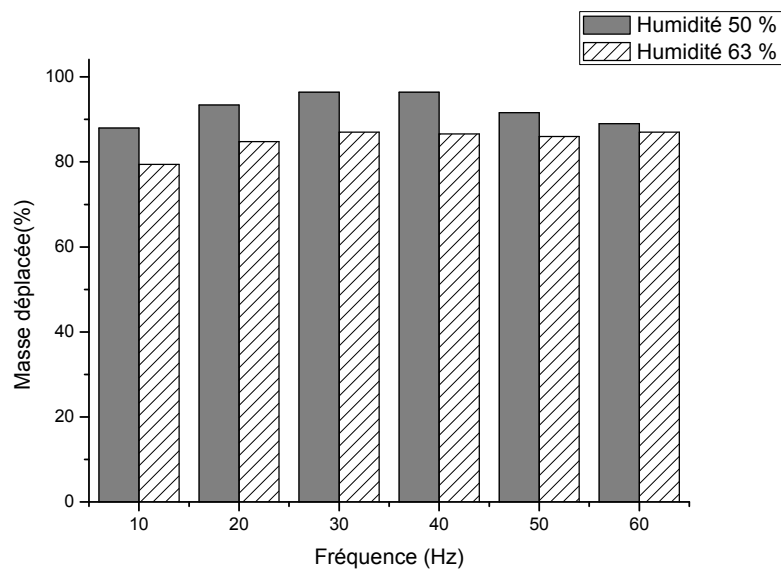
Nous pouvons conclure que l'effet du champ électrique est plus significatif sur la force électrique qui détache la particule de la surface du convoyeur que sur la force diélectrophorétique elle-même. Nous remarquons que le mouvement des particules est plus rapide pour des valeurs plus élevées de la tension appliquée, donc la portion de poudre enlevée par le champ alternatif, est une fonction croissante de la tension appliquée (Figure 3.13).



**Figure 3.13.** Variation de la masse déplacée en fonction de la tension appliquée

### 3.6.6. Influence de l'humidité

Des expériences ont été effectuées en variant la fréquence pour une tension 1,2 kV, et une masse de particules de PVC égale à 0,25 g (Taille moyenne 150  $\mu\text{m}$ ). La figure 3.14, représente les résultats obtenus avec le convoyeur en termes de la masse déplacée (en pourcents) en fonction de la fréquence pour deux valeurs d'humidités égales à 60-63 % et 49-50 % respectivement.



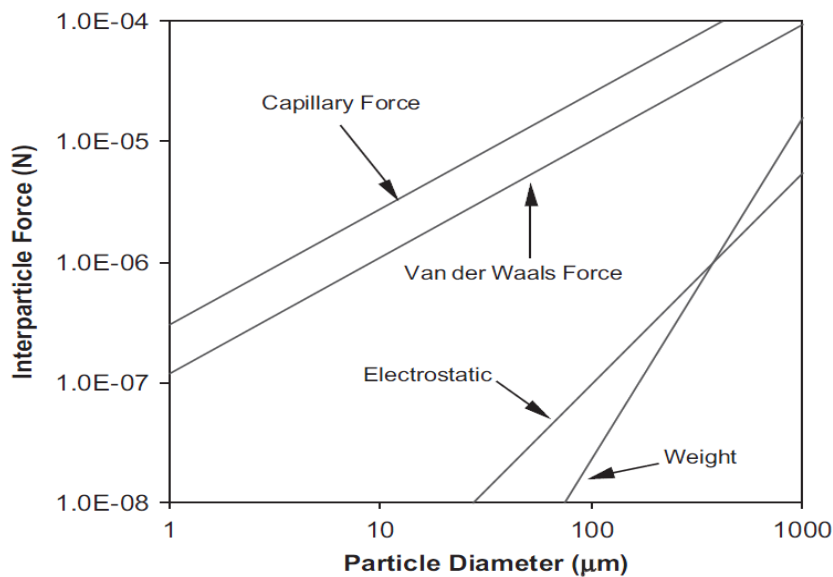
**Figure 3.14.** Variation de la masse déplacée des particules en fonction de la fréquence, pour deux valeurs d'humidité différentes ( $U = 2 \text{ kV}$  ; Taille granulométrique 125  $\mu\text{m}$ )

La plupart des résultats précédents mesurés au laboratoire ont montré que la présence d'humidité modifiait fortement le comportement déplacement des particules en matière de perte de charge. On constate que l'humidité influe négativement sur le taux de déplacement des particules.

Les performances des convoyeurs à ondes mobiles, en matière d'efficacité de déplacement des particules microniques, sont relativement bien reliées lors de leur fonctionnement aux conditions climatiques (humidité et température ambiantes). Malheureusement, certaines conditions d'utilisation donnent lieu à un milieu très riche en humidité. Elles peuvent être d'origine naturelle, comme

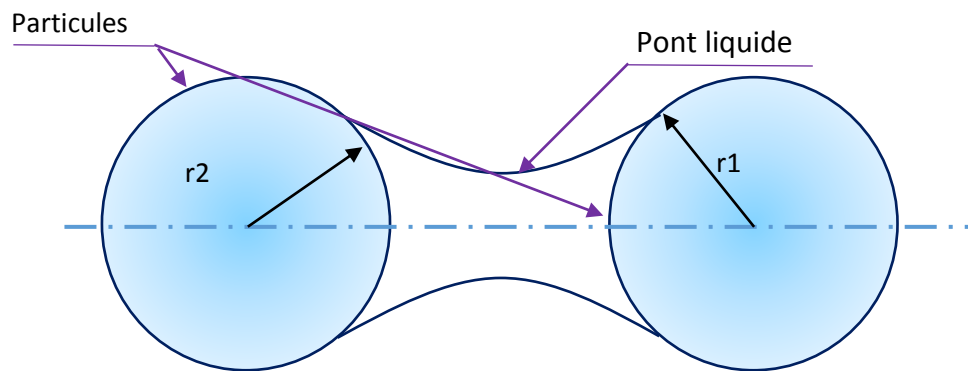
l'augmentation de l'humidité de l'air due aux conditions climatiques (brouillard par exemple).

L'impact entre deux ou plusieurs particules peut résulter en une attrition ou coalescence selon la cinématique d'impact, la microstructure des particules et l'interaction interparticulaire [130]. La cohésion causée par la force interparticulaire peut être classée dans deux catégories différentes, soit une cohésion dite « humide » ou « sèche ». La cohésion « humide » est causée par la présence de forces capillaires. En ce qui concerne la cohésion « sèche », celle-ci peut être causée par la force de Van der Waals et la force électrostatique. La figure 3.15 illustre les principales forces de cohésion entre les particules en fonction du diamètre particulaire et démontre bien l'importance de ces forces par rapport au poids particulaire.



**Figure 3.15.** Forces cohésives en fonction du diamètre de particule [131]

L'humidité peut être caractérisée par la présence de forces capillaires entre les particules, causée par la présence d'un liquide entre ces dernières. En effet, la présence de forces capillaires en plus de la tension de surface du liquide créera un pont liquide [132]. Par ailleurs, tel qu'illustré à la figure 3.16, il n'est pas nécessaire qu'il y ait un contact physique entre deux particules pour la formation d'un pont liquide [133].



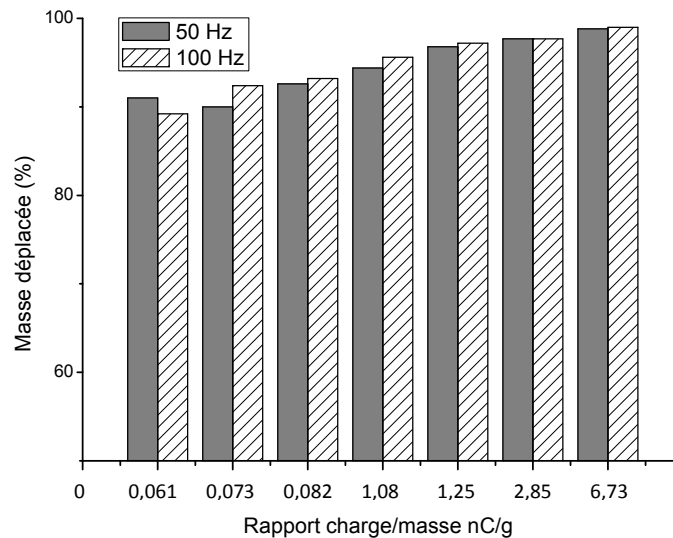
**Figure 3.16.** Exemple de pont liquide [133]

La géométrie d'un pont liquide peut être très complexe et il est possible de procéder selon deux approches afin de calculer tous les paramètres, soit celle de l'approximation toroïdale de Fisher (1926) ou encore selon la solution exacte de l'équation de Laplace-Young [134].

### 3.6.7. Influence de la charge électrique des particules

La charge électrique des matériaux pulvérulents de plastique peut être produite par le mécanisme physique tribo-électrique, comportant un transfert d'électrons, d'ions ou de matière à l'impact et/ou au frottement entre les particules ou entre celles-ci et les parois de dispositifs dédiés.

Dans cette partie on va étudier l'influence de la charge tribo-électrique des particules de PVC acquise par frottement, de taille granulométrique 125  $\mu\text{m}$ , sur le déplacement des particules. La figure 3.17 montre les résultats obtenus de la variation de la masse déplacée en fonction du rapport « charge/masse » acquise par les particules, pour une tension de 2 kV et deux valeurs différentes de la fréquence du convoyeur triphasé.



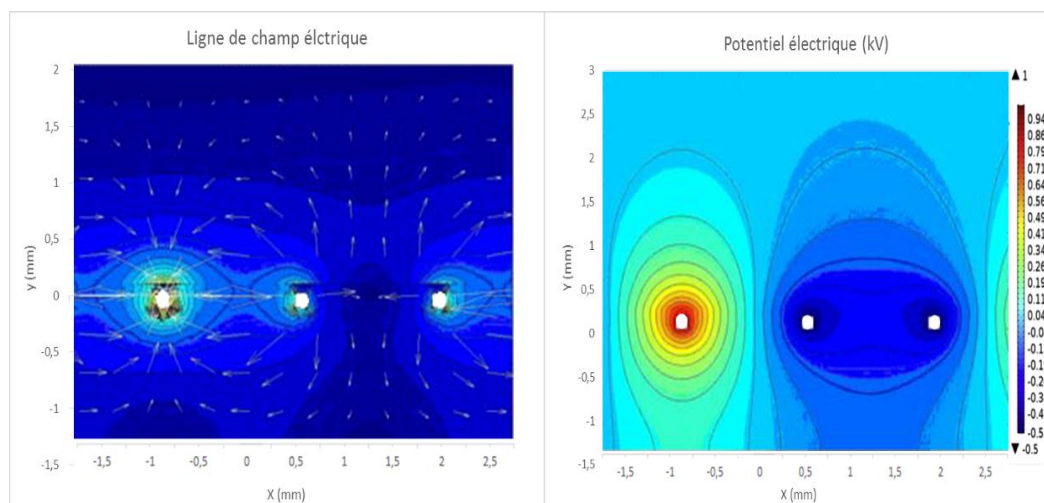
**Figure 3.17.** Variation de la masse déplacée en fonction du rapport « charge/masse, pour deux valeurs différentes de la fréquence ( $U=2$  kV ; taille granulométrique  $125 \mu\text{m}$ )

Les résultats obtenus montrent que le taux de déplacement des particules augmente avec l'augmentation de la charge triboélectrique acquise par les particules. Ceci est dû principalement à l'augmentation de la force créée par le champ électrique qui est proportionnel à la charge électrique acquise qui va contribuer elle-même sur le déplacement des particules. En fait, c'est la force de Coulomb qui augmente avec l'accroissement de la charge électrique des particules.

### 3.6.8. Analyse numérique du champ électrique

Chaque particule chargée positivement ou négativement se déplace sous l'action de la force de Coulomb dans un champ électrique horizontal créé entre deux électrodes adjacentes. Les particules chargées positivement se déplacent dans le sens du champ électrique vers l'électrode négative et les particules chargées négativement sont dirigées vers l'électrode positive. Soumises à l'action de la force d'image électrique, les particules chargées adhèrent à la surface des électrodes de polarités opposées.

La distribution de l'intensité du champ électrique sur deux électrodes adjacentes a été analysée pour un convoyeur avec des électrodes de largeur 0,5 mm et d'espacement entre les électrodes de 2 mm (Figure 3.18). Le champ électrique atteint une valeur maximum au voisinage du bord de l'électrode en raison du pouvoir de pointe, et il diminue de façon exponentielle le long de la direction verticale. La figure 3.18 montre le champ électrique et les lignes équipotentielles pour un signal d'onde triphasée carré 2 kV.



**Figure 3.18.** (à gauche) Configuration du champ E pour un signal carré triphasé, tracé. (Droite) configuration du Potentiel électrostatique.

### 3.7. Influence de la charge acquise par décharge couronne

#### 3.7.1. Chargement par décharge couronne

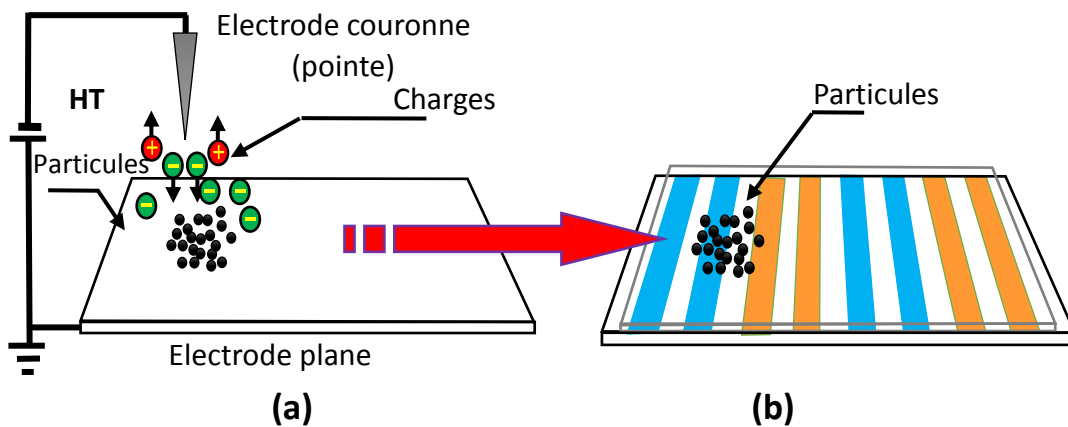
Les travaux de caractérisation des particules isolantes chargées par décharge couronne, effectués dans le cadre de cette partie, sont principalement basés sur la mesure de la quantité des particules déplacées par le convoyeur à ondes mobiles après l'utilisation du chargement par décharge couronne. Le dispositif utilisé a été réalisé au laboratoire, il s'agit d'une configuration « fil fin-plan » généralement utilisée dans les études de la décharge couronne [135-140].

La technique expérimentale utilisée comprend pour son fonctionnement deux étapes : une phase de chargement des particules par décharge couronne pendant une durée de 30 secondes, et une phase de mesure de l'efficacité de déplacement des particules.

Ce procédé de formation est basé sur la génération de décharges couronne en appliquant une tension assez élevée à une électrode de faible rayon de courbure située à une certaine distance par rapport à un plan de masse.

Le champ électrique dans l'espace inter électrodes est non uniforme, son intensité au voisinage de l'électrode active est assez élevée pour que l'air soit ionisé. Les particules qui sont posées sur le plan de masse, acquièrent sous l'action du champ électrique des charges de même polarité que l'électrode couronne. La figure 3.19 illustre le principe de chargement par décharge couronne négative.

