



HAL
open science

Utilisation de la technique des ondes voyageuses pour la séparation des mélanges de particules métal/plastique

Hamza Louati

► **To cite this version:**

Hamza Louati. Utilisation de la technique des ondes voyageuses pour la séparation des mélanges de particules métal/plastique. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université de Poitiers; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf (Algérie), 2022. Français. NNT : 2022POIT2262 . tel-03902687

HAL Id: tel-03902687

<https://theses.hal.science/tel-03902687>

Submitted on 16 Dec 2022

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

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

THESE

Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (Poitiers)

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN
(Faculté de Génie Electrique)

(Diplôme National - Arrêté N° 935 du 31/07/2016)
Ecole Doctorale : Haute Tension et Plasmas Appliqués

Secteur de Recherche : Génie électrique

Présentée par :

Hamza LOUATI

UTILISATION DE LA TECHNIQUE DES ONDES VOYAGEUSES POUR LA SEPARATION DES MELANGES DE PARTICULES METAL/PLASTIQUE

Directeurs de Thèse : **Noureddine ZOUZOU**
Amar TILMATINE

Soutenue le 31 mars 2022 devant la Commission d'Examen

JURY

Laurent BOUDOU	Maître de Conférences, Université de Toulouse 3, France	Rapporteur
Zehira ZIARI	Professeur, Université de Constantine 1, Algérie	Rapporteur
Mohamed RIZOUGA	Professeur, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie	Examineur
Sidi-Mohamed REMAOUN	Maître de Conférences, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Algérie	Examineur
Khashayar SALEH	Professeur, Université Technologique de Compiègne, France	Examineur
Thierry PAILLAT	Professeur, Université de Poitiers, France	Examineur
Amar TILMATINE	Professeur, Université de Sidi Bel-Abbès, Algérie	Examineur
Noureddine ZOUZOU	Maître de Conférences - HDR, Université de Poitiers, France	Examineur

Remerciements

A la fin de la rédaction de ce mémoire, je suis persuadé que la thèse est loin d'être un travail personnel. En réalité, je n'aurais jamais pu atteindre ce travail sans être entouré par des personnes que je voudrais, à travers ces quelques lignes, sincèrement les remercier.

Les travaux présentés dans cette thèse ont fait l'objet d'une convention de cotutelle établie entre l'Université de Poitiers et l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.

La présente thèse a pu être achevée grâce à la bourse Profas B+ offerte par les ministères de l'enseignement supérieur et de la recherche, franco-algérien, auxquels j'exprime ici toute ma considération.

*En premier lieu, je tiens à exprimer mes plus respectueux remerciements à M. **Noureddine Zouzou**. Qu'il trouve ici l'expression de ma plus sincère reconnaissance pour sa disponibilité, son soutien constant, sa rigueur ainsi que la liberté intellectuelle et la confiance qu'il m'a accordées pour mener ces travaux. J'adresse également un immense merci à M. **Amar Tilmatine**. Les idées et les conseils qu'il a apportés m'ont permis de me surpasser dans tous les aspects tant scientifiques qu'humains.*

*Mes remerciements sont aussi destinés à Messieurs **Rabah Ouiddir** et **Ayoub Zouaghi**. Qu'ils reçoivent l'expression de ma profonde gratitude pour leurs disponibilités, leurs remarques éclairantes et encouragements.*

*Au même titre, j'adresse mes remerciements à Mme. **Zehira Ziari** et M. **Laurent Boudou** pour avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.*

*Je remercie vivement les autres membres de jury Messieurs **Mohamed Rizouga**, **Sidi-Mohamed Remaoun**, **Thierry Paillat** et **Khashayar Saleh**, qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon travail.*

Merci à tous les personnels techniques et administratifs de l'institut Pprime et du laboratoire LGEO qui, de près de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, et qui n'ont ménagé aucun effort pour nous rendre la tâche agréable.

Je tiens également à remercier mes collègues doctorants et post-doctorants des différents départements pour, la bonne ambiance, les échanges scientifiques et humains de grand intérêt que nous avons pu avoir.

Je remercie l'ensemble de mes amis, et les personnes que je respecte beaucoup, qui m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final.

Enfin, j'adresse toute ma gratitude à ma famille. Particulièrement à mes parents, qui m'ont toujours soutenus et ont contribué pour m'assurer une belle vie et un meilleur avenir. Je témoigne également toute ma reconnaissance à ma sœur et mes frères qui m'ont appris à mettre l'honnêteté et le courage au-dessus de toutes les autres vertus. A vous, je dédie ce travail.

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	iii
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xvi
Introduction	1
Chapitre I. Etat de l’art	6
I.1. Interaction entre particules et champ électrique	7
I.1.1. Particules de la gamme 6 nm-10 μm	9
I.1.1.1. Electrofiltre avec décharge couronne.....	10
I.1.1.2. Electrofiltre avec chargeur DBD	11
I.1.1.3. Médias fibreux non-tissés chargés par décharge couronne.....	12
I.1.2. Particules de la gamme 10 μm -500 μm	14
I.1.2.1. Séparation des particules.....	16
I.1.2.2. Dépoussiérage des panneaux solaires	19
I.1.3. Particules de la gamme 500 μm -10 mm.....	27
I.1.3.1. Séparation isolant-isolant.....	27
I.1.3.2. Séparation conducteur-conducteur.....	29
I.1.3.3. Séparation conducteur-isolant.....	30
I.2. Revue bibliographique sur les applications du système à réseaux d’électrodes intercalées	32
I.2.1. Action des ondes progressives et stationnaires	33
I.2.2. Action d’électro-adhésion	40
I.3. Positionnement de la problématique de la thèse	49
Chapitre II. Etude analytique et numérique du phénomène d’électro-adhésion	52
II.1. Modélisation de la force d’électro-adhésion	53
II.1.1. Modèle analytique.....	54
II.1.1.1. Cas d’un diélectrique	55
II.1.1.2. Cas du métal	59
II.1.2. Modèle numérique	61
II.2. Calcul de la force d’électro-adhésion.....	64
II.2.1. Effet de la tension.....	64
II.2.2. Effet de l’épaisseur du gap d’air	65

II.2.3.	Effet de l'épaisseur de la barrière diélectrique.....	65
II.2.4.	Effet de la permittivité de la barrière diélectrique.....	66
II.2.5.	Effet de la permittivité du substrat	67
II.2.6.	Effet de la forme des électrodes	67
II.3.	Autres paramètres complémentaires	68
II.3.1.	Electro-adhésion de plaques.....	69
II.3.1.1.	Influence de la rugosité.....	69
II.3.1.2.	Influence de la tension	70
II.3.1.3.	Influence de la tension alternative	72
II.3.1.4.	Influence du temps de montée en tension carrée.....	73
II.3.2.	Electro-adhésion des particules	74
II.3.2.1.	Cas de plusieurs particules	74
II.3.2.2.	Cas d'une seule particule	77
II.4.	Conclusion.....	79
Chapitre III. Effet des paramètres électriques et géométriques sur l'électro-adhésion ...		82
III.1.	Installation expérimentale	83
III.2.1.	Description du banc expérimental.....	84
III.2.2.	Configurations des actionneurs étudiés.....	85
III.2.3.	Protocole expérimental.....	87
III.2.	Adhésion du métal.....	88
III.2.1.	Effet de la fréquence	88
III.2.2.	Effet de la tension.....	91
III.2.3.	Effet du rapport cyclique et du déphasage	93
III.2.4.	Effet de la largeur d'électrodes et l'espace inter-électrodes.....	93
III.3.	Adhésion du polymère	95
III.4.	Comparaison entre l'adhésion du métal et du polymère	97
III.5.	Conclusion.....	99
Chapitre IV. Etude du procédé de séparation par électro-adhésion.....		100
IV.1.	Séparateur à plan incliné vibrant	101
IV.1.1.	Installation expérimentale	102
IV.1.2.	Méthodologie expérimentale.....	103
IV.1.3.	Résultats et discussion.....	105
IV.2.	Séparateur à tambour rotatif	109

IV.2.1.	Banc d'essai.....	109
IV.2.2.	Protocole expérimental.....	113
IV.2.3.	Résultats et discussion.....	116
IV.2.3.1.	Espacement inter-électrodes $g = 3$ mm.....	116
IV.2.3.2.	Espacement inter-électrodes $g = 6$ mm.....	121
IV.3.	Etude de l'effet de la charge électrique initiale sur la séparation.....	124
IV.3.1.	Montage expérimental et protocole de mesure	124
IV.3.2.	Résultats et discussion.....	125
IV.3.2.1.	Charge au niveau de la goulotte et de l'actionneur.....	126
IV.3.2.2.	Effet du pré-chargement sur la charge finale	127
IV.3.2.3.	Effet de la tension de l'actionneur sur la charge finale.....	127
IV.3.2.4.	Effet de la charge des particules sur la séparation	129
IV.4.	Conclusion.....	130
Chapitre V. Décharges électriques induites sur un convoyeur.....		132
V.1.	Protocole expérimental.....	133
V.1.1.	Dispositif expérimental et outils de caractérisation	133
V.1.1.1.	Module « actionneur »	134
V.1.1.2.	Module d'alimentation et de mesure électrique.....	135
V.1.2.	Système d'alimentation électrique et de mesure.....	135
V.1.2.1.	Alimentation électrique	135
V.1.2.2.	Eléments de visualisation et d'acquisition.....	135
V.1.2.3.	Boitier de mesures électriques	135
V.1.3.	Méthodes de mesure des grandeurs électriques	135
V.1.3.1.	Acquisition des formes d'ondes de la tension et du courant	135
V.1.3.2.	Mesure de la puissance électrique consommée	136
V.2.	Caractérisations électriques.....	138
V.2.1.	Etude du courant	138
V.2.2.	Morphologie de la décharge de surface	140
V.2.3.	Etude de la charge	144
V.3.	Etude paramétrique	145
V.3.1.	Cas plan-plan	146
V.3.1.1.	Influence de la position de la zone de contact	146
V.3.1.2.	Influence de la tension.....	148

V.3.1.3.	Influence de la fréquence.....	150
V.3.1.4.	Influence de l'épaisseur de la barrière diélectrique	150
V.3.1.5.	Influence du rapport écartement/largeur d'électrodes	152
V.3.2.	Cas fil-plan.....	153
V.3.3.	Cas brins-plan	154
V.3.3.1.	Particules de cuivre.....	154
V.3.3.2.	Etude de la puissance consommée par les décharges induites	157
V.3.3.3.	Effet des décharges sur la récupération du cuivre	159
V.4.	Conclusion.....	161
	Conclusion générale.....	162
	Annexes.....	166
	Références bibliographiques.....	168

Liste des figures

Figure I.1. (a) Représentation schématique d'un électrofiltre à deux étages, avec une vue de coupe du chargeur. (b) Répartition de la taille des particules à la sortie de l'électrofiltre avec et sans décharge couronne. (c) Evolution de l'efficacité fractionnelle de collecte en fonction de la taille des particules pour plusieurs tensions appliquées [38].	10
Figure I.2. Electrofitre DBD de type fil – tube carré. (a) Représentation schématique et (b) Efficacité de collecte en fonction de la fréquence [43].	12
Figure I.3. (a) Photographie et schéma du système de charge par décharge couronne (forme triode). (b) Schéma du montage de mesure de l'efficacité de la collecte [45][59].	13
Figure I.4. Efficacité de collecte sous l'influence de (a) la charge et (b) la polarité [45].	14
Figure I.5. Schéma typique d'un convoyeur à ondes stationnaires.	14
Figure I.6. Les formes basiques des rideaux électriques [22].	15
Figure I.7. Collecteur de poussière à rideau électrique plan [71].	15
Figure I.8. Systèmes de séparation électrostatique des particules. (a) Séparateur à plan incliné et (b) système de séparation à rouleau [89].	17
Figure I.9. Schémas des dispositifs de séparation de particules : (a) tamis électrostatique et (b) système de classification sur un plan horizontal [91].	18
Figure I.10. Evolution de la puissance du PV en fonction de la masse des sols : (a) Martien, (b) Lunaire [99].	20
Figure I.11. ITO transparent. (a) Electrodes parallèles biphasées sur un support en polymère flexible. (b) Electrodes spirales triphasées sur un support rigide en verre [73][101].	20
Figure I.12. Photographie de la section transversale d'un rideau électrique avec DBD dans l'air atmosphérique ($V_{appl} = 6\text{ kV}$) [78].	21
Figure I.13. Systèmes utilisés pour le nettoyage des panneaux PV. (a) Jet d'eau. (b) Robot Ecoppia E4 [108].	22
Figure I.14. Démonstration de l'efficacité du système de nettoyage électrostatique sur un grand panneau solaire [103].	23
Figure I.15. (a) Vu de coupe de la configuration de l'EDS avec deux couches diélectriques transparentes. (b) Photographie d'un film EDS avant la couverture sur un module PV. (c) Film EDS collé sur un panneau solaire [110].	23
Figure I.16. Schémas des systèmes de nettoyage électrostatique qui utilisent (a) des ondes progressives et (b) des ondes stationnaires [112].	25
Figure I.17. (a) Relation entre l'inclinaison du panneau et l'efficacité du nettoyage pour les COP et COS. (b) Efficacité du nettoyage en fonction de la taille des particules classifiées [103].	25
Figure I.18. Schéma du descriptif (a) et photographie (b) du séparateur tribo-aéroélectrostatique à deux disques métalliques. 1 : Moteurs électriques ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes-disques métalliques tournantes ; 4 : Collecteurs ; 5 : Cages de Faraday ; 6 : Balances électroniques ; 7 : Soufflante ; 8 : Armoire électrique [119].	28
Figure I.19. Représentation schématique des électrodes-disques tournantes alimentées en haute tension [118].	28

Figure I.20. (a) Représentation schématique du séparateur conducteur-conducteur. (1) Plaque vibrante métallique reliée à la terre ; (2) Electrode cylindrique mise sous HT ; (3) Electrode elliptique mise sous HT; (4) Electrode plaque reliée à la terre. (b) Distribution des produits obtenus dans les compartiments du collecteur [127].....	29
Figure I.21. Séparateur électrostatique à tambour. (a) Forces agissant sur les particules conductrices (C) et non-conductrices (NC) ; (b) Représentation schématique du système d'électrodes utilisé pour la séparation de déchets ; (1) Goulotte oscillante ; (2) Electrode couronne ; (3) Electrode statique ; (4) Electrode cylindrique tournante ; (5) Déflecteur ; (6) Collecteur; (7) Electrode couronne de neutralisation ; (8) Balais [132].....	30
Figure I.22. Représentation schématique d'un condensateur conventionnel à plaques parallèles (à gauche) et un condensateur à plaques coplanaires (à droite) [132]......	33
Figure I.23. Configuration triphasée (Onde progressive) [92]......	34
Figure I.24. (a) Distribution du potentiel électrique sur un COP et (b) profils du potentiel électrique numérique total (VFEM) et ses deux composantes harmoniques directe (<i>Wdir</i>) et inverse (<i>Winv</i>) pour les instants , $t = 0, T/6, T/4, T/3, T/2$ [24].	35
Figure I.25. Configuration biphasée (Onde stationnaire) [150].	36
Figure I.26. (a) Distribution du potentiel électrique sur un COS et (b) profils du potentiel électrique numérique total (VFEM) et ses deux composantes harmoniques directe (<i>Wdir</i>) et inverse (<i>Winv</i>) pour les instants , $t = 0, T/6, T/4, T/3, T/2$ [24]......	37
Figure I.27. Schéma de la configuration considérée pour l'étude comparative des forces. La particule est déposée sur la surface diélectrique, qui recouvre des électrodes mises sous tensions triphasées [24].	40
Figure I.28. Évolution de la composante <i>y</i> des forces à la surface en fonction du diamètre des particules de PMMA [24].	40
Figure I.29. La force électrostatique attractive produite entre deux objets solides si (a) une différence de potentiel électrique se produit entre les corps, ou si (b) un champ électrique se produit à l'extérieur de l'un des corps en raison d'une différence de potentiel électrique entre deux régions conductrices à l'intérieur du corps [156].	41
Figure I.30. Vue de coupe d'un système d'EA typique. (a) Électro-adhésion sur des matériaux conducteurs. (b) Électro-adhésion sur les matériaux isolants. Le signe "+" indique une tension positive tandis que le signe "-" indique une tension négative ou la terre [157].	42
Figure I.31. Supports possibles d'un actionneur d'adhésion électrostatique. Rigides, comprenant : (a) Electroadesor de la NASA, (b) Pince Fraunhofer IPT EA, (c)Pince Schmalz EA, (d)Pince Grabit EA, Flexible ou conforme, y compris (e) Electro-adhésif flexible de la NASA, (f) Pince EA conforme de Monkman, (g) La pince EA de Choi, et (h) La pince EA de JPL. Extensible, y compris (i) La pince souple DEA-EA de Shintake. (j) Pince composite souple EA-DEA de Guo, et (k) Pince Pneu-EA de Guo [157].	43
Figure I.32. (a) Prototype de robot grim pant (isolée en surface) sur une paroi conductrice. (b) prototype de robot grim pant sur une surface isolante en verre [172].	44
Figure I.33. Conception du système d'électro-adhésion auto-alimenté. (a) Processus d'intégration du système à partir de trois nano-générateurs triboélectriques (TENG) et d'un actionneur électro-adhésif (EAP). (b) Image des nanostructures gravées sur la surface. (c) Principe de fonctionnement de base du TENG. (d) Photographie du système fabriqué [182].....	47
Figure II.1. Schéma d'un actionneur électro-adhésif avec des électrodes intercalées.....	55

Figure II.2. Section transversale de l'actionneur d'électro-adhésion. La structure est multicouche; couche 1 : support isolant, couche 2 : barrière diélectrique, couche 3 : gap d'air, couche 4 : substrat diélectrique.....	56
Figure II.3. Section transversale de l'actionneur à électro-adhésion avec un substrat conducteur.....	59
Figure II.4. Schéma d'un condensateur plat contenant deux couches de diélectriques différents en série avec une surface limite entre les diélectriques parallèle aux plaques conductrices.....	60
Figure II.5. Illustration du domaine de simulation pour une seule période géométrique avec les conditions aux limites correspondantes adaptées à l'électro-adhésion d'un diélectrique.....	62
Figure II.6. Illustration du domaine de simulation pour une seule période géométrique avec les conditions aux limites correspondantes adaptées à l'électro-adhésion d'un conducteur.....	62
Figure II.7. Profils de distribution (a) du potentiel électrique, (b) du champ électrique pour le cas du diélectrique.....	63
Figure II.8. Profils de distribution (a) du potentiel électrique, (b) du champ électrique pour le cas du conducteur.....	63
Figure II.9. Evolution de la force d'EA en fonction de la tension appliquée dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d1 = 1\text{ mm}$, $d2 = 0.035\text{ mm}$, $d3 = 0.01\text{ mm}$, $d4 = 10\text{ mm}$, $\epsilon r1 = 4.3$, $\epsilon r2 = 3.5$, $\epsilon r3 = 1$, $\epsilon r4 = 3$, $g = w = 1\text{ mm}$, $L = 4\text{ mm}$	64
Figure II.10. Variation de la force d'EA en fonction de l'épaisseur du gap d'air dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d1 = 1\text{ mm}$, $d2 = 0.035\text{ mm}$, $d4 = 10\text{ mm}$, $\epsilon r1 = 4.3$, $\epsilon r2 = 3.5$, $\epsilon r3 = 1$, $\epsilon r4 = 3$, $g = w = 1\text{ mm}$, $L = 4\text{ mm}$, $Vp = 1000\text{ V}$, $Vn = -1000\text{ V}$	65
Figure II.11. Variation de la force d'EA en fonction l'épaisseur de la barrière diélectrique dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d1 = 1\text{ mm}$, $d3 = 0.01\text{ mm}$, $d4 = 10\text{ mm}$, $\epsilon r1 = 4.3$, $\epsilon r2 = 3.5$, $\epsilon r3 = 1$, $g = w = 1\text{ mm}$, $L = 4\text{ mm}$, $Vp = 1000\text{ V}$, $Vn = -1000\text{ V}$	66
Figure II.12. Evolution de la force d'EA en fonction de la permittivité relative de la barrière diélectrique dans les cas du substrat : (a) diélectrique et (b) conducteur. Conditions : $d1 = 1\text{ mm}$, $d2 = 0.035\text{ mm}$, $d3 = 0.01\text{ mm}$, $d4 = 10\text{ mm}$, $\epsilon r1 = 4.3$, $\epsilon r3 = 1$, $\epsilon r4 = 3$, $g = w = 1\text{ mm}$, $L = 4\text{ mm}$, $Vp = 1000\text{ V}$, $Vn = -1000\text{ V}$	66
Figure II.13. Evolution de la force d'EA en fonction de la permittivité relative du substrat diélectrique : (a) à petite échelle et (b) à grande échelle. Conditions : $d1 = 1\text{ mm}$, $d2 = 0.035\text{ mm}$, $d3 = 0.01\text{ mm}$, $d4 = 10\text{ mm}$, $\epsilon r1 = 4.3$, $\epsilon r2 = 3.5$, $\epsilon r3 = 1$, $g = w = 1\text{ mm}$, $L = 4\text{ mm}$, $Vp = 1000\text{ V}$, $Vn = -1000\text{ V}$	67
Figure II.14. Représentation schématique des formes d'électrodes étudiées.....	68
Figure II.15. Evolution de la force d'EA en fonction de la tension appliquée pour les trois formes d'électrodes dans les cas du substrat : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d1 = 1\text{ mm}$, $d2 = 0.035\text{ mm}$, $d3 = 0.01\text{ mm}$, $d4 = 10\text{ mm}$, $\epsilon r1 = 4.3$, $\epsilon r2 = 3.5$, $\epsilon r3 = 1$, $\epsilon r4 = 3$, $g = w = 1\text{ mm}$, $L = 4\text{ mm}$, $Vp = 1000\text{ V}$, $Vn = -1000\text{ V}$	68
Figure II.16. Représentation schématique de l'état des surfaces (a) lisse et (b) rugueuse utilisé dans la modélisation pour le calcul de la force d'EA.....	69
Figure II.17. Variation de la force d'EA en fonction de la tension appliquée pour les surfaces lisse et rugueuse : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d1 = 1\text{ mm}$, $d2 =$	

0.035 mm, $d_3 = 0.01$ mm, $d_4 = 10$ mm, $\epsilon r_1 = 4.3$, $\epsilon r_2 = 3.5$, $\epsilon r_3 = 1$, $\epsilon r_4 = 3$, $g = w = 1$ mm, $L = 4$ mm, $f = 100$ Hz.....	69
Figure II.18. Comparaison entre l'adhésion de PVC et de cuivre en fonction de la tension. Conditions : $d_1 = 1$ mm, $d_2 = 0.035$ mm, $d_3 = 0.01$ mm, $d_4 = 10$ mm, $\epsilon r_1 = 4.3$, $\epsilon r_2 = 3.5$, $\epsilon r_3 = 1$, $\epsilon r_4 = 3$, $g = w = 1$ mm, $L = 4$ mm, $f = 100$ Hz.....	70
Figure II.19. Illustration schématique d'un substrat (plaque en PVC ou en Cuivre) soumis à la force de gravité et la force d'EA.....	70
Figure II.20. Variation de la force d'EA et la force de gravité en fonction de la masse des substrats pour différentes valeurs de tension. (a) Cas du diélectrique. (b) Cas du conducteur.....	71
Figure II.21. Evolution de la masse critique de l'électro-adhésion des matériaux en fonction de la tension appliquée : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur.....	71
Figure II.22. Variation de la force d'EA exercée sur (a) le PVC et (b) le Cuivre en fonction du temps pour une tension carrée. Conditions : Temps de montée et de descente de la tension = 20 ns ; $V = 1000$ V ; $f = 100$ Hz.....	72
Figure II.23. Variation de la force d'EA exercée sur (a) le PVC et (b) le Cuivre en fonction du temps pour une tension sinusoïdale. Conditions : $V = 1000$ V ; $f = 100$ Hz.....	72
Figure II.24. Comparaison entre la force d'EA moyenne exercée sur (a) le PVC et (b) le Cuivre en fonction de la tension appliquée. Conditions : $f = 100$ Hz.....	73
Figure II.25. Comparaison entre la force d'EA exercée sur (a) le substrat diélectrique et (b) le substrat conducteur en fonction du temps pour une tension carrée. Conditions : Temps de variation montée et de descente de la tension = 20 μ s ; $V = 1000$ V ; $f = 100$ Hz.....	73
Figure II.26. Comparaison entre la force d'EA moyenne exercée sur des substrats (a) diélectrique ou (b) conducteur en fonction de la fréquence pour une tension carrée. Conditions : Temps de variation montée et de descente de la tension = 20 μ s ; $V = 1000$ V.....	74
Figure II.27. Représentation schématique de la répartition des particules sur les trois actionneurs : (1) $gw = 0.0125$, (2) $gw = 1$, et (3) $gw = 8$ avec $w = 1$ mm.....	75
Figure II.28. Evolution de la force d'EA exercée sur les particules diélectriques en fonction du rapport gw , pour g variable et w constant.....	75
Figure II.29. Représentation schématique de la répartition des particules sur les trois actionneurs : (1) $gw = 0.125$, (2) $gw = 1$, et (3) $gw = 8$ pour $g = 1$ mm.....	76
Figure II.30. Evolution de la force d'EA exercée sur des particules diélectriques en fonction du rapport gw , pour g constant et w variable.....	76
Figure II.31. Variation de la force d'EA exercée sur des particules conductrices en fonction du rapport gw . (a) g variable et w constant. (b) g constant et w variable.....	76
Figure II.32. Représentation schématique de la disposition d'une particule entre deux électrodes pour les trois actionneurs : (1) $gw = 0.125$, (2) $gw = 1$, et (3) $gw = 8$ avec $w = 1$ mm.....	77
Figure II.33. Variation de la force d'EA exercée sur une particule diélectrique en fonction du rapport gw , pour g variable et w constant.....	77
Figure II.34. Représentation schématique de la disposition d'une particule entre deux électrodes pour les trois actionneurs. (1) $gw = 0.125$, (2) $gw = 1$, et (3) $gw = 8$ avec $g = 1$ mm.....	78
Figure II.35. Variation de la force d'EA exercée sur une particule diélectrique en fonction du rapport gw , pour g constant et w variable.....	78

Figure II.36. Variation de la force d'EA exercée sur une particule conductrice en fonction du rapport gw . (a) g variable et w constant. (b) g constant et w variable.....	78
Figure III.1. Représentation schématique d'un matériau (Cu ou PE) soumis aux forces d'EA et de gravité.....	84
Figure III.2. Schéma de l'installation expérimentale.....	84
Figure III.3. Démonstration des facteurs géométriques d'un AEA avec la répartition des phases.....	85
Figure III.4. Photographies des deux actionneurs sans barrière diélectrique.....	85
Figure III.5. Les formes d'ondes typiques des tensions appliquées dans les deux configurations d'électrodes. Conditions : $V_{max} = 700 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$	86
Figure III.6. Photographies des matériaux déposés en monocouche sur l'actionneur mis dans une position horizontale. Conditions : $V_{max} = 600 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$; $g/w = 1$	87
Figure III.7. Photographies des matériaux collés à la surface de l'actionneur en position verticale. Conditions : $V_{max} = 600 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$; $g/w = 1$	88
Figure III.8. Evolution du taux d'adhésion de cuivre en fonction de la fréquence dans une configuration biphasée. Conditions : $g/w = 1$	89
Figure III.9. Evolution du taux d'adhésion de cuivre en fonction de la fréquence dans une configuration triphasée. Conditions : $g/w = 1$	90
Figure III.10. Progression du taux d'adhésion de cuivre en fonction des tensions continues. (a) Tension sur l'électrode haute tension ; (b) tension entre deux électrodes adjacentes. Conditions : $g/w = 1$. .	91
Figure III.11. Progression du taux d'adhésion de cuivre en fonction de la forme d'onde de la tension. Conditions : $f = 300 \text{ Hz}$; $g/w = 1$	92
Figure III.12. Comparaison des caractéristiques taux d'adhésion - tension pour différentes configurations. Conditions : $f = 300 \text{ Hz}$; $g/w = 1$	92
Figure III.13. Variation du taux d'adhésion du cuivre en fonction du rapport cyclique et du déphasage pour une configuration biphasée avec une tension carrée. Conditions : $V_{max} = 700 \text{ V}$; $f = 300 \text{ Hz}$; $g/w = 1$	93
Figure III.14. Variation du taux d'adhésion de cuivre en fonction du rapport géométrique g/w . Conditions : configuration biphasée, $Er = 1000 \text{ V/mm}$	94
Figure III.15. Représentation schématique de la position possible de la particule sur l'actionneur pour : (a) une largeur d'électrode élevée et (b) un écart élevé.	94
Figure III.16. Comparaison de l'effet du rapport géométrique gw sur le taux d'adhésion de cuivre. Conditions : Configuration biphasée ; $f = 100 \text{ Hz}$; $g/w = 1$	95
Figure III.17. Variation du taux de récupération de PE en fonction de la fréquence pour les tensions biphasées. Conditions : $g/w = 1$	95
Figure III.18. Evolution du taux d'adhésion des particules de polymère en fonction de la tension continue biphasée. Conditions : $g/w = 1$	96
Figure III.19. Photographies de particules de polymère sur l'actionneur mis dans une position verticale. Conditions : $V_{max} = 600 \text{ V}$; $g/w = 1$	96
Figure III.20. Variation du taux de récupération de PE en fonction de la fréquence pour les tensions triphasées carrée et sinusoïdale. Conditions : $V_{max} = 700 \text{ V}$; $g/w = 1$	97

Figure III.21. Comparaison de l'effet de la fréquence sur le taux d'adhésion de cuivre et du PE pour une tension biphasée. (a) Tension Sinusoïdale ; (b) tension carrée. Conditions :	98
Figure III.22. Comparaison de l'effet de la tension biphasée continue sur le taux d'adhésion de cuivre et du PE. Conditions : $g/w = 1$	98
Figure IV.1. Photographie du dispositif de tri à plan incliné vibrant.	102
Figure IV.2. Représentation schématique de l'installation expérimentale de tri à plan incliné vibrant.	102
Figure IV.3. Photographie des échantillons de polymère et de métal.	103
Figure IV.4. Evolution de la récupération des matériaux sur la surface de l'actionneur en fonction de l'inclinaison. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V; $f = 300$ Hz et $gw = 0,5$	105
Figure IV.5. Taux de pureté du cuivre récupéré sur la surface de l'actionneur. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 800$ V; $f = 300$ Hz et $gw = 0,5$	106
Figure IV.6. Evolution de la récupération des matériaux dans le compartiment de collection en fonction de l'inclinaison. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V; $f = 300$ Hz et $gw = 0,5$	106
Figure IV.7. Taux de pureté des matériaux récupérés dans le compartiment de collection. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V; $f = 300$ Hz et $gw = 0,5$	107
Figure IV.8. Comparaison de la récupération de cuivre en fonction de l'inclinaison sur les trois actionneurs correspondants aux rapports : $R = 0,25$; $R = 0,5$ et $R = 1$	108
Figure IV.9. Comparaison de la pureté de PVC dans le compartiment de collection en fonction de l'inclinaison pour les trois actionneurs correspondants aux rapports : $R = 0,25$; $R = 0,5$ et $R = 1$. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V ; $f = 300$ Hz.	108
Figure IV.10. Séparateur électrostatique de laboratoire SELMEG.	109
Figure IV.11. Le banc expérimental de tri à tambour rotatif.	110
Figure IV.12. Schéma frontal du tambour avec ses dimensions en mm.	112
Figure IV.13. Schéma du cylindre en téflon qui montre les deux couronnes métalliques et les contacts HT (les dimensions indiquées sont en mm).	112
Figure IV.14. Photographies des échantillons granulaires de métal et de polymère utilisés dans le cadre de l'étude du séparateur à tambour.	113
Figure IV.15. Schéma descriptif du processus de séparation.	114
Figure IV.16. Schéma descriptif du bilan des forces exercées sur les particules à la surface du tambour.	114
Figure IV.17. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la tension appliquée. Conditions : tension biphasée carré, $f = 350$ Hz, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.	116
Figure IV.18. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre et de PVC, respectivement dans les compartiments de collection métal et polymère, en fonction de la tension appliquée. Conditions : $f = 350$ Hz, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.	117
Figure IV.19. Illustration schématique de la charge électrique induite dans une particule métallique.	117
Figure IV.20. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.	118