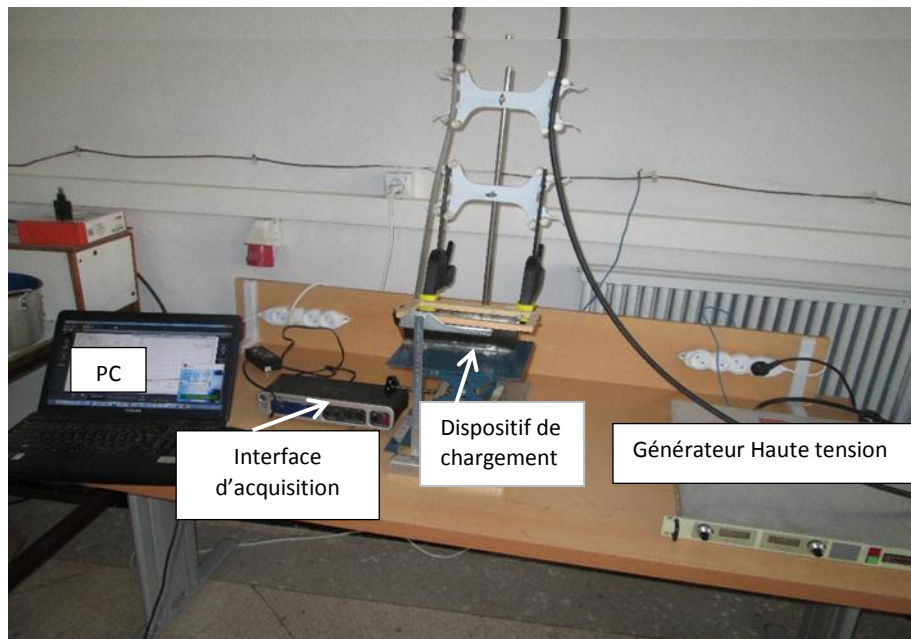
Si la décharge couronne se produit à partir d'une électrode de polarité négative dans l'air à pression atmosphérique et à une humidité relative comprise entre 40% à 60%, des ions négatifs seront formés



**Figure 3.19.** Dispositif expérimental de chargement par décharge couronne, (a) Schéma du dispositif expérimental (b) Rideau électrique

### 3.9. Etude du déplacement des particules après chargement par décharge couronne

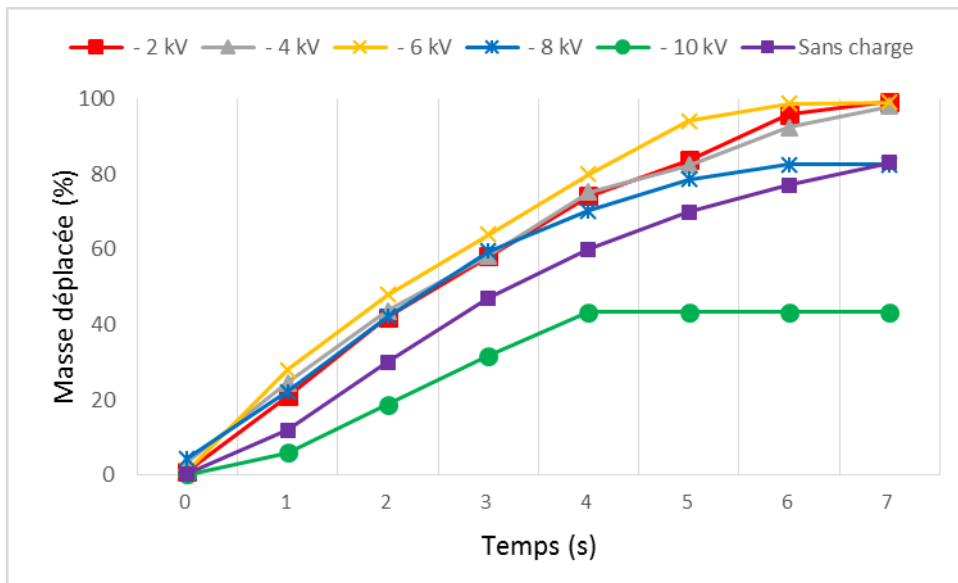
Pour cette partie des expériences, nous avons utilisé un dispositif de chargement, constitué d'une plaque en acier inoxydable reliée à la terre sur laquelle sont étalées les particules de PVC pour un chargement couronne. L'électrode à fil fin est portée à un potentiel continu de polarité négative, délivrée par une source haute tension continue (Figure 3.20).



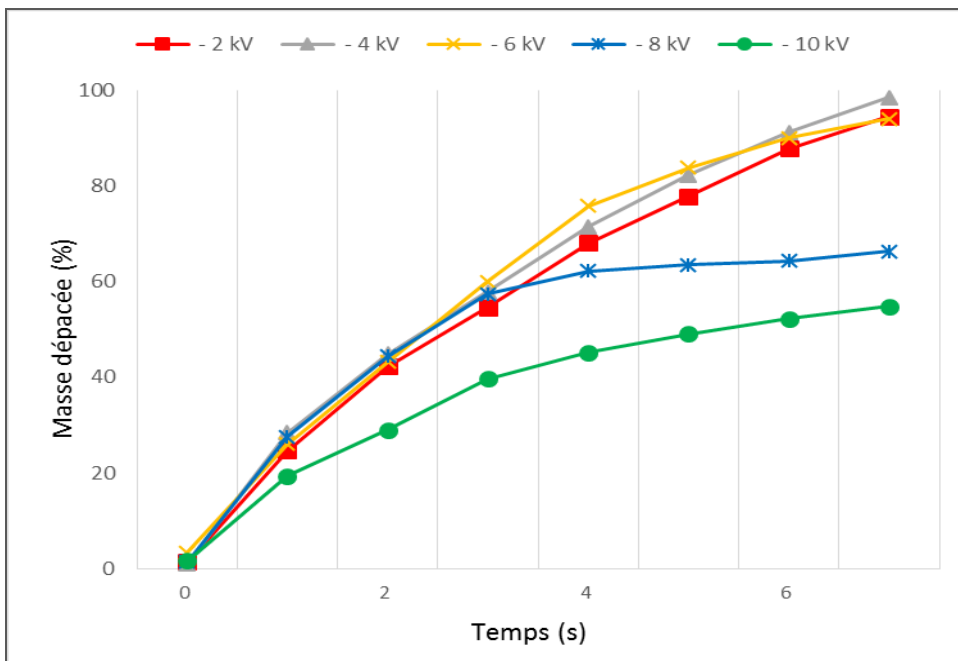
**Figure 3.20.** Dispositif expérimental du chargement par décharge couronne

Dans ce contexte, nous avons étalé 5 g de particules de PVC sur la plaque métallique reliée à la terre, ces particules sont chargées négativement avec une alimentation de haute tension continue négative et variable. Après un chargement d'une durée de 30 s, les particules sont déposées sur le convoyeur à ondes mobiles.

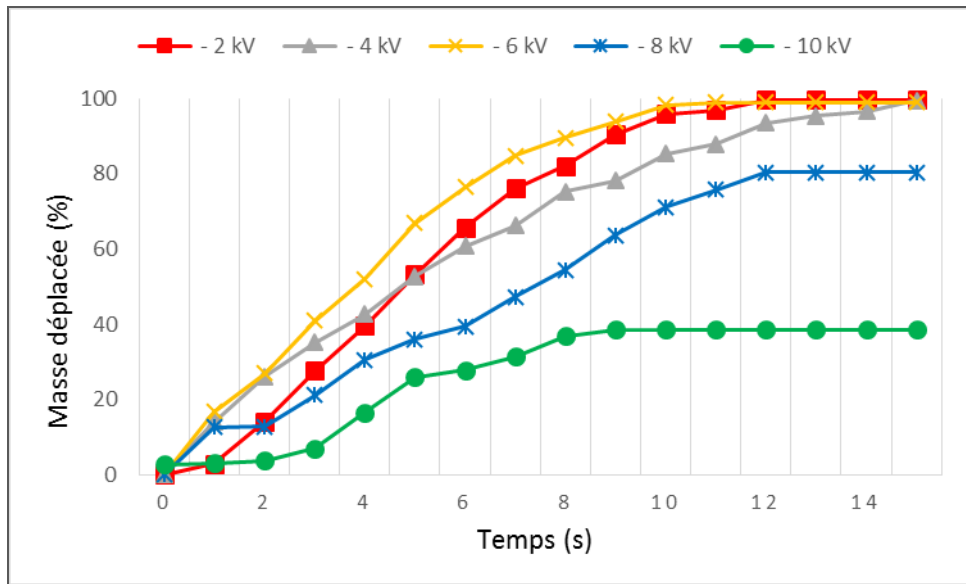
Les résultats obtenus de l'évolution de la masse déplacée en fonction du temps, pour plusieurs valeurs de la tension de chargement couronne allant de 2 kV à 10 kV. Plusieurs figures sont tracées pour différentes valeurs de la tension  $U_{COM}$  appliquée au convoyeur (2 kV ; 1,8 kV ; 1,5 kV et 1,2 kV). Tous ces résultats sont tracés à la figure 3.21 pour une fréquence de 50 Hz. Des courbes similaires sont tracées aux figures 3.22 et 3.23 pour des fréquences de 100 Hz et 150 Hz, respectivement.



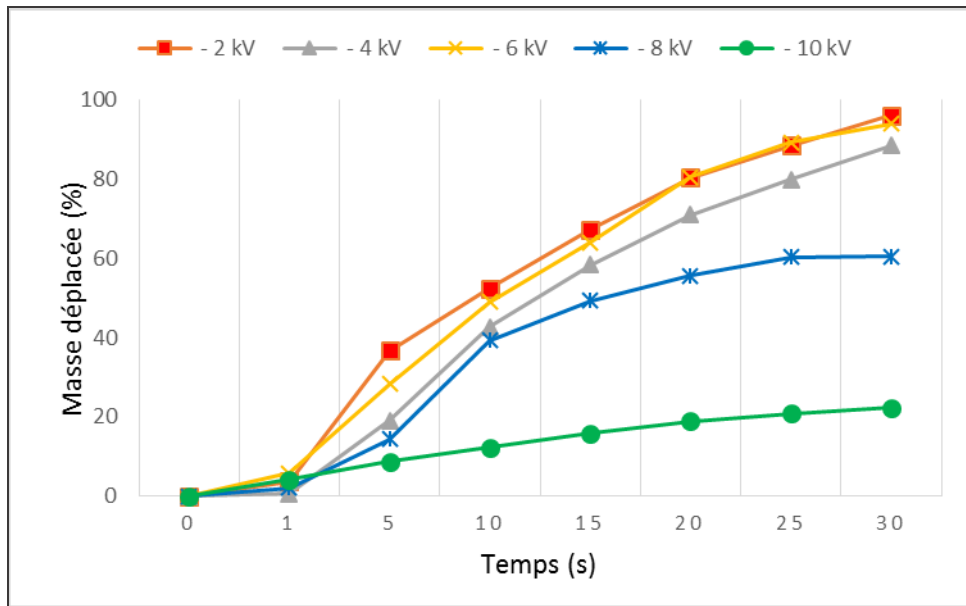
a)  $U_{COM} = 2 \text{ kV}$



b)  $U_{COM} = 1,8 \text{ kV}$

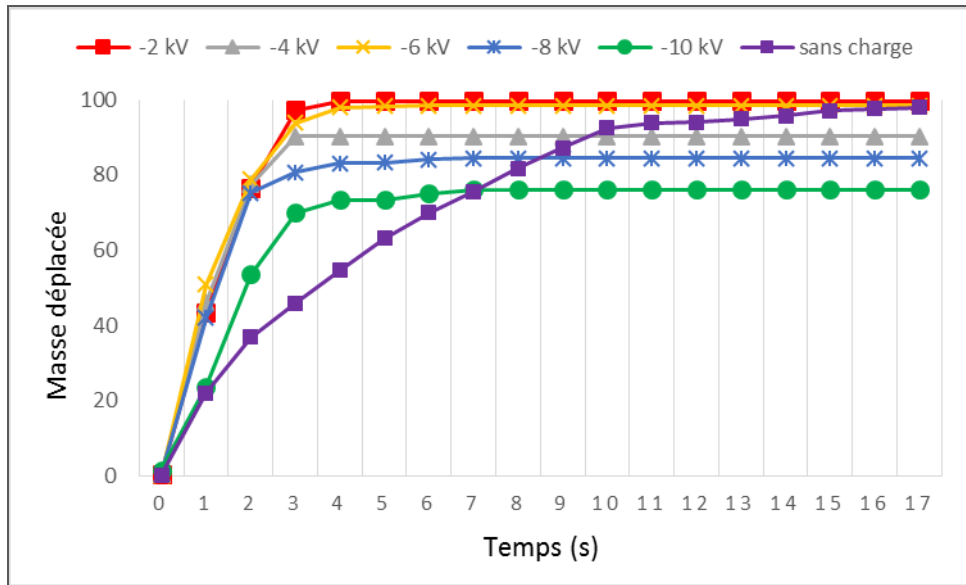


c)  $U_{COM} = 1,5 \text{ kV}$



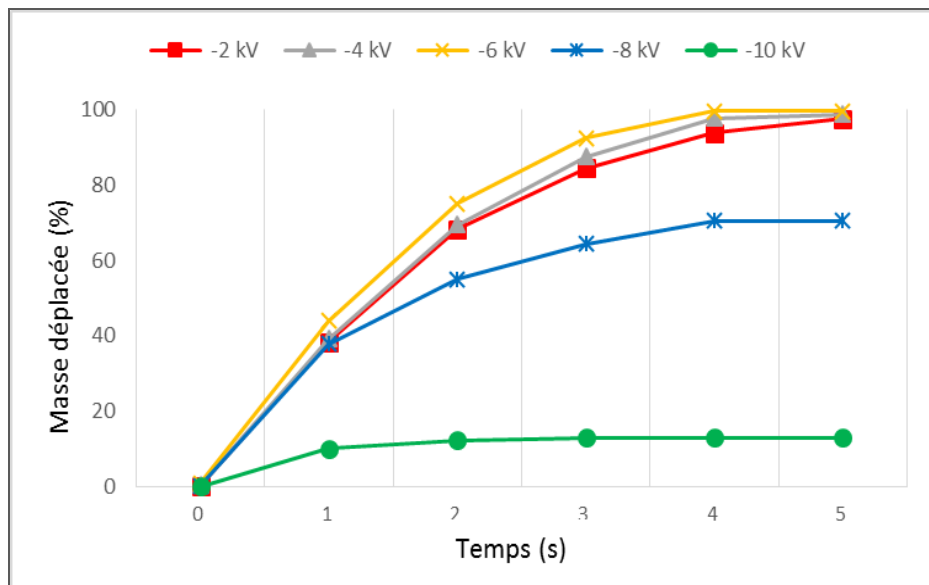
d)  $U_{COM} = 1,2 \text{ kV}$

**Figure 3.21.** Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension de chargement couronne et différentes valeurs de la tension  $U_{COM}$  appliquée au convoyeur ( $f=50 \text{ Hz}$ )

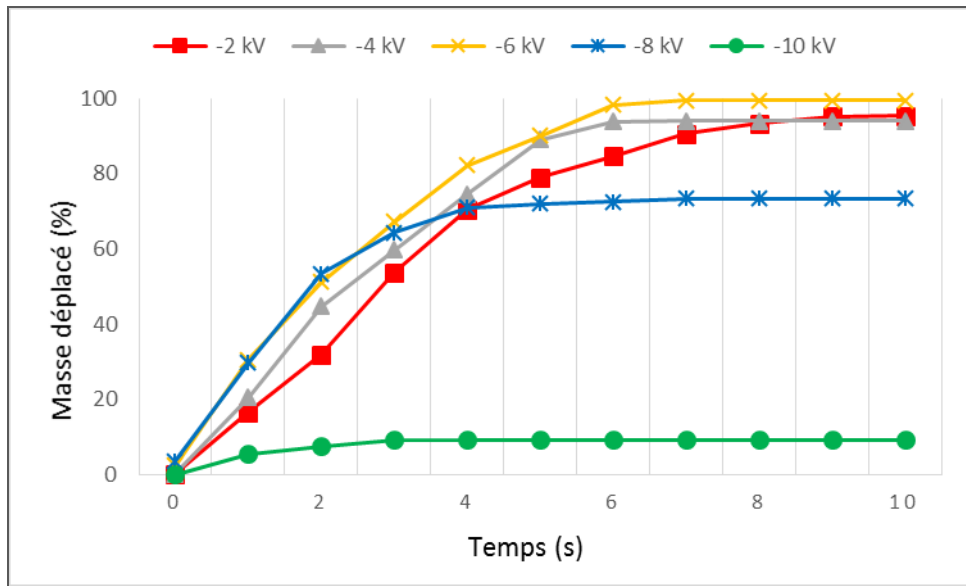


a)  $U_{COM} = 2 \text{ kV}$

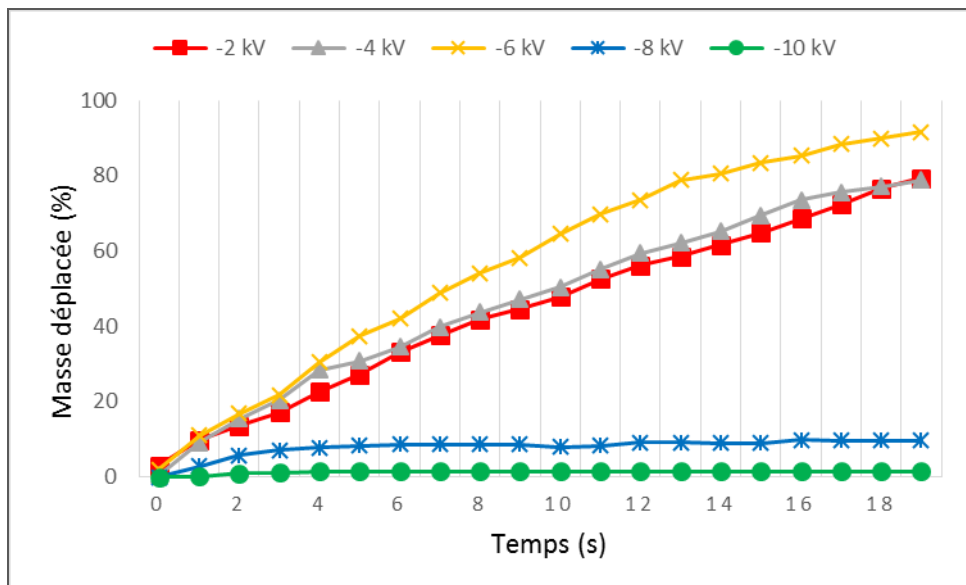
(%)