Figure IV.21. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre et du PVC dans les deux compartiments de collection réservés en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.	118
Figure IV.22. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm	119
Figure IV.23. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la vitesse de rotation du tambour. Conditions : $V = 2$ kV, $f = 350$ Hz et $g = 3$ mm.....	120
Figure IV.24. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre et de PVC dans les deux compartiments de collection, métal et polymère en fonction de la vitesse de rotation du tambour. Conditions : $V = 2$ kV ; $f = 350$ Hz et $g = 3$ mm.	120
Figure IV.25. Evolution de la masse du cuivre dans le compartiment dédié en fonction de la tension appliquée pour deux espacements inter-électrodes : $g = 3$ mm et $g = 6$ mm. Conditions : $f = 350$ Hz et $n = 30$ tr/min.....	121
Figure IV.26. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre dans le compartiment correspondant en fonction de la tension appliquée. Conditions : $f = 350$ Hz et $n = 30$ tr/min.....	122
Figure IV.27. Evolution de la masse de cuivre dans le compartiment dédié en fonction de la fréquence pour deux espacements inter-électrodes : $g = 3$ mm et $g = 6$ mm. Conditions : $V = 2$ kV et $n = 30$ tr/min.	122
Figure IV.28. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre dans le compartiment correspondant en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV et $n = 30$ tr/min.....	123
Figure IV.29. Evolution de la masse de cuivre dans le compartiment dédié en fonction de la vitesse de rotation du tambour pour deux espacements inter-électrodes : $g = 3$ mm et $g = 6$ mm. Conditions : $V = 2$ kV et $f = 350$ Hz	123
Figure IV.30. Représentation schématique de deux particules de longueurs différentes pour un écartement d'électrodes $g = 6$ mm.....	123
Figure IV.31. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre dans le compartiment correspondant en fonction de la vitesse de rotation. Conditions : $V = 2$ kV et $f = 350$ Hz	124
Figure IV.32. Banc expérimental dédié à la mesure de la charge massique.	125
Figure IV.33. Charge massique acquise par les particules dans le vibro-transporteur et sur l'actionneur incliné de 10° en absence de tension électrique : (a) PVC et (b) cuivre.....	126
Figure IV.34. Charge massique mesurée avant et après le passage des particules sur l'actionneur à électro-adhésion incliné de 10° ; avec et sans tribo-chargement dans le cas du (a) PVC et du (b) cuivre.	127
Figure IV.35. Effet de l'angle d'inclinaison sur la charge massique des particules de PVC : (a) hors tension et (b) sous tension AC carrée ($V = 400$ V, $f = 300$ Hz).	128
Figure IV.36. Effet de l'angle d'inclinaison sur la charge massique des particules de cuivre : (a) hors tension et (b) sous tension AC carrée ($V = 400$ V, $f = 300$ Hz).	128
Figure IV.37. Effet du type de la tension (AC carré ou DC, avec $V = 400$ V et $f = 300$ Hz) sur la charge acquise par les particules lors du passage sur l'actionneur incliné à 10° : (a) PVC et (b) cuivre.....	129
Figure IV.38. Effet de la charge électrique initiale sur la pureté et le taux de récupération des particules de : (a) PVC dans le box de collection et (b) cuivre sur la surface de l'actionneur à électro-adhésion (angle d'inclinaison = 10°).	129

Figure V.1. Représentation schématique de l'installation expérimentale utilisée pour la caractérisation électrique des décharges induites.	133
Figure V.2. Représentation schématique des trois configurations d'actionneur.	134
Figure V.3. Montage électrique de mesure de la charge (ou du courant) et de la tension.....	136
Figure V.4. Circuit électrique équivalent du montage expérimental.....	136
Figure V.5. Forme d'onde de la tension et du courant en fonction du temps dans le cas d'une électrode plane à potentiel flottant pour une tension appliquée (a) sinusoïdale ou (b) carrée. Conditions : $V = 4000$ V ; $f = 100$ Hz.	139
Figure V.6. Forme d'onde de la tension et du courant en fonction du temps dans le cas du fil à potentiel flottant pour une tension appliquée (a) sinusoïdale ou (b) carrée. Conditions : $V = 4000$ V ; $f = 100$ Hz.	139
Figure V.7. Schémas illustrant le positionnement de la caméra par rapport aux électrodes pour les configurations de type 1 (a) et de type 2 (b).....	140
Figure V.8. Représentation schématique de la distribution de charges sans décharges électriques lors de (a) l'alternance positive et (b) l'alternance négative.	141
Figure V.9. Représentation schématique de la distribution des charges générées par les décharges surfaciques entre l'électrode à potentiel flottant et les électrodes actives : (a) pendant l'alternance positive et (b) pendant l'alternance négative.....	141
Figure V.10. Morphologie des décharges en polarités positive et négative pour la configuration de type 1 avec une tension carrée. Conditions : $V = 4000$ V ; $f = 100$ Hz.	142
Figure V.11. Morphologie des décharges en polarités positive et négative pour la configuration de type 2 avec une tension carrée. Conditions : $V = 4000$ V ; $f = 100$ Hz.	143
Figure V.12. Formes d'ondes typiques de la charge et de la tension sinusoïdale appliquée pour les cas plan-plan et fil-plan. Conditions : $V = 4000$ V ; $f = 1000$ Hz.	144
Figure V.13. Caractéristiques charge-tension de référence des actionneurs de type 1 (a) et de type 2 (b). Conditions : Tension sinusoïdale ; $V = 4000$ V ; $f = 1000$ Hz.....	145
Figure V.14. Représentation schématique des emplacements étudiés de la plaque de cuivre sur l'actionneur. (a) changement de position du côté gauche vers la position de référence (b) déplacement de la position de référence vers le côté droit.	146
Figure V.15. Caractéristiques charge-tension obtenues pour les emplacements de l'électrode active plane entre $x = -12$ mm et 0 mm. Conditions : $V = 3200$ V ; $f = 100$ Hz.	147
Figure V.16. Caractéristique charge-tension obtenues pour les emplacements de l'électrode active plane entre $x = 0$ mm et +12 mm. Conditions : $V = 3200$ V ; $f = 100$ Hz.	147
Figure V.17. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la position pour les deux signaux de tension : sinusoïdal et carré. Conditions : $V = 3200$ V ; $f = 100$ Hz.	148
Figure V.18. Caractéristique charge-tension obtenues pour différentes amplitudes de la tension appliquée ($f = 100$ Hz).....	149
Figure V.19. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension appliquée ($f = 100$ Hz).....	149
Figure V.20. Progression de la puissance moyenne consommée en fonction de la fréquence pour plusieurs niveaux de tension.....	150

Figure V.21. Caractéristiques charge-tension pour plusieurs épaisseurs de la barrière diélectrique. Conditions : $V = 4000 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$	151
Figure V.22. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension appliquée pour plusieurs épaisseurs de la barrière diélectrique ($f = 100 \text{ Hz}$).	151
Figure V.23. Représentation schématique de l'actionneur utilisé.	152
Figure V.24. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction du champ électrique réduit appliquée pour chaque actionneur ($f = 100 \text{ Hz}$).	152
Figure V.25. Variation de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension (a) et de la fréquence (b) pour le cas des deux formes d'onde de la tension.	153
Figure V.26. Comparaison de l'évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension appliquée pour les configurations fil-plan et le plan-plan ($f = 100 \text{ Hz}$)	154
Figure V.27. Distribution granulométrique en nombre pour un échantillon de particules de cuivre de 1 g.	154
Figure V.28. Forme d'onde de la tension et du courant en fonction du temps dans le cas des particules de cuivre. Tensions appliquées, (a) sinusoïdal ; (b) carré. Conditions : $V = 1400 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$. ..	155
Figure V.29. Caractéristiques charge-tension de référence des actionneurs de type 3 pour des tensions appliquées (a) sinusoïdale et (b) carrée. Conditions : $V = 1400 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$	155
Figure V.30. Schéma du positionnement de la caméra au-dessus de l'actionneur de type 3.	156
Figure V.31. Morphologie des décharges en polarités positive et négative pour la configuration de type 3 avec tension carrée. Conditions : $V = 1400 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$	156
Figure V.32. Variation de la puissance consommée par les décharges induites en fonction du rapport gw pour différentes valeurs de fréquence. Conditions : Tension appliquée carrée ; $Er = 1000 \text{ V/mm}$	157
Figure V.33. Variation de la puissance consommée par les décharges induites en fonction du rapport gw et pour différentes valeurs de champ réduit. Conditions : Tension carrée appliquée ; $f = 100 \text{ Hz}$	158
Figure V.34. Effet de la forme d'onde de la tension appliquée sur la variation de la puissance moyenne consommée en fonction du rapport gw . Conditions : $Er = 1000 \text{ V/mm}$; $f = 100 \text{ Hz}$	158
Figure V.35. Variation de la puissance moyenne consommée et le taux de récupération des particules de cuivre en fonction du rapport gw . Conditions : $Er = 1000 \text{ V/mm}$; $f = 100 \text{ Hz}$	159
Figure V.36. Evolution de la récupération des particules de cuivre en fonction de la tension et la fréquence pour le cas de l'actionneur correspondant au rapport $gw = 1$. Conditions : Tension carrée ; $Er = 1000 \text{ V/mm}$; $f = 100 \text{ Hz}$	160
Figure V.37. Variation du rapport taux de récupération / puissance en fonction de la fréquence ($gw = 1$; $Er = 1000 \text{ V/mm}$) et du rapport $gw(Er = 1000 \text{ V/mm}$; $f = 100 \text{ Hz}$) pour les deux formes d'onde de la tension appliquée	161
Figure A.1. Evolution de la force d'EA en fonction de la tension appliquée dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d_1=0.020 \text{ mm}$, $d_2=0.04 \text{ mm}$, $d_3=0.005 \text{ mm}$, $d_4=20 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1}=\epsilon_{r2}=3.5$, $\epsilon_{r3}=1$, $\epsilon_{r4}=6.4$, $g=w=1 \text{ mm}$, $L=75 \text{ mm}$	166

Liste des tableaux

Tableau I.1. Thèses soutenues au sein des équipes EFD, HTPA et ACE depuis 2012 sur les interactions champ électrique-particules	8
Tableau II.1. Valeurs g/w étudiées pour w constant.	75
Tableau II.2. Valeurs g/w étudiées pour g constant.....	75
Tableau III.1. Données géométriques des actionneurs à électro-adhésion.....	86
Tableau VI.1. Extrait d'un exemple de série tribo-électrique.	126
Tableau V.1. Dimensions des six actionneurs utilisés.	134

INTRODUCTION

Introduction

L'industrie des équipements électriques et électroniques (EEE) est un secteur en plein développement qui connaît des changements importants dans les caractéristiques des équipements, les matériaux traités, les techniques utilisées et leurs performances [1] [2]. Cette évolution se traduit par une tendance à l'augmentation de la production et des ventes d'EEE, et s'accompagne par la diminution de la durée de vie de ces équipements. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) constituent l'un des types de déchets dont la croissance est la plus rapide au monde [3]. Selon les statistiques, les DEEE représentent un volume important de matériaux de plus en plus diversifiés, dont la production mondiale est estimée à plus de 40 millions de tonnes par an [4].

La gestion adéquate des DEEE est l'une des principales préoccupations économiques et environnementales des communautés scientifiques et industrielles. Les dispositifs de gestion de ces déchets couvrent toutes les démarches qui visent à récupérer et à recycler les matériaux, en considérant les déchets comme une ressource, afin de prévenir les problèmes sanitaires et environnementaux et de préserver les ressources naturelles, en réduisant le coût de production de nombreux produits, tels que les métaux, les polymères, etc...[5]. Le recyclage des matériaux récupérés est également important du point de vue des économies d'énergie. Cette stratégie permet de conserver de précieuses réserves de pétrole, de gaz ou de charbon et de réduire la quantité de CO₂ émise dans l'atmosphère [6].

Il n'est pas difficile de recycler des DEEE propres et homogènes, mais des problèmes surviennent lorsque ces déchets sont constitués de matériaux différents. L'un de ces matériaux mixtes est le déchet des câbles électriques, qui sont composés d'un conducteur, le plus souvent un fil de cuivre, recouvert d'une enveloppe isolante en plastique (polymère). Le cuivre est le composant le plus précieux du câble, de plus il peut être recyclé facilement et réutilisé. Cependant, le recyclage des matériaux isolants du câble peut également être très intéressant [7].

Au cours de ces dernières années, plusieurs technologies de séparation mécanique et physique ont été développées pour la récupération des matériaux métal/polymère issus des DEEE, y compris les câbles électriques [7]. Ces techniques multi-étapes impliquent généralement (i) une technologie de traitement mécanique (telle que la technologie de décapage et la technologie de broyage), la séparation par ultrasons, la technologie de traitement à l'eau chaude, la technologie des jets d'eau à haute pression combinée à une technologie de séparation des particules de cuivre et de plastique, (ii) une technologie chimique (telle que la dissolution et la cimentation, la lessivage chimique ou biologique, ou la volatilisation des chlorures), et (iii) les processus de récupération d'énergie/de chaleur (tels que l'incinération et la décomposition thermique) [8] [9].

Les différences des caractéristiques physiques des matériaux non homogènes dans les DEEE, telles que les propriétés magnétiques, électriques et densimétriques sont à la base de leur séparation mécanique/physique.

Parmi les méthodes de séparation utilisées, on peut trouver le séparateur magnétique, à courant de Foucault par exemple, qui est largement utilisée pour la récupération des métaux

ferromagnétiques à partir des métaux non ferreux et autres déchets non magnétiques [10]. Selon la différence de la densité/taille/forme des matériaux, le tri peut être effectué mécaniquement par un séparateur à gravité [11], par un séparateur à gabarit, par un séparateur à table densimétrique [12] [13] [14] ou par la méthode de flottation par mousse [15]. La plupart de ces méthodes sont énergivores, coûteuses et ne permettent pas de séparer tous les types de matériaux constituant le DEEE.

Les méthodes de séparation électrostatique font aussi partie des techniques de tri et possèdent l'avantage de la faible consommation d'énergie, le faible coût d'entretien et d'exploitation, et la possibilité de séparer des produits mixtes comprenant des matériaux de plusieurs conducteurs, des mélanges conducteurs/isolants ou plusieurs isolants. Le principe de ce mode de tri consiste à manipuler les matériaux par un champ électrique intense généré par un système d'électrodes, généralement sous tensions électriques de l'ordre du kV, tout en exploitant les caractéristiques électriques de ces matériaux. Les séparateurs électrostatiques typiques sont basés sur les effets couronne et/ou triboélectrique [16] [17] [18] [19] [20]. Le contrôle des matériaux granulaires ou pulvérulents qui constituent les DEEE est liée à la charge qu'ils peuvent acquérir, avant qu'elles passent au processus de tri. Cette charge dépend de la nature et la taille des particules mais aussi le milieu avec lequel elles interagissent.

En matière de traitement des mélanges de matériaux métal/isolant, les séparateurs électrostatiques à effet couronne sont les plus utilisés. Les séparateurs à rouleau rotatif et à plaque font partie des modèles les plus étudiés dans la littérature [18] [21]. Le principe de fonctionnement de ces séparateurs consiste à appliquer un champ électrique intense afin de charger le conducteur par induction ou par effet couronne et l'orienter vers le compartiment de collecte. Pour les particules diélectriques, il s'agit soit de les faire glisser dans le cas du séparateur à plaque soit de les charger et les attirer sur la surface du tambour dans le cas du séparateur à rouleau. L'inconvénient majeur de ces deux systèmes est l'utilisation d'une décharge couronne, qui peut introduire une consommation électrique supplémentaire, des risques pour les équipements électriques et pour l'opérateur en raison du niveau de la tension appliquée. De plus, la multitude des paramètres rend difficile le contrôle de la trajectoire des particules. L'élimination de ces défauts passe sans doute par le développement de nouvelles approches de séparation, qui représente un des objectifs de cette thèse.

Parmi les autres solutions de tri électrostatique, il y a la technologie des convoyeurs électrostatiques qui ne fait pas appel à des tensions très élevées, et ne nécessite pas d'électrodes actives externes pour la génération d'une décharge couronne afin de charger et séparer les matériaux granulaires.

Les convoyeurs électrostatiques se présentent comme un moyen innovant pour le tri des particules sur des surfaces. Ils sont constitués d'un réseau d'électrodes parallèles, disposées sur une surface diélectrique et alimentées par des tensions alternatives polyphasées. Cette configuration est utilisée dans les applications du convoyeur à ondes progressives (COP) et d'actionneur d'adhésion électrostatique (AE) ou d'électro-adhésion (EA) [22] [23]. Le COP est utilisé dans la manipulation de différents types de particules dont la taille typique est inférieure à 500 μm , comme les aérosols et les particules de toner, ainsi que pour la séparation et le déplacement des particules isolantes. La technique d'EA permet le contrôle électrique de

l'adhésion de différents matériaux dans diverses applications, y compris le mécanisme d'adhésion robotisé, les interconnexions mécaniques et électriques, et les actionneurs dédiés à la manipulation des matériaux fragiles et fibreux [24].

L'électro-adhésion se manifeste par une force attractive qui apparaît lorsque les interfaces sont soumises à l'action d'un champ électrique, généré par deux couches de charges électriques de signe opposé. Le champ électrique, qui est créé par les tensions appliquées entre deux électrodes adjacentes, peut polariser ou induire des charges opposées sur la surface du matériau en contact avec le système à réseaux d'électrodes intercalées, provoquant ainsi une force d'adhésion électrostatique entre l'actionneur à EA et les matériaux sur la surface. Ainsi, l'exploitation de ce principe dans un processus de séparation permet de capter les matériaux conducteurs par les forces électriques et ne pas agir sur les matériaux isolants qui se déplacent sous l'effet des forces mécaniques. Comparé aux séparateurs classiques, le séparateur à électro-adhésion présente plusieurs avantages : une consommation électrique très faible, un niveau de tension réduit (environ 1 kV), une action importante sur des particules submillimétriques, et la possibilité de réalisation sur des supports souples, entre autres.

L'intérêt de l'industrie pour le développement des séparateurs électrostatiques justifie l'étude des phénomènes physiques déterminant le comportement des particules conductrices et isolantes sous champ électrique intense [25]. Plusieurs équipes de recherche soutiennent une activité scientifique et de transfert de technologie dans le domaine des procédés électrostatiques qui font appel à l'application d'un champ électrique sur une matière divisée. L'équipe EFD de l'institut Pprime en France et l'équipe HTPA du laboratoire LGEO en Algérie participent à ces efforts de recherche depuis une vingtaine d'années. C'est dans ce contexte, qu'une nouvelle collaboration entre ces deux équipes de recherche a vu le jour, matérialisée par la présente thèse en cotutelle. Cette collaboration a été soutenue financièrement par le programme de coopération algéro-française PROFAS B+.

L'objectif principal de cette thèse est d'étudier et d'optimiser les phénomènes d'électro-adhésion afin de les appliquer à la problématique de tri électrostatique, en particulier le cas des mélanges granulaires métal/plastique. Dans le cadre de cette étude, la stratégie d'action adoptée sur ces mélanges consiste à utiliser l'actionneur à EA afin d'agir sur les particules conductrices à l'aide de la force d'électro-adhésion d'une part, et de transporter les particules diélectriques à l'aide de la force de gravité ou de vibration mécanique. La validation de cette stratégie permettra de concevoir un nouveau prototype de séparation basé sur l'utilisation du système d'électrodes intercalées. Cette thèse est la première au niveau des deux équipes qui se focalise sur l'utilisation d'un actionneur d'adhésion électrostatique pour la séparation d'un mélange de matériaux métal/plastique.

Dans le **chapitre I**, une synthèse bibliographique sur les principaux travaux de recherche destinés à la manipulation des particules par champ électrique sera exposée. La première section présente les modes de traitement des particules répartis sur trois gammes de tailles. La deuxième section passe en revue les investigations effectuées sur les applications des systèmes à réseaux d'électrodes intercalées pour l'entraînement des particules sur une surface et l'électro-adhésion de matériaux conducteurs et isolants. La troisième partie est consacrée au positionnement des

nouveaux défis scientifiques et techniques de la séparation électrostatique métal/polymère par la méthode d'électro-adhésion auxquels la thèse souhaite répondre.

Le **chapitre II** sera consacré à l'étude de la force électrostatique qui est responsable du comportement des particules conductrices et diélectriques sur la surface de l'actionneur d'adhésion électrostatique. L'analyse de ce phénomène consiste à utiliser des modèles analytiques et numériques dans le but de définir l'effet de la force d'électro-adhésion sur chaque type de matériau en fonction des paramètres électriques et géométriques. Les résultats obtenus permettront de déduire l'applicabilité de cette technique dans un procédé de séparation électrostatique.

Dans le **chapitre III**, l'influence des paramètres électriques et géométriques sur l'adhésion-électrostatique d'un mélange sera étudiée expérimentalement en utilisant un actionneur à EA (AEA) fixé sur un plan rotatif à 180°. Le but consiste à déterminer, séparément, les interactions de chaque matériau (métal et / ou polymère) avec les forces générées par l'AEA, avant de passer à l'application de la séparation électrostatique qui sera traitée dans le chapitre IV. La connaissance de l'effet des paramètres électriques et géométriques permettra de contrôler l'efficacité de l'électro-adhésion sur les matériaux à trier.

Le **chapitre IV** précise les solutions techniques qui conduisent à la conception et à la réalisation d'un dispositif de tri électrostatique. Deux montages expérimentaux ont été réalisés afin d'étudier le processus de tri électrostatique d'un mélange provenant de déchets de câbles électriques contenant du cuivre et du PVC. Le premier banc est un démonstrateur dans lequel l'AEA est fixé sur un plan incliné vibrant. L'étude de cette installation se base sur l'exploitation des paramètres optimaux obtenus dans le chapitre III, afin de les appliquer au procédé de séparation. Le deuxième banc est un dispositif de séparation à tambour rotatif avec un actionneur à EA de forme cylindrique. Cette conception assure une sélection continue et autonome des matériaux et ne nécessite pas l'intervention d'un opérateur pour récupérer les particules de cuivre collées sur la surface de l'AEA cylindrique. L'étude de ces deux bancs est organisée en deux sections. La première est dédiée à la description d'une des deux installations expérimentales et de son protocole, tandis que la deuxième est consacrée à l'analyse des résultats obtenus.

Lors de la manipulation de particules de cuivre par un actionneur d'adhésion électrostatique, sous des tensions électriques élevées (> 2 kV), des décharges électriques indésirables peuvent être observées. Le **chapitre V** porte sur la caractérisation de ces décharges électriques et leur impact sur le processus d'électro-adhésion. Plus précisément, l'étude se focalisera sur les mesures qui caractérisent ces décharges au-dessus de trois actionneurs modèles. Il s'agit du courant de décharge, la charge transférée et la puissance électrique consommée. De plus, l'analyse de la morphologie des décharges à partir des images rapides et intensifiées permettra de mieux comprendre leurs activités au-dessus des actionneurs. Les effets de la présence des décharges induites sur le mécanisme d'adhésion électrostatique seront évalués dans la dernière partie de ce chapitre en utilisant le banc à plan rotatif.

Les principales contributions menées par la présente thèse dans le domaine du tri électrostatique, mais aussi les perspectives ouvertes par ce travail, seront discutées dans la **conclusion générale** pour clôturer ce mémoire.

CHAPITRE I

Etat de l'art

Chapitre I

Etat de l'art

Ce premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'utilisation des procédés électrostatiques pour la manipulation des particules de différentes tailles par champ électrique. La première section traite les modes de manipulation des particules répartis sur trois gammes de tailles. Pour chaque gamme, nous présenterons les principes physiques des dispositifs de manipulations de particules développés par les chercheurs de l'Institut Pprime (Université de Poitiers) et du laboratoire LGEO (USTO-MB) en collaboration avec le laboratoire APELEC (UDL-SBA). Dans la deuxième section, nous passerons en revue les principales investigations de la littérature sur les applications utilisant un système de réseaux d'électrodes intercalées, soit pour la manipulation des particules sur une surface, ou alors pour l'électro-adhésion d'objets avec une surface conductrices ou isolantes. La dernière section de ce chapitre portera sur le positionnement de la problématique de cette thèse en détaillant les principaux objectifs.

I.1. Interaction entre particules et champ électrique

La manipulation des particules a fait l'objet de nombreuses études pour diverses exploitations dans les applications industrielles. Travailler sur des nouvelles méthodes, moins coûteuses et plus efficaces pour classer, contrôler et déplacer des particules est considéré comme un sujet d'actualité dans le domaine de la recherche et développement. Les techniques électrostatiques qui sont basées sur l'application d'un champ électrique pour manipuler les mélanges de particules, composés de produits isolants, conducteurs ou mixtes, se présentent comme une solution efficace et avantageuses par rapport aux méthodes mécaniques [26]. L'utilisation du champ électrique peut être intéressante, car elle peut servir à donner des charges électriques à un matériau isolant, mais aussi à créer des interactions avec des particules (conductrices ou isolantes) qui se manifestent par des forces contrôlables capables d'entraîner ces particules. Habituellement, pour agir sur une particule, il suffit de la soumettre à un fort champ électrique généré entre deux électrodes, une reliée à une source de haute tension et l'autre à la masse [17][27].

Ce concept simple fait en sorte que les méthodes électrostatiques sont très évolutives et modulables aux différentes applications sur des échelles variées. Ces méthodes peuvent être utilisées pour la manipulation des particules dans les microsystèmes fluidiques, comme dans les systèmes de précipitations et de séparations industriels [17]. Contrairement aux méthodes mécaniques, qui demande des couts élevés d'entretien, de maintenance et d'exploitation, les installations électrostatiques sont reconnues par leur faible consommation énergétique, à cause du faible courant de fonctionnement qui est généralement de l'ordre du milliampère voire du microampère [26].

Dans le but d'assurer un traitement efficace et d'exploiter la force de Coulomb en présence d'un champ électrique, les matières particulaires et granulaires doivent porter une charge électrique. Il est également possible de manipuler des particules électriquement neutres

ou très faiblement chargées par la force diélectrophorétique [28][29]. Cette force peut être suffisamment importante lorsque les particules et le milieu environnant ont des propriétés diélectriques très différentes [30].

Les procédés d'interactions particules/champ électrique font partie des thématiques de recherches de l'équipe Electro-Fluido-Dynamique (EFD) à l'institut Pprime, mais également des équipes Haute Tension et Plasma Appliquée (HTPA) au laboratoire LGEO et Application du Champ Electrique (ACE) au laboratoire APELEC. Ces dernières années, plusieurs thèses ont été soutenues au sein de ces équipes sur des sujets qui traitent des particules et granules selon les gammes de tailles suivantes : 6 nm -10 μm , 10 μm -500 μm et 500 μm -10 mm. Le travail présenté dans cette thèse s'intéresse au contrôle des particules dans la gamme de taille 500 μm -10 mm par le champ électrique généré au voisinage d'un système d'électrodes interposées.

Tableau I.1. Thèses soutenues au sein des équipes EFD, HTPA et ACE depuis 2012 sur les interactions champ électrique-particules

Gamme de taille	Thèse	Sujet	Année
6 nm – 10 μm	R. Gouri	Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré. Application aux particules submicroniques.	2012
	D. Raouti	Contribution à l'étude de la dépollution des gaz toxiques par décharges électriques.	2015
	A. Fatihou	Amélioration des performances des matériaux fibreux non-tissés chargés par décharge couronne utilisés pour la filtration de l'air.	2016
10 μm – 500 μm	I. N. Mahi	Utilisation de l'instrument virtuel dans des dispositifs électrostatiques.	2018
	A. Zouaghi	Manipulation de particules diélectriques micrométriques par ondes électrostatiques progressives et stationnaires - Études théorique, expérimentale et numérique.	2019
	A. Belgacem	Etude du déplacement et de la séparation des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles	2020
500 μm – 10 mm	S. Messal	Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire.	2016
	A. Mekhalef Benhafssa	Etude d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux.	2017
	G. Richard	Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires.	2018

Le Tableau I.1 représente quelques travaux de thèses réalisées durant ces dernières années, au sein des équipes EFD, HTPA et ACE, selon la gamme de tailles des particules. Nous présentons au cours de cette première section du chapitre, une synthèse des travaux relatifs à chaque gamme de tailles des particules.

I.1.1. Particules de la gamme 6 nm-10 μm

La gamme de taille 6 nm-10 μm représente les matières particulaires en suspension dans l'air. Nommé encore aérosols, les particules solides ou liquides qui se trouvent en suspension dans un milieu gazeux présentent une vitesse de chute souvent négligeable [31]. Les sources d'émissions de ces aérosols sont très nombreuses et sont principalement liées aux activités humaines [32]. Il y a deux espèces de particules ; on distingue les particules d'origine naturelle qui peuvent être minérales (aérosols du sels marins, poussières volcaniques,...) ou organiques (bactéries, acariens, moisissures, pollen, fibres végétales,...)[33], et les particules originaires des émissions anthropiques de polluants comme la combustion industrielle, les feux de cheminés, les incinérateurs, le ciment, et les moyens de transport, etc...[34]. Les particules sont classées selon leurs caractéristiques physiques et chimiques, ou selon les effets qu'elles induisent sur la santé, ou encore suivant les méthodes utilisées pour les définir, entre autres [35][36]. La taille des particules est le paramètre le plus important pour caractériser le comportement des aérosols [37]. Dans le cadre de la pollution environnementale, on distingue généralement les granulométries suivantes : les PM10 (Particulate Matter), les PM2.5, les PM1 et les PM0.5. Les PM10 (particules grossières) sont des particules dont le diamètre aérodynamique moyen est inférieur à 10 μm . Alors que les PM2.5, PM1 et PM0.1 sont respectivement des particules dont le diamètre n'excède pas 2,5 μm (particules fines), 1 μm (particules très fines) et 0,1 μm (particules ultrafines ou nanoparticules) [26].

Parmi les principales techniques de filtration de l'air destinées à la diminution des problèmes liés à la pollution atmosphérique, notamment dans le secteur industriel, il y a les systèmes de précipitation électrostatique (ou électrofiltres). Leurs principes de fonctionnement consistent à exercer des forces électrostatiques pour collecter les particules présentes dans un gaz [17]. Il s'agit d'appareils constitués d'un ensemble d'électrodes émissives alimentées en haute tension et d'électrodes collectrices connectées à la masse [31]. Les électrofiltres peuvent présenter différentes géométries, les plus classiques sont de type : plan/plan, fil/plan ou encore fil/cylindre [38]. La décharge générée dans ces dispositifs produit des ions par attachement des électrons libres aux molécules du gaz. Les particules se chargent par les collisions avec les ions générés et se dirigent vers les électrodes collectrices suivant la direction du champ électrique appliqué. Les particules collectées sont enlevées par lavage, grattage, frappage ou vibration ultrason [38]. L'air sortant contient alors moins de particules en suspension. C'est le principe de la précipitation électrostatique [39]. Les filtres électrostatiques, développés au sein des équipes impliquées dans cette thèse, peuvent être qualifiés selon le mode utilisé pour charger les particules. Il y a deux catégories : les électrofiltres à décharge couronne [40][41][42][43][44] et les électrofiltres à barrière diélectrique [37][45][46]. Un autre mode de filtration qui utilise des médias fibreux chargés par décharge couronne a été également étudiée au sein de l'équipe EFD [47].

I.1.1.1. Electrofiltre avec décharge couronne

L'électro-filtration à décharge couronne est une technologie employée depuis plusieurs décennies dans le domaine industriel. L'efficacité de ce système est extrêmement élevée, notamment pour les particules micrométriques et sub-micrométriques là où d'autres systèmes sont peu efficaces [48]. Généralement, un précipitateur électrostatique utilise une tension négative de quelques dizaines de kV. La décharge couronne est typiquement créée au moyen de deux électrodes dont l'une a un faible rayon de courbure [49]. La géométrie typique de ces électrodes est fil/cylindre ou fil/plan [39]. Hormis la forme géométrique de l'électrode collectrice du filtre électrostatique à décharge couronne, on distingue deux types de dispositifs : les électrofiltres à un seul étage et les électrofiltres à deux étage [50][51]. Dans les systèmes à un seul étage, la charge et la collecte des particules sont réalisées simultanément sur toute la longueur de l'électrofiltre. Les systèmes d'électrofiltrations à double étage sont équipés d'un premier étage dans lequel les particules sont chargées suivi d'un deuxième étage responsable de la migration et de la collecte des particules initialement chargées. Le schéma de la Figure I.1 représente un électrofiltre réalisé par l'équipe EFD en collaboration avec l'Institut National de la Recherche Agronomique (INARA) dans le cadre d'un projet de traitement des particules ligno-cellulosiques [26].

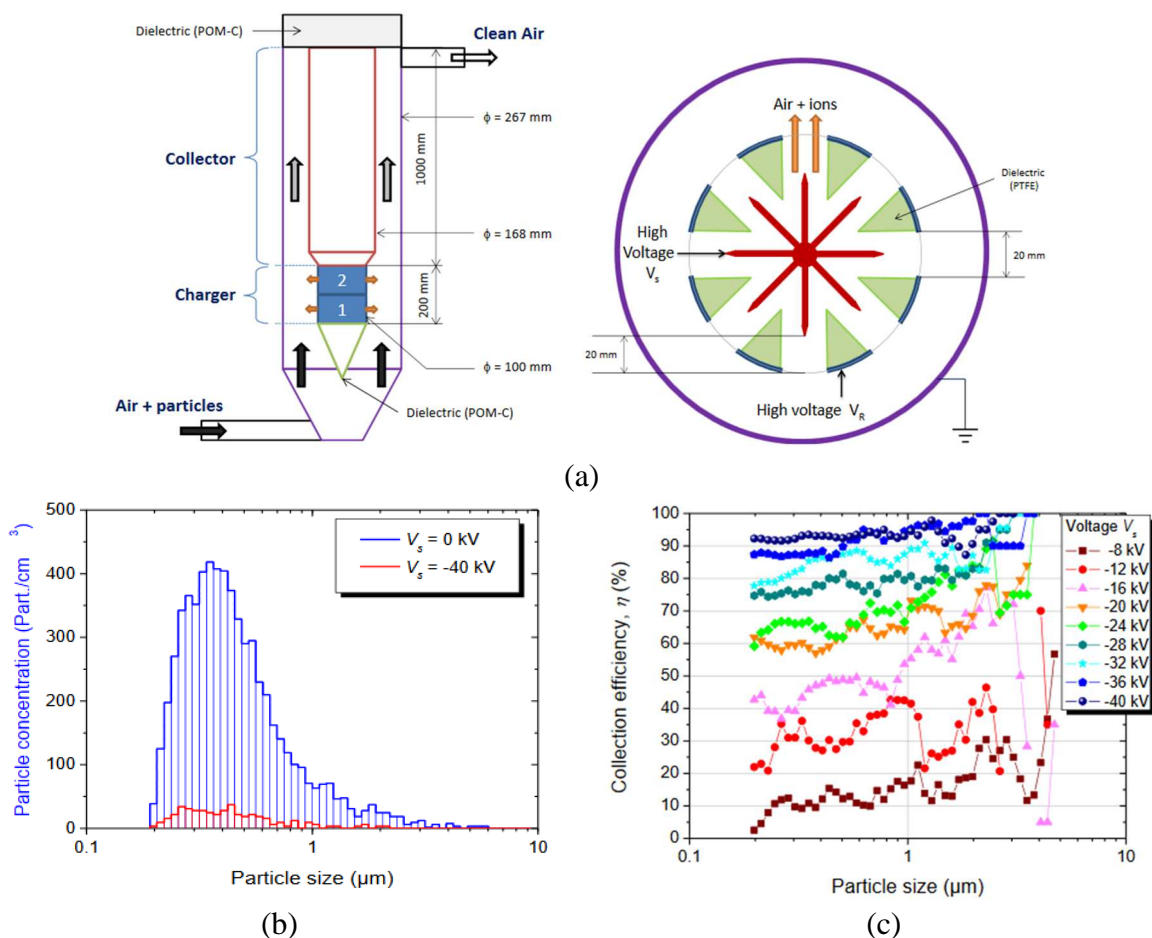


Figure I.1. (a) Représentation schématique d'un électrofiltre à deux étages, avec une vue de coupe du chargeur. (b) Répartition de la taille des particules à la sortie de l'électrofiltre avec et sans décharge couronne. (c) Evolution de l'efficacité fractionnelle de collecte en fonction de la taille des particules pour plusieurs tensions appliquées [40].

La spécificité de cet électrofiltre est que la zone de production des ions n'interfère pas avec les particules [26]. En effet, les ions sont générés à l'intérieur du chargeur de type triode, puis ils sont transportés dans le canal dédié au passage des particules par le biais d'un écoulement d'air propre [40]. Cette configuration a comme objectif d'éliminer le risque d'explosion des particules qui peut se produire au contact d'une décharge électrique. Les résultats de la Figure I.1 montrent la variation de l'efficacité de collection sur l'électrofiltre en fonction de la taille des particules qui varie de 0,2 à 6 μm pour différentes valeurs de tension. La production des ions est améliorée avec l'élévation de la tension, donc le mécanisme de charge des particules progresse et conduit à l'augmentation de l'efficacité de collecte.

I.1.1.2. Electrofiltre avec chargeur DBD

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) limitent le passage à l'arc causé par les accumulations de charges électrique grâce à la présence d'au moins une couche de matériau diélectrique disposée sur ou entre les deux électrodes [52]. La DBD est bien connue pour sa capacité à produire des plasmas hors-équilibre à pression atmosphérique. L'avantage principal des DBD est leur simplicité de mise en œuvre pour une large gamme de condition de fonctionnement y compris les applications de dépollution de l'air [53]. L'une des premières applications de la DBD dans le domaine de la précipitation électrostatique était dans un électrofiltre à deux étages [46]. Les DBD ne peuvent fonctionner qu'avec une alimentation alternative ou pulsée, car une fois les diélectriques polarisés, le champ électrique est bloqué [54]. Il existe deux grandes familles de décharge à barrières diélectriques : les décharges de volume et les décharges de surface [55][56]. Pour une décharge de volume, le plasma traverse un intervalle compris entre deux surfaces séparées par un gaz. Parmi les géométries utilisées, il y a les configurations fil-cylindre, fil-plan-plan et fil-tube carré en simple et double barrière diélectrique [46]. Dans une décharge de surface, les électrodes sont situées sur le même diélectrique et le plasma se propage alors dans le gaz, le long de ce diélectrique [57]. Les électrofiltres DBD ont été proposés comme une solution pour s'affranchir de quelques inconvénients des électrofiltres classiques à haute tension continue. Par exemple, dans l'air à pression atmosphérique, le problème des électrofiltres à décharge couronne est la formation d'importante charge d'espace qui peut conduire à l'apparition d'arc, ce qui présente un danger à la fois pour l'opérateur et pour l'installation électrique. A cela s'ajoute la difficulté des électrofiltres classiques à collecter efficacement les particules de la gamme de taille comprises entre 0,1 μm et 1 μm [45][58]. Un des avantages des électrofiltres à DBD est la possibilité de les rendre auto-nettoyant [59]. Cette solution a été confirmée par l'équipe EFD avec l'utilisation d'une DBD nano-pulsée pour le nettoyage des dépôts de particules diesel [46].

La Figure I.2 présente une configuration typique d'un « électrofiltre DBD fil – tube carré » ainsi que l'évolution de l'efficacité de collecte qui le correspond en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la tension appliquée. Il a été démontré que les performances de l'électrofiltre augmentent avec la tension et dépendent de la gamme de fréquence utilisée [37][45]. En effet, l'efficacité de collecte est généralement faible pour des valeurs de fréquence inférieures à 1 Hz ou supérieures à 100 Hz. A basse fréquence (< 1 Hz), l'efficacité de collecte est faible en raison du fonctionnement intermittent de la décharge [58]. Ainsi, entre deux demi-périodes consécutives, la décharge s'arrête pendant un laps de temps

très bref, équivalent au temps de résidence des particules dans l'électrofiltre [60]. De ce fait, pendant le transit dans la zone active, une partie des particules n'est pas du tout ou pas assez chargée. A haute fréquence (>100 Hz), les phénomènes responsables de la chute de l'efficacité de collecte sont de nature différente. En effet, l'amplitude maximale que peut atteindre le mouvement oscillatoire d'une particule d'une alternance à l'autre diminue, alors les particules oscillent entre les électrodes sans pouvoir être collectées [60].

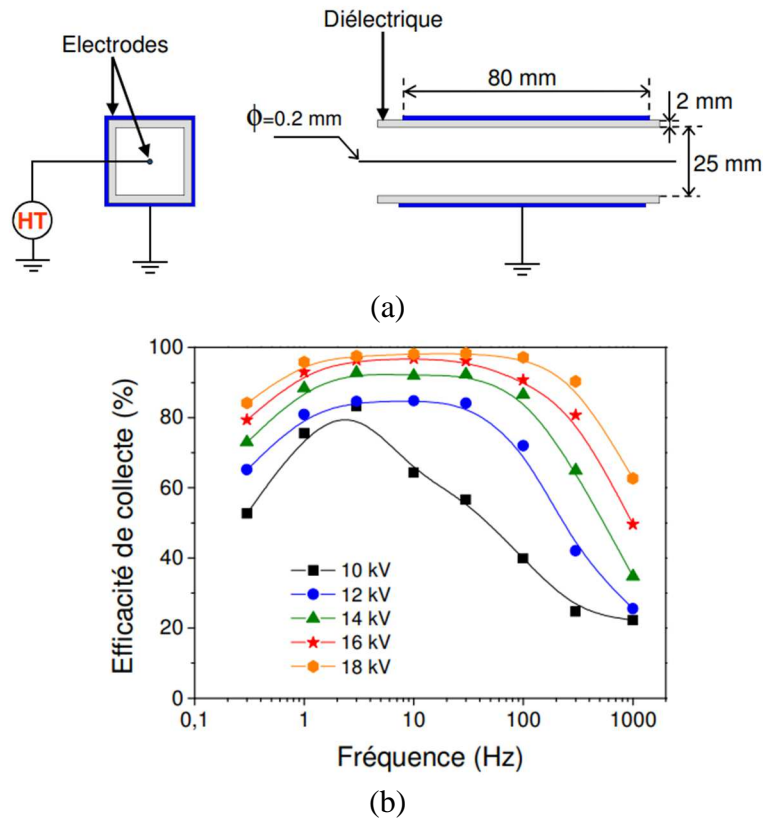


Figure I.2. Electrofiltre DBD de type fil – tube carré. (a) Représentation schématique et (b) Efficacité de collecte en fonction de la fréquence [45].

Les résultats d'une étude comparative entre les configurations fil-tube carré et fil-cylindre ont montrés que le comportement des deux électrofiltres est très proche, par contre la comparaison a permis aussi de déduire que l'efficacité de la configuration carrée est meilleure à fréquence fixe pour des tensions élevées [45].

I.1.1.3. Médias fibreux non-tissés chargés par décharge couronne

Pour améliorer la qualité de l'air des espaces fermés ventilés ou climatisés, comme c'est le cas de l'habitacle d'un véhicule, il est nécessaire d'utiliser des médias filtrants avec un taux de pénétration limité pour laisser passer l'air [61]. De ce fait, l'amélioration de l'efficacité des filtres d'air a été et reste une préoccupation majeure pour l'industrie automobile. Depuis quelques années, la communauté scientifique s'intéresse au développement des systèmes de filtration d'air utilisant des médias fibreux non-tissés à électret chargé par décharge couronne [62]. Ces filtres utilisent des médias non tissés en grande majorité, compte tenu de leur qualité et de leur faible coût de fabrication comparé aux médias tissés [46]. Les matériaux fibreux non tissés sont souvent constitués de fibres en polymère. L'efficacité de collecte des particules par

les fibres correspond principalement aux actions mécaniques de capture (l'interception directe, l'impaction inertielle, la déposition par diffusion) [63]. Dans le but d'améliorer la qualité de filtration, il y a la méthode de chargement électrique des fibres par effet couronne pour capter les particules fines, de taille submicronique et les piéger sous l'effet de la force de Coulomb et la force diélectrophorétique. Dans leurs contributions dans ce domaine de recherche, Tabti [61] et Fatihou [47] ont utilisé le système montré sur la Figure I.3.a. pour la génération des charges et la mesure du potentiel de surface. Dans ce système, l'échantillon filtrant non-tissé est chargé électriquement par décharge couronne avec une configuration d'électrodes de type triode. Le procédé consiste à placer une grille entre l'électrode portée à la haute tension (Dual fil-cylindre) et l'électrode de forme plane mise à la masse sur laquelle le média fibreux est déposé. La mise en place de la grille permet d'améliorer et de contrôler le dépôt des charges électriques. La Figure I.3.b représente le schéma de l'installation expérimentale utilisée pour les tests de l'efficacité de filtration des particules [64].

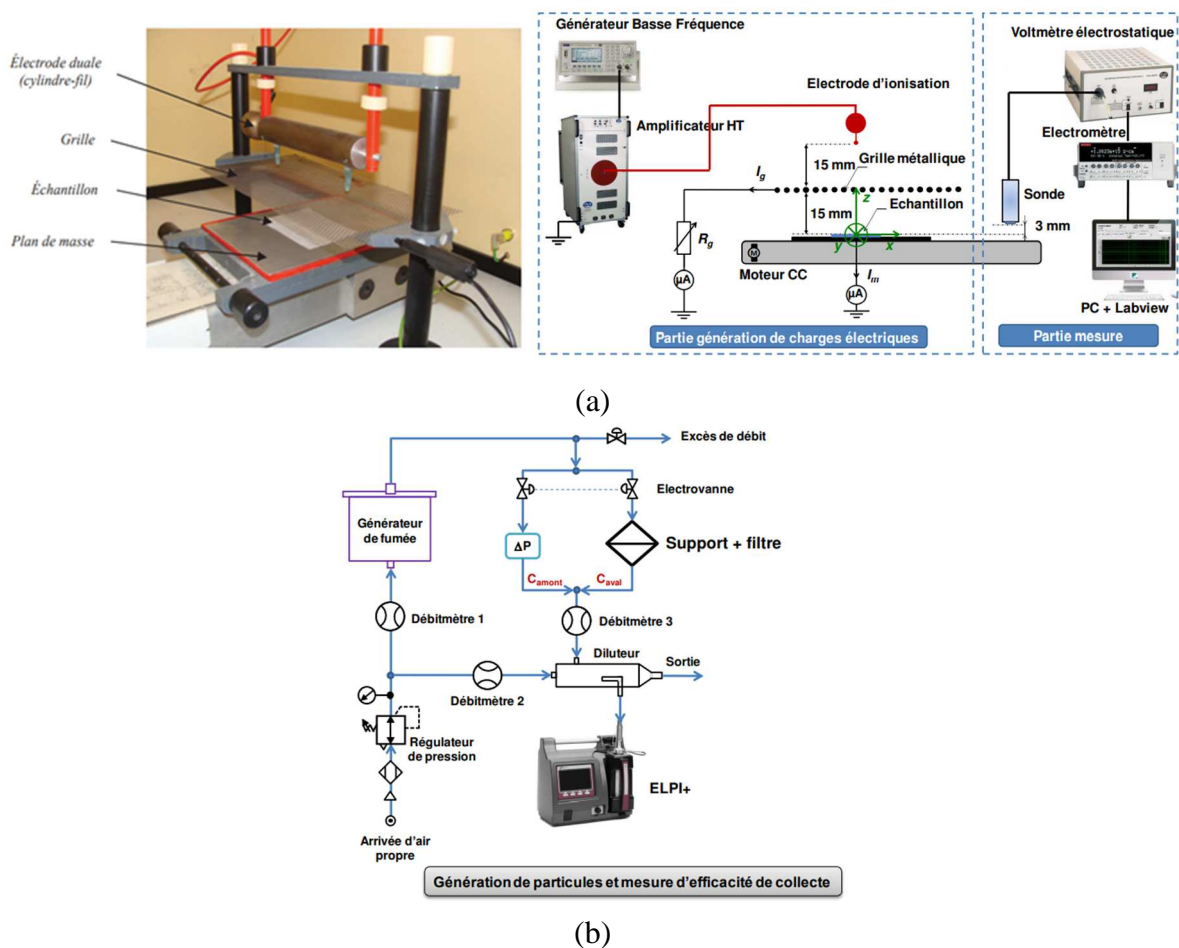


Figure I.3. (a) Photographie et schéma du système de charge par décharge couronne (forme triode).
(b) Schéma du montage de mesure de l'efficacité de la collecte [47][61].

La Figure I.4.a illustre un exemple typique de la courbe d'efficacité de collecte fractionnaire avec et sans chargement électrique du média, dans le cas de la polarité positive. Les résultats montrent clairement l'influence du dépôt de charges sur la filtration des particules notamment dans la plage 0,1-1 μm là où le filtre mécanique n'est pas avantageux. Il est constaté alors que l'effet électrostatique s'ajoute aux mécanismes mécaniques de capture des particules,

et cet effet se contrôle principalement par la force de Coulomb et la force diélectrophorétique. Les résultats du changement de polarité des sources d'alimentation sur l'efficacité de collecte sont illustrés sur la Figure I.4.b. Ils montrent que la performance de la polarité positive en termes d'efficacité de collecte est importante par rapport à la polarité négative [47].

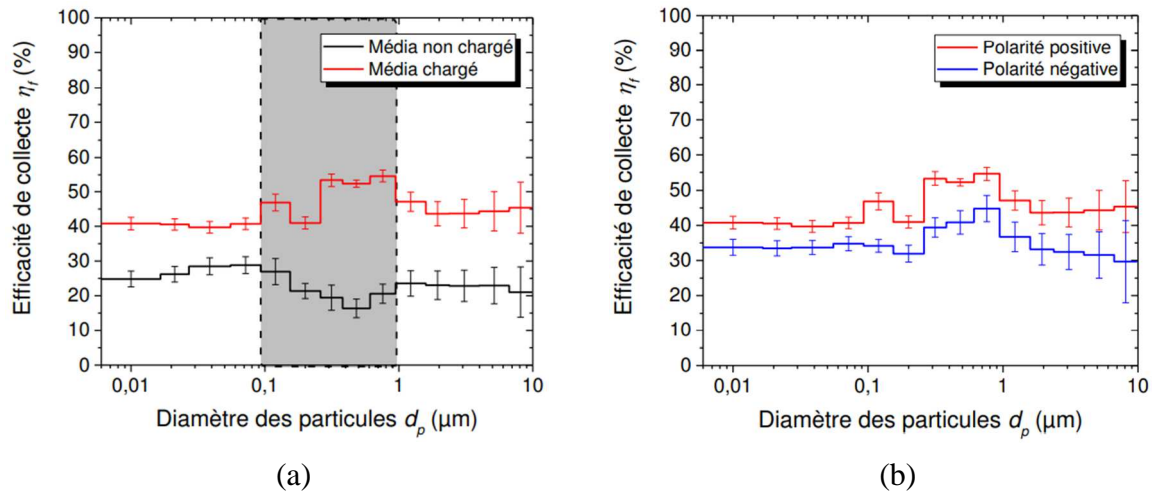


Figure I.4. Efficacité de collecte sous l'influence de (a) la charge et (b) la polarité [47].

I.1.2. Particules de la gamme 10 μm -500 μm

Dans cette gamme de taille, la force de gravité devient suffisamment importante pour que les particules chutent et ne restent pas en suspension dans l'air [26]. L'accumulation de ces particules sur des surfaces peut créer des problèmes dans certains secteurs d'activité. Par exemple, dans le cas des panneaux photovoltaïques, la déposition et l'accumulation des particules polluantes et de sable réduit considérablement leur rendement énergétique [65][66]. Transporter ou classer des particules par un champ électrostatique périodique progressif a fait l'objet de nombreuses applications, comme par exemple le déplacement des particules de toner dans l'électro-photographie [67][68]. Les équipes EFD et HTPA s'intéressent depuis quelques années à l'utilisation du champ électrique variable pour la manipulation des particules de taille 10 μm - 500 μm [26][69][70].

Les interactions particules / champ électrique sont générées par l'intermédiaire d'un dispositif nommé convoyeur à ondes progressives ou stationnaires comme montré sur la Figure I.5.



Figure I.5. Schéma typique d'un convoyeur à ondes stationnaires.

Il s'agit d'une série d'électrodes intercalées et écartées régulièrement, fixées sur un support diélectrique, et recouverte par une couche de matériau isolant. Le réseau d'électrodes est alimenté par des tensions alternatives polyphasées avec un déphasage adéquat. La conception et la distribution des électrodes de ce dispositif diffèrent selon le type de particules et l'application. La configuration typique comporte des électrodes rectilignes et parallèles, qui apparaissent sous la forme de peignes interposés (Figure I.5).

Proposée pour la première fois par Tatom *et al.* [71] puis développée par Masuda *et al.* [72], la technique des ondes progressives appelée aussi rideau électrique (Electric curtain), a été employé dans le transport et la manipulation des particules fines. Parmi les conceptions de base des rideaux électriques qui sont apparus dans les premières études, on peut trouver les formes suivantes : type plan (Figure I.6.a), type cage (Figure I.6.b) et type anneau (Figure I.6.c) [22].

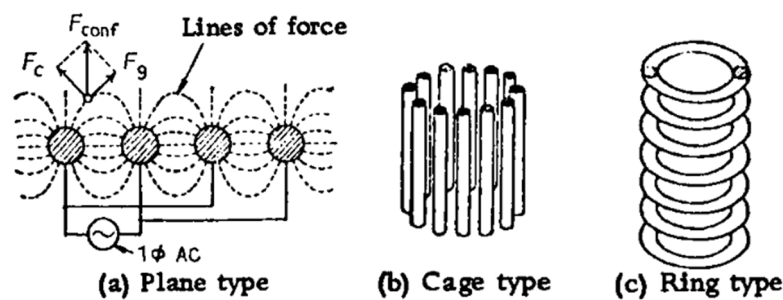


Figure I.6. Les formes basiques des rideaux électriques [22].

Selon les tensions alternatives appliquées, les rideaux électriques peuvent être classés en deux catégories. Lorsque le système est alimenté par une tension biphasée, on parle d'un convoyeur à ondes stationnaires. Mais lorsque les tensions appliquées sont polyphasées (triphasées ou plus), on est dans un cas de convoyeur à ondes progressives [22]. La Figure I.7 représente un modèle de rideau électrique à ondes progressives de type plan destiné à la collecte électrostatique des poussières [72].

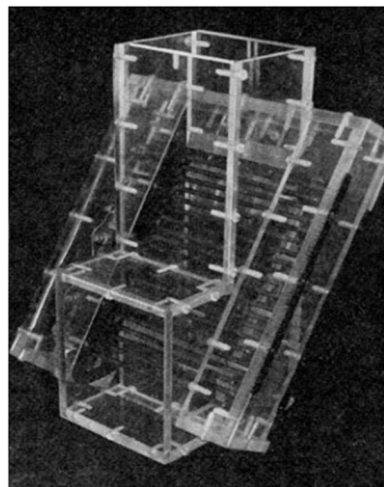


Figure I.7. Collecteur de poussière à rideau électrique plan [73].

Mazumder *et al.* [74], et, Calle *et al.* [75] ont mis respectivement en avant le concept de l'écran électrodynamique (Electrodynamique Screen) et le bouclier anti-poussière électrodynamique (Electrodynamic Dust Shield ou EDS) flexible basé sur la technologie de rideau électrique, et ont étudié l'efficacité de dépoussiérage lunaire et martien sur les surfaces des équipements d'exploration, des combinaisons spatiales et des systèmes optiques.

En plus de la manipulation des particules de toner [22][76] et les dépôts d'aérosols [77], cette technique a également été employée dans le domaine de la chimie et le biomédicale, soit pour le mouvement et la séparation des cellules [78], soit pour manipuler les poudres pharmaceutiques [79]. Elle est utilisée aussi dans le développement des systèmes micro-électromécaniques (MEMS) [73][80]. Ces dernières années, de nombreux travaux de recherches ont été rapportés sur l'utilisation des systèmes à ondes progressives pour le dépoussiérage des panneaux solaires dans des conditions terrestres et spatiales [81][82][83]. L'avantage de cette technologie réside dans le fait que le transport des particules est assuré par les forces électrostatiques sans avoir besoin d'effets des vibrations mécaniques ou de bruit acoustique.

Nous abordons dans les paragraphes suivants, une revue bibliographique sur des travaux basés sur la technique des convoyeurs électrostatiques utilisée dans la manipulation des particules sur une surface diélectrique par ondes progressives et stationnaires. Vu la diversité des technologies existantes dans la littérature, nous allons présenter principalement les systèmes utilisés pour la séparation des particules et le nettoyage des panneaux solaires.

I.1.2.1. Séparation des particules

La séparation des particules est un processus clé dans une large gamme d'applications d'ingénierie, agricoles et minières. Les méthodes de la séparation mécanique standard, telles que la centrifugation ou le tamisage, présentent de mauvaises performances pour les particules chargées, car les charges électriques provoquent l'adhésion des particules les unes aux autres ou avec les parois [84]. La technique des rideaux électriques présente une approche alternative très attractive pour la séparation des particules chargées, puisque la méthode de transport des particules est directement liée à leurs charges [84].

Une des premières applications de la technologie des ondes progressives a été développée pour contrôler le transport des particules de toner dans les photocopieuses [85]. Taniguchi *et al.* [86] ont conduit une série de travaux portés sur l'amélioration du transport du toner. Ils ont étudié l'effet de la forme d'onde de la tension et du nombre de phases, et ils ont observé le mouvement des particules par une caméra vidéo. Ils ont affirmé que la distance de transport des particules de toner chargées peut être contrôlée par le fonctionnement pas à pas des ondes rectangulaires à quatre phases. Les travaux d'Adachi *et al.* [87] ont montré que le convoyeur à ondes progressives peut être une bonne alternative au système de toner classique qui permet d'assurer une alimentation stable en toner sans qu'il y ait une adhésion forte entre le toner et le convoyeur [26].

L'application des rideaux électriques dans la séparation des particules à charges et tailles différentes a été proposée par Weiss et Thibodeaux [88] pour le tri des graines des sous-produits agricoles. Yen et Hendricks [77] ont également travaillé sur des rideaux électriques mais cette

fois inclinés et sans matériaux diélectriques, de sorte que les particules tombent à travers le rideau composé uniquement de fils.

La séparation des particules avec la technique des ondes voyageuses peut être réalisée dans un milieu liquide, dans l'air ou même sous vide. Masuda *et al.* [89] ont appliquée l'opération du tri par taille et par charge des particules en suspension dans un liquide. Sander *et al.* [78] ont examiné la possibilité de manipuler et trier des cellules biologiques dans un milieu liquide. D'autres travaux ont conduit à la création d'un séparateur de bio-particules capable de séparer des cellules vivantes d'un mélange contenant des débris cellulaires ainsi que des cellules non vivantes [70].

Une variété de technologies accompagnée par des études théoriques et expérimentales ont été décrites par Kawamoto *et al.* [68][90][91] qui utilisent les ondes électriques progressives pour la séparation et la classification des particules de toner en fonction de leurs tailles. Les auteurs ont développé cinq méthodes de séparation destinée à la classification des particules de toner dont le système à plan incliné et le système à rouleau représentés sur la Figure I.8. La méthode du convoyeur incliné (angle θ avec la position horizontale) utilise la balance entre les forces électrostatique et gravitationnelle de telle sorte que les grosses particules se déplacent en bas du rideau électrique et les petites sont transportés vers le haut. Le système rouleau exploite la suspension des particules et l'équilibre de la force de Coulomb et la force gravitationnelle. Le fonctionnement de ce système est réparti sur deux parties permettant d'avoir une très bonne performance de séparation. La première partie consiste à transporter les particules sur un convoyeur plan par les ondes progressives. La deuxième partie est consacrée à la collecte des petites particules par le rouleau chargé électriquement qui se trouve à l'extrémité du convoyeur plan. D'autres convoyeurs électrostatiques, en forme de tube incliné, systèmes centrifuge ou spirale, ont été développés pour la séparation de ces particules [69].

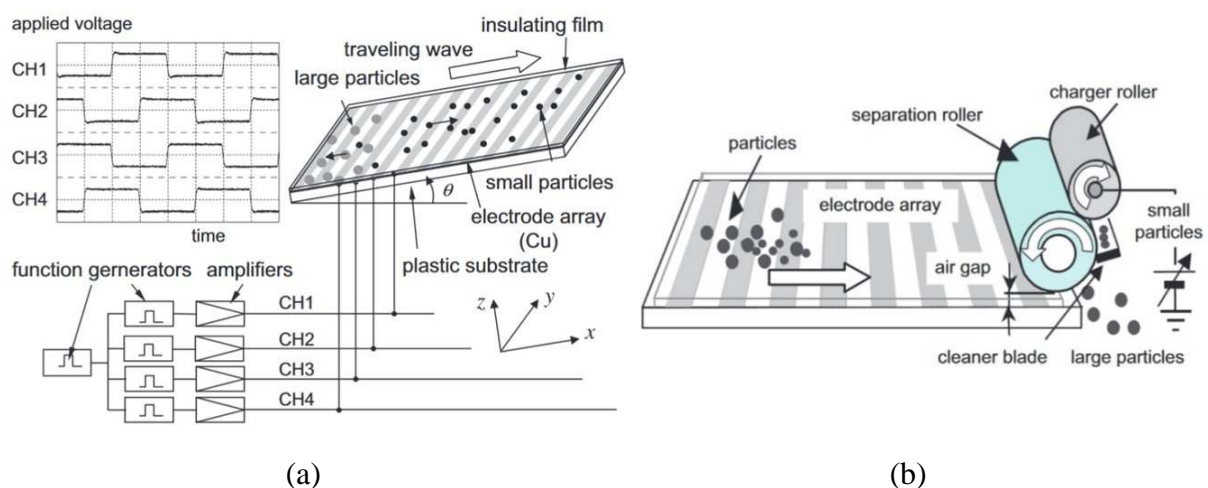


Figure I.8. Systèmes de séparation électrostatique des particules. (a) Séparateur à plan incliné et (b) système de séparation à rouleau [91].

Dans le but de réaliser des explorations spatiales à long terme sur la lune, et réduire les risques et le coût de transport des ressources depuis la terre, il est indispensable d'utiliser les ressources existantes sur la surface de la lune [92]. Cette exploitation nécessitera des processus

tels que le forage, la collecte, le stockage, le tri et le traitement chimique du régolithe lunaire (sol de la lune) pour synthétiser l'oxygène, l'eau et les métaux. Une solution de tri du sol lunaire est nécessaire. Donc, pour réaliser cette opération, Kawamoto *et al.* ont développé deux techniques de tri à ondes progressives utilisant les forces de Coulomb et de gravité, et la force diélectrophorétique [92][93]. Les deux systèmes peuvent séparer efficacement les particules de régolithe de tailles inférieures à 20 μm dans un environnement sous vide. La Figure I.9 illustre ces deux séparateurs dont le premier est appelé tamis électrostatique et le deuxième est nommé système de classification électrostatique.

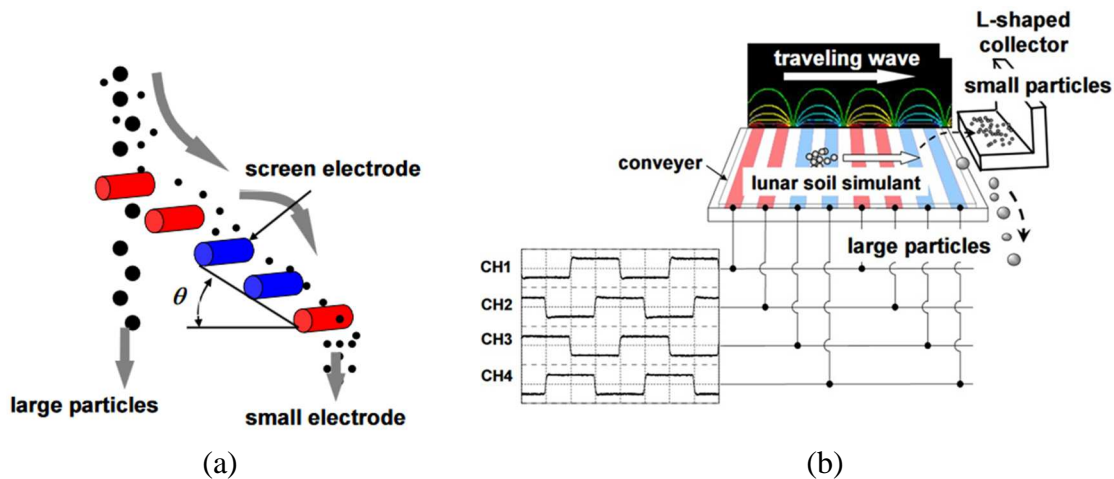


Figure I.9. Schémas des dispositifs de séparation de particules : (a) tamis électrostatique et (b) système de classification sur un plan horizontal [93].