b)  $U_{COM} = 1,8 \text{ kV}$

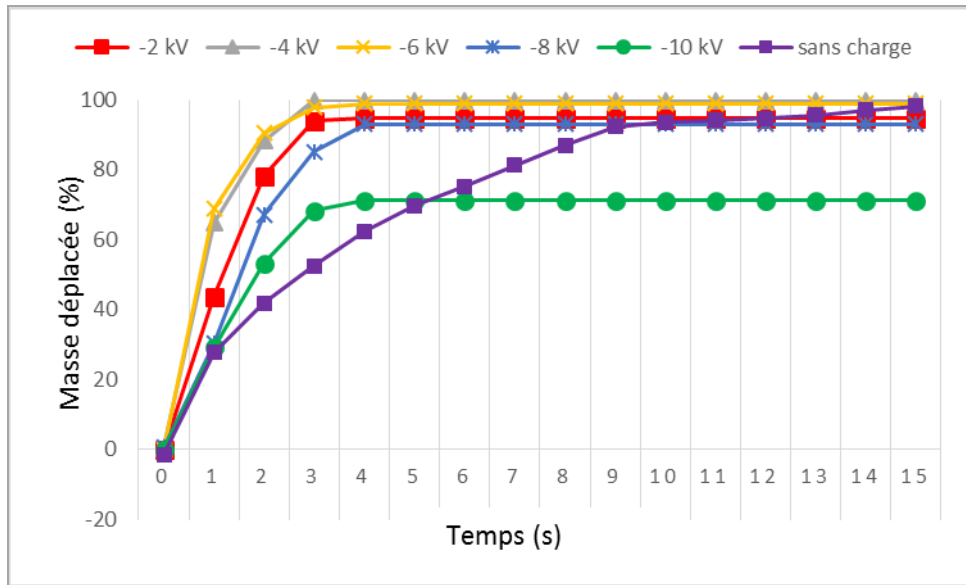


c)  $U_{COM} = 1,5 \text{ kV}$

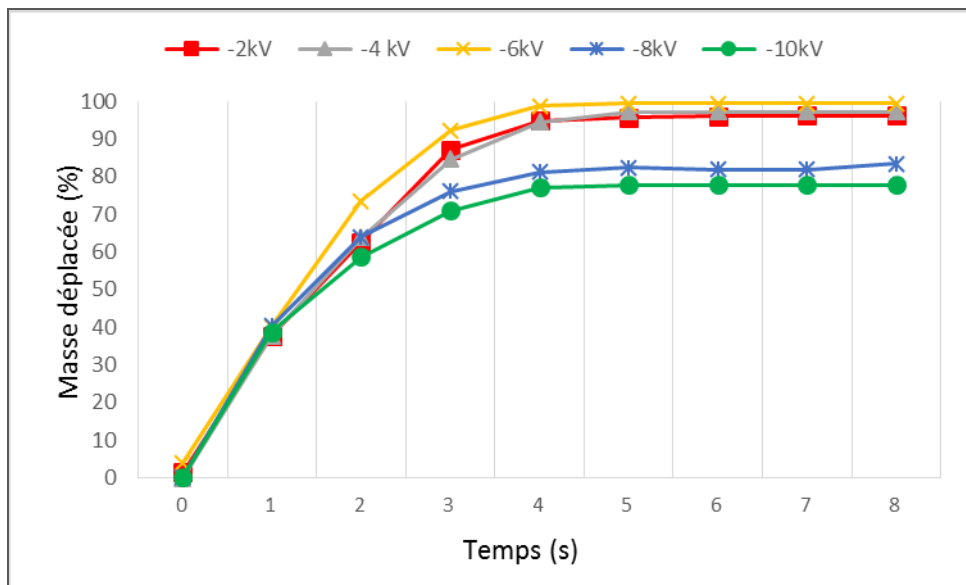


d)  $U_{COM} = 1,2 \text{ kV}$

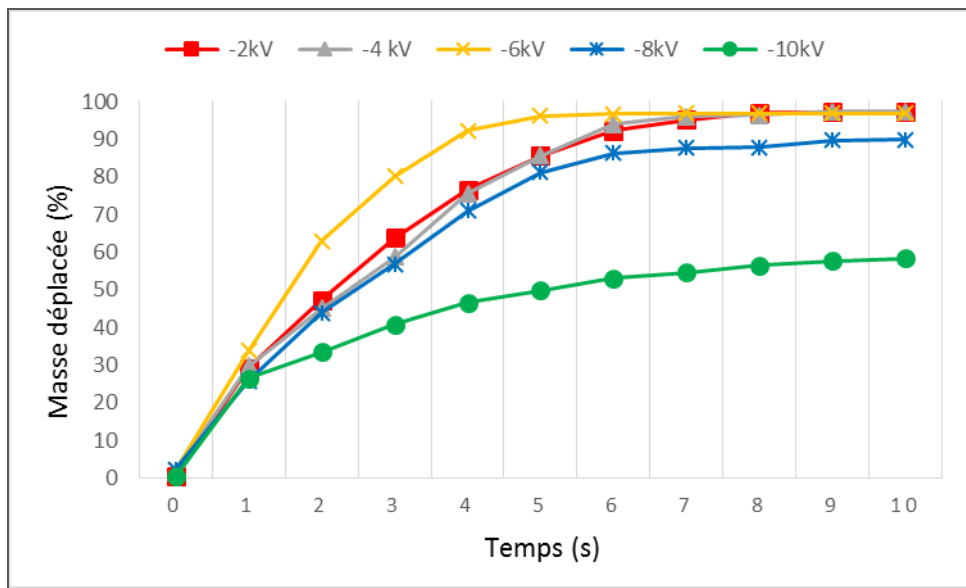
**Figure 3.22.** Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension de chargement couronne et différentes valeurs de la tension  $U_{COM}$  appliquée au convoyeur ( $f=100 \text{ Hz}$ )



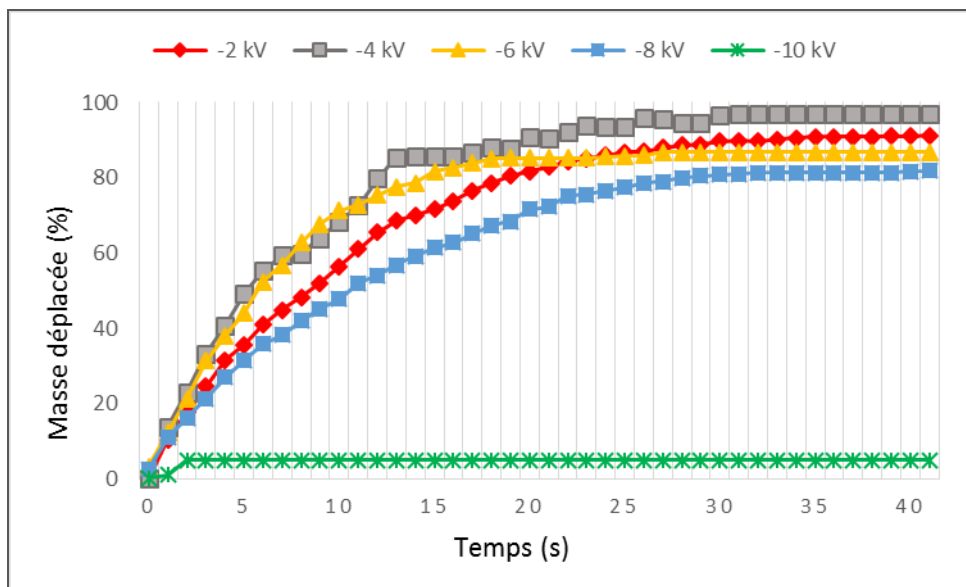
a)  $U_{COM} = 2 \text{ kV}$



b)  $U_{COM} = 1,8 \text{ kV}$



c)  $U_{COM} = 1,5 \text{ kV}$



d)  $U_{COM} = 1,2 \text{ kV}$

**Figure 3.23.** Evolution de la masse déplacée pour plusieurs valeurs de la tension de chargement couronne et différentes valeurs de la tension  $U_{COM}$  appliquée au convoyeur ( $f=150 \text{ Hz}$ )

Les résultats obtenus montrent l'efficacité de déplacement lorsqu'on charge les particules par la méthode de décharge couronne pour les trois gammes de fréquences 50 Hz, 100 Hz et 150 Hz. L'efficacité de déplacement est meilleure que dans le cas de particules non chargées. Néanmoins au-delà d'une certaine valeur de la tension (-6 kV), le déplacement devient très lent jusqu'à l'arrêt total du déplacement quand les particules se collent à la surface du convoyeur.

Pour un chargement modéré, avec une tension couronne dont la valeur varie en fonction de la fréquence, le déplacement est meilleur car la force de Coulomb qui dépend de la charge acquise devient plus grande. Par contre, pour des tensions de chargement couronne encore plus grandes, la force d'image qui retient les particules devient prépondérante et les granules restent fortement attachés au convoyeur.

### 3.9. Conclusion

Cette étude a confirmé certains effets comme l'amélioration de l'efficacité du déplacement des particules sur le convoyeur à ondes mobiles avec l'accroissement l'amplitude de la tension. D'un autre côté, le déplacement dépend de la taille des particules car la masse des particules déplacées diminue à mesure que le diamètre des particules augmente.

Un autre facteur important est la fréquence qui donne des résultats intéressants pour des valeurs supérieures à 50 Hz et inférieures à 200 Hz. Par ailleurs, l'humidité influe aussi sur les performances de fonctionnement des convoyeurs à ondes mobiles, en matière d'efficacité de déplacement des particules. Cependant, l'étude a également montré l'effet de la charge des particules par décharge couronne.

Le chapitre suivant se focalise sur l'étude d'une force d'attraction appliquée par les convoyeurs à ondes mobiles sur des pièces métalliques.

**Analyse expérimentale d'une nouvelle force d'attraction  
appliquée sur les particules de métal**



#### 4. 1. Introduction

Les matériaux sont omniprésents dans notre quotidien. Il n'est pas de structures, d'infrastructures sans matériaux. Il n'est pas de transport ni de production d'énergie sans matériaux. On les dit aujourd'hui nano-structurés, architecturés ou bien encore intelligents. Ils occupent une place fondamentale dans l'activité économique mondiale et font également l'objet d'une attention particulière de la part des acteurs académiques qui n'ont de cesse de les améliorer, de les adapter et de les optimiser pour répondre aux exigences technologiques, environnementales et sociétales croissantes.

Dans l'industrie les déchets sont composés d'une grande diversité de matériaux plastiques et métalliques [141].

En effet le recyclage permet d'économiser une grande quantité d'énergie primaire, notamment du pétrole, la principale matière première de la plupart des matériaux plastiques. Le développement de ce secteur industriel nécessite la recherche et le développement de nouvelles technologies de séparation physique.

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la caractérisation du comportement des particules millimétriques à la surface des électrodes du convoyeur à ondes mobiles

Nous avons réalisé les expériences sur deux classes de matériaux isolants et non isolants qui se trouvent dans les mélanges granulaires triés par les séparateurs électrostatiques. Une nouvelle méthode de séparation a été testée pour le tri des particules micronisées « Cuivre/PVC » en utilisant la technique des ondes mobiles.

D'autre part, l'objectif de la seconde partie de ce chapitre est totalement différent, il s'agit d'une étude expérimentale effectuée sur l'influence de plusieurs facteurs du convoyeur à ondes mobiles sur la force d'attraction exercée par ces derniers sur des particules métalliques qui les retiennent attachées sur la surface.

Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions stables de température (20-25°C) et d'humidité (50-55%) ; de plus, chaque expérience a été répétée deux fois et la valeur moyenne a été utilisée pour le traçage des courbes.

## 4. 2. Caractérisation des matériaux

Plusieurs mélanges conducteur – isolant ont été étudiés. Des expériences sur des particules et des pièces de Cuivre /PVC ont visé à démontrer la faisabilité de la séparation électrostatique de ces matériaux par la technique des convoyeurs à ondes mobiles [142].

Par ailleurs, les métaux conducteurs étant de natures diverses, trois types ont fait l'objet des essais visant à déterminer l'influence des paramètres tels que la tension, la fréquence, l'humidité et la forme d'onde du signal appliqué sur la force d'attraction magnétique exercée par le convoyeur à ondes mobiles sur ces métaux.

## 4. 3. Propriétés des matériaux utilisés

### A. Cuivre

Avec l'or, le cuivre est le seul métal naturellement coloré et le meilleur conducteur d'électricité et de la chaleur après l'argent. La présence moyenne dans l'ensemble de l'écorce terrestre est de 55 g à la tonne. Sa présence dans les organismes vivants est de 1 à 10 milligrammes par kg.

Le cuivre a des propriétés remarquables extrêmement nombreuses. Celles-ci ne sont pas forcément exigées par l'utilisateur systématiquement en même temps. La grande majorité des applications du cuivre se réfère à l'une des 2 propriétés dominantes : sa conductibilité électrique et thermique d'une part et sa résistance à la corrosion d'autre part. À ces deux propriétés de base, il faut souvent ajouter des propriétés de résistance mécanique, d'aptitude à la mise en œuvre ou à l'usinage, que le cuivre ne possède pas ou insuffisamment. On fait alors appel aux alliages de cuivre. Partant des deux propriétés dominantes qui demeurent souvent les préoccupations principales, le prescripteur doit chercher ensuite dans le large éventail des additions possibles celle qui lui permettra, avec des caractéristiques mécaniques renforcées et/ou une bonne aptitude à l'usinage, d'obtenir le meilleur compromis entre toutes les autres exigences.

- Symbole Cu
- Densité 8,92 kg/dm<sup>3</sup>
- Température de fusion 1084°C
- Temperature d'ébullition 2,562°C
- Coefficient de dilatation 1,7 mm/m pour 100 egrés

### B. Bronze

Le bronze est un alliage métallique non ferreux. Un nom générique qui était donné autrefois à tous les alliages de cuivre. Aujourd'hui son sens s'est restreint aux alliages de cuivre et d'étain.

Les bronzes sont, pour la plupart, composés de plus de 54 % de cuivre (qui peut aller jusqu'à avoisiner les 95 %<sup>1</sup>) et d'une proportion variable, non seulement d'étain, mais aussi d'aluminium, de plomb, de béryllium, de manganèse et de tungstène, ainsi qu'accessoirement de silicium et de phosphore, mais pas de zinc en quantité notable (ne pas confondre avec le laiton, dont le terme anglais *brass* est souvent traduit par bronze).

Leurs caractéristiques principales sont une bonne résistance à l'usure, une résistance moyenne à la corrosion et une bonne conductivité électrique. On les utilise souvent comme matériau de frottement en face de l'acier. La corrosion des pièces en bronze est une entrave à leur usage dans le secteur de la marine et de l'industrie navale.

### C. Acier

En raison de ses propriétés, l'acier est peut-être le matériau pour l'ingénierie et la construction le plus important au monde. Les propriétés essentielles de l'acier sont de grandes formabilité et durabilité, de bonnes contrainte de traction et limite d'élasticité, une bonne conductivité thermique, et pour les aciers inoxydables une résistance à la corrosion.

L'acier est élaboré pour résister à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou une combinaison des deux.

Des éléments chimiques peuvent être ajoutés à sa composition en plus du carbone pour résister aux sollicitations précédentes. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

Les propriétés physiques de l'acier sont liées à la physique du matériau, telles que la densité, la conductivité thermique, le module d'élasticité, le coefficient de Poisson etc. Quelques valeurs caractéristiques des propriétés physiques de l'acier sont :

- densité  $7.7 \div 8.1$  [kg/dm<sup>3</sup>]
- module d'élasticité  $190 \div 210$  [GPa]
- coefficient de Poisson  $0.27 \div 0.30$
- conductivité thermique  $11.2 \div 48.3$  [W/mK]
- dilatation thermique  $9 \div 27$  [ $10^{-6}$  / K]

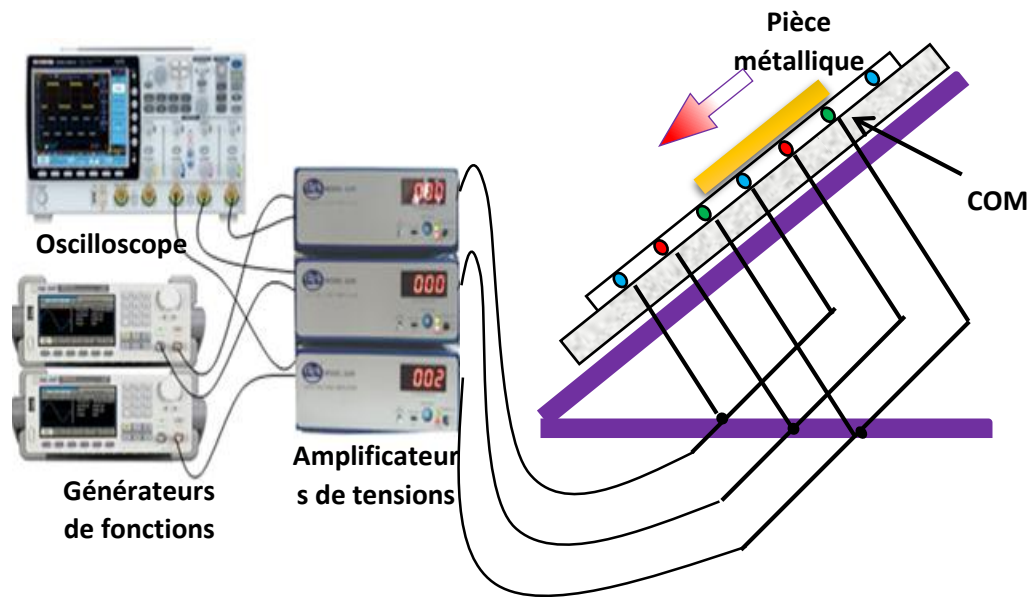
#### **4. 4. Analyse expérimentale d'une nouvelle force d'attraction appliquée sur des pièces métalliques**

##### **4.4.1. Dispositif expérimental**

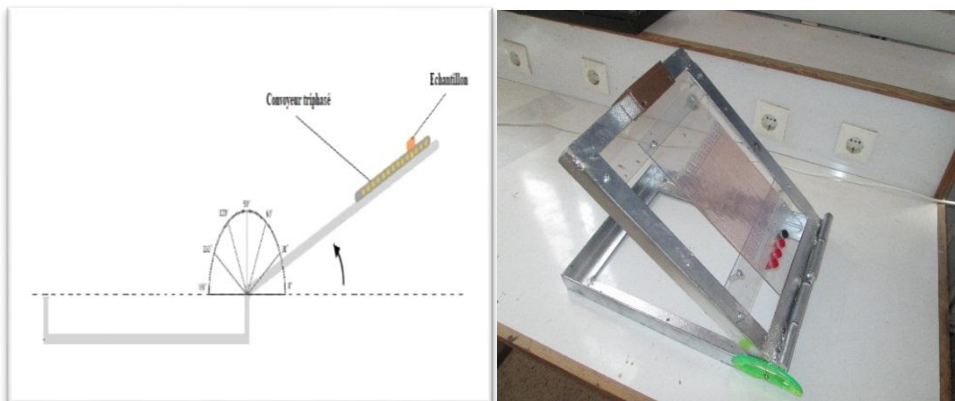
###### **A) Convoyeur à inclinaison variable**

Le dispositif expérimental utilisé dans ces expériences est constitué d'un convoyeur à ondes mobiles (COM) plan à trois phases et d'un système qui permet son inclinaison jusqu'à un angle de  $180^\circ$ . C'est le même convoyeur à ondes mobiles avec les mêmes caractéristiques que celui utilisé dans le chapitre précédent.

Les électrodes appartenant à la même phase sont connectées ensemble. Les phases sont alimentées par des tensions alternatives de forme carrée ayant un déphasage de  $120^\circ$  entre elles (Figure 4.1) [143]. Dans le but de mesurer l'angle de décrochage à partir duquel les pièces métalliques se détachent de la surface du convoyeur, un dispositif mécanique a été réalisé sur lequel le convoyeur est fixé. Ce dispositif permet de faire incliner le convoyeur (COM) manuellement d'un angle initial de  $0^\circ$  jusqu'à un angle de  $180^\circ$  (Figure 4.2).



**Figure 4.1.** Schéma descriptif du montage expérimental

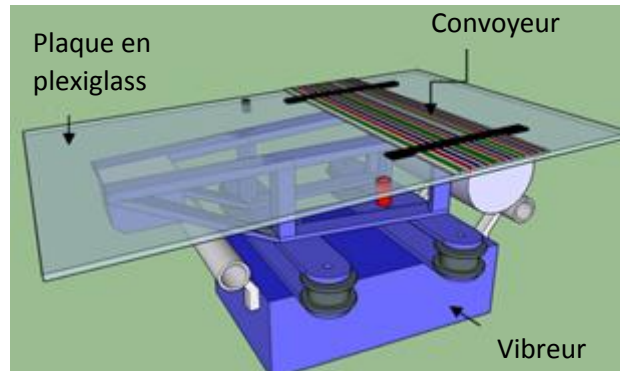


**Figure 4.2.** Photographie du dispositif mécanique utilisé

### B) Convoyeur vibrant

De plus, une autre configuration expérimentale a été utilisée où le convoyeur a été fixé sur une plaque vibrante avec une inclinaison constante égale à  $10^\circ$ , insuffisante pour provoquer le glissement des particules par gravité.

En raison des vibrations mécaniques, à la fois les granules de métal et de plastique se déplacent lorsque le convoyeur est éteint (Figure 4.3) [144]. Par ailleurs, lorsque le COM est alimenté par une tension polyphasée, seules les particules de plastique qui se déplacent laissant derrière elles les granules de métal qui restent attachés à la surface du COM vibrant.



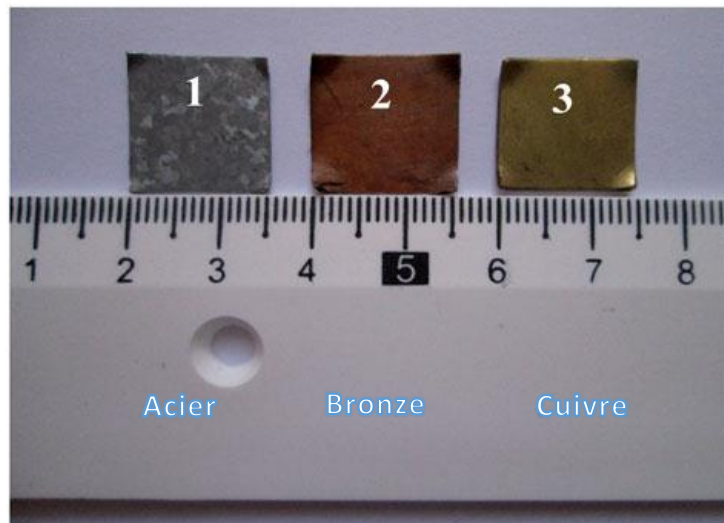
**Figure 4.3.** Le convoyeur fixé sur une plaque vibrante

Les conditions climatiques telles que la température et l'humidité relative de l'air peuvent affecter l'état du convoyeur. L'humidité de l'air désigne la quantité de vapeur d'eau contenue dans un certain volume d'air. Elle est limitée par la quantité maximale que l'air peut absorber avant qu'il y ait saturation à une température et une pression données. Il s'agit donc du rapport entre la masse de vapeur d'eau et le volume d'air à la pression et la température considérées.

Dans ce cas, nous avons besoin de connaître ses valeurs. Pour cela, on a utilisé un hygromètre (PCE 313A) permettant de mesurer le taux d'humidité de l'air et la température ambiante.

#### 4.4.2. Pièces de métal utilisées

Les expériences ont été effectuées en utilisant des pièces carrées 15 mm de côté pour trois types de métal : cuivre, bronze et acier galvanisé, de masses respectives 1,5 g, 1,6 g et 1,3 g (Figure 4.4) [145].



**Figure 4.4.** Pièces métalliques utilisées

#### 4.4.3. Procédure expérimentale

Le but de cette section est de présenter les mesures expérimentales obtenues lors des expériences effectuées au laboratoire sur le convoyeur à ondes mobiles sur les pièces de cuivre, de bronze et d'acier. Nous décrivons la procédure expérimentale ainsi que les analyses visant à déterminer l'influence de la tension, de la fréquence et de la masse des pièces utilisées dans les expériences sur la force d'attraction appliquée par les convoyeurs à ondes mobiles.

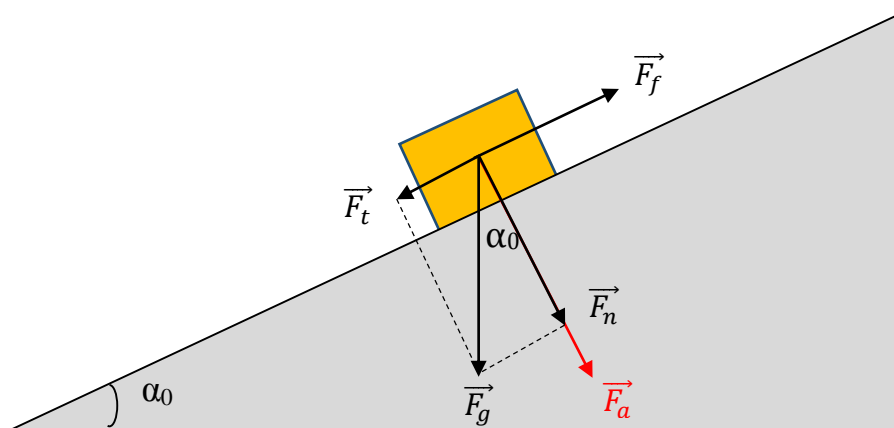
Pour chaque expérience, trois pièces identiques du même métal sont placées sur le convoyeur dans sa position initiale (horizontale, angle égale à  $0^\circ$ ) dans une même zone délimitée sur le COM et identique à tous les essais. Une fois le convoyeur est alimenté par une tension polyphasée, il est incliné graduellement jusqu'à ce que les échantillons se détachent de la surface du convoyeur à ondes mobiles.

La valeur de l'angle de décrochage considéré pour chaque expérience est la moyenne entre les trois valeurs des angles de décrochage des trois pièces métalliques. La valeur moyenne des angles de décrochage des trois pièces a été prise en compte pour le traçage des courbes.

En outre, les expériences ont été menées dans deux conditions d'humidité différentes (35 et 75% HR) pour détecter un éventuel effet pouvant influencer l'adhérence des pièces métalliques sur le convoyeur à ondes mobiles.

#### 4.5. Analyse des forces

Le convoyeur à ondes mobiles produit une force d'attraction qui agit sur les pièces métalliques. La force d'attraction fait que les pièces métalliques s'attachent sur la surface du convoyeur, contrairement aux pièces de plastique qui ne s'attachent pas [144].



**Figure 4.5.** Forces appliquées sur la pièce métallique

Les différentes forces appliquées sur un objet placé sur un plan incliné sont indiquées à la figure 4.5.

La force de frottement pour un plan incliné normal est donnée par :

$$F_f = \mu \cdot F_n = \mu \cdot F_g \cdot \cos(\alpha_0) \quad (4.1)$$

Avant de glisser

$$F_f = F_t = F_g \cdot \sin \alpha_0 \quad (4.2)$$

A partir des équations (4.1) et (4.2), le coefficient de frottement peut être défini comme :

$$\mu = \tan \alpha_0 \quad (4.3)$$

Les expériences préliminaires réalisées avec la tension  $V=0$  ont montré que la pièce métallique commence à glisser à partir de  $\alpha_0 = 30^\circ$ .

La force de friction avec une force d'attraction supplémentaire devient :

$$F_f = \mu \cdot (F_a + F_n) = \mu \cdot (F_a + F_g \cdot \cos \alpha_0) \quad (4.4)$$

Avant de glisser, la force de frottement est donnée par :

$$F_f = F_t = F_g \cdot \sin \alpha_0 \quad (4.5)$$

A partir des équations (4,4) et (4,5), la force d'attraction peut être définie comme suit :

$$\begin{aligned} \mu \cdot (F_a + F_g \cdot \cos \alpha_0) &= F_g \cdot \sin \alpha_0 \\ F_a &= \frac{F_g \cdot \sin \alpha - \mu \cdot F_g \cdot \cos \alpha}{\mu} \\ F_a &= \frac{F_g (\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha)}{\mu} \\ F_a &= \frac{F_g (\sin \alpha - \tan \alpha_0 \cdot \cos \alpha)}{\tan \alpha_0} \end{aligned} \quad (4.6)$$

En position verticale pour  $\alpha = 180$ , on obtient  $F_a = F_g$

$$F_g = m \cdot g$$

où

$F_g = m \cdot g$  : Force gravitationnelle

$m$  : Masse de la pièce

$g$  : Accélération gravitationnelle

$F_f$  : Force de frottement

$F_n$  : Composante normale au plan de la gravitation Obliger

$F_t$  : Composante tangentielle au plan de la gravitation Obliger

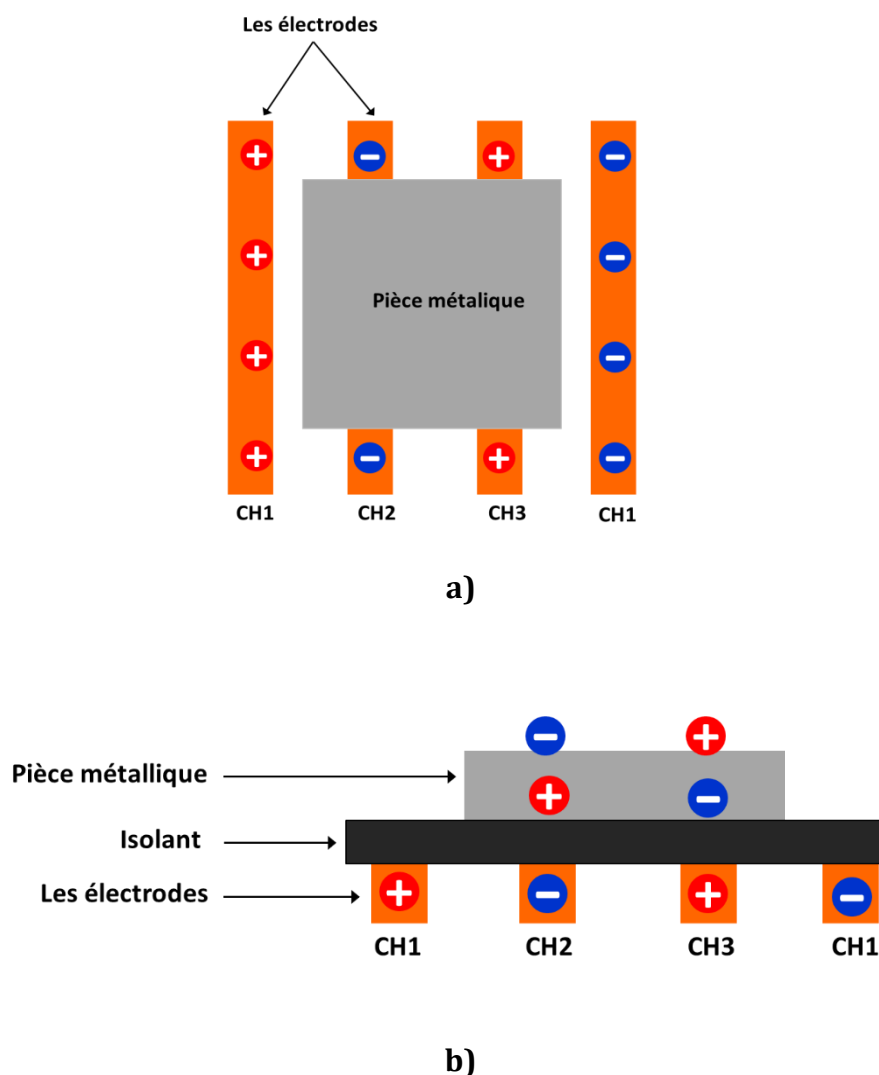
$F_a$  : Force d'attraction

$\mu$  : Coefficient de frottement

$\alpha_0$  : Angle du plan à l'équilibre juste avant le glissement (pas de force d'attraction)

$\alpha$  : Angle du plan à l'équilibre juste avant le glissement (avec force d'attraction)

Comme le montre la figure 4.6, lorsque la particule métallique est au-dessus des électrodes, une charge électrique d'induction de polarité opposée à la tension appliquée est induite. Par conséquent, une force électrostatique attractive est générée, quelle que soit la polarité des électrodes adjacentes qui provoque la fixation des particules métalliques en raison de la force électro-adhésive. De plus, une petite charge de polarisation est également produite sur les particules de plastique. Cependant, cette charge est beaucoup plus petite et donc insuffisante pour amener les particules de plastique à se fixer sur la surface du convoyeur.



**Figure 4.6.** Description schématique de la charge d'induction et de la force d'attraction appliquée sur les pièces métalliques

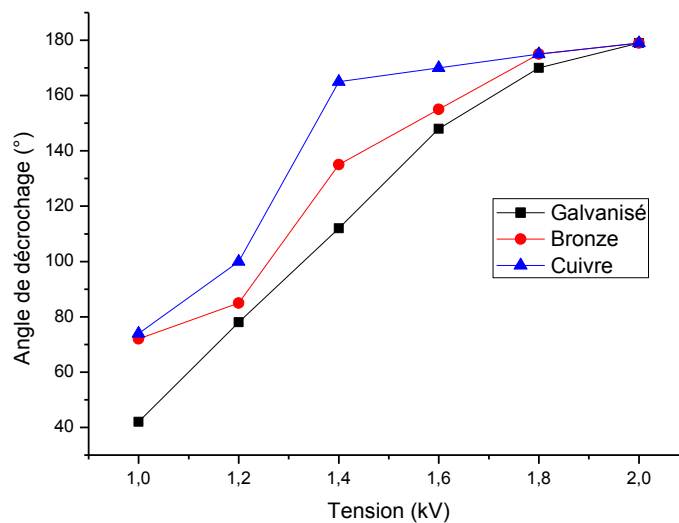
a) Vue de dessus ; b) vue latérale

En effet, pour les particules de taille millimétrique utilisées dans ce travail, en raison de leur force de gravité, l'effet des électrodes polyphasées sur le mouvement des particules est négligeable. L'effet principal des électrodes polyphasées reste la force d'attraction appliquée sur les particules métalliques [143]. Cependant, dans d'autres expériences réalisées sur des particules micrométriques [144], il y avait un effet significatif sur la séparation des échantillons granulaires micronisés.