Une fois les électrodes du tamis électrostatique sont alimentées en tension, et les particules sont fournies du côté gauche du système, les particules de grosses tailles traversent le tamis et tombent sous l'effet de la force de gravitation, alors que les plus petites sont transportées le long du tamis sous l'action des forces de Coulomb et diélectrophorétique. Le deuxième système dédié à la classification électrostatique utilise la balance entre la force électrostatique et la force gravitationnelle. Les particules sont transmises vers le côté droit du convoyeur de telle sorte que les grosses particules chutent à l'extrémité, et les plus petites sont récoltées dans le collecteur de forme « L » placé au bout du convoyeur à une hauteur donnée. Les résultats ont confirmé que les systèmes proposés ont le potentiel de réaliser la classification du régolithe lunaire sur la lune.

Plusieurs études numériques ont également été réalisées sur le déplacement de particules par ondes progressives. Zouaghi [94], Gartstein et Shaw [95] et Kawamoto *et al.* [90] ont étudié le mouvement des particules non-adhésives sur un rideau électrique. Un modèle de sphère dure basé sur la méthode des éléments discret a été développé pour déterminer la dynamique des particules. La construction du modèle peut prendre en compte les collisions entre deux particules sans contact avec la surface diélectrique. Pour confirmer le modèle, les résultats ont été comparés avec des expériences portées sur la mesure de la charge et le déplacement des particules.

Une autre méthode de discrétisation à sphère souple a été développée par Liu et Marshall [96] afin d'étudier le mouvement des particules adhésives sur le rideau électrique. La

construction du modèle peut prendre en compte les collisions impliquant deux ou plusieurs particules qui peuvent également toucher la surface diélectrique. Cette méthode a été utilisée pour examiner les effets de la collision et de l'adhérence des particules durant le transport sur un rideau horizontal et a ensuite été appliquée pour étudier le mouvement des particules sur un rideau électrique à ondes stationnaires [84].

I.1.2.2. Dépoussiérage des panneaux solaires

Les dépôts de pollutions sur les panneaux photovoltaïques et les concentrateurs thermiques sont une préoccupation technologique majeure pour garantir un bon rendement énergétique. Assurer un auto-nettoyage avec les méthodes électrostatiques a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Dans des conditions terrestre ou spatiale, les moyens d'enlèvement des poussières peuvent être classés en quatre catégories : naturel, mécanique, électromécanique et électrique [91]. Sur Mars par exemple, le moyen d'enlèvement naturel est le vent. La catégorie mécanique consiste à nettoyer physiquement la surface, par essuyage mécanique, ou soufflage, ou encore à la protéger par un couvercle amovible. Les moyens électromécaniques peuvent être des vibrations ou l'utilisation de sons ou d'ultrasons pour briser l'adhésion des particules. Le moyen le plus simple d'enlèvement électrique est la méthode électrostatique, qui ne nécessite aucune pièce en mouvement [80]. Dans les prochains paragraphes, nous présenterons les principaux travaux de nettoyage électrostatique dans des environnements terrestres et extra-terrestres [97].

a) Nettoyage des panneaux solaires dans les conditions d'espace

L'espace au-dessus de la surface de la lune est imprégné d'une quantité massive de particules de poussière fines. Dans un environnement de faible gravité, de champ magnétique nul et de vide poussé, ces particules de poussière peuvent flotter jusqu'à des milliers de mètres pendant des mois. Les particules de poussière en suspension absorbent une partie notable du rayonnement solaire ce qui les charge électriquement [98]. Les minuscules particules de poussière peuvent se déposer et se fixer sur les surfaces exposées d'un appareil mobile, ce qui pose des problèmes pour l'exploration de la surface lunaire. Les explorations spatiales sur Mars ont montré que l'obscurcissement des panneaux solaires est dû au dépôt de poussière qui présente un taux de 0.15% par jour [99]. L'adhésion de poussière sur un panneau solaire peut provoquer une perte de 16 % de la puissance de sortie, telle que mesurée lors de la mission Survey 3 [100].

Dans une étude expérimentale, Shahmoradi *et al.* [101] ont simulé l'effet de la déposition de la poussière lunaire et martienne sur la surface d'un panneau solaire. Les résultats indiqués sur la Figure I.10 montrent que la puissance générée devient égale à zéro lorsque toute la surface du panneau est recouverte par ces poussières. De plus, la poussière peut entraîner des problèmes d'imagerie, de fausses lectures d'instruments et une défaillance du contrôle thermique, entre autres [100].

Il a été nécessaire d'examiner les moyens possibles pour éliminer et/ou éviter les dépôts de poussières sur les panneaux solaires, qui sont généralement la principale source d'énergie pour les missions lunaires et martiennes. Afin de surmonter ce problème, Call *et al.*, Atten *et al.* ont développé le concept de l'EDS pour éliminer la poussière accumulée sur les modules

photovoltaïques dans des conditions expérimentales permettant de simuler les environnements lunaires et martiens [98][102][103].

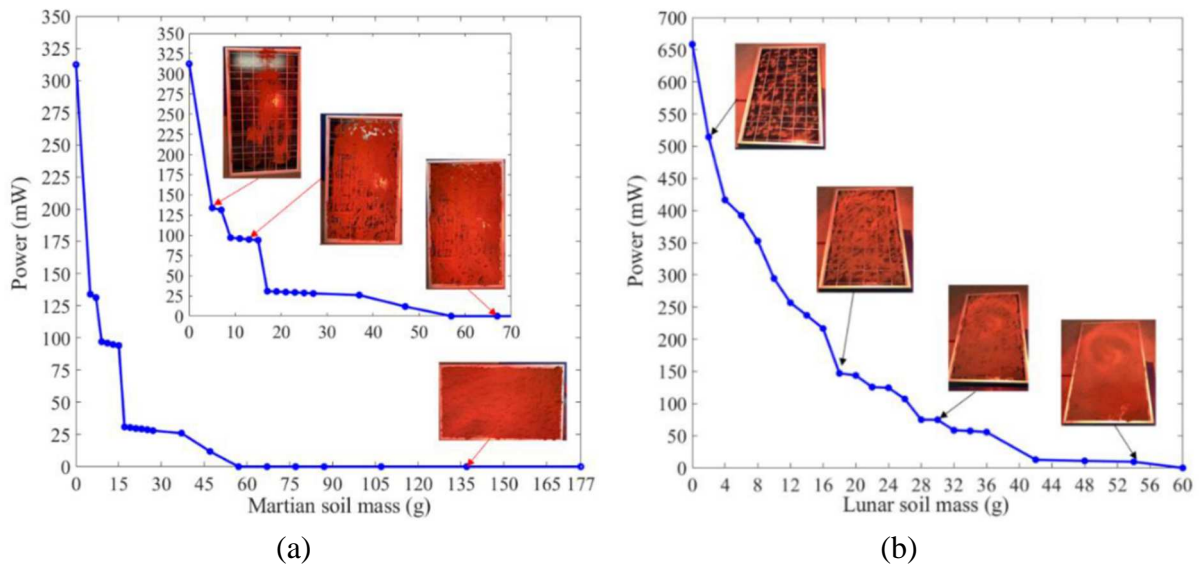


Figure I.10. Evolution de la puissance du PV en fonction de la masse des sols : (a) Martien, (b) Lunaire [101].

Cette technologie utilise les forces électrostatiques pour éliminer les particules de poussière accumulées sur les surfaces opaques, transparentes, rigides et flexibles [75][85]. Le plus important critère pour appliquer l'EDS sur un panneau solaire est la transparence de l'écran lui-même [104] [105]. Différents modèles d'EDS ont été conçus et réalisés sur différents substrats diélectriques avec des électrodes en configuration parallèle ou en spirale (Figure I.11). Call *et al.* ont étudié des EDS transparents pour les systèmes optiques qui ont été développés et testés de manière approfondie dans des conditions sous vide de laboratoire. Ces écrans utilisent des électrodes transparentes d'oxyde d'indium dopé à l'étain (ITO) intégrées dans un substrat transparent à haute rigidité diélectrique. Les électrodes d'ITO sont gravées chimiquement sur un substrat transparent en verre ou polymère. La couche d'ITO est revêtue ensuite d'un diélectrique transparent pour empêcher l'apparition des décharges électriques entre les électrodes [103].

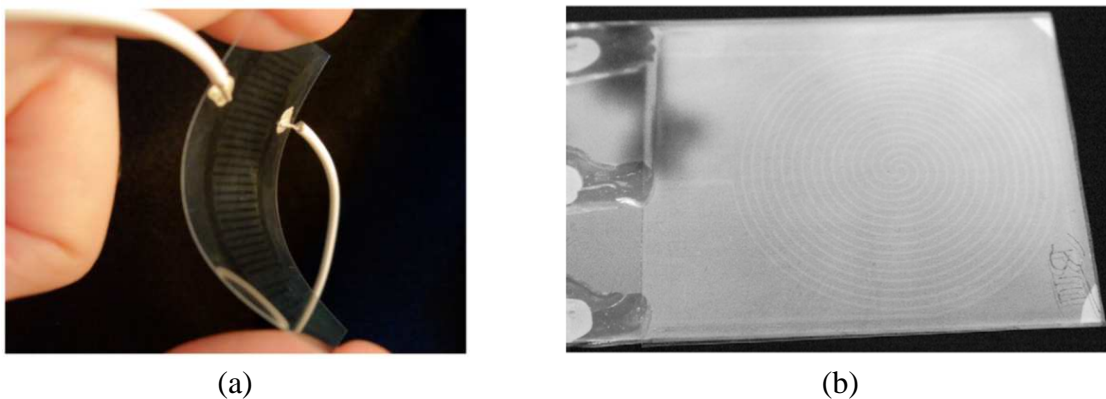


Figure I.11. ITO transparent. (a) Electrodes parallèles biphasées sur un support en polymère flexible. (b) Electrodes spirales triphasées sur un support rigide en verre [75][103].

L'ITO a été choisi comme matériau d'électrodes car il peut être déposé en couches minces soit par évaporation par faisceau d'électrons, soit par des techniques de pulvérisation. Ses propriétés optiques et électriques dépendent des paramètres de dépôt et de la composition du matériau initialement employé pour réaliser le revêtement. L'ITO est transparent dans la région visible du spectre électromagnétique [75].

Wu *et al.* ont étudié l'influence des facteurs électriques et géométriques d'un EDS réalisé avec l'ITO, et ils ont mentionné que l'efficacité de dépoussiérage dépasse 90% dans les conditions optimales [106]. Selon Sharma *et al.*, l'EDS permet d'éliminer la poussière même avec une accumulation de particules élevées correspondant à plus d'un an de dépôt de poussière à la surface de Mars [105]. Il a été estimé qu'un panneau photovoltaïque d'une superficie de 1 m² nécessiterait environ 10 W pour réaliser l'opération de dépoussiérage par l'EDS [105].

Atten *et al.* ont étudié le mécanisme de dépoussiérage des panneaux solaires dans des conditions similaires à l'environnement Martien [98]. Des expériences ont été réalisées avec un convoyeur à ondes stationnaires dans l'air atmosphérique et dans le dioxyde de carbone pour différentes poudres sous différentes pressions jusqu'à celle existant sur Mars (~ 7 mbar). Ils ont démontré que le déplacement des particules de poussière dépend de leurs charges. Les particules isolantes sont caractérisées par un temps de relaxation très élevé, ainsi une partie d'entre elles sont chargées naturellement et peuvent être transportées en présence d'un champ électrique élevé. Le chargement des particules peut se faire aussi par le biais des DBD qui se produisent lorsque la tension appliquée dépasse la valeur seuil d'apparition de la décharge (V_{DBD}) [98]. L'observation visuelle de la surface du rideau en l'absence de poudre pour des tensions V_{appl} légèrement supérieures à V_{DBD} a révélé que des micro-décharges se produisent aléatoirement au-dessus de la surface diélectrique. Ces décharges se développent dans le volume du gaz (Figure I.12) et ne sont pas restreintes à la surface diélectrique.

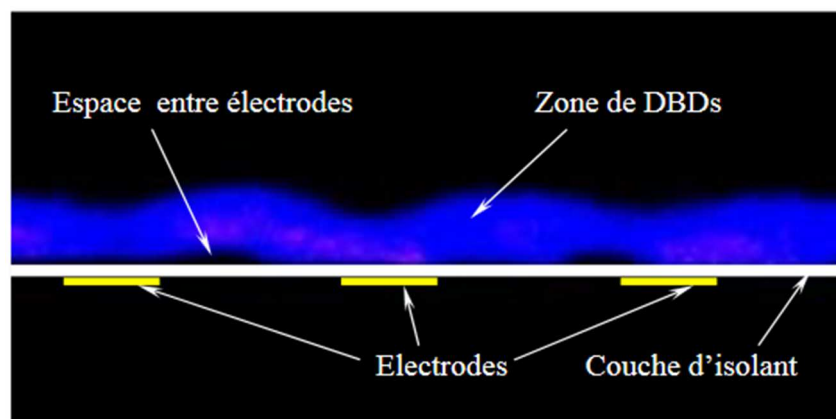


Figure I.12. Photographie de la section transversale d'un rideau électrique avec DBD dans l'air atmosphérique ($V_{appl} = 6 \text{ kV}$) [80].

Avec l'augmentation de la tension appliquée, les micro-décharges occupent une aire de plus en plus importante. Les DBDs induites par une tension alternative génèrent en moyenne une charge d'espace positive dans le gaz (~1 bar) entre les barrières diélectriques. Ceci est dû au fait qu'une partie non négligeable des porteurs de charge négatifs sont des électrons qui ont

une mobilité bien plus élevée que les ions. Par conséquent, les particules suspendues dans le gaz peuvent acquérir une charge positive [80].

Dans l'air à pression ambiante, il a été établi que le rideau électrique à ondes stationnaires peut éliminer la totalité de couches déposées de particules ou d'agglomérats. Dans les gaz à basse pression, comme par exemple sur l'atmosphère de Mars, il a été montré que le rideau électrique à ondes stationnaires peut également agir sur des particules ou des agglomérats de grosse taille et sur des particules soumises à des forces d'adhésion relativement faibles. Cependant, comme la tension d'initiation de la DBD est faible, il est nécessaire de diminuer l'espacement inter-électrodes pour obtenir des forces électriques suffisantes. Par contre, le libre parcours moyen des molécules prend des valeurs assez importantes à la pression de 10 mbar, donc la diminution de l'espacement inter-électrodes n'élimine pas les particules fortement adhérentes (< à quelques micromètres) [98]. Les résultats ont conduit les auteurs à constater que la charge des particules martienne acquise naturellement par triboélectricité pendant les tempêtes n'est pas suffisante pour éliminer la totalité des poussières martiennes accumulées sur les panneaux solaires.

b) Nettoyage des panneaux solaires dans les conditions terrestres

De nombreuses méga centrales solaires existent dans le désert à basse altitude, là où le soleil brille le plus [104]. L'accumulation des particules de sable et de poussière sur les panneaux photovoltaïques et les concentrateurs solaires est l'un des facteurs responsables de la diminution drastique de la puissance de sortie d'une centrale solaire [107]. La déposition des particules sur les surfaces limite la perméabilité lumineuse au niveau des modules photovoltaïques, et la réflectivité des miroirs des concentrateurs solaires. Par conséquent, le nettoyage fréquent de ces installations est nécessaire pour augmenter leurs performances.

Plusieurs technologies de nettoyage passives ont été proposées dans la littérature [108][109], dont les revêtements hydrophile et hydrophobe qui réduisent l'adhésion entre les particules de poussière avec la surface des panneaux et des concentrateurs solaires [110]. En revanche, cette méthode passive ne peut pas éliminer la poussière de la surface, car elle nécessite soit la pluie ou le vent, soit un nettoyage mécanique ou à l'eau (Figure I.13).



(a)



(b)

Figure I.13. Systèmes utilisés pour le nettoyage des panneaux PV. (a) Jet d'eau. (b) Robot Ecoppia E4 [111].

L'utilisation de jets d'eau à haute pression, souvent mélangés à des détergents, est la méthode la plus utilisée actuellement à grande échelle dans les centrales solaires [26]. L'inconvénient majeur de ces méthodes est le volume d'eau élevé nécessaire à chaque opération de nettoyage.

Les technologies électrostatiques qui utilisent la méthode des convoyeurs à ondes progressives ou stationnaires sont proposées comme des solutions actives pour l'élimination des particules sur les surfaces. Cette technique permet à la fois, une efficacité de nettoyage très élevée (plus de 90% en moins de 2 min) et une faible consommation d'énergie (moins de 0.1% de l'énergie produite par un panneau). De plus, ce système ne nécessite pas de ressources en eau ni d'un système hydraulique ou mécanique (Figure I.14), ce qui réduit le coût d'entretien et d'exploitation [110][112].

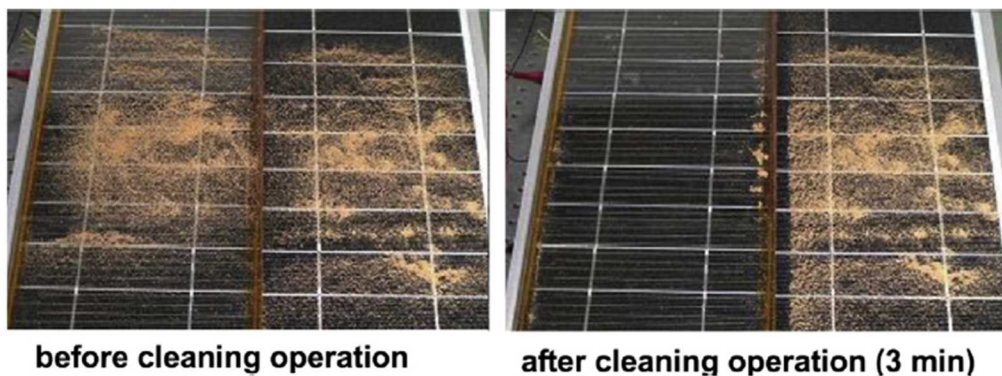


Figure I.14. Démonstration de l'efficacité du système de nettoyage électrostatique sur un grand panneau solaire [104].

Le principe consiste à placer un écran électrodynamique (EDS) sur la surface supérieure des panneaux solaires. Comme le montre la Figure I.15, la conception de l'EDS de base implique la fabrication d'électrodes sur un substrat.



Figure I.15. (a) Vue de coupe de la configuration de l'EDS avec deux couches diélectriques transparentes. (b) Photographie d'un film EDS avant la couverture sur un module PV. (c) Film EDS collé sur un panneau solaire [113].

Les électrodes sont soit transparentes, soit très fines afin de minimiser les effets d'ombrage ; elles peuvent avoir des formes en lignes parallèles ou en d'autres formes plus complexes. Une couche de diélectrique transparent couvre les électrodes pour les protéger

[113]. Le dispositif est applicable dans les atmosphères semi-arides et désertiques ; mais il ne fonctionne pas dans des conditions humides. L'EDS peut être soit une structure mince qui recouvre la surface avant d'un module solaire, soit un composant qui est intégré dans un module solaire [82].

L'EDS peut être conçu pour avoir un champ électrique alternatif à ondes progressives ou à ondes stationnaires. La conception à ondes progressives implique des circuits électriques et des sources haute tension plus complexes. Kawamoto et Shibata ont suggéré que la conception à ondes stationnaires pourrait être mieux adaptée à la production d'énergie solaire [104]. Les propriétés des matériaux, en particulier les particules et le revêtement diélectrique de l'EDS à la surface, jouent un rôle important dans les interactions particules-EDS et particule-particule et affectent aussi la performance de dépoussiérage. Le dépoussiérage qu'un EDS peut exécuter sur un panneau solaire peut être affecté par d'autres facteurs, tels que le fonctionnement électrique de l'EDS, les propriétés des électrodes et les conditions environnementales, entre autres. Le développement des EDS et les forces impliquées ont été analysés par plusieurs chercheurs [110][114].

Le processus de nettoyage passe par trois étapes essentielles : le chargement électrostatique des particules, la propulsion et le transport de la couche de poussière de la surface [112]. Avec l'alimentation périodique de l'EDS, la poussière accumulée sur la face avant du module solaire peut être repoussée, tomber sur le sol ou être emportée par le vent.

Mazumder *et al.* ont passé en revue le processus de chargement des particules décrit par plusieurs auteurs [112] et ont considéré que plusieurs processus pourraient contribuer simultanément à la charge électrostatique des particules. Ils ont considéré que les particules peuvent acquérir les charges électriques suivant les processus suivants : (1) le contact basé sur les états de surface des particules en contact avec la surface du film diélectrique, (2) l'agitation et le mouvement des particules provoqués par les forces de Coulomb et diélectrophorétique, (3) les fuites superficielles nécessaires pour régénérer l'état neutre du film diélectrique aidées par une injection de charge depuis la surface. Ces processus responsables du chargement individuel ou collectif des particules devraient produire une distribution de charges bipolaire (charges positives et négatives) aux particules [22] [112].

Kawamoto et Guo ont démontré que plus de 90% de la poussière sur une plaque de verre peut être éliminée à l'aide d'ondes progressives électrostatiques générées par une tension carrée à quatre phases (Figure I.16.a) appliquées à un convoyeur transparent constitué d'électrodes transparentes en oxyde d'indium dopé à l'étain (indium tin oxide-ITO). Cependant, cette technologie initialement développée pour des applications spatiales n'est pas compatible avec les systèmes solaires à grande échelle, car elle nécessite des électrodes ITO coûteuses et une construction complexes pour s'adapter aux configurations multi phases [115]. La source haute tension et les interconnexions seraient également compliquées et coûteuses pour des réalisations à grande échelle. Compte tenu de ces problèmes, les auteurs ont proposé d'utiliser des fils conducteur fins parallèles intégrées dans la plaque de verre qui protège le panneau solaire, et une source haute tension carrée monophasée (Figure I.16.b) [104]. Dans ce cas, le champ électrique génère une onde stationnaire qui provoque le mouvement des particules de

sable dans les deux sens, par contre la position inclinée et la présence de la force de gravité favorisent un seul sens de déplacement.

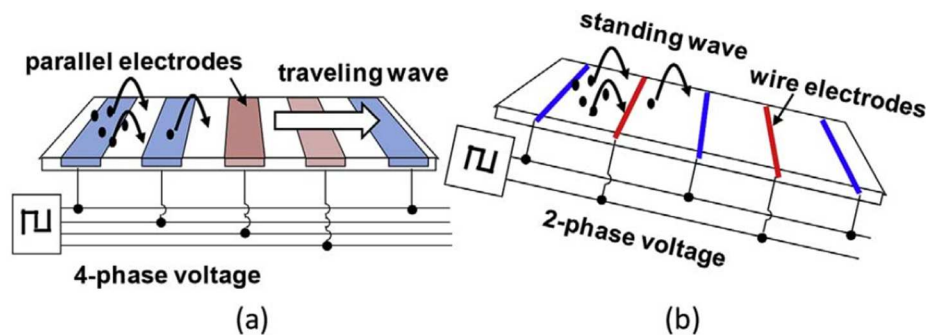


Figure I.16. Schémas des systèmes de nettoyage électrostatique qui utilisent (a) des ondes progressives et (b) des ondes stationnaires [115].

Une étude expérimentale a été réalisée par Kawamoto *et al.* afin de comparer le rendement des EDS à ondes stationnaires (2 phases) et progressives (4 phases) en fonction de l'angle d'inclinaison, pour éliminer des poussières surfaciques. La Figure I.17 présente l'efficacité de nettoyage en fonction de l'angle d'inclinaison correspondante aux deux EDS et au diamètre des particules.

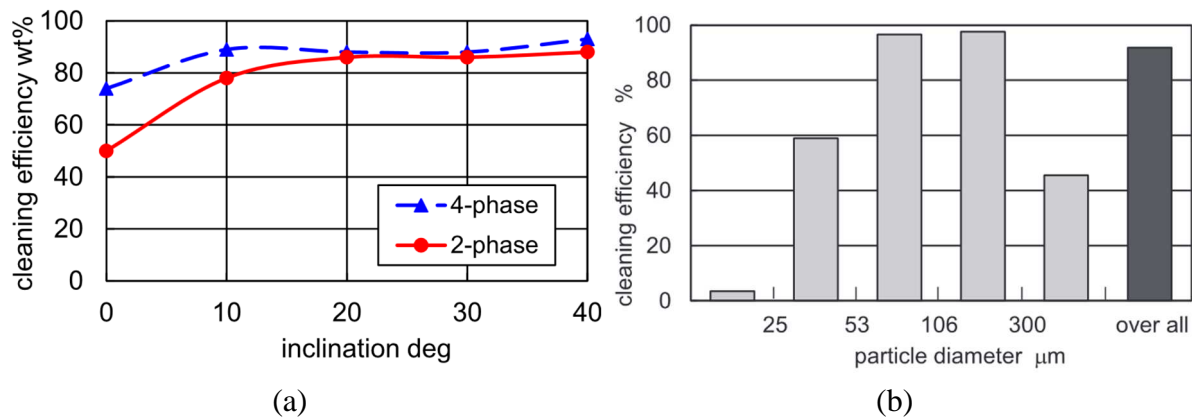


Figure I.17. (a) Relation entre l'inclinaison du panneau et l'efficacité du nettoyage pour les COP et COS. (b) Efficacité du nettoyage en fonction de la taille des particules classifiées [104].

Les résultats montrent que l'efficacité de nettoyage obtenue par les systèmes monophasés et à quatre phases converge lorsque l'angle d'inclinaison est supérieur à 20°. Pour le diamètre des particules inférieures à 25 μm et supérieures à 300 μm, il est remarqué que le nettoyage n'est pas efficace. Les raisons du problème rencontré pour le transport des petites et grosses particules sont différentes. Pour les petites particules, les forces d'image et d'adhésion électrostatique sont relativement grandes par rapport aux forces diélectrophorétique et de Coulomb. Pour les grosses particules, la force gravitationnelle est importante et empêche leur déplacement. En conséquence, ces particules restent localisées à la surface de l'EDS, ce qui réduit les performances du nettoyage [81].

Sur d'autres séries d'expériences, Kawamoto *et al.*, et Mazumder *et al.* ont étudié plusieurs facteurs qui impactent les capacités de l'EDS à éliminer les particules de sable. Il

s'agit principalement des paramètres suivants : l'angle d'inclinaison, la fréquence et la tension appliquée, la géométrie des électrodes, la masse de sable à éliminer par unité de surface, l'effet de la surface sur le chargement des particules, la quantité de charge acquise, les caractéristiques et la taille des particules de sable et la consommation d'énergie. Les échantillons de sable employés dans leurs investigations proviennent de régions désertiques différentes [113][115].

La communauté scientifique de ces dernières années a noté que l'efficacité de nettoyage variait selon le type des particules de poussières, et elle a suggéré que les systèmes EDSs doivent être conçu et optimisés selon les conditions environnementales du site d'exploitation et les taux de dépôt des poussières qui varient considérablement d'une région à l'autre [116].

En plus des études expérimentales, plusieurs chercheurs ont examiné les champs électriques de l'EDS, le transport et l'atténuation des poussières par des modélisations et des études numériques [26][117]. Il a été démontré, dans diverses conditions, les effets de plusieurs facteurs sur la trajectoire d'une particule soumise à une onde progressive d'un rideau électrique horizontal. Les résultats ont montré que la trajectoire des particules dépend de la localisation initiale des particules mais aussi de leur taille [26][117]. Par exemple, une particule de petit diamètre se déplace avec l'onde, tandis qu'une particule de diamètre plus grand se déplace avec un mouvement désordonné.

Marshall *et al.* [96] ont identifié, par la simulation numérique des ondes stationnaires et progressives sur des systèmes EDS horizontal et incliné, les effets des collisions, de l'adhésion et des interactions électrostatiques sur la distance de transport des particules ainsi que les modes de déplacement (le saut et la rotation des particules par exemple).

Chesnutt *et al.* [118] ont identifié numériquement la conception et les paramètres de fonctionnement optimaux de l'EDS. L'étude a été basée sur la détermination des effets des paramètres d'entrée sur les interactions des particules de poussière individuelles dans le but d'améliorer le rendement du nettoyage des panneaux photovoltaïques recouverts par la poussière du désert. Leur étude a été la première à décrire le mouvement de particules individuelles sous divers facteurs pour améliorer le nettoyage des particules difficiles à éliminer sur des panneaux photovoltaïques inclinés.

Dans une autre étude, Chesnutt *et al.* [119] ont analysé par simulation numérique les effets de la consommation d'énergie, la taille et les interactions des particule-particule pendant le fonctionnement de l'EDS avec la prise en considération de certains facteurs spécifiques des particules chargées tels que l'adhésion, les images et les collisions. De telles analyses ne sont pas réalisables par des expériences, non plus par des simulations de particules uniques ou des analyses numériques de champs électriques créés par des électrodes en l'absence de particules chargées et d'images de particules. Ils ont constaté à partir des résultats qu'avec les plus petites particules (10 μm de diamètre), l'absence de collisions particule-particule due à la répulsion électrostatique particule-particule était l'un des principaux facteurs responsables d'un mauvais nettoyage, en plus de la force de van der Waals. Ils ont montré que la force d'image est responsable des propriétés de l'EDS dans l'élimination des poussières, comme suggéré par des études antérieures. Le mauvais nettoyage des grosses particules est lié aux collisions particule-particules qui favorisent un mouvement aléatoire au-dessus de la surface, et la charge acquise par les grosses particules les entraînent là où la force du champ électrique est faible. Ils ont

suggéré que les particules encore plus grosses sont affectées par les forces de gravités, ce qui empêche leur mouvement sur la surface de l'écran électrodynamique [119].

La force gravitationnelle peut gêner l'opération d'élimination de la poussière sur les concentrateurs solaires concaves ou paraboliques. Récemment, Chen *et al.* [120] ont étudié la faisabilité de l'EDS pour transporter la poussière vers le coté haut ou latéral des dispositifs solaires de formes concaves. Ils ont utilisé la méthode des éléments discrets pour simuler le transport, la collision et l'adhésion des particules de poussières chargées qui étaient soumises à des ondes progressives sur un EDS incliné. Les auteurs ont amélioré les performances de dépoussiérage par la proposition d'une nouvelle configuration de l'EDS qui consiste à transporter les particules latéralement sous l'action des ondes progressives.

I.1.3. Particules de la gamme 500 μm -10 mm

Le traitement des matériaux granulaires de la gamme de taille 500 μm - 10 mm représente aujourd'hui un important domaine d'application industrielle de la séparation électrostatique. Depuis une vingtaine d'année, l'équipe EFD de l'Institut Pprime et les équipes HTPA et ACE des laboratoires LGEO et APELEC ont mené de nombreux travaux de recherches sur le développement et l'amélioration des techniques utilisant des forces électrostatiques pour le tri sélectif des matériaux granulaires et pulvérulents [121][122][123][124]. Le principe de la séparation électrostatique consiste à appliquer un champ électrique intense sur des particules chargés ou polarisés en mouvement. La charge acquise par les particules et leurs trajectoires diffèrent lorsque les matériaux ont des caractéristiques physiques différentes [125]. Les particules peuvent avoir des charges électriques à partir de plusieurs mécanismes physiques. Les trois principaux sont : l'effet couronne, l'induction électrostatique et l'effet tribo-électrique [126]. La gamme d'application s'étend du traitement des minéraux et du conditionnement des semences jusqu'au recyclage des métaux et plastiques à partir de déchets d'équipements électrique et électronique industriels [127].

Dans les prochains paragraphes, nous présenterons les trois principaux modes de séparations électrostatiques en fonctions du type des granules et/ou particules triées : séparateurs isolant-isolant, conducteur-conducteur et conducteur-isolant. Pour chaque type de séparateur, nous citerons un prototype de séparation des particules réalisé au sein des équipes EFD, HTPA ou ACE.

I.1.3.1. Séparation isolant-isolant

Pour ce mode de séparation nous avons choisi de présenter le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques métalliques tournants illustré sur la Figure I.18 [128] [121]. Cette installation expérimentale est destinée au traitement des mélanges de matériaux isolants de tailles millimétriques et sous millimétriques.

Le mode opérationnel de ce séparateur consiste à introduire un mélange composé de deux matériaux isolants dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation réalisée avec des parois en PMMA transparent. Une turbine permet de fournir le débit d'air souhaité. Le lit fluidisé se forme grâce à une plaque poreuse qui distribue l'air de façon homogène. Les matériaux agités par le lit fluidisé engendrent des effets électrostatiques dus aux collisions entre

les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre de séparation. Il en résulte la tribo-électrification des matériaux [129].



Figure I.18. Schéma du descriptif (a) et photographie (b) du séparateur tribo-aéroélectrostatique à deux disques métalliques. 1 : Moteurs électriques ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes-disques métalliques tournants ; 4 : Collecteurs ; 5 : Cages de Faraday ; 6 : Balances électroniques ; 7 : Soufflante ; 8 : Armoire électrique [122].

Le champ électrique est généré entre les deux disques tournants en acier plongés dans le lit fluidisé et séparés par une distance contrôlée. Les deux disques sont couplés à deux moteurs électriques à vitesses variables. Chaque disque est relié à un générateur haute tension de polarité opposée (Figure I.19) de sorte que les tensions appliquées peuvent varier de manière indépendante. Il résulte que chaque matériau adhère à un disque de polarité opposée à la charge qu'il a acquis, par conséquent le mélange est séparé.

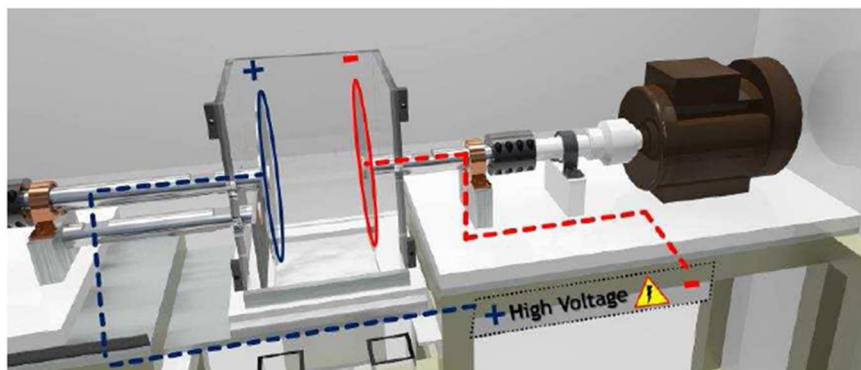


Figure I.19. Représentation schématique des électrodes-disques tournants alimentés en haute tension [121].

La récupération des particules est assurée par des balais racleurs qui grattent la surface des électrodes disques. Après la séparation, les produits sont accumulés dans deux boîtes faradisées de collection reliées à des électromètres. Ces deux boîtes sont placées à l'extérieur

de la chambre de séparation sur deux balances électroniques pour mesurer la charge et la masse en même temps. Ce qui fait l'originalité de cette installation est la simultanéité des opérations de la charge tribo-électrique et de la séparation. Les résultats de la séparation des mélanges de plastiques obtenus par ce dispositif ont montré des niveaux de puretés très élevés [121].

I.1.3.2. Séparation conducteur-conducteur

Les investigations portées sur la séparation électrostatique des mélanges contenant plusieurs matériaux conducteurs ne sont pas nombreuses dans la littérature. En réalité, ce n'est pas évident de séparer des granules de deux matériaux conducteurs par des méthodes électrostatiques en raison de leurs caractéristiques électriques très proches. Cependant, quelques expériences et simulations numériques ont été effectuées pour évaluer le comportement de particules conductrices de tailles sous-millimétrique dans des séparateurs électrostatiques. La Figure I.20.a représente une variante d'un séparateur à plaque sur lequel Younes *et al.* [130] ont étudié le processus de la séparation d'un mélange de matériaux composé par des particules isolantes, et conductrices en cuivre et en aluminium avec des tailles sous-millimétriques, et ont réalisé une simulation numérique de la trajectoire des particules sous diverses conditions de fonctionnement.

Les matériaux à séparer sont déposés sur la surface de l'électrode plane vibrante. Les particules isolantes glissent le long de cette électrode sans être affectées par les électrodes haute tension, car la quantité de charge acquise par effet triboélectrique est négligeable. Les particules conductrices sont chargées par induction électrostatique au contact de l'électrode vibrante plane et sont attirées par les électrodes haute tension. Les particules de l'Al et de Cu sont acheminées vers les compartiments correspondants selon la masse volumique et la conductivité. La Figure I.20.b illustre les résultats de la distribution des masses des matériaux conducteurs séparés sur 11 compartiments. Pour une masse initiale de 10 g de chaque matériau conducteur et une tension appliquée de 20 kV, les auteurs ont trouvé dans leur étude expérimentale que 84,9 % d'Al est récupéré dans les compartiments 5 à 11 avec une pureté de 100%, et 91% de Cu est récupéré dans les compartiments 2 à 3 avec une pureté de 96,9 % [130].

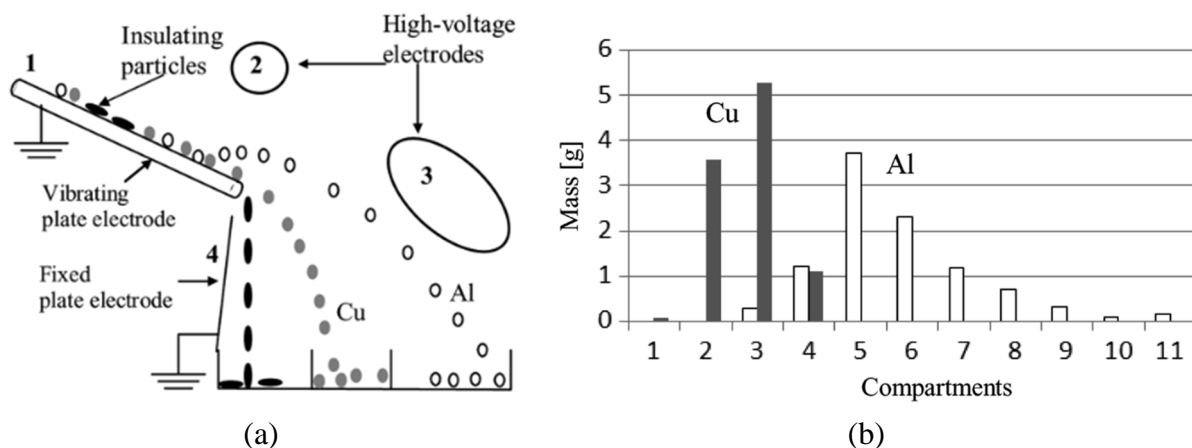


Figure I.20. (a) Représentation schématique du séparateur conducteur-conducteur. (1) Plaque vibrante métallique reliée à la terre ; (2) Electrode cylindrique mise sous HT ; (3) Electrode elliptique mise sous HT; (4) Electrode plaque reliée à la terre. (b) Distribution des produits obtenus dans les compartiments du collecteur [130].

En dehors des technologies électrostatiques, on peut trouver dans la littérature d'autres méthodes de séparation conducteur-conducteur qui utilisent un champ magnétique. Merahi *et al.* [10][131] ont développé une méthode de séparation d'objet par induction de courant de Foucault. Cette technique peut trier un mélange d'objet composé d'un matériau isolant (plastique) et trois matériaux conducteurs (fer, cuivre et aluminium).

I.1.3.3. Séparation conducteur-isolant

La séparation électrostatique des métaux et des matériaux isolants contenus dans un mélange granulaire est une technique de plus en plus utilisée dans l'industrie du recyclage des déchets de câbles électriques et équipements électroniques [125]. Trois modèles de séparateurs peuvent être utilisés : le séparateur à plaque [132], le séparateur à tambour [133] ou le séparateur à tapis roulant [122]. Le séparateur à tambour est le modèle le plus utilisé dans l'industrie. Il permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal avec des puretés très proches de 100 % [134]. Les deux autres séparateurs qui utilisent une courroie mobile ou un plan glissant, servant à introduire les particules et les faire passer près des électrodes haute tension, ne sont que rarement appliquées dans l'industrie [124]. Nous présentons dans cette partie à titre d'exemple le modèle du séparateur tambour illustré sur la Figure I.21 qui a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche au sein des équipes EFD, HTPA et ACE [124][133][135][18].

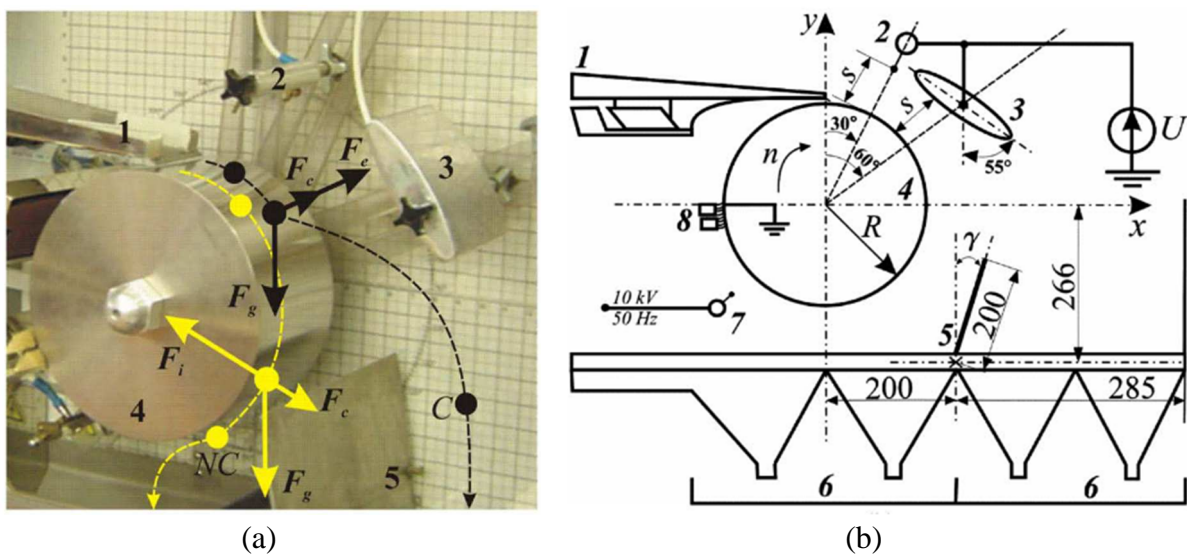


Figure I.21. Séparateur électrostatique à tambour. (a) Forces agissant sur les particules conductrices (C) et non-conductrices (NC) ; (b) Représentation schématique du système d'électrodes utilisé pour la séparation de déchets ; (1) Goulotte oscillante ; (2) Electrode couronne ; (3) Electrode statique ; (4) Electrode cylindrique tournante ; (5) Déflecteur ; (6) Collecteur ; (7) Electrode couronne de neutralisation ; (8) Balais [135].

Dans ce type de séparateur, le champ électrique est créé entre deux électrodes (2) et (3), connectées à un générateur haute tension, et l'électrode tournante de forme cylindrique (4) qui est reliée à la terre. La goulotte oscillante (1) dépose le produit granulaire à séparer sur la surface de l'électrode tambour (4) pour le transférer dans la zone d'application du champ électrique. Les particules sont alors soumises simultanément à deux mécanismes de charge. Le premier est l'effet couronne qui affecte seulement les particules non-conductrices. Dans le deuxième

mécanisme, il s'agit de l'induction électrostatique qui implique uniquement les particules conductrices [124].

Les particules non-conductrices, chargée par un flux ionique dans la zone de décharge couronne, adhèrent à la surface de l'électrode tambour sous l'action de la force image [136]. Elles tombent dans la partie du collecteur dédié lorsque la résultante des forces de pesanteur et centrifuge dépasse la force image. Dans le cas d'une forte adhésion des particules isolantes, due à l'acquisition d'une charge élevée, certains séparateurs électrostatiques industriels sont équipés d'une autre électrode couronne de neutralisation pour faciliter la tâche du balais à éliminer ces particules [137].

Les particules conductrices reçoivent des charges électriques sous l'action de l'électrode couronne. Cependant, ces charges se dissipent rapidement à travers l'électrode cylindrique reliée à la terre. Dans la zone de l'électrode ellipsoïdale, les particules acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de l'électrode haute tension qui leur a donné naissance. Par conséquent, ces particules seront attirées et déviées de leur trajectoire pour se retrouver dans la partie droite du collecteur [125].

Le procédé de séparation par le dispositif tambour est multifactoriel. Donc, une bonne connaissance du comportement des matériaux sous l'effet des forces électrostatiques est nécessaire. De nombreuses modélisations expérimentale et numérique sur le séparateur électrostatique tambour ont été effectuées par la communauté scientifique [138][139]. L'intérêt de ces études est de prévoir les possibilités de séparation, et dans certaines conditions, la maîtrise et l'optimisation des réglages en vue d'améliorer les rendements.

Sur certains modèles numériques, les chercheurs ont pris en compte la décroissance de la charge des particules en contact avec l'électrode, et ils ont mentionné que la trajectoires des particules est affectée par plusieurs facteurs : la géométrie et la position des électrodes, le niveau de la haute tension appliquée, la vitesse de rotation de l'électrode cylindrique, la taille des particules et l'humidité de l'air ambiant [138][140][141]. De plus, des modélisations par la méthode des plans d'expériences ont été effectuées pour déterminer l'influence de différents facteurs et leurs interactions sur la performance de la séparation [133][135].

En relations avec les applications de l'industrie du recyclage, les produits traités par les séparateurs électrostatiques comportent de nombreux matériaux de formes et tailles variées. Dans le domaine de récupération des déchets d'équipement électroniques par exemple, des séparateurs électrostatiques à tambour à double étage ont été réalisés et évalués [142]. En comparaison avec les séparateurs à tambour classique, ces machines permettent à la fois d'augmenter la pureté et le taux des produits à collecter en minimisant le produit mixte. Le premier étage peut être configuré pour le traitement des particules fines, tandis que le deuxième est plutôt destiné aux grosses particules [143].

Dans une installation industrielle pilote, de recyclage des déchets de câbles électrique par exemple, les séparateurs électrostatiques prennent la dernière position sur la chaîne de traitement, après les systèmes de séparation magnétique et mécanique, et les tables densimétriques. Les autres composants de la chaîne de recyclage font un premier tri plus ou

moins grossier alors que les séparateurs électrostatiques permettent de récupérer les produits à fort potentiel de valorisation [122].

I.2. Revue bibliographique sur les applications du système à réseaux d'électrodes intercalées

Les actionneurs à réseaux d'électrodes intercalées (REI), sont constitués d'un ensemble d'électrodes, distribué parallèlement et périodiquement, et séparés par un matériau isolant, dans le cas typique. La configuration REI a été utilisée dans divers domaines, y compris l'étude des propriétés diélectriques des couches minces, la réalisation des composants électroniques, comme par exemple, les filtres hyperfréquences, les dispositifs à ondes acoustiques de surface et le super condensateur [144]. On peut trouver également d'autres applications de cette technologie dans le domaine de la biologie ou de la chimie. Il s'agit d'utiliser la configuration d'électrodes comme un détecteur, qui mesure les variations de capacité ou d'impédance, pour étudier les changements survenant à l'interface solide / liquide produites par des interactions physiques, chimiques ou biologiques à la surface des électrodes [145]. Cette méthode de mesure d'impédance est aussi impliquée dans les capteurs assurant la surveillance continue des gaz et d'humidité [146]. Le REI est souvent choisi comme un composant pour les opérations de détection car il permet de générer les signaux électriques nécessaires à l'interprétation du phénomène à détecter [147]. La technologie d'impression Rouleau-à-Rouleau (Roll-to-Roll, R2R) a facilité la tâche de développement et de réalisation de nombreux dispositifs REI électroniques et photoniques flexibles [148]. Ces dernières années, les REI ont été utilisés dans les transducteurs pour les dispositifs de laboratoire sur puce [144].

Dans les différents domaines d'application cités précédemment, l'une des composantes les plus exigeantes dans les capteurs c'est qu'ils doivent répondre à une large gamme de caractéristiques telles que : taille ultra petite, fonctionnement à long terme, très faible consommation d'énergie, très faible coût et intégration facile avec d'autres circuits [146]. Ainsi, la forme miniature des électrodes et leur faible coût ont fait des REIs un cadre apprécié pour la conception de dispositifs de détection. Une procédure de fabrication en série simple et économique, avec la possibilité de l'utiliser dans un certain nombre d'applications sans modification substantielle de la conception du capteur, sont les avantages les plus significatifs. En général, ces systèmes ont été utilisés pour détecter la capacité, l'impédance, la constante diélectrique et la conductivité de masse dans les gaz et liquide [147].

Traditionnellement, un condensateur est constitué de deux plaques parallèles, où les électrodes de détection et de commande sont situées à proximité l'une de l'autre, et à l'opposé l'une de l'autre, avec un champ électrique uniformément réparti. Si les électrodes s'ouvrent progressivement (Figure. I. 22), le champ électrique ne sera pas limité à une petite zone entre les électrodes, mais il sera étendu à un espace plus large, ce qui génère un champ marginal. Cependant, si les électrodes s'ouvrent sur un plan coplanaire, alors le champ marginal devient prédominant entre les électrodes, et ce type de capteur est connu sous le nom de capteur planaire. La structure plane permet d'examiner le matériau testé d'un seul côté, ce qui est particulièrement utile lorsque l'accès aux deux côtés du matériau est limité [144].

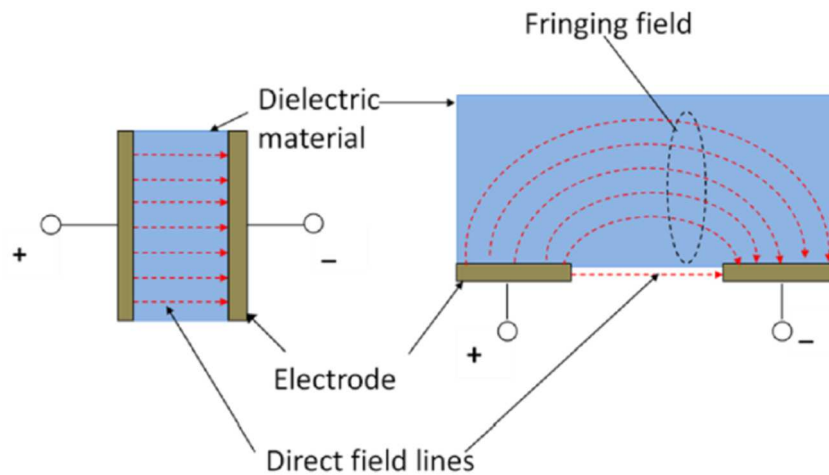


Figure I.22. Représentation schématique d'un condensateur conventionnel à plaques parallèles (à gauche) et un condensateur à plaques coplanaires (à droite)[149].

Hormis l'utilisation du REI dans les capteurs et instruments de mesure, il est employé pour la manipulation des particules dans les microsystèmes fluidiques par force diélectrophorétique [150]. Dans une plus grande échelle, il est utilisé dans les convoyeurs électrostatiques pour la génération des ondes progressives et stationnaires qui servent à transporter ou classifier les particules comme nous l'avons mentionné dans les paragraphes précédents. Dans un autre domaine, les actionneurs à REI sont utilisés dans la robotique pour la création d'une adhésion électrostatique nécessaire à la manipulation de divers objets, des matériaux durs aux matériaux souples, des matériaux lisses aux matériaux déformés, et des matériaux conducteurs aux matériaux non-conducteurs [151]. Ces systèmes génèrent entre les électrodes des forces d'électro-adhésion (EA) qui augmentent avec l'accumulation de charge et le champ électrique [152]. Un fort champ électrique se forme entre les électrodes lorsqu'une haute tension est appliquée, induisant les forces d'EA entre l'actionneur et l'objet à capter [153].

Les prochaines parties de cette section présentent l'action électrostatique du REI dans le processus des ondes progressives et stationnaires, sur lesquelles les particules sont soumises. Nous passerons ensuite à une revue bibliographique qui traite le principe de l'adhésion électrostatique dans une sélection d'applications.

I.2.1. Action des ondes progressives et stationnaires

Comme nous l'avons mentionné dans le paragraphe I.1.2.2, les particules isolantes peuvent être transportées sous l'effet d'un champ électrique généré par un convoyeur à ondes progressives (COP) ou stationnaires (COS). La différence entre les deux types de convoyeurs réside dans le nombre de phases interposées qui jouent un rôle très important sur le sens de déplacement des particules. Nous décrirons dans cette partie la distribution du potentiel électrique correspondant à chaque configuration d'électrode, ainsi que les forces qui agissent sur le déplacement et la trajectoire des particules isolantes.

I.2.1.1. Convoyeur à ondes progressives

On parle de convoyeur à ondes progressives, lorsque les électrodes de celui-ci sont réparties sur trois phases ou plus (Figure I.23). Dans des conditions expérimentales différentes,

les résultats observés et analysés dans la bibliographie ont montré que les particules se déplacent dans le sens de propagation de l'onde progressive, mais qu'une petite quantité se déplace dans le sens inverse [154]. Ceci s'explique par la distribution spatiale non sinusoïdale du potentiel électrique au-dessus de la surface, permettant de générer des ondes harmoniques qui se propagent dans les deux directions du COP en fonction du temps. Différentes modélisations numérique et théorique ont étudié la distribution du potentiel électrique et l'effet des ondes harmoniques sur le comportement des particules [154][155]. L'avantage de ces modèles, en plus de leur coût de calcul très faible, est qu'ils permettent d'avoir une formule approchée des potentiels et des champs électriques à n'importe quel moment et à n'importe quel point de l'espace [94].

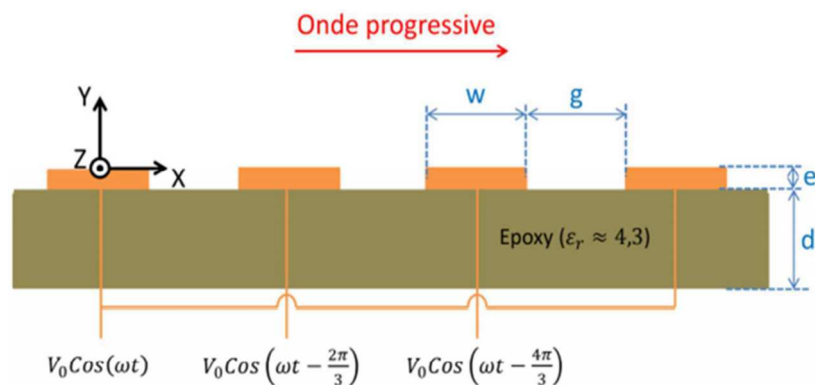


Figure I.23. Configuration triphasée (Onde progressive) [94].

Dans le but d'étudier le mouvement des particules, Zouaghi *et al.* ont développé un modèle d'analyse basé sur la décomposition du potentiel électrique selon les ondes harmoniques au-dessus de la surface d'un COP à 3 phases. La distribution du potentiel a été obtenue par l'utilisation de la méthode des éléments finis FEM, à l'aide du logiciel commercial COMSOL Multiphysics. Puis, la forme d'onde du potentiel électrique en proche parois a été décomposée en multiples harmoniques à l'aide de la transformation de Fourier rapide (FFT), développée sous Matlab. Les harmoniques sont dus à la déformation de l'onde du potentiel électrique causée par la forme rectangulaire des électrodes. Les résultats ont montré que les harmoniques les plus importants sont le fondamental et l'harmonique de rang 2, tandis que l'effet du reste des harmoniques peut être négligé. Ces résultats signifient que le potentiel électrique peut être décomposé en deux ondes du potentiel qui se propagent dans deux directions opposées (directe et inverse).

En relation avec les résultats expérimentaux obtenus par les auteurs [154], il a été constaté que le déplacement des particules dans les deux sens est dû aux ondes directes (W_{dir}) et inverse (W_{inv}) qui constituent l'onde du potentiel électrique appliqué. La Figure I.24.a représente les distributions spatiales du potentiel électrique en 2D aux instants $t=0$, $T/6$, $T/4$, $T/3$ et $T/2$ de haut en bas, respectivement. Lors du passage de $t=0$ à $t=T/2$, les valeurs extrêmes du potentiel électrique (zone rouge) se déplacent de la gauche vers la droite (sens de la succession des phases). La forme d'ondes du potentiel électrique obtenue par simulation numérique FEM (V_{FEM}) est illustrée sur la Figure I.24.b, en ligne noire, et la forme d'onde du potentiel électrique ($W_{dir}+W_{inv}$) en ligne rouge. Cette onde est la somme des deux ondes du potentiel électrique W_{dir} et W_{inv} représentées en lignes verte et bleue, respectivement [26].

La Figure I.24.b représente la composition du potentiel électrique et les ondes harmoniques au-dessus de la surface d'un COP à 3 phases, développé par Zouaghi *et al.* [154], dans le but de déterminer la trajectoire des particules.

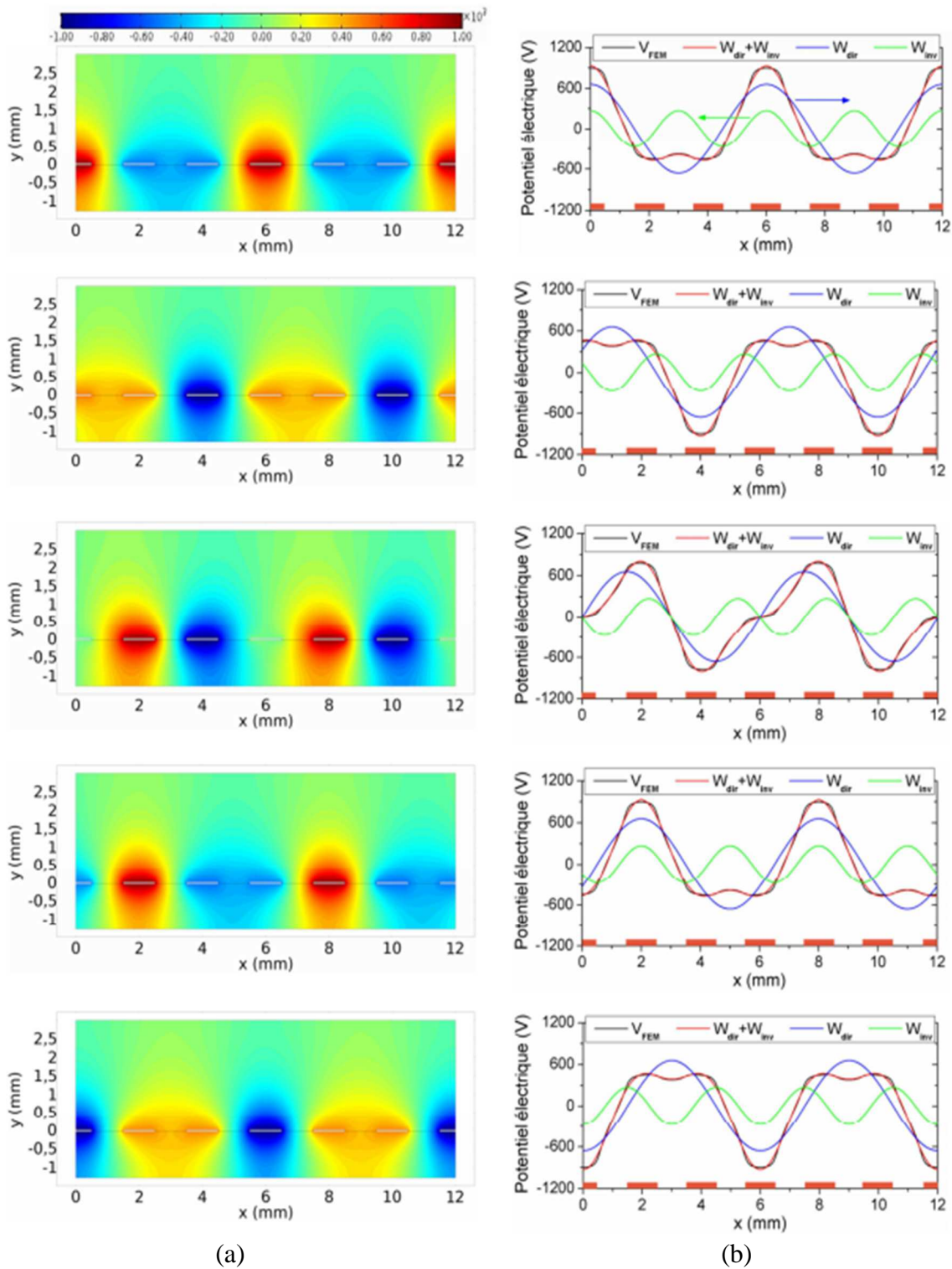


Figure I.24. (a) Distribution du potentiel électrique sur un COP et (b) profils du potentiel électrique numérique total (V_{FEM}) et ses deux composantes harmoniques directe (W_{dir}) et inverse (W_{inv}) pour les instants , $t = 0, T/6, T/4, T/3, T/2$ [26].

I.2.1.2. Convoyeur à ondes stationnaires

On parle de convoyeur à ondes stationnaires lorsque le réseau d'électrodes interposées est constitué par deux phases (Figure I.25).

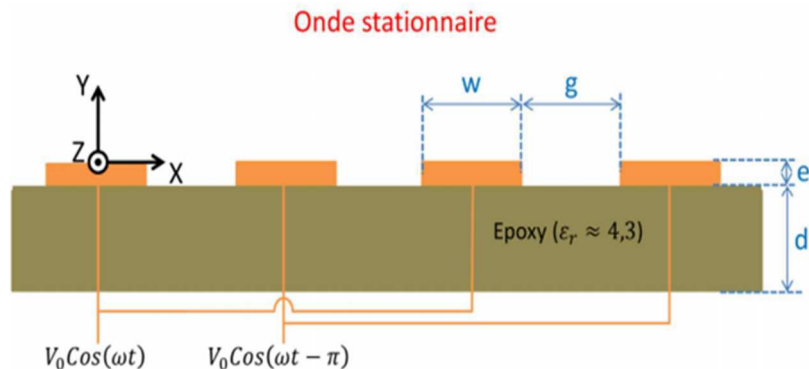


Figure I.25. Configuration biphasée (Onde stationnaire) [154].

Suivant la même analyse utilisée pour le COP, il a été constaté que le potentiel électrique dans l'espace situé au-dessus des électrodes peut être exprimé par la somme de deux ondes qui possèdent la même amplitude et la même fréquence, et qui se propagent dans deux directions opposées en fonction du temps. Par l'utilisation de la transformation de Fourier rapide, pour une position donnée au-dessus des électrodes, la forme d'onde du potentiel électrique peut être décomposée en de multiples harmoniques. Chaque onde harmonique stationnaire peut être décomposée en deux ondes qui ont la même amplitude et qui se propagent avec la même vitesse dans des directions opposées. Il résulte que la présence de ces harmoniques n'affecte pas forcément l'efficacité globale de déplacement des particules dans le cas du COS. L'amplitude de l'harmonique de rang 1 (fondamental) est très élevée par rapport aux harmoniques de rangs supérieurs [26]. Ainsi, l'effet de ces dernières peut être négligé dans la reconstruction simplifiée du potentiel électrique.

La Figure I.26.a représente les distributions spatiales du potentiel électrique en 2D aux instants $t=0$, $T/6$, $T/4$, $T/3$ et $T/2$. Lors du passage de $t=0$ à $t=T/4$, la valeur absolue du potentiel électrique au niveau des électrodes diminue entre 0 et $T/4$ avant un changement de polarité puis une augmentation à partir de $T/4$. C'est bien la caractéristique d'une onde stationnaire. La Figure I.26.b montre les formes d'ondes du potentiel électrique à la position $y=0,1$ mm. La forme d'onde du potentiel électrique obtenue par simulation numérique FEM est illustrée en ligne noire (V_{FEM}), et la forme d'onde du potentiel électrique ($W_{dir}+W_{inv}$) en ligne rouge. Comme mentionné précédemment, l'onde stationnaire du potentiel électrique peut être décomposée en deux ondes de directions opposées W_{dir} et W_{inv} représentées en lignes verte et bleue, respectivement [26].

En plus des études analytique et numérique, réalisées par Zouaghi *et al.*, sur la distribution du potentiel électrique pour analyser les ondes harmoniques dans les deux cas COP et COS, l'influence de plusieurs paramètres sur l'amplitude de ces harmoniques a été également étudiée. Il a été constaté que la vitesse de propagation des ondes est proportionnelle à la fréquence et à la période géométrique. L'amplitude des ondes harmoniques peut être contrôlée en modifiant la géométrie et la largeur des électrodes ou le gap entre eux, et en ajoutant aussi une barrière

diélectrique au-dessus de la surface. Par ailleurs, la longueur d'onde inverse diminue lorsque le nombre des phases augmente [154]. Ainsi, le mouvement des particules sera moins impacté par l'onde inverse.