## 4. 6. Influence et détermination des paramètres électriques

### 4.6.1. Influence de la tension

Les résultats obtenus en fonction de la variation de tension (de 1,0 kV à 2,0 kV) sont tracés sur la courbe de la figure 4.7. La fréquence est maintenue constante, égale à 900 Hz.



**Figure 4.7.** Variation de l'angle de décrochage en fonction de la tension appliquée

Ces résultats qui ont été obtenus avec un taux d'humidité bas (atmosphère sèche), montrent que l'angle de décrochage des pièces métalliques augmente remarquablement avec l'augmentation de la tension. L'augmentation de la tension appliquée induit un accroissement du champ électrique qui lui est proportionnel,

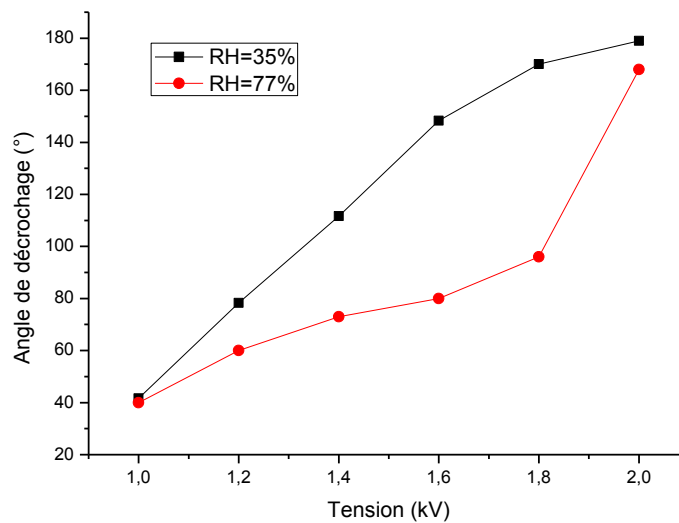
celui-ci cause l'induction d'une charge par induction électrostatique qui est plus grande (Figure 4.7). Par conséquent, la force d'attraction produite sur la pièce de métal devient plus intense d'où l'attachement qui se produit sur le convoyeur.

On apercevait que la tension a une influence sur le pouvoir d'attraction dès qu'elle atteint une valeur de 1,6 kV.

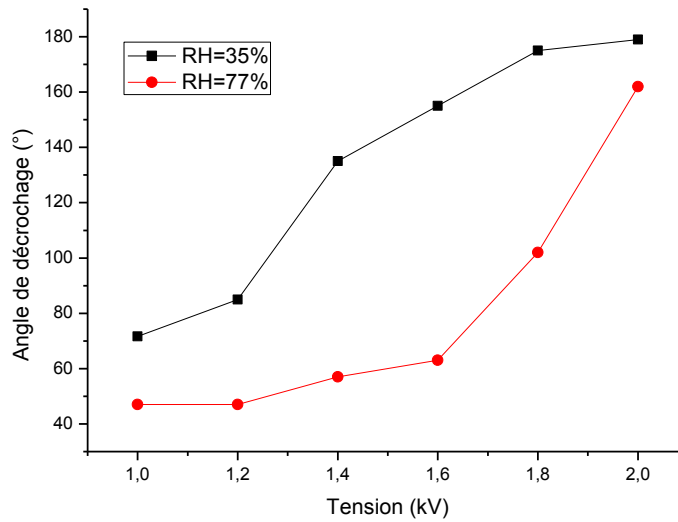
La force d'attraction électrostatique générée provoque la fixation des pièces métalliques sur le convoyeur à ondes mobiles. Quelle que soit la polarité des électrodes adjacentes.

#### 4.6.2. Influence de l'humidité de l'air

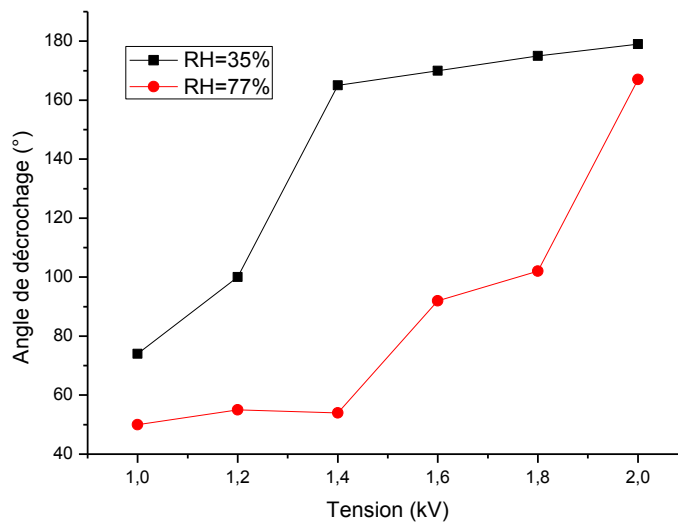
Les résultats montrés à la figure 4.8 sont obtenus pour deux valeurs d'humidité (RH=35% et RH=77%) [144].



a) Pièce d'acier galvanisée



b) Pièce de Bronze



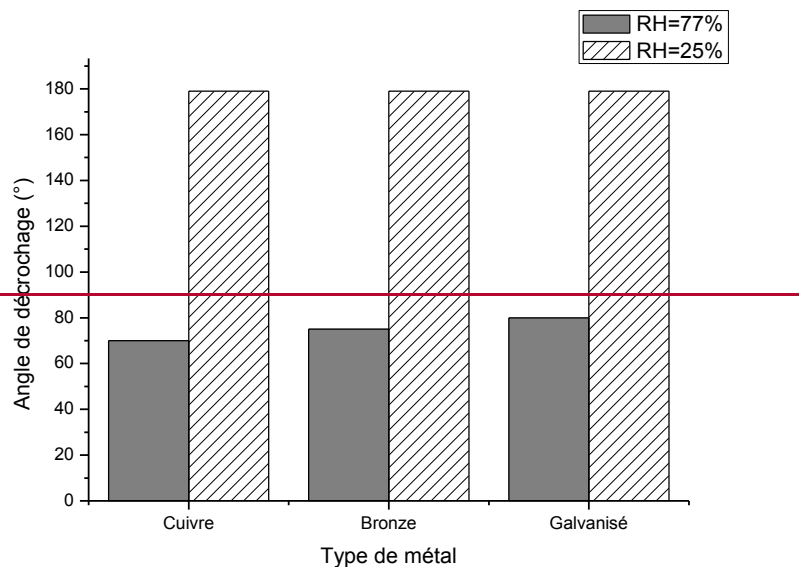
c) Pièce de cuivre

**Figure 4.8.** Variation de l'angle de décrochage en fonction de la tension appliquée pour les trois pièces avec deux valeurs d'humidités (RH=35%, RH=77%)

L'humidité élevée rend la surface de convoyeur glissante, cela a un effet néfaste sur le pouvoir d'attraction. D'un autre côté, elle ajoute une couche d'humidité sur les pièces métalliques et sur la surface du convoyeur qui fait que le

contact entre les pièces métalliques et la surface du COM n'est pas direct. Cette couche d'humidité augmente en fait la distance entre la pièce et le convoyeur, ce qui affaiblit le champ électrique et donc la force d'attraction.

La figure suivante montre une comparaison entre les résultats des deux expériences identiques ; l'une faite dans une atmosphère humide (77%) et l'autre dans un air sec (25%) avec une tension maximale égale à 2 kV et une fréquence de 500 Hz (Figure 4.9).

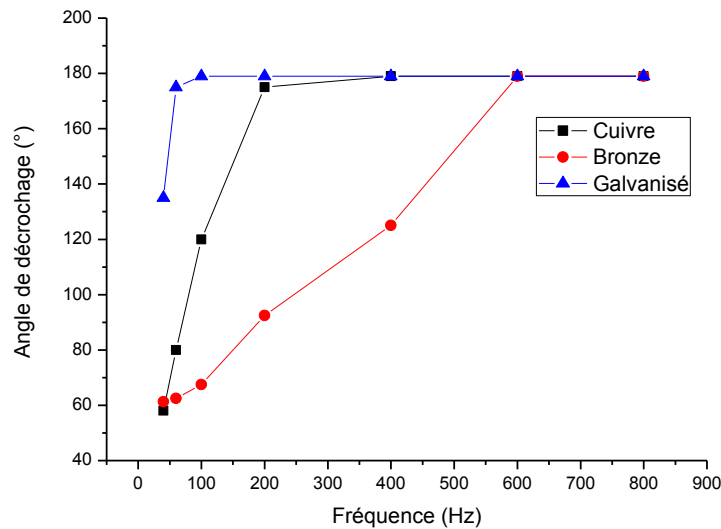


**Figure 4.9.** Variation de l'angle de décrochage pour deux valeurs d'humidité différentes

On peut dire alors que l'humidité relative de l'air a un effet significatif sur la force d'attraction exercée par le convoyeur. Une augmentation délicate de l'humidité peut avoir une réduction importante de la force d'attraction.

#### 4.6.3. Influence de la fréquence

Les résultats de la figure 4.10 sont obtenus en fonction de la variation de la fréquence (de 100 Hz à 800 Hz) avec une tension constante égale à 2 kV, dans une atmosphère sèche (33%).



**Figure 4.10.** Variation de l'angle de décrochage en fonction de la fréquence.

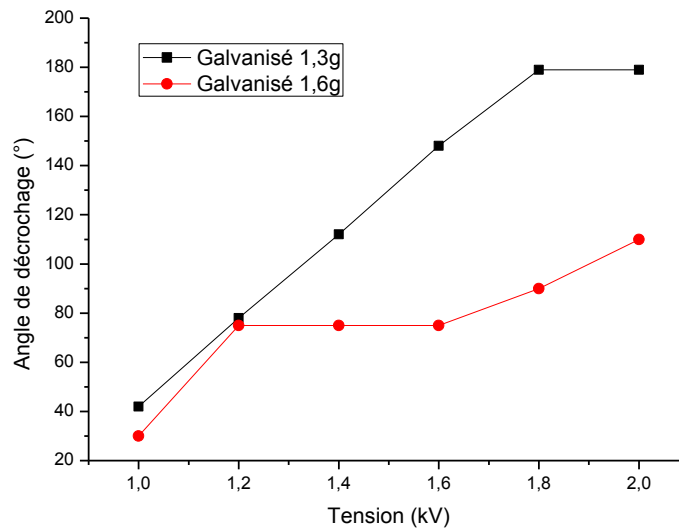
La figure précédente (Figure 4.10) montre que la fréquence de signal est autant critique que la tension. L'influence de la fréquence sur la valeur de la force d'attraction suggère qu'il y a une autre force qui agit sur l'attachement des particules en plus de la force électrostatique. En effet, la force d'attraction électrostatique comme expliqué par la figure 4.10, ne dépend pas de la fréquence [143-144].

#### 4.6.4. Influence de la nature et de la masse des pièces

Les résultats obtenus dans les figures précédentes montrent qu'a priori il n'y a aucun effet de la nature ferromagnétique ou non du métal sur la force d'attraction. Cette analyse est bien claire sur la figure 4.11 qui montre que les valeurs de l'inclinaison ne dépendent aucunement de la nature du matériau. Cependant, des expériences effectuées avec des pièces de plastique ont montré une grande différence, la force d'attraction est bien plus grande pour les pièces de métal, ce qui laisse penser que seule la conductivité du matériau qui est le facteur le plus significatif.

Par ailleurs, nous avons remarqué que la pièce d'acier galvanisé s'attache mieux sur le convoyeur à cause de sa masse réduite par rapport aux deux autres métaux.

Les résultats tracés sur la figure 4.11 ont été obtenus lors des expériences pour deux pièces de galvanisé de mêmes dimensions mais de masses différentes (fréquence égale à 900 Hz, Humidité 36%). La variation de la masse a été obtenue en collant des pièces de même nature (acier galvanisé) les unes sur les autres.



**Figure 4.11.** Variation de l'angle de décrochage en fonction de la tension appliquée pour deux pièces d'acier galvanisé de mêmes dimensions et de masses différentes (1,6g, 1,3g)

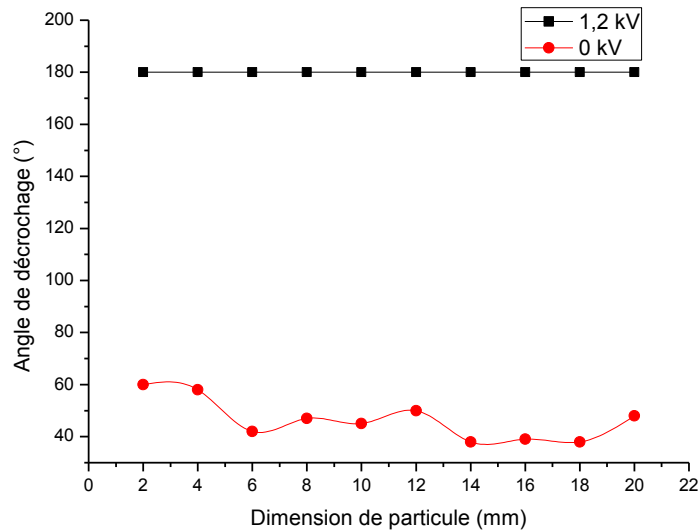
Donc, l'adhésion exceptionnelle des pièces de galvanisé n'a aucun rapport avec sa nature ferromagnétique. Le collage unique de ces pièces est dû uniquement à sa masse relativement petite.

#### 4.6.5. Influence des dimensions des particules

Dans cette expérience, nous avons étudié l'influence des dimensions des particules sur l'angle de décrochage. Nous avons alors utilisé des échantillons de feuille de cuivre de petites masses et de différentes tailles (de 2 mm à 20 mm). Les masses de chaque pièce de cuivre en fonction de leurs dimensions sont résumées dans le tableau 4.1.

**Tableau 4.1.** Valeurs des masses des différentes tailles de feuille de cuivre

Dimensions (mm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Masse (g)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1

**Figure 4.12.** Variation de l'angle de décrochage en fonction des dimensions des pièces carrées de cuivre

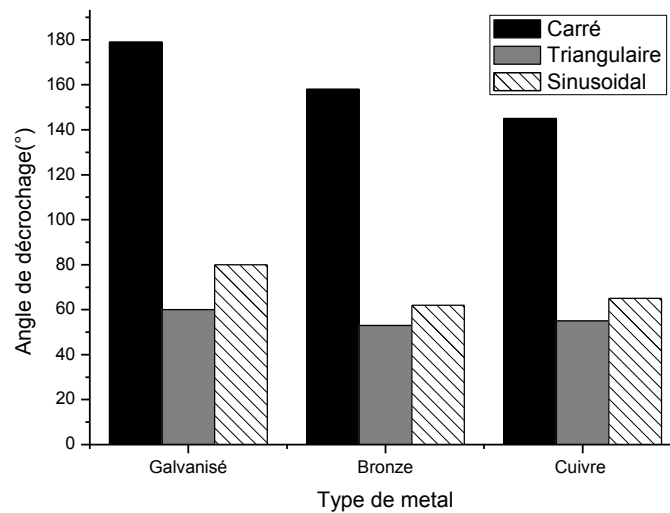
Les résultats obtenus à la figure 4.12 montrent que les pièces de feuille de cuivre restent collées à la surface du convoyeur quelles que soient ses dimensions malgré la valeur comparativement petite de la tension appliquée qui est égale à 1,2 kV.

Contrairement à la masse, les dimensions n'ont aucune influence sur la force d'attraction. Bien au contraire, quand les dimensions augmentent, la surface de contact augmente aussi ce qui produit une plus grande charge électrique par induction électrostatique et génère une force d'attraction plus intense. Le courant et la force augmentent aussi.