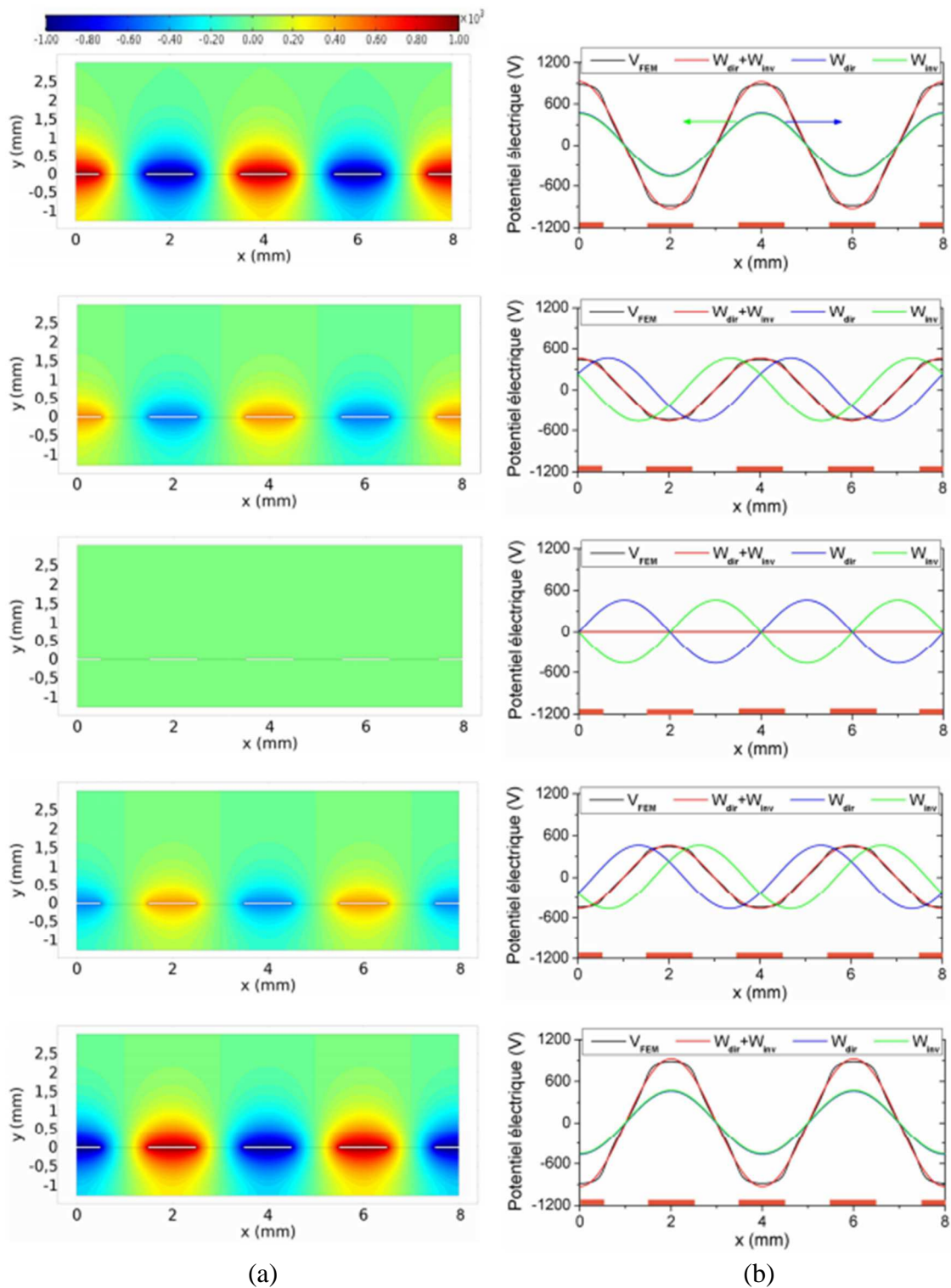


Figure I.26. (a) Distribution du potentiel électrique sur un COS et (b) profils du potentiel électrique numérique total (V_{FEM}) et ses deux composantes harmoniques directe (W_{dir}) et inverse (W_{inv}) pour les instants , $t = 0, T/6, T/4, T/3, T/2$ [26].

I.2.1.3. Bilans des forces exercés sur les particules

Les études expérimentales des convoyeurs à ondes progressives (COP) et stationnaires (COS) ont montré la supériorité incontestable des premiers en termes d'efficacité de déplacement des particules. Nous décrivons dans ce paragraphe le bilan des forces exercées sur les particules dans un champ électrique à ondes progressives. La distribution du potentiel électrique au-dessus des électrodes influe sur le champ électrique impliqué ainsi que les principales forces électrostatiques sous lesquelles les particules en mouvement sont soumises.

Les principales forces qui peuvent influencer le mouvement des particules sont : la force de Coulomb F_c , la force diélectrophorétique F_{DEP} , la force gravitationnelle F_g , la force de van der Waals F_{vdW} , la force image F_{img} et la force de traînée F_{Tr} . Le bilan des forces exercées sur une particule sphérique déposée sur la surface du convoyeur étudié est donné, sur les axes (Ox) et (Oy) en coordonnées cartésiennes, par le système d'équations [94] :

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_p = F_{Trp} + F_{cx} + F_{DEPx} \\ m_p \ddot{y}_p = F_{Trp} + F_{cy} + F_{DEPy} + F_g + F_{vdW} + F_{img} \end{cases} \quad (I.1)$$

Dans cette équation, \ddot{x}_p et \ddot{y}_p représentent les deux composantes d'accélération de la particule et m_p la masse de la particule.

La force de Coulomb est la principale force responsable du mouvement des particules, car c'est la seule force répulsive qui peut donner une composante verticale positive avec une valeur considérable. Cette force est donnée par la relation :

$$\vec{F}_c = q_p \cdot \vec{E} = 4\pi r_p^2 \cdot \sigma_s \cdot \vec{E} \quad (I.2)$$

Avec, \vec{E} le champ électrique appliqué, r_p et q_p le rayon et la charge de la particule respectivement, et σ_s la densité de charge sur la surface de la particule.

La force diélectrophorétique (DEP) résulte de l'interaction entre le champ électrique non uniforme et le moment dipolaire induit dans une particule diélectrique. La non-uniformité du champ électrique est indispensable pour l'apparition de cette force. La force diélectrophorétique est donnée par la relation suivante :

$$\overrightarrow{F_{DEP}} = 2 \cdot \pi \cdot r_p^3 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{rm} \cdot f_{CM} \cdot \nabla(E^2) \quad (I.3)$$

Avec $f_{CM} = \frac{\epsilon_{rp} - \epsilon_{rm}}{\epsilon_{rp} - 2\epsilon_{rm}}$, où ϵ_{rp} et ϵ_{rm} sont les constantes diélectriques de la particule et du milieu respectivement.

f_{CM} est le facteur de Clausius-Mossotti, qui permet de déterminer la direction de la force. Lorsqu'une particule est plus polarisable que le milieu, $f_{CM} > 0$, la force DEP se dirige vers les zones où le champ est très intense (vers les électrodes) ; dans la cas inverse où la particule est moins polarisable que le milieu, $f_{CM} < 0$, la force DEP sous laquelle la particule est soumise s'oriente vers les zones à champ électrique moins intense (entre les électrodes).

La force image exercée sur une particule de charge q_p , qui possède une constante diélectrique ϵ_{rp} , placée à une distance d d'une surface métallique liée à la masse est donnée par la relation :

$$\vec{F}_{img} = -\frac{q_p^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_{rp}} \cdot \frac{1}{[2(d+r_p)]^2} \vec{n} \quad (I.4)$$

Avec \vec{n} le vecteur normal perpendiculaire à la surface, orienté vers la particule.

La force de trainée, qui décrit le frottement entre une particule sphérique et le gaz, est donnée par la relation de Stokes :

$$\vec{F}_{Tr} = 6\pi \cdot \eta_g \cdot r_p \cdot (\vec{U}_g - \vec{U}_p) \cdot \frac{1}{Cu(r_p, \lambda_g)} \quad (I.5)$$

Où η_g est la viscosité dynamique de l'air, $\eta_g = 1,85 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, \vec{U}_g la vitesse de l'écoulement et \vec{U}_p la vitesse de la particule. Si l'air est considéré dans un état statique, alors la vitesse est nulle. Si la dimension de la particule est comparable au libre parcours moyen λ_g des molécules du gaz, les particules se déplacent dans un milieu discontinu. Dans ce cas, l'équation doit être corrigée par le facteur de Cunningham Cu .

La force de gravité est donnée par la relation :

$$\vec{F}_g = \frac{4}{3} \pi r_p^3 \cdot \rho \cdot \vec{g} \quad (I.6)$$

Avec, ρ la masse volumique de la particule isolante et \vec{g} le vecteur d'accélération de la gravité.

La force de van der Waals est une force d'adhésion exercée sur une particule lorsqu'elle est en contact avec la surface.

$$\vec{F}_{vdW} = -\frac{A_h r_p}{6D^2} \vec{n} \quad (I.7)$$

Avec A_h la constante de Hamaker (de l'ordre de 10^{-19} J dans le vide) et D la distance la plus courte entre la particule et le substrat (de l'ordre de 10^{-10} m).

Une étude comparative de l'effet de ces forces exercées sur les particules a été effectuée par Zouaghi *et al.* [94][154]. La configuration de la simulation considérée est présentée sur la Figure I.27. Le but était de réaliser une étude comparative des forces attractives et répulsives au moment de l'application de la tension pour analyser la possibilité d'un déclenchement de mouvement de la particule.

L'analyse du bilan de ces forces par les auteurs a montré que la mise en mouvement d'une particule isolante (PMMA) est amorcée grâce à la force de Coulomb. A titre d'exemple, la Figure I.28 montre que la force de Coulomb domine les autres forces dans une gamme de taille limitée. Cette gamme s'étend considérablement avec l'augmentation de la charge initiale des particules, l'amplitude de la tension appliquée et la position de la particule. Par ailleurs, les principales forces attractives qui empêchent le mouvement des particules sont: 1) la force de van der Waals qui prédomine pour les particules de petites tailles, 2) la force gravitationnelle

qui prédomine pour les grosses particules, 3) la force DEP qui est forte dans une petite région proche des bords des électrodes et enfin 4) la force d'image qui prend une valeur significative lorsque les particules sont chargées jusqu'à la saturation [26]. La force de Coulomb peut être attractive au-dessus des électrodes ayant une polarité opposée à celle des particules.

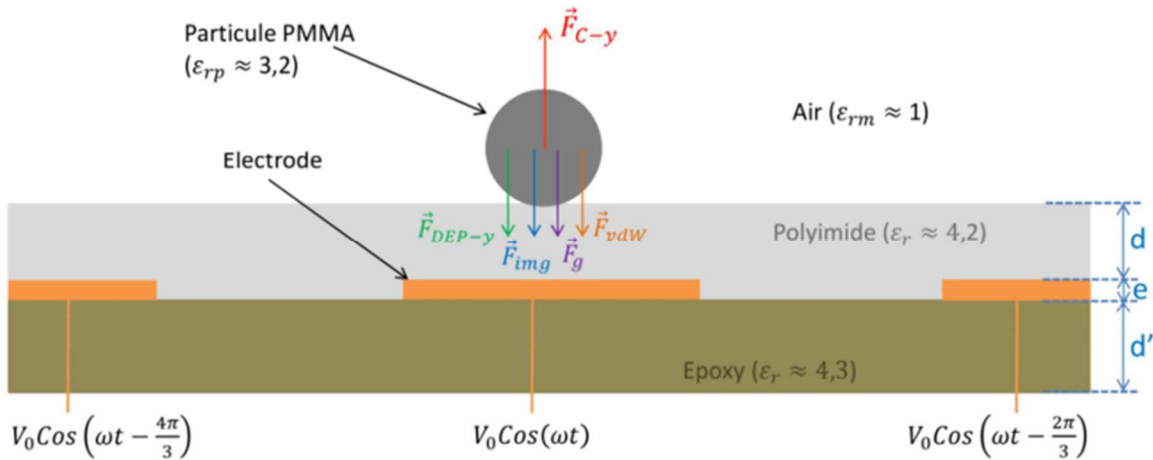


Figure I.27. Schéma de la configuration considérée pour l'étude comparative des forces. La particule est déposée sur la surface diélectrique, qui recouvre des électrodes mises sous tensions triphasées [26].

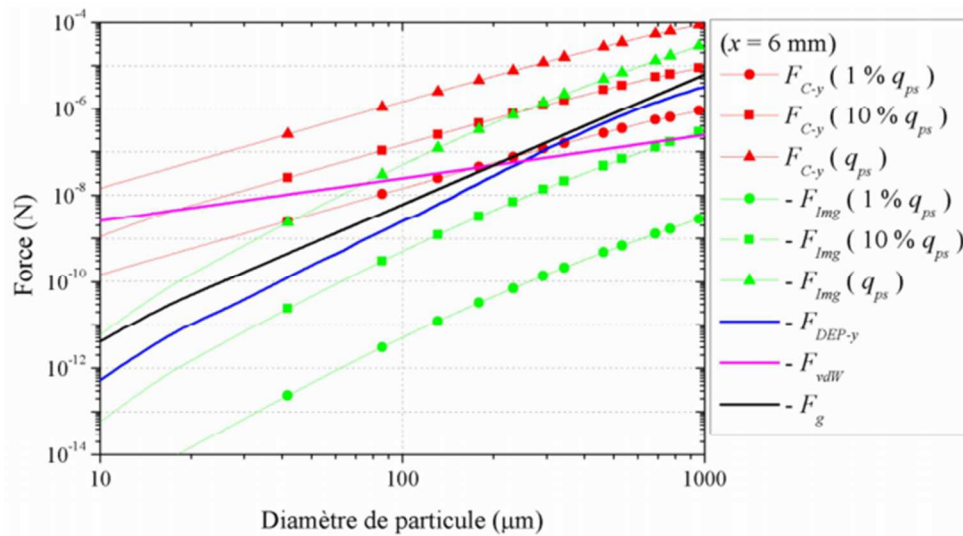


Figure I.28. Évolution de la composante y des forces à la surface en fonction du diamètre des particules de PMMA [26].

I.2.2. Action d'électro-adhésion

I.2.2.1. Généralités sur l'électro-adhésion

Le phénomène d'adhésion est l'attraction d'un matériau sur un autre dans un milieu gazeux ou liquide. Il existe de nombreux mécanismes qui peuvent contribuer à l'adhésion entre les matériaux. L'effet des forces électrostatiques sur l'adhésion est largement connu. 500 ans avant J.-C., les Grecs ont fait l'expérience de l'attraction entre des bouts de paille et l'ambre chargé par frottement avec un autre matériau. Plusieurs siècles plus tard, la loi de Coulomb a fourni les bases mathématiques pour la description des forces électrostatiques entre des objets ayant des propriétés physiques différentes [156].

Il y a un siècle, Alfred Johnsen et Knud Rahbek [157] ont découvert que lorsqu'il y a une différence de potentiel électrique entre deux matériaux en contact, il se produit une force d'attraction entre eux. Le terme électro-adhésion (EA), ou l'adhésion électrostatique (AE), est un effet d'attraction électrostatique entre deux surfaces isolées par un diélectrique. Il s'agit d'une interaction entre un substrat (diélectrique ou conducteur) et un support adhésif (actionneur d'adhésion électrostatique). L'attachement se manifeste par une force qui apparaît lorsque les deux surfaces sont soumises à l'action d'un champ électrique, généralement de l'ordre du kV/mm, généré par deux couches de charges électriques de signe opposé [23]. Les mécanismes d'électro-adhésion sont utilisés depuis de nombreuses années dans diverses applications comme un système d'adhérence ou de récupération.

L'attraction électrique entre une surface chargée et un doigt humain a été découverte par Johnsen et Rahbek. Lorsqu'ils ont appliqué une tension alternative à des électrodes métalliques isolées, ils ont observé une force électrostatique alternative qui attire et libère périodiquement le doigt de la surface ; c'est ce qui est appelé aujourd'hui « l'électro-vibration », et qui constitue les dispositifs haptiques basés sur l'électro-adhésion, tels que les écrans et les afficheurs tactiles [158]. Pour ces applications, les détections tactiles sont produites par l'application d'une tension à la couche conductrice d'un dispositif haptique isolé, tel qu'un écran tactile, induisant des forces électro-adhésives entre le dispositif et le doigt de l'utilisateur [159].

L'effet Johnsen-Rahbek (J-R) est dû à l'attraction électrostatique entre les charges de polarisation sur deux solides, résultant d'un potentiel électrique appliqué, comme indiqué sur la Figure I.29.a. Une application similaire est celle des dispositifs électrostatiques, qui ont été utilisés pour diverses tâches de manipulation, telles que la capture et le dépôt des plaquettes. Dans ce cas, une différence de potentiel électrique se produit entre deux électrodes métalliques fixées au même objet, comme illustré sur la Figure I.29.b.

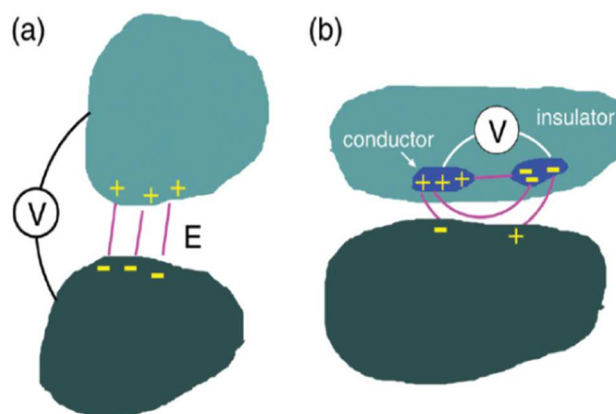


Figure I.29. La force électrostatique attractive produite entre deux objets solides si (a) une différence de potentiel électrique se produit entre les corps, ou si (b) un champ électrique se produit à l'extérieur de l'un des corps en raison d'une différence de potentiel électrique entre deux régions conductrices à l'intérieur du corps [160].

Ces dispositifs électrostatiques sont généralement fabriqués à partir de matériaux élastiques ou rigides, avec des surfaces très plates et lisses, ce qui est utile pour déplacer des objets comme les plaquettes de silicone [160]. L'effet J-R s'est révélé efficace pour le maintien

d'objets dans l'industrie des semi-conducteurs [24]. Les systèmes d'adhérence ou de manutention à base d'EA présentent une adaptabilité élevée, une complexité réduite, une faible consommation d'énergie et des caractéristiques de manipulation minutieuse pour différents matériaux. Les technologies EA permettent le contrôle électrique de l'adhésion dans de nombreuses applications, notamment la capture et la fixation d'objets délicats [161][162], et de matériaux fibreux [163], l'escalade et la mobilité des robots [164][165], les interconnexions mécaniques et électriques [166], l'ancrage [167], entre autres dispositifs robotisés.

Le système typique de l'EA comprend quatre composants essentiels : l'actionneur électro-adhésif, le substrat qui doit être capturé sur l'actionneur, la source haute tension et l'unité de contrôle électrique. Comme il est indiqué sur la Figure I.30, l'actionneur à électro-adhésion (AEA) est constitué d'un réseau d'électrodes immergé dans un diélectrique qui empêche la neutralisation de la charge et le claquage entre les électrodes.

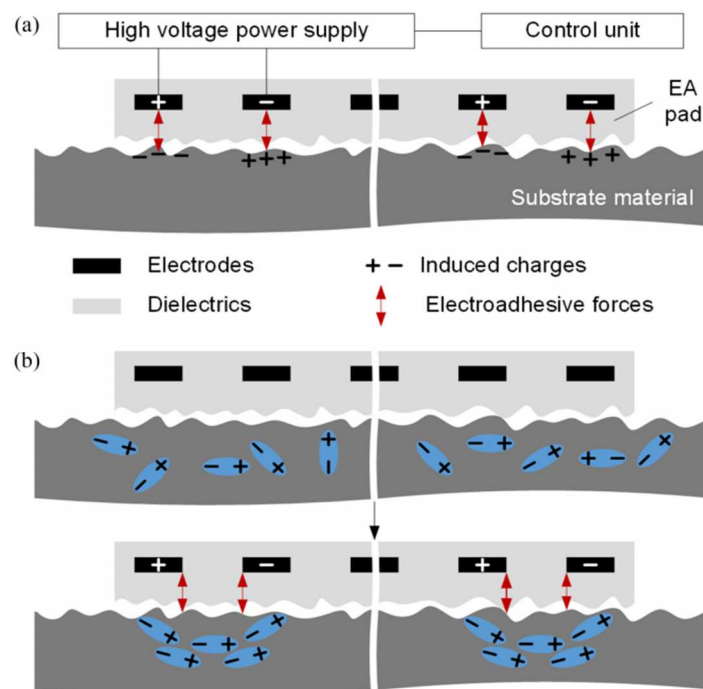


Figure I.30. Vue de coupe d'un système d'EA typique. (a) Électro-adhésion sur des matériaux conducteurs. (b) Électro-adhésion sur les matériaux isolants. Le signe "+" indique une tension positive tandis que le signe "-" indique une tension négative ou la terre [24].

Le matériau diélectrique peut être de l'air, donc des électrodes nues peuvent être utilisées pour le maintien électro-adhésif de certains matériaux isolants. La source haute tension alternative est connectée aux électrodes, et les alimentent avec une excitation unipolaire, bipolaire ou plus généralement multipolaire. L'unité de contrôle est connectée à la source d'alimentation haute tension, et elle a pour rôle de commander dynamiquement les tensions appliquées au système EA, et par conséquent assurer le contrôle de l'adhésion entre l'AEA et le matériau du substrat. Lorsque le réseau d'électrodes est excité par la haute tension, des forces électro-adhésives seront induites, par polarisation ou par induction électrostatique, selon le type du matériau à capturer [168]. L'adhérence peut être interrompue par la mise hors tension de l'AEA [169][170].

Par rapport à d'autres méthodes d'adhésion, telles que les mécanismes d'adhésion magnétiques et pneumatiques, cette technique présente plusieurs avantages clés [24], comme par exemple :

- La capacité à adhérer ou soulever presque tous les matériaux et toutes les surfaces (films d'aluminium, papiers de verre, bétons, plaques de verre, ...) ;
- L'utilisation dans des environnements poussiéreux, à basse pression et même sous vide (y compris dans l'espace) ;
- La simplicité de la structure mécanique et de la commande électrique ;
- L'utilisation d'une tension modérée (\sim kV) avec une faible énergie consommée ;
- La possibilité de soulever des objets délicats et de grande valeur grâce à des conceptions d'AEA souple ;
- Et la capacité d'être réalisé sur divers supports : rigides, flexibles ou extensibles (Figure I.31).

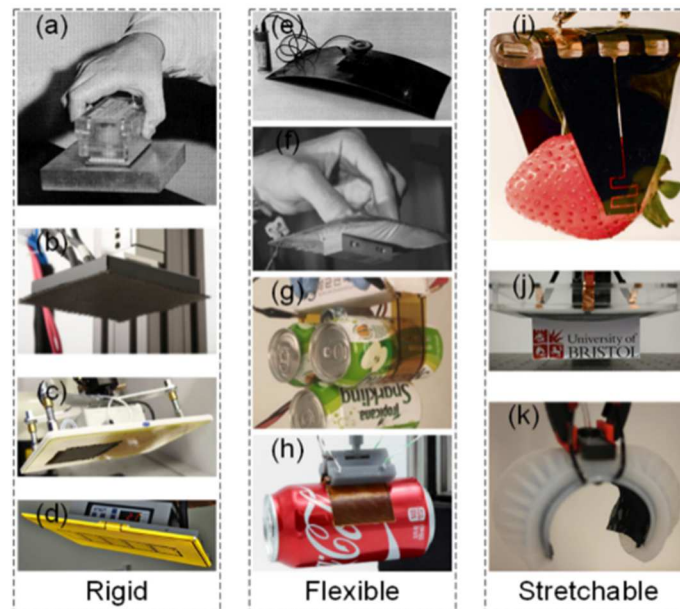


Figure I.31. Supports possibles d'un actionneur d'adhésion électrostatique. Rigides, comprenant : (a) Electroadhesor de la NASA, (b) Pince Fraunhofer IPT EA, (c) Pince Schmalz EA, (d) Pince Grabit EA, Flexible ou conforme, y compris (e) Electro-adhésif flexible de la NASA, (f) Pince EA conforme de Monkman, (g) La pince EA de Choi, et (h) La pince EA de JPL. Extensible, y compris (i) La pince souple DEA-EA de Shintake. (j) Pince composite souple EA-DEA de Guo, et (k) Pince Pneu-EA de Guo [24].

Il convient de noter que l'EA n'est pas une technique d'adhésion parfaite et qu'elle possède quelques limitations. Par exemple, dans certains cas d'applications, elle nécessite une tension relativement élevée, de plus, la pression d'adhésion généralement obtenue est relativement faible et parfois instable [167].

I.2.2.2. Applications et technologies de l'EA

La mise en point de la technologie d'EA est passée par plusieurs étapes à travers le temps. L'effet J-R constitue la base des dispositifs de maintien électrostatique qui ont été largement

utilisées dans l'industrie des semiconducteurs [171]. Les premiers dispositifs d'EA, rigides ou flexibles, réalisés pour les applications aérospatiales, ont été développés par Krape *et al.* dans le cadre des activités spatiales de la NASA [23]. Le besoin croissant d'automatisation de l'assemblage des vêtements dans l'industrie, a conduit Monkman *et al.* d'exploiter le mécanisme de l'EA pour la manutention des tissus ou des textiles [169]. Chen *et al.* ont traité dans leurs travaux les principes de la force d'électro-adhésion, appliqué pour la manipulation des matériaux textiles de grande taille. Ils ont étudié le comportement dynamique du processus de chargement/déchargement de la surface maintenue [172]. Les résultats expérimentaux ont été exploités pour développer un prototype de capture électrostatique des matériaux à base de fibre de carbone.

Dans un autre travail, Monkman *et al.* ont développé les premiers systèmes d'EA qui s'adaptent avec les surface : la micro pince électro-adhésive et le tapis roulant adhérent [173][174]. Yamamoto *et al.* ont conçu un robot d'escalade avec des électrodes flexibles fabriquées à partir d'un film plastique et d'une feuille conductrice. Ils ont testé la performance de fixation du panneau d'électrodes flexibles contre des parois conductrices et non-conductrices. Les résultats des mesures effectuées sur une surface conductrice ont montré que les électrodes flexibles peuvent fonctionner comme une ventouse, et que la force d'aspiration de l'air et la force électrostatique peuvent toutes deux contribuer à l'adhérence des parois. La configuration d'électrode a été utilisée sur un prototype de robot qui pouvait grimper avec succès sur une paroi conductrice avec une vitesse de 6,6 mm/s (Figure I.32.a).

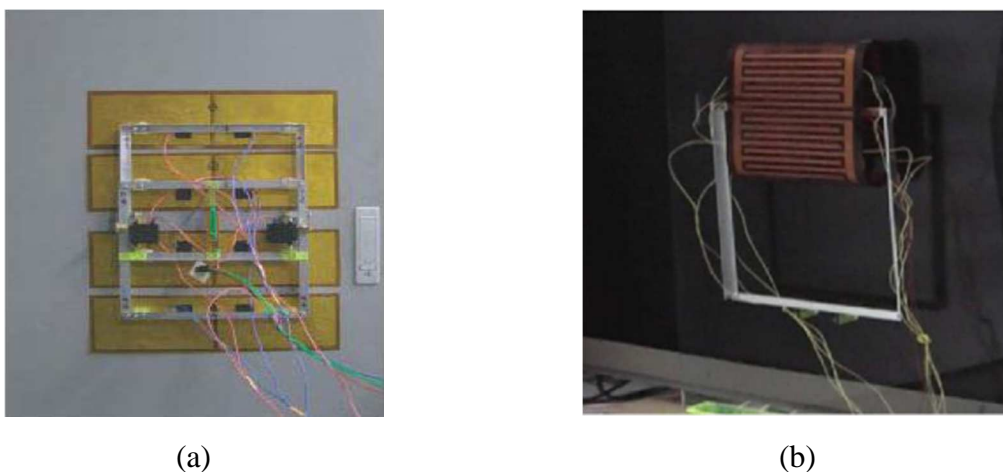


Figure I.32. (a) Prototype de robot grim pant (isolée en surface) sur une paroi conductrice. (b) prototype de robot grim pant sur une surface isolante en verre [175].

Pour l'adhésion des surfaces non conductrices, deux méthodes supplémentaires ont été appliquées aux électrodes flexibles, à savoir le système d'électrodes intercalé sous forme de peigne monté sur le convoyeur d'un autre prototype de robot (Figure I.32.b) et le chargement préalable de la surface. Les résultats obtenus ont révélé qu'avec les méthodes proposées, le robot a pu adhérer à une surface en verre, et grimper à une vitesse moyenne de 1,75 mm/s [175].

Prahlad *et al.* ont étudié expérimentalement la technique de l'électro-adhésion et ont développé une variété de robot d'escalade de murs tels que les robots à chenilles et à pattes [176]. Ils ont testé la force d'attraction des robots grim pant sur des surfaces à différents

matériaux, et ont démontré la validité et les performances élevées de l'électro-adhésion dans ces applications [176].

Pour prouver le concept de l'EA, Wang *et al.* ont fabriqué deux prototypes de robots équipés par un AEA sous forme de film, afin de parcourir des surfaces avec différents modes de déplacement [177]. Le premier prototype qui possède une structure mécanique rigide, a été conçu pour le déplacement vertical et horizontal. Les résultats expérimentaux ont montré qu'il pouvait monter verticalement à une vitesse allant jusqu'à 104 mm/s, et qu'en se déplaçant ou en se tenant sur une surface horizontale, il pouvait porter une charge utile d'environ 3,2 N avec une tension appliquée de 1000 V. Pour grimper sur une surface courbée ou inclinée, le deuxième prototype a été réalisé avec une structure mécanique flexible. Il pouvait se déformer librement et remonter une pente sans pause ni arrêt. Les données de son déplacement ont également révélé que sa vitesse restait la même lorsqu'il se déplaçait sur deux surfaces qui se croisaient [177]. Avec l'accroissement rapide des travaux de recherches dans ce domaine, ces technologies ont pu être commercialisées par la compagnie Américaine Grabbit, Inc [24].

Ruffatto *et al.* ont examiné la géométrie des électrodes dans les AEA pour améliorer les forces d'adhésion en vue de les utiliser dans les applications de robot grimpeur et de capture. L'optimisation de la géométrie des électrodes a permis d'accroître les forces d'adhésion et d'augmenter l'effet de la fixation. Une gamme de largeurs d'électrodes et de tailles de gap (espacement inter-électrodes) a été évaluée pour trouver la configuration optimale. Pour les matériaux très lisses et de composition régulière, tels que le verre et l'acier, les résultats expérimentaux et de simulations ont montré qu'une largeur d'électrode d'environ 3 mm avec une taille de gap aussi petite que possible donnera les plus grandes forces d'adhésion. En revanche, sur les matériaux rugueux, tels que les cloisons sèches et le bois, un espacement et une largeur d'électrode plus importants sont nécessaires pour minimiser la dispersion du champ électrique, et par conséquent, fournir les forces d'adhésion les plus élevées [178][179].

L'électro-adhésion est un mécanisme prometteur pour la robotique et les applications de maintenance, en raison de plusieurs avantages qu'elle présente par rapport à d'autres technologies. Cependant, des forces d'adhésion électrique instables peuvent apparaître dans les milieux ambiants. Les dispositifs électro-adhésifs qui peuvent produire des forces stables dans des environnements changeants sont donc souhaitables. Dans ce contexte, Guo *et al.* ont conçu et fabriqué un dispositif électro-adhésif, flexible qui s'adapte avec les conditions environnementales, par l'application d'une couche de titanate de baryum diélectrique sur une couche mince de cuivre gravée chimiquement [166]. Ils ont caractérisé expérimentalement la force d'adhésion en fonction de l'humidité, la température et la pression atmosphérique. Les résultats montrent que seule une différence relative de 5,94 % dans la direction de la force normale a été observée. Cette différence a été obtenue lorsque l'humidité relative est passée de 25 % à 53 %, la température de 13,7 °C à 32,8 °C et la pression atmosphérique de 999 hPa à 1016,9 hPa. Le dispositif électro-adhésif qui s'adapte avec les conditions environnementales à vocation à favoriser la diffusion de la technologie de l'électro-adhésion [180][181].