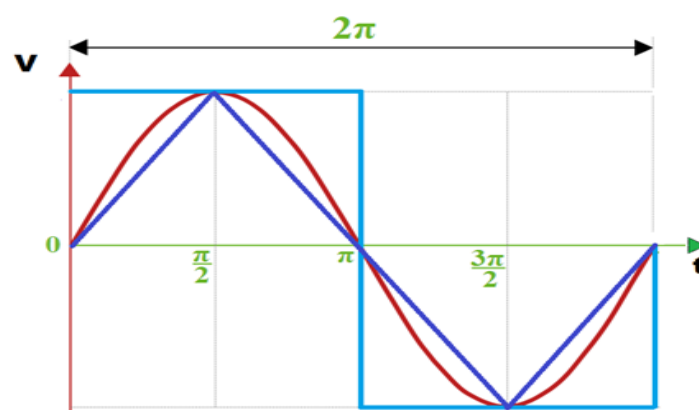
#### 4.6.6. Influence de la forme du signal de la tension

La figure 4.13 montre les résultats obtenus lors des expériences utilisant des différentes formes de signal de la tension appliquée (sinusoïdal, triangulaire, et carré) [143] (Figure 4.14).

Toutes les expériences ont été effectuées dans les mêmes conditions, en utilisant les mêmes échantillons et avec une fréquence de 900 Hz.



**Figure 4.13.** Variation de l'angle de décrochage en fonction de la forme du signal (fréquence constante égale à 900 Hz)



**Figure 4.14.** Forme de signaux de la tension appliqué au convoyeur à ondes mobiles

Les valeurs des angles de décrochage des pièces de métal avec un signal de forme carrée sont remarquablement plus grandes par rapport aux signaux triangulaire et sinusoïdal [143-144].

Effectivement, ce résultat provient de la valeur efficace de signal carré ;  $U_{carré} = U_{max}$ , par contre, pour un signal sinusoïdal,  $U_{sinus} = U_{max}/\sqrt{2}$ , et pour un signal triangulaire ;  $U_{triangle} = U_{max}/\sqrt{3}$ .

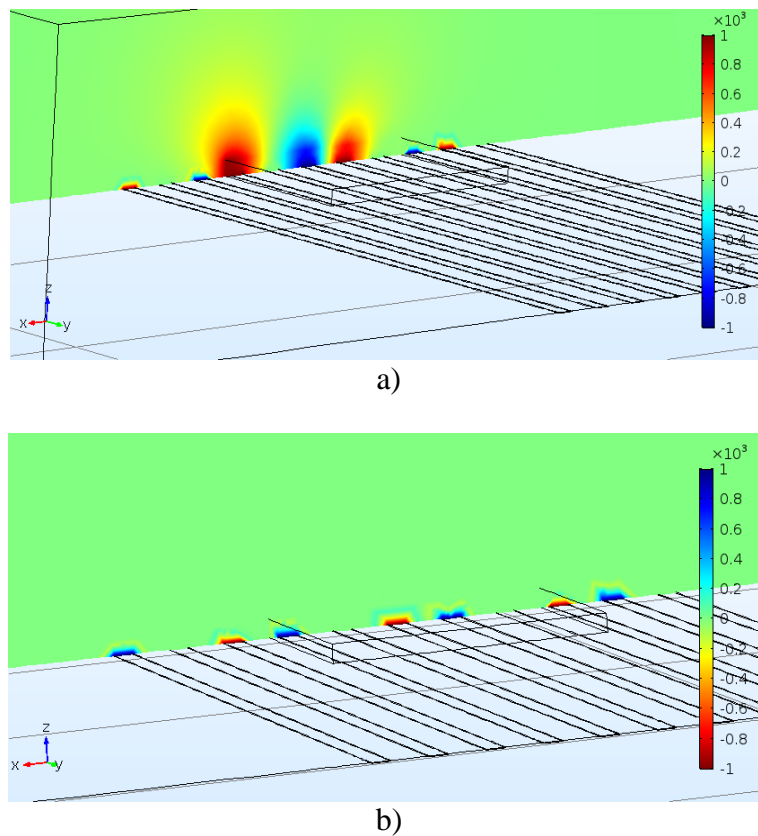
Soit

$$U_{carré} = \sqrt{2}U_{sinus} = \sqrt{3}U_{triangle} .$$

Par conséquent, la force d'attraction générée par une tension  $U$  de signal carré est incontestablement plus forte par rapport à la force produite par un signal de forme sinusoïdale ou triangulaire.

#### 4. 7. Distribution du potentiel sur le convoyeur

En outre, une analyse numérique a été réalisée avec Le logiciel COMSOL [144], utilisant une pièce de cuivre et une autre en plastique PVC de formes carrées de mêmes dimensions 1 x 1 cm<sup>2</sup>. Les résultats obtenus ont montré que le potentiel électrique à l'extrémité de la pièce métallique est nettement plus grand par rapport au potentiel produit sur la pièce en plastique PVC (Figure 4.15).



**Figure 4.15.** Distribution du potentiel sur le convoyeur en présence d'une pièce.

a) Pièce métallique ; b) pièce en PVC

#### 4. 8. Introduction d'une technique de séparation utilisant un COM vibrant

De nombreux procédés de séparation existent pour bon nombre de mélanges, qu'ils soient « conducteur – isolant », « conducteur – conducteur » ou « isolant – isolant » [145].

Toutefois, ces procédés sont souvent coûteux (aussi bien financièrement qu'en termes d'énergie), peuvent utiliser des liquides avec certains additifs (problème de post-traitement) et sont souvent spécifiques à un seul type de mélange. L'avantage des séparateurs électrostatiques est sans conteste leur faible consommation d'énergie et leur grande adaptabilité.

Trois types de séparateurs peuvent être utilisés : le séparateur à plaque, le séparateur à tambour ou encore le séparateur à convoyeur à ondes mobiles. Ce dernier, principalement utilisé pour les particules fines (sous-millimétriques) sera détaillé dans cette partie [146-151].

#### 4.8.1. Description de la séparation en utilisant un COM vibrant

Des expériences préliminaires ont été effectuées sur un convoyeur à ondes mobiles qui est fixé sur une plaque vibrante, comme montré à la figure 4.3. Bien que les vibrations mécaniques soient intenses, les particules métalliques restent fortement accrochées à la surface du convoyeur par la force d'attraction exercée. Cette technique pourrait représenter une autre alternative technologique de séparation de particules qui doit être bien approfondie dans le futur proche.

D'autre part, dans le cas où le convoyeur à ondes mobiles est statique (ne vibre pas), ce dispositif peut représenter une bonne alternative pour la séparation de particules micronisées. En effet, les particules de plastique sont transportées par les forces de Coulomb et les forces diélectrophorétiques, tandis qu'il n'y aura aucun mouvement des particules de métal. Notons, qu'aucun mouvement de particules de plastique n'a été observé dans nos expériences en raison de la masse des particules qui est plus élevée car elles sont de taille millimétrique.

#### 4.8.2. Expériences de séparation de mélanges de particules micronisées en utilisant un convoyeur plan statique

Pour ces expériences, le COM est déposé sur un plan statique, il est utilisé pour la séparation des particules micronisées dont les dimensions sont de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ .

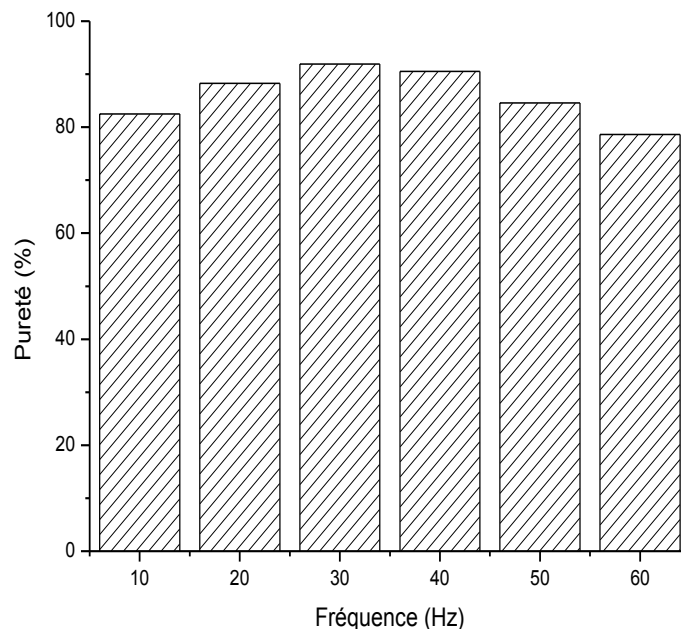
Nous avons effectué la séparation d'un mélange granulaire de masse totale égale à 0.5 g composé de 0.25 g de particules micronisées de PVC et de 0.25 g de particules de cuivre, avec une taille granulométrique moyenne de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ . Une tension  $U$  de 1,4 kV a été appliquée au convoyeur à ondes mobiles vibrant de trois phases.

Il a été observé que contrairement aux particules de PVC qui se déplacent le long des électrodes du convoyeur grâce à la force diélectrophorétique causée par le champ électrique, les particules de cuivre qui se trouvent dans la zone de champ électrique intense vibrent légèrement mais ne se déplacent pas. Elles subissent alors une force d'attraction électrique qui les attire vers des électrodes

statiques du convoyeur reliées à la haute tension polyphasée, elles restent donc collées à la surface du convoyeur.

La force principale provoquant le mouvement des particules est la force diélectrophorétique appliquée aux particules isolantes à cause de la charge de polarisation acquise par ces particules. L'effet de polarisation n'étant spécifique qu'aux particules isolantes, la force diélectrophorétique n'agit pas sur les granules métalliques [152].

La figure 4.16 montre les résultats obtenus en fonction de la fréquence en termes de pureté du cuivre récupéré lors de la séparation du mélange Cuivre/PVC.



**Figure 4.16.** Variation de la Pureté du produit de cuivre après séparation en fonction de la fréquence ( $U=1,4$  kV).

Dans la plupart des convoyeurs à ondes mobiles, les trajectoires des particules conductrices, et donc les quantités et la pureté des produits séparés, sont contrôlées en ajustant la valeur de l'amplitude de la haute tension appliquée au système d'électrodes, ainsi que les valeurs de la fréquence.

Toutefois, la pureté du produit conducteur est souvent affectée par les trajectoires des produits non-conducteurs qui ne peuvent pas être contrôlés.

Certaines de ces particules, à cause de la force diélectrophorétique, et avec l'augmentation de l'amplitude de la tension entraîne la récupération d'une quantité plus importante des particules non-conductrices au risque de diminuer sa pureté.

Une application typique du procédé de la séparation par le convoyeur à ondes mobiles pourrait également être par exemple pour récupérer des déchets industriels nécessitant un broyage fin afin de dissocier complètement le métal et la matière plastique.

#### **4.8.3. Expériences de séparation de mélanges de particules millimétriques en utilisant un convoyeur plan vibrant**

Pour ces expériences, le COM est fixé sur un plan vibrant en utilisant un vibreur électromagnétique (Figure 4.3). Il est utilisé pour la séparation des particules de taille millimétrique dont les dimensions sont de l'ordre de quelques millimètres.

En raison des vibrations mécaniques, à la fois les granules de métal et de plastique se déplacent lorsque le convoyeur est éteint [144]. Par ailleurs, lorsque le COM est alimenté par une tension polyphasée, seules les particules de plastique qui se déplacent laissant derrière elles les granules de métal qui restent attachés à la surface du COM vibrant.

### **4.9. Conclusion**

La technique expérimentale présentée dans la première partie de ce travail permet de mieux cerner les phénomènes physiques qui se déroulent dans les séparateurs électrostatiques à ondes mobiles pour les particules micronisées métal/plastique.

Les résultats ainsi présentés ont été utiles pour l'analyse des effets de la multitude des facteurs qui influent sur l'efficacité de la séparation, tels que l'amplitude de la tension appliquée, la fréquence et l'humidité.

L'effet du niveau de tension est plus prédominant sur la force électrique qui détache les particules isolantes de la surface du convoyeur contrairement aux particules conductrices qui sont maintenues fixées sur la surface du convoyeur.

On remarque aussi que l'exposition des échantillons à un milieu environnant caractérisé par une humidité relative élevée produit une augmentation de la conductivité électrique superficielle des particules, s'accompagnant d'une réduction du taux de récupération des deux produits séparés « métal/plastique ».

D'autre part, la force d'attraction exercée par le COM sur des pièces métalliques de taille de plusieurs centimètres, a été observée et analysée expérimentalement. Il a été démontré que la force d'attraction est plus forte pour des valeurs plus élevées de l'amplitude, de la fréquence et d'une forme carrée de la tension appliquée.

## ***Conclusion générale***

L'application des convoyeurs électrostatiques à ondes progressives et stationnaires s'est révélée très efficace dans la maîtrise et la manipulation efficace des particules micrométriques. Elle repose sur l'utilisation de la force électrostatique avec une consommation faible en énergie électrique. Les méthodes électrostatiques utilisées dans de tels procédés sont très avantageuses par rapport aux méthodes mécaniques car elles ne nécessitent pas de pièces mobiles et leur coût énergétique est extrêmement bas.

Depuis plusieurs années, ces convoyeurs suscitent des préoccupations toujours plus grandes parmi la communauté scientifique en vue de les utiliser dans plusieurs applications industrielles telles que : peinture, fabrication de médicaments, électrophotographie, séparation de mélanges granulaires, ou encore le dépoussiérage des panneaux et des concentrateurs solaires. La revue bibliographique des principaux travaux dans la littérature nous a permis de connaître l'évolution des techniques et le mécanisme de déplacement des particules avec les convoyeurs électrostatiques ainsi que les principaux paramètres qui influent sur leur fonctionnement.

Les objectifs des études expérimentales concernent généralement le diagnostic du mouvement des particules sur le convoyeur à ondes mobiles, l'identification des paramètres affectants la direction, la vitesse et l'efficacité de déplacement des particules et enfin l'analyse des modes et mécanismes de mouvement

Dans le cadre du travail effectué dans cette thèse, les résultats expérimentaux ont été obtenus en utilisant des échantillons de poudre de PVC au laboratoire. Ces résultats montrent que l'efficacité de déplacement des particules augmente significativement avec l'amplitude de la tension appliquée, diminue pour les grandes valeurs de la taille des particules en raison de l'effet de la force gravitationnelle, et passe par un optimum en fonction de la fréquence.

Aussi, il a été observé lors des expériences que les particules se déplacent dans les deux sens, mais la plupart se déplace suivant le sens des ondes du champ

électrique. Cependant, une petite masse de particules se déplace vers le sens opposé en raison de la contribution des ondes harmoniques spatiales. Ces harmoniques apparaissent près de la surface en raison de la géométrie rectangulaire des électrodes, ce qui provoque une déformation de l'onde de potentiel électrique.

D'un autre côté, les résultats obtenus ont montré que la charge des particules est un paramètre essentiel à leur mise en mouvement. En effet, l'efficacité du système est très limitée lorsque les particules ne sont pas suffisamment chargées, notamment pour les plus petites d'entre elles en raison d'une force d'adhésion relativement forte. L'ajout d'un système efficace de chargement des particules avec une décharge couronne a fait l'objet d'une autre série d'expériences. Il a été constaté que les particules chargées au-dessus de la surface du convoyeur se déplacent même si elles sont fortement adhérentes à la surface.

Enfin, la dernière partie de ce travail s'est focalisée sur un nouveau système de séparation des particules micrométriques « métal/plastique » en utilisant le convoyeur triphasé. Les matériaux utilisés dans ce procédé sont des déchets des câbles électriques qui contiennent des mélanges de granules conducteurs et isolants.

L'amélioration de la pureté du cuivre est possible par le biais d'un séparateur électrostatique à convoyeur à ondes mobiles, les particules conductrices restent attachées sur la surface du convoyeur tandis que les particules isolantes sont éjectées de la surface dès qu'on applique une tension suffisante. Ce procédé est capable de collecter séparément les particules d'autres matériaux conducteurs, tel que l'aluminium, le bronze et l'acier.

Nous avons également étudié l'influence du convoyeur électrostatique sur les pièces métalliques de taille de quelques centimètres. Pour cela, des expériences ont été réalisées en utilisant des pièces carrées de côté 15 mm de trois types de métal : cuivre, bronze et acier galvanisé. Ces pièces sont disposées sur un convoyeur fixé sur un dispositif mécanique à inclinaison variable variant de 0° à 180°. L'analyse d'une première série de mesures montre que les pièces métalliques qui se trouvent dans la zone de champ électrique intense restent

attachées au convoyeur, contrairement aux pièces similaires de PVC. Elles subissent alors une force d'attraction électrique qui les attire vers des électrodes du convoyeur reliées à la haute tension polyphasée.

La tension, la fréquence, l'humidité et la forme d'onde du signal sont des paramètres qui ont été vérifiés lors des expériences effectuées au laboratoire. Il a été vérifié que la force d'attraction exercée sur les particules augmente avec l'accroissement de l'amplitude de la tension, la valeur de la fréquence et avec une forme d'onde carrée du signal appliqué.

Comme perspectives, nous suggérons d'axer dans le futur les travaux vers l'identification et la compréhension de la force d'attraction appliquée sur les particules de métal par le convoyeur à ondes mobiles. D'un autre côté, il serait intéressant de tester la séparation des particules « métal/plastique » par cette technique à l'échelle de prototype industriel.

# Bibliographie

- [1] M. Govi. "Quelques expériences sur l'induction électrostatique ", *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, vol. 4, pp. 264-266, 1875.
- [2] D. H. Pontius, P. Vann Bush and L. E. Sparks. "Performance of large-diameter wires as discharge electrodes in electrostatic precipitators ", *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 34, pp. 1203-1207, 1984.
- [3] H. A. Said, H. Nouri and Y. Zebboudj. "Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator ", *Journal of Electrostatics*, vol. 73, pp. 19-25, 2015.
- [4] J.A. Giacometti, S. Fedosov and M.M. Costa. "Corona charging of polymers: recent advances on constant current charging ", *Brazilian Journal of Physics*, vol. 29, pp. 269-279, 1999.
- [5] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila and V. Neamtu. "Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes ", *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [6] K. Senouci, K. Medles and L. Dascalescu, "Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment ", *Waste Management and Research*, vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [7] Reguig, A. Bendaoud, P. Dordizadeh, A. R. Salama, S. Messal and L. Dascalescu. "Experimental study of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostatic separation applications ", *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 232-235, 2017.
- [8] Reguig, A. Bendaoud, B. Neagoe, Y. Prawatya and L. Dascalescu. "Electric potential distribution at the surface of insulating materials exposed to corona discharges from various electrode configurations », *Journal of Electrostatics*, vol. 82, pp. 55-62, 2016. [32] W. R. Harper. « Contact and Frictional Electrification », Oxford University Press, London, 1967.
- [9] W. D. Greason. "Investigation of a test methodology for triboelectrification ", *Journal of Electrostatics*, vol. 49, pp. 245-256, 2000.
- [10] D. K. Davies. "Charge generation on dielectric surfaces ", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 2, pp. 1533-1537, 1969.
- [11] G. S. P. Castle. "Contact charging between insulators ", *Journal of Electrostatics*, vol. 40/41, pp. 13-20, 1997
- [12] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga and N. Serban. "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose ", *Environment and Progress*, vol. 6, pp. 341-346, 2006.
- [13] E.G. Kelly and D.J. Spottiswood. "The theory of electrostatic separations: a review, part 1, Fundamentals ", *Minerals Engineering*, vol. 2, pp. 33-46, 1989.
- [14] R.D. Pascoe and B.O. Connel. "Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation ", *Minerals Engineering*, vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
- [15] Y. Matsushita, N. Mori and T. Sometani. "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades ", *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, pp. 33-40, 1999. [51] M.
- [16] Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami and L. Dascalescu. "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials ", *Journal of Electrostatics*, vol. 69, pp. 631-637, 2011.
- [17] International Organisation for Standardisation ISO 22412: "Particle size analysis – Dynamic light scattering (DLS) ", International Standard, 2008.
- [18] V. A. Hackley and C. F. Ferraris. "The use of nomenclature in dispersion science and technology", volume 960. National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [19] R. Xu. "Particle Characterization: Light Scattering Methods", Particle Technology Series. Springer, 2000.
- [20] T. Allen. "Particle Size Measurement: Volume 1: Powder sampling and particle size measurement", Chapman & Hall, 1997.

- [21] Pethig Ronald. "Dielectrophoresis : Status of the theory, technology, and applications. *Biomicrofluidics*", vol. 4, no. 2010, page 022811, 2010. (Cit  en pages 8, 18, 22, 50 et 63.)
- [22] S. Masuda, K. Fujibayashi, K. Ishida and H. Inaba, "Confinement and Transportation of charged aerosol clouds via electric curtain", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 92, No. 1, pp. 43-52, 1972.
- [23] S. Masuda and T. Kamimura, "Approximate methods for calculating a non-uniform travelling field", *Journal of Electrostatics*, Vol. 1, pp. 351-370, 1975.
- [24] S. Masuda and Y. Matusumoto, "Theoretical characteristics of standing-wave electric curtains", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 93, No. 1, pp. 71-77, 1973.
- [25] A. Sayyah, M.N. Horenstein and M.K. Mazumder, "Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels", *Sol. Energy* 107 (2014) 576e604.
- [26] A. Sayyah, M. Horenstein and M. Mazumder, "Mitigation of soiling losses in concentrating solar collectors", in: *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013 IEEE 39th, Tampa, FL, 2013, pp. 0480-0485.
- [27] M. Mani and R. Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations", *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (9) (2010) 3124-3131.
- [28] R. Bkayrat, "Developing solutions for the environmental challenges to deploying PV plants in desert areas", in: *Presented in Solar Middle East Conference*, Feb 2013.
- [29] A.M. Pavan, A. Mellit and D.D. Pieri, "The effect of soiling on energy production for large-scale photovoltaic plants", *Sol. Energy* 85 (5) (2011) 1128e1136.
- [30] J.B. Blackmon and H.H. Dixon, "Dust Buildup Tests of Heliostats and Mirror Specimens", *Tech. Rep*, MDC-G-7543, McDonnell Douglas Astronautics Co., Huntington Beach, CA, 1978.
- [31] M.B. Sheratte, "Cleaning Agents and Technologies for Concentrating Solar Collectors", *Tech. Rep*, 79e7052, Sandia Labs., Albuquerque, NM, 1979.
- [32] H.A. Pohl, "Dielectrophoresis: the Behavior of Neutral Matter in Nonuniform Electric Fields", Vol. 80, Cambridge University Press, 1978.
- [33] C. Calle, C. Buhler, J. McFall and S. Snyder, "Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions", *J. Electrostat.* 67 (2) (2009) 89-92.
- [34] A. Sayyah, M.N. Horenstein and M.K. Mazumder, "A comprehensive analysis of the electric field distribution in an electrodynamic screen", *J. Electrostat.* 76 (2015) 115-126.
- [35] H. Morgan and N.G. Green, "AC Electrokinetics: Colloids and Nanoparticles", No. 2, Research Studies Press, 2003.
- [36] M. Washizu and T.B. Jones, "Multipolar dielectrophoretic force calculation", *J. Electrostat.* 33 (2) (1994) 187e198.
- [37] T.B. Jones, "Electromechanics of Particles", Cambridge University Press, 1995.
- [38] K. Engelen, P. Jacqmaer and J. Driesen, "Electric and magnetic fields of two infinitely long parallel cylindrical conductors carrying a dc current", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 64 (02) (2013) 24515.
- [39] S.J. Orfanidis, "Electromagnetic Waves and Antennas", Rutgers University New Brunswick, NJ, 2014.
- [40] J.A. Cross, "Electrostatics: Principles, Problems and Applications", Adam Hilger, 1987.
- [41] O.H. Pakarinen, A.S. Foster, M. Paaanen, T. Kalinainen, J. Katainen, I. Makkonen, J. Lahtinen and R.M. Nieminen, "Towards an accurate description of the capillary force in nanoparticle-surface interactions", *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 13 (7) 1175e1186, 2005.
- [42] A.  olak, H. Wormeester, H.J. Zandvliet and B. Poelsema, "Surface adhesion and its dependence on surface roughness and humidity measured with a flat tip", *Appl. Surf. Sci.* 258 (18) (2012) 6938e6942
- [43] Y.I. Rabinovich, J.J. Adler, M.S. Esayanur, A. Ata, R.K. Singh and B.M. Moudgil, "Capillary forces between surfaces with nanoscale roughness", *Adv. Colloid Interface Sci.* 96 (1) 213e230. 2002.
- [44] S. Masuda and Y. Matsumoto, "Theoretical characteristics of standing-wave electric curtains," *Electrical Engineering in Japan*. vol. 93, no. 1, pp. 71-77, Jan. 1973.
- [45] S. Masuda, "Electrodynamic apparatus for controlling flow of particulate material", US3872361A, 18-Mar-1975.

- [46] S. Masuda, "Apparatus for electric field curtain of contact type", US3778678A, 11Dec-1973.
- [47] F. W. Schmidlin, "Development apparatus," US4647179A, Mar-1987.
- [48] F. W. Schmidlin, "A new nonlevitated mode of traveling wave toner transport", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 3, pp. 480–487, 1991.
- [49] K. Taniguchi, Y. Yamamoto, J. Mizukami, S. Watanabe and S. Morikuni, "Characteristics of experimental transportation systems for charged toner particles", presented at the International Conference on Digital Printing Technologies, 1998, pp. 473–476.
- [50] K. Taniguchi, S. Morikuni, S. Watanabe, T. Sakai and T. Yugi, "Improved driving characteristics for the toner transportation system", presented at the International Conference on Digital Printing Technologies, 2000, pp. 740–742.
- [51] K. Adachi, S. Masuda and T. Nakamura, "Development system by toner transportation using traveling wave electric field", presented at the NIP 21, The 21st International Conference on Digital Printing Technologies, Baltimore, US, pp. 597–601, 2005.
- [52] H. Kawamoto, K. Seki, and N. Kuromiya, "Mechanism of travelling-wave transport of particles," Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 39, no. 6, p. 1249, 2006.
- [53] H. Kawamoto and N. Hasegawa, "Traveling wave transport of particles and particle size classification," Journal of Imaging Science and Technology, vol. 48, no. 5, pp. 404–411, 2004.
- [54] H. Kawamoto, "Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field", Journal of Electrostatics, vol. 66, no. 3, pp. 220–228, Mar. 2008.
- [55] N. Afshar-Mohajer, C.-Y. Wu, J. S. Curtis, and J. R. Gaier, "Review of dust transport and mitigation technologies in lunar and Martian atmospheres," Advances in Space Research, vol. 56, no. 6, pp. 1222–1241, Sep. 2015.
- [56] J. R. Gaier, "The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions," NASA TM-2005-213610, p. 74, 2005.
- [57] R. Christoffersen, J. F. Lindsay, S. K. Noble, J. J. Kosmo, J. A. Lawrence, L. Brostoff, A. Young, and T. McCue, "Lunar dust effects on spacesuit systems," NASA TP-2009-214786, p. 47, 2008.
- [58] S. A. Wagner, "The Apollo experience lessons learned for constellation lunar dust management," NASA TP-2006-213726, p. 73, 2006.
- [59] G. A. Landis, "Dust obscuration of Mars solar arrays," Acta Astronautica, vol. 38, no. 11, pp. 885–891, Jun. 1996.
- [60] G. A. Landis and P. P. Jenkins, "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, 1997.
- [61] G. A. Landis, "Mars dust-removal technology," Journal of Propulsion and Power, May 2012.
- [62] S. C. S. Costa, A. S. A. C. Diniz and L. L. Kazmerski, "Solar energy dust and soiling R&D progress: Literature review update for 2016", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 2504–2536, Feb. 2018.
- [63] C. I. Calle, E. E. Arens, J. M. McFall, S. J. Snyder, J. K. Geiger, R. A. Hafley, K. M. Taminger, and C. D. Mercer, "Reduced gravity flight demonstration of the Dust Shield technology for optical systems," in 2009 IEEE Aerospace conference, 2009, pp. 1–10.
- [64] C. I. Calle, C. R. Buhler, M. R. Johansen, M. D. Hogue, and S. J. Snyder, "Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration," Acta Astronautica, vol. 69, no. 11, pp. 1082–1088, Dec. 2011.
- [65] S. Biris, D. Saini, P. K. Srirama, M. K. Mazumder, R. A. Sims, C. I. Calle, and C. R. Buhler, "Electrodynamic removal of contaminant particles and its applications," in Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting, 2004, vol. 2, pp. 1283–1286 vol.2. 2004.
- [66] M. K. Mazumder, R. Sharma, A. S. Biris, J. Zhang, C. Calle, and M. Zahn, "Self- Cleaning Transparent Dust Shields for Protecting Solar Panels and Other Devices," Particulate Science and Technology, vol. 25, no. 1, pp. 5–20, Jan. 2007.
- [67] R. Sharma, C. A. Wyatt, J. Zhang, C. I. Calle, N. Mardesich, and M. K. Mazumder, "Experimental Evaluation and Analysis of Electrodynamic Screen as Dust Mitigation Technology for Future Mars Missions," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 2, pp. 591–596, Mar. 2009.

- [68] Kaïs DAOUDI, "Elaboration et caractérisation de films minces d'oxyde d'indium dope à l'étain obtenus par voie sol-gel potentialité pour la réalisation d'électrodes sur silicium poreux," *Doctorat soutenue le 20 mai 2003*, L'université Claude Bernard – Lyon 1.
- [69] A. BIKI, N. LABAD, "Préparation et caractérisation d'une électrode modifiée ITO/TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub>," *Master Académique soutenue le 05/06/2018*, Université Echahid Hamma Lakhdar. El Oued.
- [70] F. Hadjersi, Investigation des propriétés structurales, optiques et électriques des films ITO élaborés par pulvérisation cathodique RF; Effet du recuit," Sétif : Université Ferhat Abbas, 2011.
- [71] H. Pang, "Dépoussiérage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (Terre) et raréfiée (planète Mars)," PhD, Grenoble 1, Grenoble, France, 2006.
- [72] S. Masuda, "Electrodynamic behaviour of charged aerosol particles in non-uniform alternating fields and its applications in dust control", 1970.
- [73] H. Noda, H. Araki, S. Goossens, Y. Ishihara, K. Matsumoto, S. Tazawa, N. Kawano and S. Sasaki, "Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA(SELENE) laser altimeter", *Geophysical Research Letters*, Vol. 35 (24), L24203 (2008).
- [74] P. Atten, H. L. Pang and J. Reboud, "Study of dust removal by standing wave electric curtain for application to solar cells on Mars", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 1, pp. 75–86, Jan. 2009.
- [75] M. Mazumder, R. Sims and J. Wilson, "Transparent self-cleaning dust shield", US20040055632A1, 25-Mar-2004.
- [76] J. Merrison, J. Jensen, K. Kinch, R. Mugford, and P. Nørnberg, "The electrical properties of Mars analogue dust," *Planet. Space Sci.*, vol. 52, no. 4, pp. 279–290, Mar. 2004.
- [77] R. A. Sims, A. S. Biris, J. D. Wilson, C. U. Yurteri, M. K. Mazumder, C. I. Calle, and C. R. Buhler, "Development of a transparent self-cleaning dust shield for solar panels," in *Proc. ESA-IEEE Joint Meeting Electro- statics*, 2003, p. 814-91.
- [78] C. I. Calle, C. R. Buhler, J. G. Mantovani, S. Clements, A. Chen, M. K. Mazumder, A. S. Biris, and A. W. Nowicki, "Electrodynamic shield to remove dust from solar panels on Mars," in *Proc. Space Congr., Cape Canaveral, FL*, Apr. 27–30, 2004.
- [79] D. B. J. Bussey, "Permanent shadow in simple craters near the lunar poles," *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 30 (6) (2003).
- [80] R. L. Staehle, J. D. Burke, G. C. Snyder, R. Dowling and P. D. Spudis, "Lunar Base Siting", Chap. 16 in *Resources of Near-Earth Space*, J. Lewis, M. S. Matthews and M. L. Guerrieri, 427-446, Arizona (1993).
- [81] NASA technical reports server (NTRS), "Lunar dust degradation effects and removal/prevention concepts", Volume 1 - Summary Final Report [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19680009551>. [Accessed: 17-Jul-2019].
- [82] NASA, "Asteroid redirect mission (ARM) formulation assessment and support team (FAST) final report draft for public comment", pp. 1–118, Nov. 2015.
- [83] B. L. Cooper, D. S. McKay, L. A. Taylor, H. Kawamoto, L. M. Riofrio, and C. P. Gonzalez, "Extracting respirable particles from lunar regolith for toxicology studies," *Earth and Space*, pp. 66–73, 2010.
- [84] H. Kawamoto and N. Hara, "Electrostatic cleaning system for removing lunar dust adhering to space suits," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 24, no. 4, pp. 442–444, Oct. 2011.
- [85] K. K. Manyapu, P. De Leon, L. Peltz, J. R. Gaier, and D. Waters, "Proof of concept demonstration of novel technologies for lunar spacesuit dust mitigation," *Acta Astronautica*, vol. 137, pp. 472–481, Aug. 2017.
- [86] N. Afshar-Mohajer, B. Damit, C.-Y. Wu, and N. Sorloaica-Hickman, "Electrostatic particle collection in vacuum," *Advances in Space Research*, vol. 48, no. 5, pp. 933–942, Sep. 2011.
- [87] N. Afshar-Mohajer, C.-Y. Wu, R. Moore, and N. Sorloaica-Hickman, "Design of an electrostatic lunar dust repeller for mitigating dust deposition and evaluation of its removal efficiency," *Journal of Aerosol Science*, vol. 69, pp. 21–31, Mar. 2014.
- [88] Sayyah, M. N. Horenstein, and M. K. Mazumder, "Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels," *Solar Energy*, vol. 107, pp. 576–604, Sep. 2014.
- [89] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, "Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1267–1278, Nov. 2016.