Singh *et al.* ont étudié les effets de la charge résiduelle dans le substrat et le diélectrique, sur les performances d'un actionneur électro-adhésif. Pour évaluer l'effet du stockage de la charge, deux configurations d'électrodes ont été utilisées, la première est couverte par une

couche diélectrique en polyimide, la deuxième est à électrodes nues (sans barrière diélectrique). La présence de la couche diélectrique provoque un stockage de la charge, même après la coupure de l'alimentation en tension. Donc, la charge ne peut pas se dissiper à travers le diélectrique qui entraîne un temps de libération plus long. De plus, cette charge résiduelle augmente avec l'augmentation de la tension appliquée aux systèmes d'électrodes. Les électrodes nues, en revanche, n'ont pas de mécanisme de stockage de charge et leur temps de libération est donc nettement inférieur (temps de libération rapide ~ 1 s). En théorie, il ne devrait pas y avoir de délai de libération avec les électrodes nues puisqu'elles ne contiennent que des conducteurs, mais en pratique un certain temps de libération est considéré étant donné que l'air entre le substrat et l'électrode agit également comme un diélectrique. Les résultats ont montré que les électrodes nues donnaient plus de résultats souhaités, car elles avaient un temps d'adhésion et de détachement plus petit, par rapport aux électrodes recouvertes par le diélectrique. Il a été constaté que l'utilisation de la couche diélectrique est en faveur de la manipulation des substrats conducteurs. La manutention des substrats isolante ne nécessite pas une couche diélectrique intermédiaire [182].

Un système d'électro-adhésion autonome, adaptatif et intelligent de manipulation des matériaux a été mis en œuvre par Guo *et al.* [181]. La conception et la fabrication du dispositif sont moins coûteuses. Doté de capteurs de détection, ce système apporte une solution de manipulation autonome qui s'adapte à l'environnement et aux matériaux du substrat. Les résultats ont montré qu'une tension minimale peut être appliquée pour maintenir différents matériaux dans différentes conditions environnementales. Le système proposé a été capable de détecter le changement du niveau d'humidité lorsqu'elle est passée de 58 ± 1 % à 63 ± 1 %, une modification de la tension minimale appliquée (de 6,4 kV à 7,2 kV) a été automatiquement effectuée par le système proposé afin de relever une plaque de papier avec succès. En plus de la capture de la plaque de papier, le système proposé a également réussi à capter une plaque de cuivre et une plaque en polyimide (PI), par application d'une tension minimale (6,4 kV, 3,2 kV et 2,8 kV respectivement) sur la base des données de détection. Le système proposé est particulièrement utile pour les applications de capture et d'emplacement (pick and place) où il existe différents types de matériaux et d'environnements, comme les applications de manipulation robotisée dans l'industrie textile et le recyclage des déchets [181][183].

Shintake *et al.* ont développé la première pince électro-adhésive entièrement souple équipée par un AEA et un élastomère diélectrique [161]. Le premier micro véhicules aériens intégrant la technique d'EA a été développé par Graule *et al.* [184] pour se percher sur divers matériaux.

Xu *et al.* [185] ont développé le premier système d'électro-adhésion auto-alimenté qui utilise des nano-générateurs triboélectriques améliorés (enhanced triboelectric nanogenerators-TENG) pour fournir l'énergie nécessaire à l'opération de l'adhésion (Figure I.33). Le système utilise un canal de supplément de charge triboélectrique pour augmenter la tension du circuit ouvert du TENG afin d'atteindre l'exigence d'électro-adhésion. Grâce au mécanisme de régénération des charges dissipées, le canal de supplément de charge peut maintenir une distribution optimale de la charge dans les électrodes du TENG, ce qui permet d'obtenir la tension de circuit ouvert la plus élevée pour une densité de charge de surface et une configuration de dispositif données. Pour les TENG sans canal supplémentaire, l'état de

distribution de charge n'est pas stable et se dégrade généralement rapidement avec une sortie à basse tension. Les TENG avec le canal supplémentaire obtiennent une augmentation de tension de plus de 10 fois (de 230 V à plus de 3300 V) pour une seule unité TENG. Basé sur la tension amplifiée du TENG, le système d'électro-adhésion auto-alimenté permet d'obtenir des forces d'adhésion pour manipuler des objets en matériaux conducteurs, semi-conducteurs et non-conducteurs par des opérations simples et faciles, ce qui démontre un grand potentiel d'applications dans la manutention et la robotique. Selon les auteurs, le canal de supplément de charge devrait constituer une stratégie universelle pour améliorer la tension en circuit ouvert de différents types de TENG. Donc, un système intégré composé de TENG avec le canal de supplément de charge, et un condensateur haute tension, peut efficacement générer une sortie haute tension et atténuer sa décroissance rapide [185]. Ceci, peut offrir une solution économique et pratique pour diverses applications qui nécessitent une alimentation électrique haute tension.

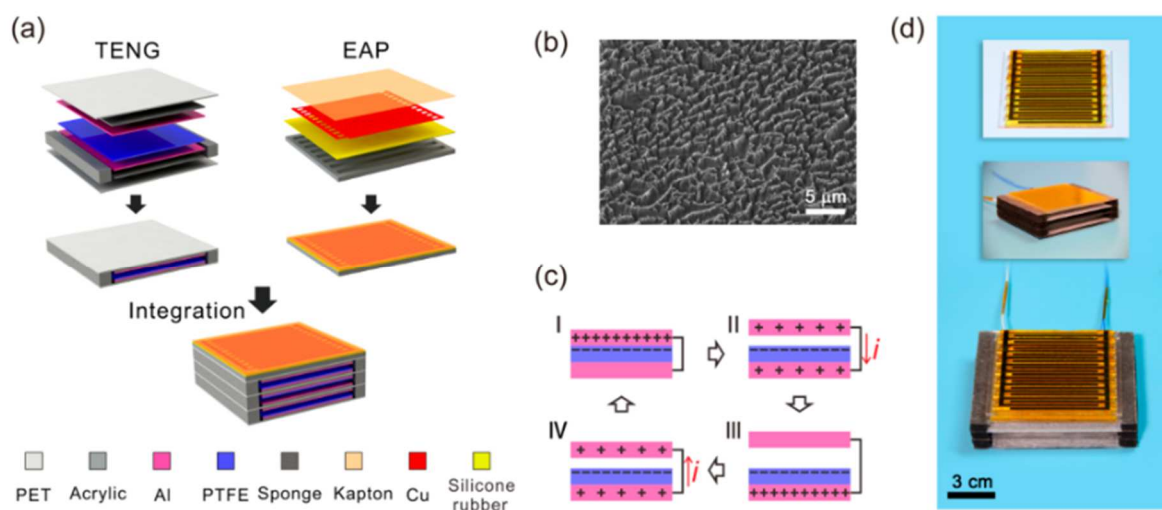


Figure I.33. Conception du système d'électro-adhésion auto-alimenté. (a) Processus d'intégration du système à partir de trois nano-générateurs triboélectriques (TENG) et d'un actionneur électro-adhésif (EAP). (b) Image des nanostructures gravées sur la surface. (c) Principe de fonctionnement de base du TENG. (d) Photographie du système fabriqué [185].

I.2.2.3. Méthodes de calcul de la force d'EA

Une modélisation simplifiée des forces d'adhésion électrostatique basée sur des hypothèses pratiques est très utile pour comprendre le phénomène d'électro-adhésion et donner une idée du niveau des forces d'EA que l'on peut obtenir. Cela peut aider à orienter la conception, la fabrication, les essais et l'application des supports électro-adhésifs [24]. Des méthodes simples basées sur les théories classiques des condensateurs parallèles ont été utilisées par la plupart des chercheurs pour calculer les forces électro-adhésives [170][186]. Il existe de nombreux modèles pour le calcul de ces forces à partir du potentiel électrostatique dérivé de l'équation du tenseur de contrainte de Maxwell (Maxwell stress tensor) [187][188]. Une variété de modèles théoriques et de simulation numérique ont été utilisés : la méthode de correspondance ponctuelle développée à partir de la méthode de cartographie conforme [189], la solution analytique [190], la méthode des différences finies [191], et la méthode des éléments finis utilisant l'analyse multiphysique sous COMSOL [168][192][193]. Ces moyens d'analyses ont permis aux chercheurs de déduire la géométrie optimale des électrodes afin d'obtenir les

forces électro-adhésives maximales entre l'AEA et le substrat. Il convient de noter que les modèles précédents sont tous statiques et ne rendent pas compte de la nature et la caractéristique dynamique du phénomène d'EA. A notre connaissance, seuls les modèles théoriques développés par Chen *et al.* [194][195], Nakamura et Yamamoto [196] ont pris en compte les comportements mécaniques dynamiques induits par les opérations d'EA.

Comme il est difficile d'inclure dans les modèles analytiques et d'analyse par éléments finis, les conditions environnementales variables, la texture de la surface et les changements dynamiques des propriétés des matériaux induits par la polarisation/dépolarisation en présence de la haute tension ; la modélisation empirique basée sur des données expérimentales peut être un modèle de solution avancé qui peut prédire les performances des électrodes de l'AEA et aider à leur conception et fabrication. Koh *et al.* [197] ont utilisé une équation empirique pour calculer la capacité des électrodes intercalées dans un modèle théorique d'EA simplifié. Guo *et al.* [198] ont développé des modèles empiriques basés sur des données déduites de la relation entre la force d'EA qui peut être obtenue et la tension appliquée jusqu'à 20 kV. Chen et Bergbreiter [199] ont élaboré expérimentalement un modèle de friction basique pour prédire la force tangentielle de l'EA.

Choi *et al.* ont réalisé une modélisation quantitative de la conception des électrodes d'un dispositif électro-adhésif de levage de différents objets (verre, papier et métal) basé sur la distribution localisée des charges et polarisation interfaciale [200]. Bien que le potentiel électrique généré par le dispositif induit des charges opposées sur l'objet pour donner la force électrostatique, les principaux facteurs de conception basés sur les processus fondamentaux de la polarisation interfaciale doivent être clairement identifiés. Les auteurs dans leur étude ont identifié que la force d'électro-adhésion est quantitativement liée à la longueur totale des bords des électrodes, où les charges induites sont concentrées de manière sélective. Ils ont constaté que les charges induites étaient concentrées sur les bords des électrodes, car la quantité de ces charges induites était maximale lorsque la distance des champs équipotentiels devenait minimale. Sur la base de cette constatation, Choi *et al.* ont proposé un modèle qui permettait de prédire les forces électro-adhésives en fonction du rapport entre la tension appliquée, l'impédance et la longueur de la limite des électrodes [200]. Par ailleurs, la quantité de charges induites et l'amplitude des polarisations développées dans différents objets ont été mesurées et comparés avec les forces électro-adhésives [200].

Un des défis majeurs de l'EA est le développement de nouvelles solutions pour accélérer le processus de libération de la surface capté, à cause des charges résiduelles qui empêchent le détachement. Cao *et al.* ont examiné les effets de la couche isolante de l'actionneur d'EA et les types de matériaux de l'objet à manipuler, sur le temps de détachement [167]. Les résultats ont montré que la vitesse de détachement dépend fortement de la couche diélectrique du système d'adhésion et le type du matériau à manipuler. Pour des expériences réalisées sur huit objets à différent matériaux, il a été constaté que les matériaux en plastique prennent un temps de libération plus long, tandis que les matériaux à base de cellulose prennent le temps de libération le plus court. Il existe une forte relation inverse entre la constante diélectrique et le taux de libération, alors qu'un poids moléculaire plus élevé entraîne une relaxation diélectrique plus lente, et par conséquent, un temps de libération plus long. Ces résultats permettent de déduire que les dispositifs d'EA dotés de capacités de détachement rapide pourraient améliorer

considérablement le débit global des chaînes de montage, avec des tâches de capture et emplacement des matériaux [167].

Selon Chen *et al.* [153], il a été constaté qu'au cours de plusieurs cycles d'activation de l'AEA (mise sous tension séquentielle pendant un certain temps, puis mise hors tension sans décharge délibérée), la force d'EA résultante diminue jusqu'à une faible valeur. Cet effet a également été observé par Graule *et al.* [184]. Cependant, ils n'ont étudié que les substrats en verre et ont conclu que la force d'EA chute à une valeur inférieure à sa valeur initiale après 35 essais d'adhésion/détachement. Cette dégradation de la force d'EA interfaciale en fonction du temps, est fort probablement due à l'accumulation excessive de charges polarisées résiduelles. Xu *et al.* ont mis en place la méthode d'inversion de la polarité de la tension, par contre, avant la réactivation de l'électro-adhésif, ils l'ont mis en attente pendant plusieurs minutes, après l'interruption de la tension, afin de dissiper naturellement les charges résiduelles piégées [185]. Par ailleurs, Chen *et al.* ont effectué des essais de la force de cisaillement, généré par la force d'EA, sur différents matériaux (PET, verre, ABS et bois), et ils ont montré que l'atténuation de la force était dominée par les charges de polarisation résiduelles piégées dans le diélectrique de l'AEA plutôt que dans le diélectrique du substrat. Afin d'expliquer la dynamique de ce phénomène, les auteurs ont examinés et comparés trois différentes méthodes destinées à la réduction de ce problème, il s'agit de : (1) la méthode de la décharge naturelle, (2) la méthode de décharge de résistance à haute tension et (3) la méthode de décharge avant l'inversion de la polarité du champ. Ces méthodes de décharge ont été validées expérimentalement comme étant efficaces, et ont révélé que la réduction de la force d'EA est inversement proportionnelle au temps de la décharge [153]. Ces solutions sont utiles pour générer des forces d'EA stables et répétables, nécessaires à la caractérisation de l'EA et son utilisation dans la manipulation des matériaux, et les tâches des robots mobiles (rampant et grimant).

I.3. Positionnement de la problématique de la thèse

Dans l'ensemble de ce chapitre, nous avons introduit une synthèse bibliographique sur les différents systèmes qui utilisent l'action du champ électrique sur des particules, et plus particulièrement les applications des actionneurs à réseaux d'électrodes intercalées. Dans la plupart des travaux expérimentaux et numériques portés sur la technique des ondes voyageuses et stationnaires, les chercheurs se sont intéressés au transport, déplacement et classification des particules isolantes ou conductrices, en fonction de l'application souhaitée. Les techniques d'électro-adhésion ont été employées pour créer un attachement entre les actionneurs d'adhésion et les surfaces conductrices ou isolantes, principalement utilisé dans les technologies des robots manipulant des objets. Peu d'études ont visé l'utilisation des systèmes à réseaux d'électrodes interposées dans la séparation électrostatique de mélange conducteur – diélectrique.

Le besoin continu du recyclage des déchets issus du broyage de câbles électriques nécessite toujours l'élaboration de nouvelles technologies pour trouver un compromis entre la consommation d'énergie et le rendement de séparation. En partant de cette nécessité, nous proposons d'exploiter les techniques des ondes voyageuses et d'électro-adhésion afin de les appliquer à la problématique du tri électrostatique, et plus particulièrement le cas des mélanges granulaires métal/polymère, dont la taille varie entre 0,5 mm et 10 mm.

La stratégie d'action adoptée dans le cadre cette thèse consiste à utiliser l'actionneur afin d'agir sur les particules conductrices à l'aide de la force d'électro-adhésion d'une part, et de transporté les particules isolantes à l'aide des ondes voyageuses ou la gravité d'autre part. La validation de cette stratégie permettra de concevoir un nouveau prototype de séparation électrostatique.

Pour atteindre cet objectif, une première étude théorique et numérique est effectuée afin d'interpréter l'effet des grandeurs physiques agissants sur le comportement des matériaux au-dessus de la surface des actionneurs. Cette étude est accompagnée par une modélisation expérimentale des différents paramètres électriques et géométriques contribuant au processus de la séparation. Les résultats de ces deux études permettront de mieux comprendre le mode d'action des forces électrostatique dans les processus de manipulation des particules conductrices et isolantes afin de les appliquer dans un prototype de séparation électrostatique.

CHAPITRE II

Etude analytique et numérique du
phénomène d'électro-adhésion

Chapitre II

Etude analytique et numérique du phénomène d'électro-adhésion

Afin de comprendre le comportement des particules conductrices et diélectriques sur un actionneur d'adhésion électrostatique, il est indispensable de passer par une étude détaillée de la force électrostatique qui apparaît au-dessus de la surface de cet actionneur, lors de l'application de la tension électrique. Dans le cadre de ce chapitre, nous avons étudié le phénomène d'électro-adhésion de ces particules pour l'appliquer au processus de tri électrostatique, essentiellement dans le cas des mélanges de matériaux granulaires métal/polymère. L'analyse de ce phénomène qui apparaît aux voisinages des interfaces des matériaux en contact avec les systèmes d'électrodes intercalées, consiste à utiliser des modèles analytiques et numériques en vue de déterminer l'effet de la force d'électro-adhésion sur chaque type de matériau, en fonction des différents paramètres électriques et géométriques. Les résultats permettront d'estimer l'ordre de grandeur de cette force, et de réaliser une comparaison entre l'adhésion des matériaux conducteurs et diélectriques, afin de confirmer l'applicabilité de cette technique dans un procédé de séparation électrostatique.

II.1. Modélisation de la force d'électro-adhésion

L'adhésion électrostatique est créée par l'application d'une haute tension (généralement de l'ordre du kV) à travers un réseau d'électrodes noyées dans un matériau diélectrique [191]. Le système d'électro-adhésion est capable d'agir sur presque tous les types de surface (acier, verre, papier, béton, etc...), dans la mesure où les matériaux subissent une formation de charges induites sur les interfaces de contact [200].

Les principes de génération des forces électro-adhésives sur les matériaux conducteurs et diélectriques sont différents. Le premier est basé sur l'induction électrostatique, tandis que le second dépend principalement de la polarisation électrique. La force électro-adhésive augmente avec l'amplitude du champ électrique et dépend de nombreux facteurs, notamment les propriétés des matériaux (épaisseur de la barrière diélectrique, permittivité et la tension critique de claquage), les propriétés structurelles (géométrie des électrodes, rugosité de surface) et les propriétés électriques (tension appliquée, forme d'onde, fréquence, etc..) [200].

L'intérêt de la modélisation théorique est d'optimiser les moyens techniques d'une part, et d'analyser des cas d'études difficiles à réaliser expérimentalement d'autre part. Ces modèles permettent d'obtenir une expression mathématique approchée des potentiels et des champs électriques à n'importe quel point de la surface d'adhésion. Dans un modèle analytique, l'expression déduite peut être introduite facilement dans un outil de calcul mathématique, sous forme d'algorithmes, pour déterminer l'évolution de la force d'électro-adhésion en fonction des paramètres d'entrée. Il est aussi facile de calculer numériquement le niveau de cette force par l'utilisation d'un logiciel de simulation numérique.

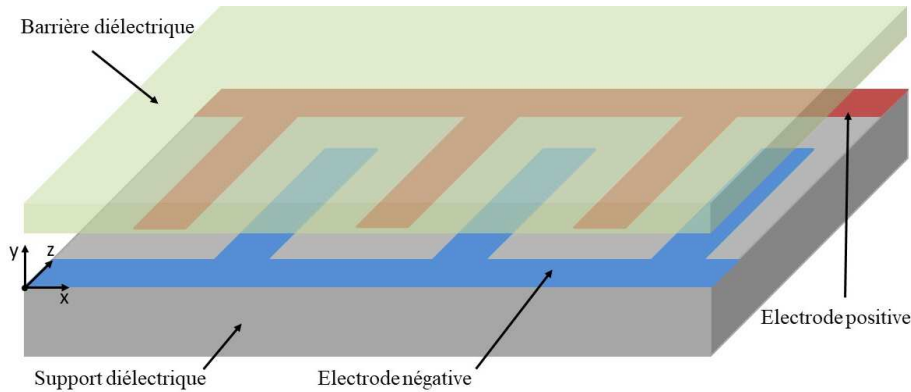
La modélisation des forces électro-adhésives sur les substrats conducteurs peut se rapprocher de la théorie des condensateurs en parallèle, tandis que dans le cas des substrats diélectriques, la capacité coplanaire associée au processus dynamique de la polarisation doit être prise en compte lors de l'analyse [201] [202]. On peut trouver dans la littérature des relations mathématiques ou des résultats expérimentaux qui ont été développés et exploités pour mettre un lien entre la polarisabilité et la force d'adhésion électrostatique. Chen, Liu *et al.* [187] sont parmi les premiers auteurs à établir des modèles théoriques afin d'expliquer le phénomène d'électro-adhésion. Ces modèles exploitent la formule du tenseur de contrainte de Maxwell pour calculer la force d'adhésion. Mao et Koh [190] [197] [203] ont proposé dans leurs travaux une solution analytique pour calculer le champ électrique entre un substrat et l'actionneur d'électro-adhésion. Cao et Dadkhah [189] [192] ont envisagé la méthode des éléments finis pour expliquer le phénomène d'adhésion électrostatique généré par le système d'électrodes intercalées. En vue d'augmenter la force d'adhésion, Ruffato [204], Guo [201] [205] et Kim [193] ont confirmé que ces méthodes, en association avec des données expérimentales, sont très utiles dans l'optimisation de la géométrie des électrodes et le contrôle des propriétés des matériaux. D'autres modèles ont été développés par Persson [160] et Ciavarella [206], qui ont réalisé des études analytiques et numériques sur l'évolution de la force électro-adhésive en fonction du temps et sur l'effet de la rugosité des interfaces sur le processus d'adhésion. Avec la diversité des méthodes de calcul de la force d'électro-adhésion, généralement basées sur l'équation du tenseur de stress de Maxwell, nous avons choisi de suivre les modèles analytiques de Mao et Brandstetter [190] [207] [208] qui s'adapte le plus à notre cas d'étude. Ce modèle est également adapté aux calculs numériques par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel commercial COMSOL Multiphysics. La description des deux méthodes de calcul et les résultats associés à chaque type de matériaux (conducteur et diélectrique) sont discutés dans les prochains paragraphes.

II.1.1. Modèle analytique

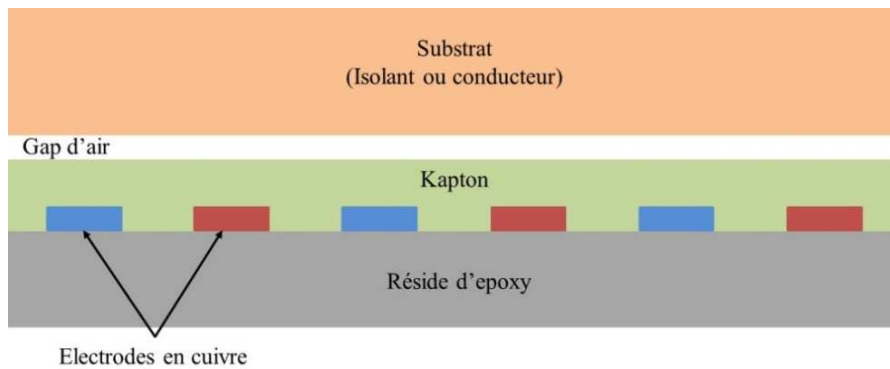
Le but de cette section est de présenter les modèles analytiques permettant d'analyser théoriquement la force électro-adhésive des matériaux diélectrique et conducteur. La conception typique d'un actionneur à électro-adhésion (AEA) est représentée sur la Figure II.1. Il est composé d'un réseau d'électrodes qui prend la forme de deux peignes intercalés, généralement connectés à deux sources de tension. L'ensemble des électrodes est immergé dans un support diélectrique (résine renforcée par des fibres de verre), et recouvert par une barrière diélectrique en polymère (polyamide). Pour générer les forces d'adhésion, il suffit juste d'exciter le système en haute tension et le mettre en contact avec un substrat (matériaux diélectrique ou conducteur).

Pour simplifier la modélisation, la rugosité de la surface des substrats diélectriques ou conducteurs et du système électro-adhésif est considérée comme une couche d'air avec une épaisseur uniforme, comme indiqué sur la Figure II.1.b. La configuration de ce système est quasi-identique dans la direction de la longueur des électrodes (axe z). Si les épaisseurs de la barrière diélectrique et le gap d'air sont largement inférieurs à la longueur des électrodes, uniquement la section transversale du système est alors prise en compte pour l'analyse. Ainsi, l'effet des deux électrodes périphériques, qui servent à interconnecter l'ensemble des

électrodes, est négligé pour simplifier la modélisation. Par conséquent, le problème de calcul tridimensionnel est converti en un problème bidimensionnel. L'épaisseur des électrodes est considérée suffisamment faible pour négliger l'influence de la barrière diélectrique sur la distribution du potentiel entre les électrodes. De plus, les effets de bord latéraux du champ électrique sur les électrodes sont négligés dans cette modélisation.



(a)



(b)

Figure II.1. Schéma d'un actionneur électro-adhésif avec des électrodes intercalées.

(a) Vue 3D ; (b) Vue de côté.

II.1.1.1. Cas d'un diélectrique

En raison de la périodicité de la structure, l'efficacité d'adhésion peut être étudiée sur une seule période géométrique L , d'où $x \in [-L/2, L/2]$, comme il est illustré sur la Figure II.2. Les électrodes sont des bandes parallèles de forme plane dont l'écartement et la largeur sont respectivement g et w . Des tensions positives et négatives V_p et V_n sont appliquées alternativement aux électrodes. Le modèle de calcul de base est représenté par 4 couches dont chacune représente, dans l'ordre croissant, le support diélectrique, la barrière isolante, le gap d'air et le substrat diélectrique [187] [190] [194]. L'épaisseur et la permittivité de la couche du support diélectrique sont respectivement d_1 et ε_1 . La barrière isolante de l'actionneur électro-adhésif, d'une épaisseur de d_2 et d'une permittivité ε_2 , doit empêcher la rupture diélectrique. La fine couche d'air prise en compte a une épaisseur de d_3 et une permittivité de ε_3 . La permittivité de la couche du matériau diélectrique est ε_4 , et l'épaisseur d_4 est considérée très grande par rapport à la taille de l'actionneur.

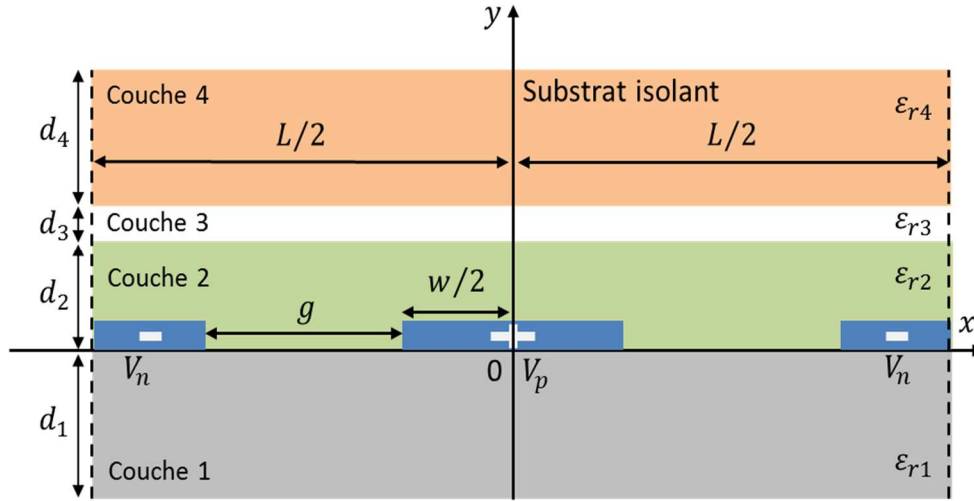


Figure II.2. Section transversale de l'actionneur d'électro-adhésion. La structure est multicouche; couche 1 : support isolant, couche 2 : barrière diélectrique, couche 3 : gap d'air, couche 4 : substrat diélectrique.

Pour calculer la force d'électro-adhésion, il est nécessaire de déterminer la distribution du champ électrique généré par le système d'électrodes intercalées. Dans tout l'espace de solution, le champ électrique peut être entièrement décrit par le potentiel électrique [190]. Pour les électrodes positives et négatives réparties symétriquement sur les côtés gauche et droit de l'axe des y , la fonction du potentiel spatial est une fonction paire suivant les axes de coordonnées. Par conséquent, il suffit de calculer la force d'électro-adhésion seulement sur une demi-période géométrique où $x \in [0, L/2]$. À partir de l'équation de Maxwell, la relation entre le champ E et le potentiel électrique φ peut être exprimée par :

$$E = -\nabla\varphi \quad (\text{II.1})$$

L'espace de résolution comprend quatre milieux différents, et le champ électrique présente des discontinuités sur les interfaces dans la direction y . Cet espace peut être divisé en quatre couches de forme rectangulaire (Figure II.2). En raison de la conservation de la charge électrique dans les 4 milieux, l'équation de Laplace (II.2) pour le potentiel électrique est valable dans chacune de ces couches.

$$\nabla^2\varphi = \frac{\partial^2\varphi(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi(x,y)}{\partial y^2} = 0, \quad -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad 0 \leq y \leq \infty \quad (\text{II.2})$$

Où $\varphi(x,y)$ est la distribution du potentiel spatial.

L'équation (2) peut être résolue par la méthode de séparation des variables [194].

$$\varphi(x,y) = X(x)Y(y) \quad (\text{II.3})$$

Si l'équation (II.3) est remplacée dans l'équation (II.2), et divisée sur $X(x)Y(y)$, il résulte les deux équations différentielles ordinaires suivantes :

$$\frac{d^2X(x)}{dx^2} + \lambda^2X(x) = 0, \quad \frac{d^2Y(y)}{dy^2} + \lambda^2Y(y) = 0 \quad (\text{II.4})$$

D'où λ^2 est la constante de séparation.

La solution générale de l'équation (II.2) peut être obtenue par la combinaison linéaire des deux solutions $\varphi_{\lambda=0}(x, y)$ et $\varphi_{\lambda \neq 0}(x, y)$, comme suit :

$$\begin{aligned}\varphi(x, y) &= \varphi_{\lambda=0}(x, y) + \varphi_{\lambda \neq 0}(x, y) \\ &= (Ax + B)(Cy + D) + \sum_{\lambda} [E \sin(\lambda x) + F \cos(\lambda x)] [G e^{\lambda y} + H e^{-\lambda y}]\end{aligned}\quad (\text{II.5})$$

Les coefficients A, B, C, D, E, F, G, H et λ peuvent être déterminés par l'adaptation de la solution de $\varphi(x, y)$ avec les conditions aux limites.

Considérons que l'épaisseur de la surface du substrat diélectrique est largement supérieure à l'épaisseur du gap d'air de sorte que le potentiel électrique et le champ électrique diminuent jusqu'à zéro à la limite supérieure du substrat, alors que les autres couches qui composent l'espace possèdent un potentiel électrique fini et symétrique sur les plans $x = 0$ et $x = L/2$. Les conditions aux limites de type Neumann satisfont les équations suivantes :

$$\frac{\partial \varphi(0, y)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \varphi(L/2, y)}{\partial x} = 0, \quad d_2 \leq y \leq +\infty \quad (\text{II.6})$$

Les conditions de continuité, aux interfaces des couches diélectriques, forment un ensemble de conditions aux limites qui peuvent être divisées en composantes tangentielles et normales exprimées par le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1(x, y) = \varphi_2(x, y) \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1(x, y)}{\partial x} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2(x, y)}{\partial x}, \quad y = 0; \\ \varphi_2(x, y) = \varphi_3(x, y) \\ \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2(x, y)}{\partial x} = \varepsilon_3 \frac{\partial \varphi_3(x, y)}{\partial x}, \quad y = d_2; \\ \varphi_3(x, y) = \varphi_4(x, y) \\ \varepsilon_3 \frac{\partial \varphi_3(x, y)}{\partial x} = \varepsilon_4 \frac{\partial \varphi_4(x, y)}{\partial x}, \quad y = d_2 + d_3. \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

Sur une demi-période géométrique où $x \in [0, L/2]$, le potentiel électrique est symétrique par rapport au centre de l'espacement inter-électrodes. Les méthodes d'approximation de la série de Taylor de premier ordre et le développement en série de Fourier peuvent être utilisées pour déduire le potentiel électrique sur le plan $y = 0$ donné par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}\varphi(x, 0) &= \frac{V_p + V_n}{2} + \frac{2(V_n - V_p)}{(1 - 2w/L)\pi^2} \\ &\quad \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[\cos \frac{n\pi}{L} (L - w) - \cos \frac{n\pi w}{L} \right] \cos \left(\frac{2n\pi}{L} x \right)\end{aligned}\quad (\text{II.8})$$

Lorsque $0 \leq x \leq L/2$, le premier terme de l'équation (8) correspond au potentiel des électrodes, tandis que le deuxième terme correspond au potentiel inter-électrodes.