- [90] J. Zorrilla-Casanova, M. Piliouguine, J. Carretero<sup>1</sup>, P. Bernaola<sup>1</sup>, "Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules," World Renewable Energy Congress – Sweden May 2011.
- [91] F. Ju, X. Fu, "Research on impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance," In: International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), Yichang, China, pp. 3601–3606. 16–18 September 2011.
- [92] J. P. Bock, J. R. Robison, R. Sharma, J. Zhang, and M. K. Mazumder, "An Efficient Power Management Approach for Self-Cleaning Solar Panels with Integrated Electrodynamic Screens", Proc. ESA Annual Meet. On Electrostatics Paper O2 (2008).
- [93] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezaadad, and S. Hajjghorbani, "Power loss due to soiling on solar panel: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 59, pp. 1307–1316, Jun. 2016.
- [94] W. Javed, B. Guo, Y. Wubulikasimu, and B. W. Figgis, "Photovoltaic performance degradation due to soiling and characterization of the accumulated dust," in IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Shanghai, China, pp. 580–584, 2016.
- [95] C. Schill, S. Brachmann, and M. Koehl, "Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules," Solar Energy, vol. 112, pp. 259–262, Feb. 2015.
- [96] S. Masuda, Y. Matsumoto, "Contact-type electric curtain for electrodynamic control of charged dust particles," In: 2nd International Conference on Static Electricity. No. 72, Frankfurt, Germany, pp. 1370–1409, March. 1973.
- [97] J. Park, Y. Liu, K. D. Kihm, and L. A. Taylor, "Characterization of Lunar Dust for Toxicological Studies I: Particle Size Distribution", J. Aerosp. Eng., 266– 271 (2008).
- [98] J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. R. Robertson, and S. Sture, "The Lunar Surface: Dust Dynamics and Regolith Mechanics", Reviews Geophysics, vol. 45 (2), RG2006 (2007).
- [99] T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, and W. M. Farrell, "A dynamic fountain model for lunar dust", Adv. Sp. Res., vol. 37 (1), 59–66 (2006).
- [100] M. K. Mazumder, "Self-Cleaning Solar Panels and Concentrators with Transparent Electrodynamic Screens", Patent No. US 20132/0263393 A1 (2013).
- [101] C. I. Calle, P. J. Mackey, M. D. Hogue, M. R. Johansen, H. Yim, P. B. Delaune and J. S. Clements, "Electrodynamic dust shields on the international space station: Exposure to the space environment", Journal of Electrostatics, vol. 71, no. 3, pp. 257–259, Jun. 2013.
- [102] M. K. Mazumder, R. Sharma, A. S. Biris, J. Zhang, C. Calle and M. Zahn, "Self-Cleaning Transparent Dust Shields for Protecting Solar Panels and Other Devices", Particulate Science and Technology, vol. 25, no. 1, pp. 5–20, Jan. 2007.
- [103] M. A. Aegerter, "Transparent conducting ATO, ITO and AZO coatings by solgel process". Retrieved February 17, 2014, from [http://www.solgel.com/labfoc/inm/dipco\\_e.html](http://www.solgel.com/labfoc/inm/dipco_e.html)
- [104] M. K. Mazumder, M. N. Horenstein, N. R. Joglekar, A. Sayyah, Jeremy W. Stark, Annie A. R. Bernard, Sean M. Garner, Julius E. Yellowhair and Hung Yi Lin, "Mitigation of Dust Impact on Solar Collectors by Water-Free Cleaning With Transparent Electrodynamic Films: Progress and Challenges", IEEE Journal Of Photovoltaics, [http://www.ieee.org/publication\\_standards/publications/rights/index.html](http://www.ieee.org/publication_standards/publications/rights/index.html) for more information. 2017.
- [105] H. Kawamoto and T. Shibata, "Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels", 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 0094– 0098, 2013.
- [106] H. Kawamoto and M. Kato, "Electrostatic Cleaning Equipment for Dust Removal from Solar Panels of Mega Solar Power Generation Plants", 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2018
- [107] W. Machowski, W. Balachandran, and D. Hu, "Influence of electrode geometry on transport and separation efficiency of powders using travelling wave field technique," in IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, 1995, vol. 2, pp. 1508–1513 vol.2, 1995.
- [108] W. W. Machowski, W. Balachandran, and D. Hu, "Influence of electrode geometry on transport and separation efficiency of powders using traveling wave field technique," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 4, pp. 887–892, Jul. 1997.
- [109] Q. Sun, N. Yang, X. Cai and G. Hu "Mechanism of dust removal by a standing wave electric curtain", Sci China-Phys Mech Astron, Vol. 55 No. 6, June 2012.

- [110] G. Liu and J. S. Marshall. "Particle transport by standing waves on an electric curtain", *J Electrostatics*, 68(4): 289–298, 2010.
- [111] G.Q. Liu and J.S. Marshall. "Effect of particle adhesion and interactions on motion by traveling waves on an electric curtain", *Journal of Electrostatics* 68, 179–189 0304-3886, 2010.
- [112] D. Qian, J.S. Marshall, J. Frolik, "Control analysis for solar panel dust mitigation using an electric curtain", *Renew. Energy* 41, 134–144, 2012.
- [113] M. K. Mazumder, M. N. Horenstein, J. W. Stark, P. Girouard, R. Sumner, B. Henderson, O. Sadler, I. Hidetaka, and A. S. Biris, "Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1793–1800, Jul. 2013.
- [114] J. R. Cain, "Lunar dust: The Hazard and Astronaut Exposure Risks", *Earth. Moon. Planets*, vol. 107 (1), 107–125, 2010.
- [115] A. Sayyah, M. N. Horenstein, M. K. Mazumder, and G. Ahmadi, "Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen," *Journal of Electrostatics*, vol. 81, pp. 24–36, Jun. 2016.
- [116] M. N. Horenstein, M. K. Mazumder, R. C. Sumner, J. Stark, T. Abuhamed, and R. Boxman, "Modeling of trajectories in an electrodynamic screen for obtaining maximum particle removal efficiency," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 2, pp. 707–713, Mar. 2013.
- [117] Z. Jie, Z. Chuande, Z. Fuzhong, L. Shuhua, F. Miao, and T. Yike, "Experimental and numerical modeling of particle levitation and movement behavior on traveling-wave electric curtain for particle removal," *Particulate Science and Technology*, vol. 37, no. 6, pp. 737–745, Aug. 2019.
- [118] E. Postaire, "Les matières plastiques à usage pharmaceutique", *Edition médicales internationales*, Paris, pp : 145, 2000.
- [119] Maou Samira, "Etude des propriétés thermiques de mélanges à base de PVC et PVC- PEHD et les phénomènes de dégradation ", *Mémoire magister*, Université KasdiMerbah- Ouargla, 2012.
- [120] H. ruska, P. Guesnet, C. Salin and J.J. Couchoud, "Poly (chlorure de vinyle) ou PVC ", *Techniques de l'Ingénieur. Réf. AM. 3325*.
- [121] G.W. Ehrenstein and F. Montagne, "Matériaux polymères (structure et application) ", *HERMES Science Publication*, Paris, 2000.
- [122] D. Ausseur, "polychlorure de vinyle", *Technique de l'ingénieur*, AM 3325, Paris, pages 1-11. 1999.
- [123] C.I. Calle, C.R. Buhler, J.L. McFall, S.J. Snyder, "Particle removal by electrostatic and dielectric forces for dust control during lunar exploration missions," *J. Electrostat.* 67 (2009) 89e92.
- [124] S. Masuda, M. Washizu and M. Iwadare, "Separation of Small Particles Suspended in Liquid by Nonuniform Traveling Field *IEEE Trans. Ind. Appl.* 23, 474-480, 1987.
- [125] A. Ramos, H. Morgan, N. G. Green and A. Castellanos, "Ac electrokinetics: a review of forces in microelectrode structures", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 31, 2338-2353, 1998.
- [126] H. A. Pohl, "Dielectrophoresis: the behavior of neutral matter in nonuniform electric fields", *New York: Cambridge University Press*, 1978.
- [127] L.C. Weiss, D.P. Thibodeaux, "Separation of seed by-products by an AC electric field," *J. Am. Oil Chem. Soc.* 61 , 886e890,1984.
- [128] W. Machowski, W. Balachandran, "Dispersion and transport of cohesive lactose powder using travelling wave field technique", *Powder Technol.* 99, 251–256, 1998.
- [129] D. Hu, W. Balachandran and W. Machowski, "Design of traveling-wave field panel for pharmaceutical powders based on computer simulation of particle trajectories", *IEEE. Trans. Ind. Appl.* 33, 641-650, 1997.
- [130] G. Lian, C. Thornton and M. J. Adams, "Discrete particle simulation of agglomerate impact coalescence", *Chemical Engineering Science*, 53(19), 3381-3391, 1998.
- [131] H. P. Zhu, Z. Y. Zhou, R. Y. Yang and Yu, A. B. "Discrete particle simulation of particulate systems: Theoretical developments", *Chemical Engineering Science*, 62(13), 3378-3396, 2007.
- [132] G. Lian, C. Thornton and M. J. Adams, "A Theoretical Study of the Liquid Bridge Forces between Two Rigid Spherical Bodies", *Journal of Colloid and Interface Science*, 161(1), 138-147, 1993.
- [133] Y. Muguruma, T. Tanaka and Y. Tsuji, "Numerical simulation of particulate flow with liquid bridge between particles (simulation of centrifugal tumbling granulator) ", *Powder Technology*, 109(1-3), 49-57, 2000.

- [134] S. C. Yang and S. S. Hsiau, "The simulation of powders with liquid bridges in a 2D vibrated bed", *Chemical Engineering Science*, 56(24), 6837-6849, 2001.
- [135] Y. Bourek. "Détermination des conditions d'ionisation caractérisant le seuil de claquage de l'air par la logique floue", Thèse de magister, université de Batna, 2005.
- [136] R. D. Medina, "Alimentation de puissance d'une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement", Thèse de doctorat de l'université Toulouse, octobre 2008.
- [137] K. Allégraud, "Décharge à Barrière Diélectrique de surface : physique et procédé", Thèse de doctorat, école polytechnique, 2009.
- [138] I. Ndiaye, "Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace", Mémoire d'ingénieur, université Québec, mai 2003.
- [139] A. Ouari, A. **Alibida**, F. Miloua and A. Tilmatine, "Design and Achievement of a New Hybrid Filter System Used in Cement", *Works Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1)*, pp. 1063-1066, Tunisia, 2017.
- [140] A. Abahazem "Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz", Thèse de doctorat, l'université de Toulouse III – Paul Sabatier, Décembre 2009.
- [141] G. Richard, "Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires ", Thèses de doctorat, Ecole Doctorale Science et Ingénierie en Matériaux, Avril 2018.
- [142] I. N. Mahi, "utilisation de l'instrument virtuel dans des dispositifs électrostatiques ", Thèse de doctorat, l'université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, 2018.
- [143] A. **Alibida**, S. Zemat, M. E. Zemat, M. B. Neagoe, F. Miloua, L. Dascalescu and A. Tilmatine "Experimental analysis of a new attraction force applied on metal particles", in *International Journal, Particulate Science and Technology*, 2019.
- [144] A. Tilmatine, A. **Alibida**, S. Zemat, H. Louati, Y. Bellebna, F. Miloua On the attraction force applied on metal pieces in a traveling wave conveyor in *Journal of Electrostatics*, 96, pp. 64–68, 2018.
- [145] H. Louati, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. **Alibida**, N. Zouzou, "New separation technique of metal/polymer granular materials using an electrostatic sorting device", *Journal of Electrostatics*, pp. 0304-3886, Elsevier, 2020.
- [146] M. Remadnia, "Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants", Thèse Doctorat en Génie Electrique, Janvier 2012.
- [147] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices ", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
- [148] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila and L. Dascalescu, "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, pp. 1044-1051, 2008.
- [149] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology", *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp 77-90, 1998.
- [150] G. Daill and B. Fournaud, "Décharges couronne application et modélisation", *Énergétique industrielle ESIP*, 2004/2005.
- [151] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud and L. Dascalescu, "Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, pp. 1564–1569, 2010.
- [152] A. Belgacem, A. Tilmatine, Y. Bellebna, F. Miloua, N. Zouzou, L. Dascalescu, "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*, Vol. 25, No. 2, 2018.

## Abstract

The traveling waves technique is an electrical phenomenon which causes the displacement of particles thanks to the interaction between a polarized particle and a polyphase electric field. This is produced by a system of parallel electrodes, located in the same plane and brought to alternating potentials with 2, 3 or 4 phases.

When a particle is placed in an electric field  $E$ , an electric dipole moment  $p$  is induced in it. In a uniform electric field, the particle being subjected to two equal and opposite forces, the resulting force is therefore zero. In a non-uniform electric field, the resulting force exerted on the particle is non-zero, it is called a dielectrophoretic force. This force, which does not depend on the polarity of the voltage, can be observed in AC or DC voltage, and represents the main force in so-called "moving wave" conveyors.

The separation of micronized particles by the traveling wave technique has been studied for several types of particles and in different media (liquid, air). Satisfactory results have been obtained for applications in electronics, chemistry, biochemistry, space, cleaning of solar panels, etc.

The objective of this thesis is to study the feasibility of the separation of micronized particles using traveling wave conveyors, with a multi-phase voltage of a maximum value of 2000 V. The advantage of this technology lies in the fact that the particle transport is provided by electric field forces instead of mechanical means without producing either acoustic noise effects or mechanical vibrations.

**Keywords:** traveling waves, polyphase electric field, particle displacement, high voltage, separation.

## Résumé

La technique des ondes mobiles, en anglais « travelling waves », est un phénomène électrique qui provoque le déplacement de particules grâce à l'interaction entre une particule polarisée et un champ électrique polyphasé. Celui-ci est produit par un système d'électrodes parallèles, situées dans un même plan et portées à des potentiels alternatifs à 2, 3 ou 4 phases.

Lorsqu'une particule est placée dans un champ électrique  $E$ , un moment dipolaire électrique  $p$  est induit dans celle-ci. Dans un champ électrique uniforme, la particule étant soumise à deux forces égales et opposées, la force résultante est par conséquent nulle. Dans un champ électrique non uniforme, la force résultante qui s'exerce sur la particule est non nulle, elle est appelée force diélectrophorétique. Cette force qui ne dépend pas de la polarité de la tension, peut être observée en tension AC ou DC, et représente la force principale dans les convoyeurs dits à « ondes mobiles ».

La séparation des particules micronisées par la technique des ondes mobiles a été étudiée pour plusieurs types de particules et dans des milieux différents (liquide, air). Des résultats satisfaisants ont été obtenus pour des applications en électronique, chimie, biochimie, espace, nettoyage des panneaux solaires, etc.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la faisabilité de la séparation des particules micronisées par les ondes mobiles, en utilisant un convoyeur à plusieurs phases et une tension maximale de 2000 V. L'avantage de cette technologie réside dans le fait que le transport des particules est assuré par les forces du champ électrique au lieu des moyens mécaniques sans produire ni d'effets de bruit acoustique ni de vibrations mécaniques.

**Mots-clé :** Ondes mobiles, champ électrique polyphasé, déplacement de particules, haute tension, séparation.

### المخلص:

الموجات المتحركة ، هي ظاهرة كهربائية تسبب إزاحة الجسيمات بفضل التفاعل بين جسيم مستقطب ومجال كهربائي متعدد الأطوار. يتم إنتاج هذا بواسطة نظام من الأقطاب الكهربائية المتوازية ، الموجودة في نفس المستوى ويتم إحضارها إلى إمكانات متناوبة بمراحل 2 أو 3 أو 4.

عندما يتم وضع جسيم في مجال كهربائي  $E$  ، يتم إحداث عزم كهربائي ثنائي القطب ع فيه. في مجال كهربائي موحد، يخضع الجسيم لقوتين متساويتين ومتعاكستين، وبالتالي فإن القوة الناتجة هي صفر. في المجال الكهربائي غير المنتظم، تكون القوة الناتجة على الجسيم غير صفرية، وتسمى القوة العازلة. هذه القوة، التي لا تعتمد على قطبية الجهد، يمكن ملاحظتها في جهد التيار المتردد أو التيار المستمر، وتمثل القوة الرئيسية فيما يسمى بالناقلات "الموجية المتحركة".

تمت دراسة فصل الجسيمات الدقيقة بواسطة تقنية الموجة المتحركة لعدة أنواع من الجسيمات وفي وسائط مختلفة (سائل، هواء). تم الحصول على نتائج مرضية للتطبيقات في الإلكترونيات، والكيمياء، والكيمياء الحيوية، والفضاء، وتنظيف الألواح الشمسية، إلخ.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة جدوى فصل الجسيمات الدقيقة عن طريق تحريك الموجات، باستخدام ناقل متعدد الأطوار وبجهد أقصى 2000 فولت. تكمن ميزة هذه التقنية في حقيقة أن يتم توفير نقل الجسيمات بواسطة قوى المجال الكهربائي بدلاً من الوسائل الميكانيكية دون إنتاج تأثيرات ضوضاء صوتية أو اهتزازات ميكانيكية. من ناحية أخرى، سيتم تطبيقه في المرسبات الكهروستاتيكية في محاولة لتنظيف أقطاب التجميع، من أجل إزالة طبقة الغبار المتلوث.

**الكلمات المفتاحية:** الموجات المتحركة، المجال الكهربائي متعدد الأطوار، إزاحة الجسيمات، الجهد العالي، الفصل، المرسب الكهروستاتيكي