Basé sur les conditions aux limites du système d'équation (II.7), le potentiel électrique à $y = 0$ de l'équation (II.8) et les conditions aux limites de Neumann (II.6), le potentiel électrique (II.5) peut être calculé dans chaque régions 'i' suivant l'équation (II.9) :

$$\varphi_i(x, y) = C_i y + D_i + \sum_{n=1}^{\infty} (G_i e^{2n\pi y/L} + H_i e^{-2n\pi y/L}) \times \cos\left(\frac{2n\pi}{L} x\right), \quad (II.9)$$

$$0 \leq y \leq +\infty$$

Les coefficients : C_i , D_i , G_i et H_i correspondant à chaque couche sont donnés dans l'annexe 1. La force d'électro-adhésion appliquée à la surface isolante (couche 4) est dérivée de l'interaction entre le champ électrique et les charges électriques induites par polarisation. Donc, la force d'adhésion totale peut être obtenue par l'utilisation de l'équation (II.10) du tenseur de stress de Maxwell pour déterminer la densité de force f sur le volume V de la paroi diélectrique, et qui consiste à calculer l'intégrale longitudinale sur une surface enfermant ce volume, comme il est mentionné dans l'équation (II.11).

$$T_{ij} = \varepsilon E_i E_j - \frac{1}{2} \varepsilon E_k E_k \delta_{ij} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon}{2} (E_x^2 - E_y^2) & \varepsilon E_x E_y \\ \varepsilon E_x E_y & \frac{\varepsilon}{2} (E_x^2 - E_y^2) \end{bmatrix} \quad (II.10)$$

$$F_{total} = \int_V f dV = \oint_A T_{ij} \times dA = \varepsilon \oint_A \left(E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E_k E_k \right) n \times dA \quad (II.11)$$

Où T_{ij} , ε et δ_{ij} représentent le tenseur de stress de Maxwell, la permittivité diélectrique et le delta de Kronecker, respectivement.

Comme il a été mentionné précédemment, il convient de noter que l'épaisseur du matériau diélectrique peut être considérée très grande par rapport à l'épaisseur de l'actionneur à électro-adhésion et du gap d'air. Pour cette raison, seul le champ électrique de la couche 3 sur la limite $y = d_2 + d_3$ est nécessaire pour l'intégration. A partir de l'équation (II.11), et suivant l'axe y , la force d'adhésion électrostatique normale appliquée sur le matériau isolant, de longueur $L/2$ et largeur l , peut être exprimée comme suit :

$$F_{Adhy} = \frac{\varepsilon_3 l}{2} \int_0^{L/2} \left\{ [E_{3y}^2[x, (d_2 + d_3)]] - [E_{3x}^2[x, (d_2 + d_3)]] \right\} dx \quad (II.12)$$

Avec

$$\begin{cases} E_{3x} = -\frac{d\varphi_3(x,y)}{dx} = \left(\frac{2n\pi}{L}\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} (G_3 e^{2n\pi y/L} + H_3 e^{-2n\pi y/L}) \times \sin\left(\frac{2n\pi}{L} x\right) \\ E_{3y} = -\frac{d\varphi_3(x,y)}{dy} = \left(\frac{2n\pi}{L}\right) \times \sum_{n=1}^{\infty} (-G_3 e^{2n\pi y/L} + H_3 e^{-2n\pi y/L}) \times \cos\left(\frac{2n\pi}{L} x\right) \end{cases} \quad (II.13)$$

$$\text{Où } \begin{cases} 0 \leq x \leq L/2 \\ d_2 \leq y \leq d_2 + d_3 \end{cases}$$

L'expression de la force d'électro-adhésion pour le cas d'un diélectrique, relative aux équations (II.12) et (II.13), est très compliquée à calculer car elle a une sommation sur un nombre infini de termes. Heureusement que la série converge de telle sorte qu'une précision

raisonnable $< 1\%$ peut être obtenue pour un nombre de termes limité à 30 [190] [197] [203] [189].

II.1.1.2. Cas du métal

La Figure II.3 illustre le schéma d'électro-adhésion d'une surface conductrice. La barrière diélectrique sert à isoler les électrodes contre les claquages électriques, et d'empêcher l'apparition des courts circuits. Pour un substrat conducteur, il existe deux types d'électro-adhésion. On parle du type de Coulomb lorsqu'on considère les surfaces adhérentes de forme régulière, dans ce cas, la force d'EA se calcule seulement dans les régions en contact. On parle de l'EA type Johnsen – Rahbek dans le cas où on tient compte des irrégularités (rugosité), alors la force d'EA se calcule sur toute la section de surface y compris les irrégularités. Les forces de type Coulomb seront dominantes si la résistivité volumique du matériau diélectrique recouvrant les électrodes est supérieure à environ $10^{14} \Omega \text{ cm}$ alors que les forces de Johnsen-Rahbek seront dominantes si la résistivité volumique est comprise entre environ 10^{10} et $10^{12} \Omega \text{ cm}$ [201].

Lorsque les électrodes sont sous tension électrique, les électrons sont libres de se déplacer dans les matériaux conducteurs, ainsi les électrons négatifs migrent sous les électrodes positives et des trous d'électrons sont créés sous les électrodes négatives. Cette disposition est similaire à un ensemble de condensateurs en parallèle. Ainsi, le modèle analytique pour le cas du matériau conducteur consiste à calculer la force EA au niveau de chaque condensateur. L'épaisseur de la barrière diélectrique est d_3 , et la permittivité relative est ϵ_{r3} . L'épaisseur du gap d'air entre le système d'EA et le substrat est d_3 , et la permittivité relative est ϵ_3 . L'épaisseur du substrat conducteur est considérée très grande par rapport à celle de l'AEA.

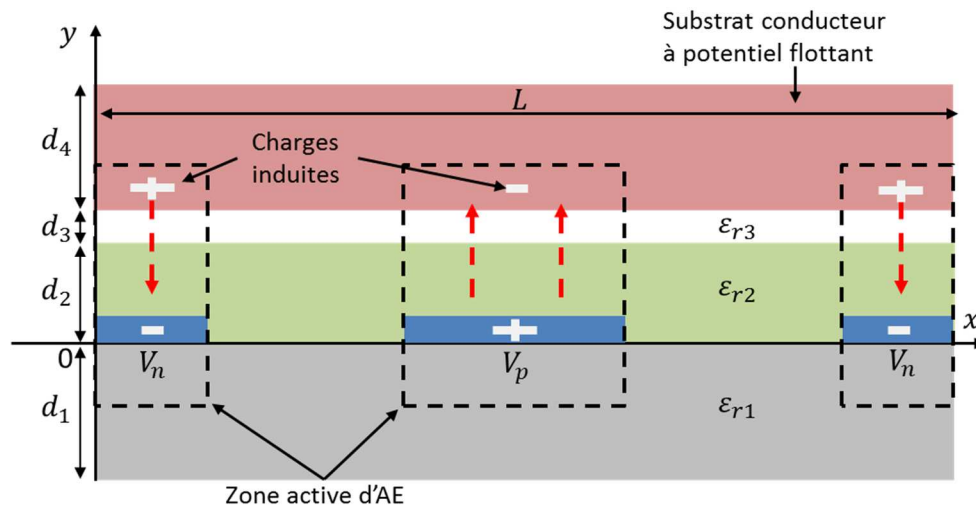


Figure II.3. Section transversale de l'actionneur à électro-adhésion avec un substrat conducteur.

Lorsqu'une haute tension V_p (ou V_n) est appliquée à chaque électrode de surface $S = w \times l$, le substrat conducteur sera soumis au champ électrique généré, et s'attire vers le système d'électrode. La Figure II.4 montre une des zones d'interaction entre une électrode et le matériau conducteur. La force d'adhésion électrostatique F générée peut être obtenue également par le calcul de la densité de force volumique mentionnée dans l'équation (II.11). La force dans la direction de l'axe y est donnée par l'expression :

$$F_{Adhy} = \int_V f_y dV = \int_V (\nabla \cdot T_{yy}) dV = \oint_A T_{yy} \times dA \quad (\text{II.14})$$

Pour un seul condensateur considéré, comme indiqué sur la Figure II.4, la discontinuité sur l'interface des matériaux diélectriques donne la traction agissant sur la surface des différents matériaux $\langle T_{yy} \rangle$ exprimée par [176] :

$$\langle T_{yy} \rangle = T_{yy}^+ - T_{yy}^- \quad (\text{II.15})$$

Où les signes '+' et '-' indiquent les valeurs légèrement au-dessus et au-dessous de la surface dans la direction y , respectivement.

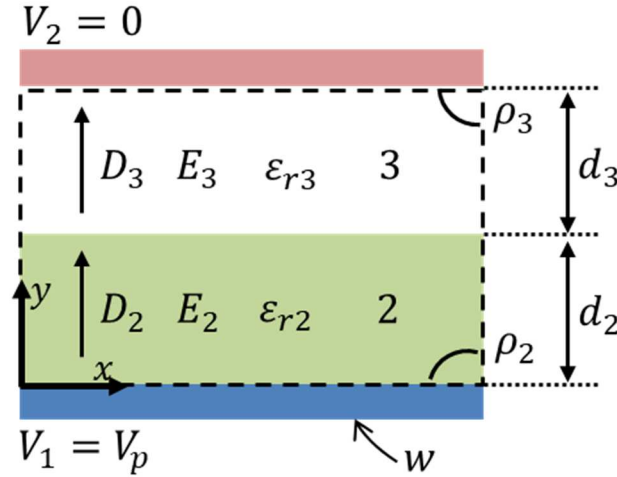


Figure II.4. Schéma d'un condensateur plat contenant deux couches de diélectriques différents en série avec une surface limite entre les diélectriques parallèle aux plaques conductrices.

Ce modèle théorique est similaire à une capacité avec deux couches diélectriques en série. Lorsqu'une haute tension alimente l'électrode inférieure de cette capacité, des charges électriques de signe opposé apparaissent sur l'électrode supérieure. Une fois ces charges atteignent l'équilibre, les densités de charges libres ρ_2 et ρ_3 deviennent égale ($\rho_2 = \rho_3 = \rho$). De plus, puisqu'il n'existe pas des charges libres sur l'interface des matériaux diélectriques, alors les composantes normales des vecteurs de déplacement du champ électrique (D_1, D_2) sont égales, selon le théorème de Gauss. Cependant, il est facile de vérifier que l'amplitude de la densité du champ électrique totale est donnée par $E = E(y)$, avec

$$E(y) = \begin{cases} 0, & y = 0 \\ \frac{\rho}{\varepsilon_{r2}\varepsilon_0}, & 0 < y < d_2 \\ \frac{\rho}{\varepsilon_{r3}\varepsilon_0}, & d_2 < y < d_2 + d_3 \\ 0, & d_2 + d_3 < y \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Où ρ est la densité surfacique des charges libres sur l'électrode et le substrat conducteur, ε_{r2} et ε_{r3} sont les permittivités diélectriques relatives de la barrière diélectrique et de l'air, respectivement. Et les composantes du tenseur de stress de Maxwell peuvent être exprimées comme suit :

$$T_{yy}(y) = \begin{cases} 0, & y = 0 \\ \frac{\rho^2}{2\varepsilon_{r2}\varepsilon_0}, & 0 < y < d_2 \\ \frac{\rho^2}{2\varepsilon_{r3}\varepsilon_0}, & d_2 < y < d_2 + d_3 \\ 0, & d_2 + d_3 < y \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Puisque la différence de potentiel est contrôlée dans un système d'électro-adhésion, alors l'équation (II.16) doit être utilisée par intégration sur la direction y pour obtenir f , en utilisant la formule suivante :

$$U = \int_0^{d_2+d_3} E dy \quad (\text{II.18})$$

$$\text{On aura :} \quad \rho = \frac{\varepsilon_{r3}\varepsilon_{r2}\varepsilon_0 U}{\varepsilon_{r2}d_3 + \varepsilon_{r3}d_2} \quad (\text{II.19})$$

La force d'électro-adhésion correspondante à chaque interface peut être déduite à partir des équations (II.15), (II.17) et (II.19). La force appliquée au-dessous de l'électrode supérieure du condensateur est donnée par la formule suivante :

$$F_{Adhy} = T_{yy}(d_2 + d_3)^+ - T_{yy}(d_2 + d_3)^- = \frac{\varepsilon_{r3}\varepsilon_{r2}^2\varepsilon_0 U^2}{2(\varepsilon_{r2}d_3 + \varepsilon_{r3}d_2)^2} \quad (\text{II.20})$$

$$F_{Adhytotal} = \frac{\varepsilon_{r3}\varepsilon_{r2}^2\varepsilon_0 U^2}{2(\varepsilon_{r2}d_3 + \varepsilon_{r3}d_2)^2} \times S \times k \quad (\text{II.21})$$

Où k est le nombre des zones d'interaction (nombre d'électrodes).

L'avantage de cette méthode de calcul est évidemment qu'elle permet de calculer facilement la force électrostatique résultante sur n'importe quelle couche limite. D'après la relation (II.20), on peut noter que la force d'EA sur l'électrode est directement proportionnelle au carré de la tension électrique, et inversement proportionnelle au carré de l'épaisseur de la barrière diélectrique et le gap d'air. C'est pourquoi, pour augmenter la force, les AEA sont alimentés en kV et la couche de la barrière isolante et le gap d'air doivent être de l'ordre des micros-mètres.

II.1.2. Modèle numérique

Dans cette étude, l'objectif visé par la simulation numérique consiste à étudier les forces d'EA des matériaux diélectriques et conducteurs afin de les comparer avec les résultats obtenus à partir des modèles analytiques, et d'atteindre des cas d'études difficiles à réaliser analytiquement. Ce modèle de résolution a été effectué en utilisant la méthode des éléments finis par le biais du logiciel commercial COMSOL Multiphysics.

Pour la détermination de la force d'électro-adhésion sur le logiciel de simulation, il suffit de réaliser la structure des systèmes d'EA appropriés aux matériaux diélectriques et conducteurs, et d'introduire l'équation (II.12) pour calculer l'intégrale de la force, sur deux périodes géométriques dans le plan à 2 dimensions, tout en fixant les conditions de continuité

représentées sur la Figure II.5 (cas du diélectrique) et la Figure II.6 (cas du conducteur). L'intégration a été réalisée le long des surfaces en interaction, et tout près de la frontière correspondante à $d_2 + d_3$.

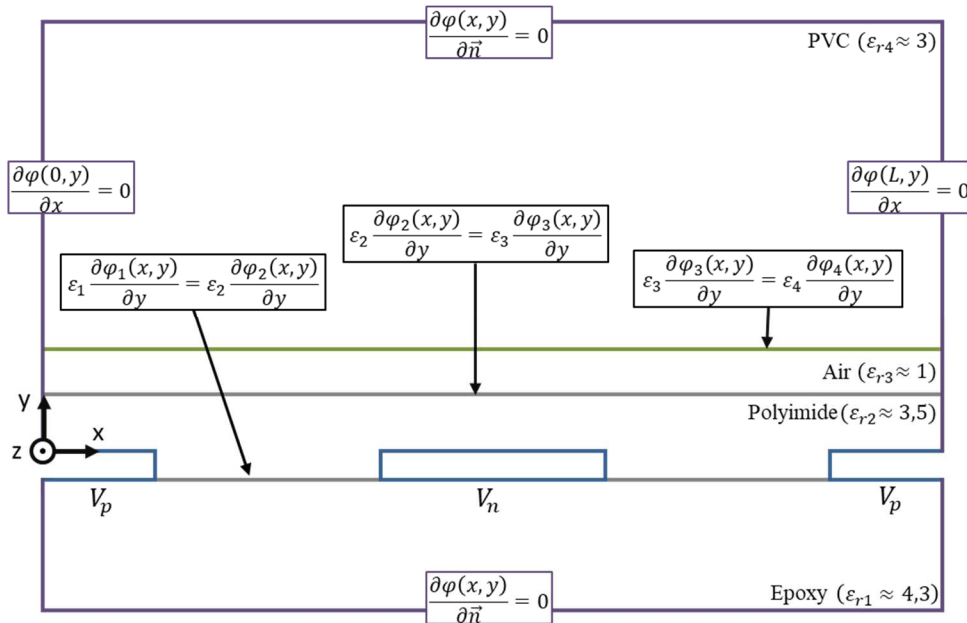


Figure II.5. Illustration du domaine de simulation pour une seule période géométrique avec les conditions aux limites correspondantes adaptées à l'électro-adhésion d'un diélectrique.

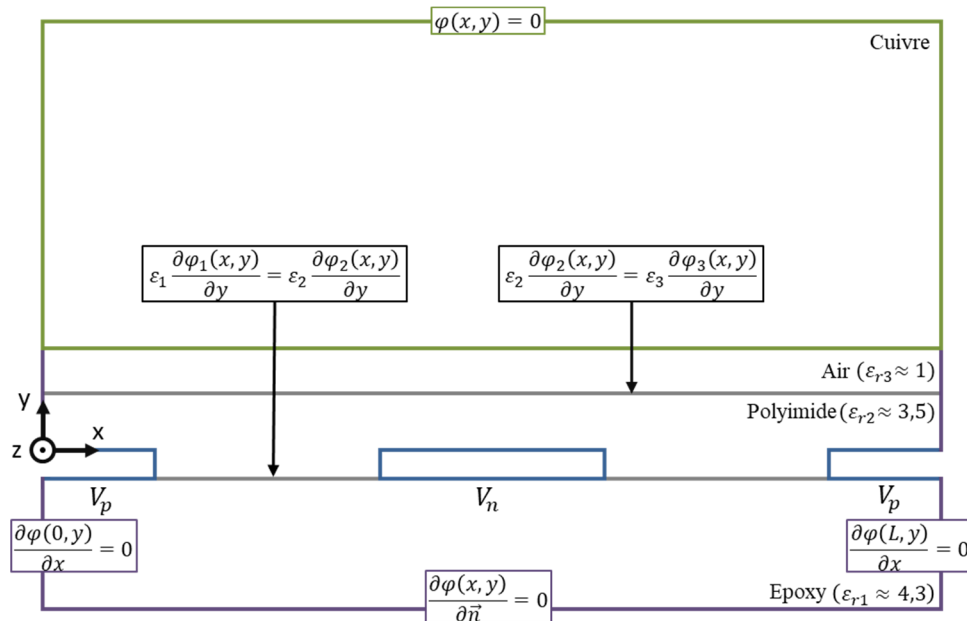


Figure II.6. Illustration du domaine de simulation pour une seule période géométrique avec les conditions aux limites correspondantes adaptées à l'électro-adhésion d'un conducteur.

La densité de charge d'espace est négligée dans les deux modèles, et les conditions aux limites sur les électrodes sont données par le critère de Dirichlet $V = V_p$ ou V_n pour les électrodes positives ou négatives, respectivement. Pour le modèle du diélectrique (PVC), le critère de Neumann est fixé sur les limites de l'espace en direction de l'axe y . Sur le modèle du conducteur (Cuivre), le critère de Dirichlet est établi sur le matériau conducteur porté à un

potentiel flottant, tandis que les conditions de Neumann sont fixées sur le reste des limites de l'espace dans la direction y .

Les paramètres initiaux du calcul analytique et de la simulation numérique sur une demi-période ($x \in [0, L/2]$) sont donnés comme suit ; les tensions positive et négative appliquées sont de ± 1000 V, les épaisseurs du support diélectrique, la barrière diélectrique et le gap d'air sont de 1 mm, 0,035 mm et 0,01 mm, respectivement, et l'épaisseur des substrats (conducteur ou diélectrique) a été fixée à 10 mm, qui peut être considérée très grand par rapport à la barrière diélectrique et le gap d'air.

La Figure II.7 illustre les allures typiques en 2D de la distribution du potentiel électrique et du champ électrique dans l'espace de résolution du modèle du diélectrique. L'amplitude de chaque grandeur est mentionnée par la barre d'échelle en couleur sur le côté droit. La Figure II.7.b montre la distribution des lignes de champ électrique dans les différentes couches diélectriques, causée par polarisations. Les charges induites par polarisation vont créer la force d'adhésion exercée sur le substrat diélectrique. Le champ électrique est naturellement plus important et se renforce au voisinage des bords d'électrodes. Afin d'obtenir une force d'adhésion plus forte, il est préférable que la structure des électrodes portes de nombreux bords [209] [210]. La concentration du champ électrique et la force électrostatique entre l'AEA et la surface isolante est particulièrement plus importante dans le gap d'air au-dessus des électrodes.

La Figure II.8 représente les répartitions typiques en 2D du potentiel appliqué et du champ électrique dans l'espace de calcul pour le cas du conducteur. Les résultats montrent que le champ électrique est très fort dans le gap lorsque le matériau du substrat est un conducteur.

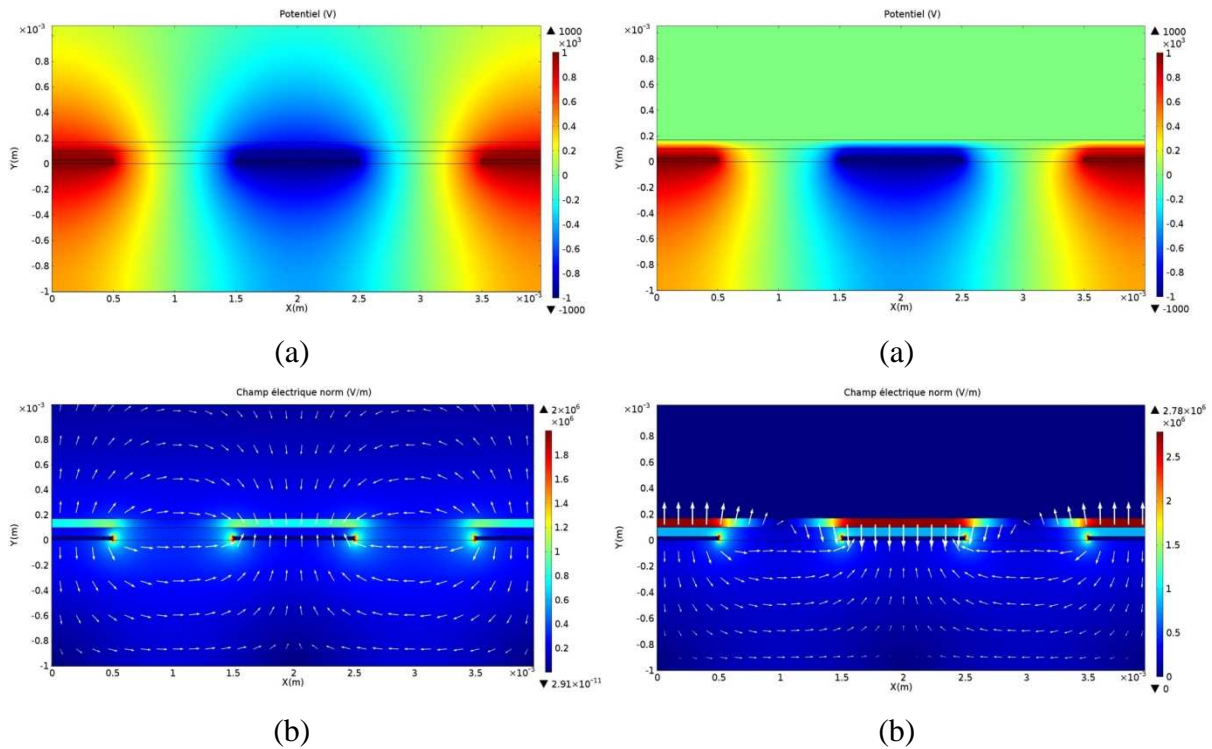


Figure II.7. Profils de distribution (a) du potentiel électrique, (b) du champ électrique pour le cas du diélectrique.

Figure II.8. Profils de distribution (a) du potentiel électrique, (b) du champ électrique pour le cas du conducteur.

II.2. Calcul de la force d'électro-adhésion

La force d'adhésion électrostatique générée entre les actionneurs et les matériaux diélectriques et conducteurs dépendent de plusieurs paramètres. Nous traitons dans cette partie de l'étude, les facteurs de contrôle qui ont le plus d'impact sur cette force, notamment la tension qui alimente le réseau d'électrodes, l'épaisseur de la couche d'air et la barrière diélectrique, la permittivité relative du substrat (cas du diélectrique) et la barrière isolante et enfin la forme des électrodes. Les paramètres critiques qui influencent la force d'EA seront analysés dans cette partie à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics, et comparés avec les résultats obtenus par le modèle de calcul théorique résolu à l'aide du logiciel MATLAB. Les conditions de simulation et de calcul ont été mentionnées dans la partie du « modèle numérique » de la section précédente. Les matériaux conducteur et diélectrique choisies comme des substrats sont respectivement, le Cu et le PVC, en raison de leur large utilisation dans la fabrication des câbles électriques.

II.2.1. Effet de la tension

L'influence de la tension appliquée sur la force d'adhésion électrostatique est analysée en fixant les autres paramètres et en utilisant les équations (II.12), (II.13) et (II.21). La Figure II.9 représente l'évolution de la force d'EA par unité de surface en fonction de la tension appliquée dans le cas d'un substrat diélectrique et conducteur. Les résultats montrent que cette force augmente progressivement avec l'augmentation de la tension. On peut constater alors que ce facteur a un effet très significatif pour le contrôle de la force d'EA. La dynamique des courbes s'explique par le fait que la force d'EA est proportionnelle au carré de la tension. Dans la plage de tension étudiée, les deux courbes obtenues analytiquement et numériquement sont superposées dans le cas du diélectrique (Figure II.9.a), contrairement au cas du conducteur (Figure II.9.b) dont les courbes présentent une légère différence, probablement due à la contribution des effets de bords.

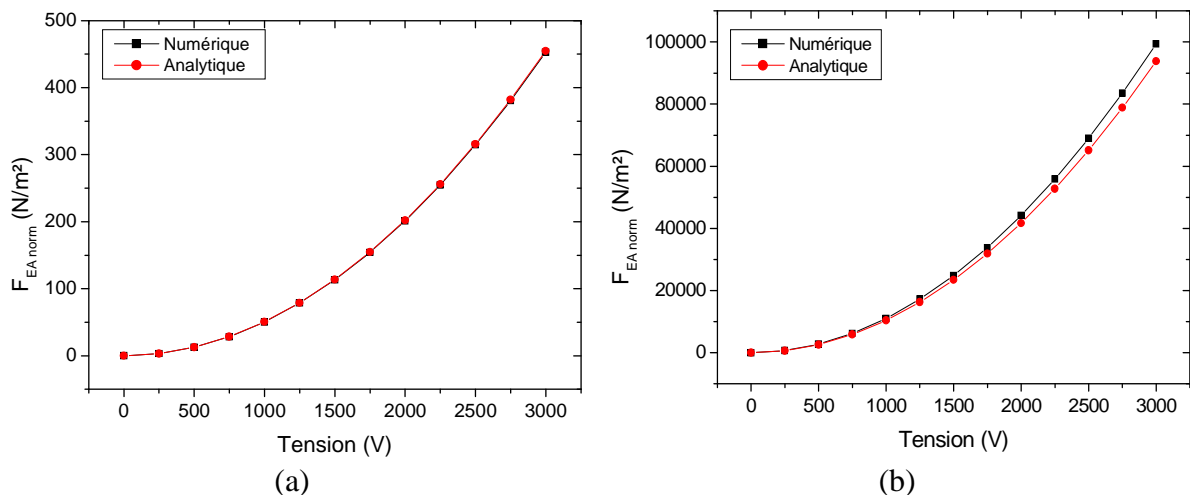


Figure II.9. Evolution de la force d'EA en fonction de la tension appliquée dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.035 \text{ mm}$, $d_3 = 0.01 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r3} = 1$, $\epsilon_{r4} = 3$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$.

Le niveau de la force d'EA est nettement plus important avec un substrat conducteur (2 à 3 ordres de grandeur), qui permet d'accumuler plus de charges électriques aux interfaces. On

peut conclure qu'une plus grande valeur de la force d'EA peut être obtenue avec l'augmentation de la tension, dans la mesure où les conditions de claquage électrique de l'actionneur ne sont pas atteintes.

II.2.2. Effet de l'épaisseur du gap d'air

La Figure II.10 illustre la variation de la force d'EA en fonction de l'épaisseur du gap d'air (d_3). Comme il a été mentionné dans la section II.2, en raison de la rugosité de la surface du substrat et du système électro-adhésif, le contact ne peut pas être parfait, ce qui rend indispensable l'introduction d'un gap d'air entre les deux surfaces dans les modèles de calcul. La variation de la force d'adhésion électrostatique dans le cas du diélectrique (Figure II.10.a) et du conducteur (Figure II.10.b) indique qu'il est difficile d'obtenir une force d'adhésion suffisante lorsque les interfaces de contact sont rugueuses (épaisseur du gap d'air non-négligeable). Pour remédier à ce problème, une des solutions techniques consiste à utiliser une barrière diélectrique flexible qui pourrait améliorer les surfaces de contact et d'augmenter la force d'attraction.

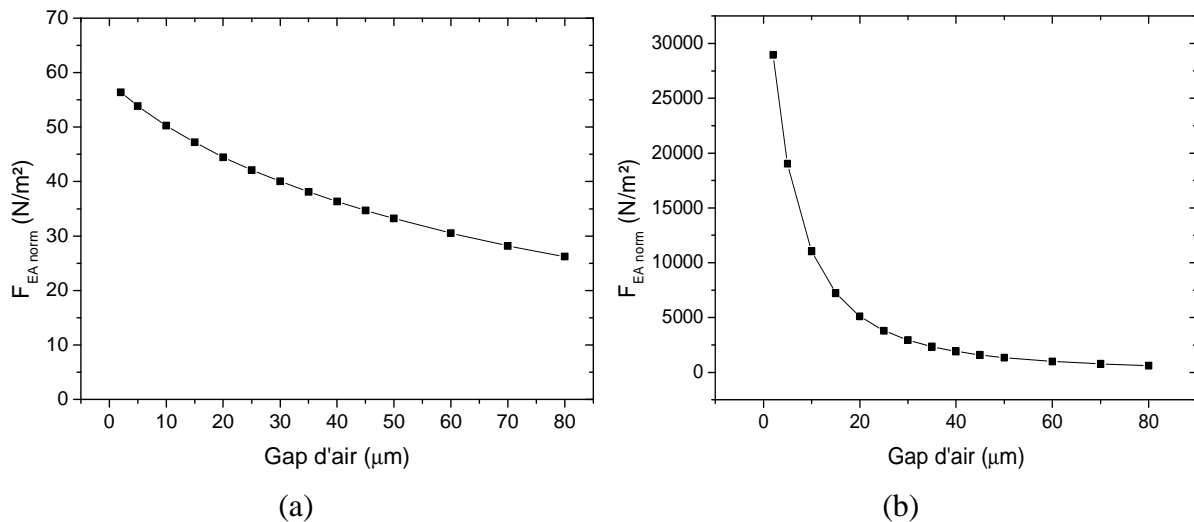


Figure II.10. Variation de la force d'EA en fonction de l'épaisseur du gap d'air dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.035 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r3} = 1$, $\epsilon_{r4} = 3$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$, $V_p = 1000 \text{ V}$, $V_n = -1000 \text{ V}$.

II.2.3. Effet de l'épaisseur de la barrière diélectrique

La Figure II.11 illustre la variation de la force d'EA en fonction de l'épaisseur de la barrière diélectrique (d_2). Les résultats montrent que la force d'attraction diminue lorsque l'épaisseur de la couche isolante augmente de $1 \mu\text{m}$ à $150 \mu\text{m}$. Le choix de l'épaisseur nécessaire pour agripper une surface isolante ou conductrice est évidemment dépendant de la capacité à éviter le claquage diélectrique. Car, le champ électrique entre l'électrode sous haute tension et le matériau à adhérer s'affaiblit lorsque l'épaisseur de la barrière diélectrique augmente. Ceci entraîne une chute considérable de la force d'adhérence électrostatique.

On constate alors que plus la barrière diélectrique est mince, plus la force d'EA sera importante. C'est pour cette raison qu'il est évident de connaître les caractéristiques diélectriques du matériau utilisé comme barrière diélectrique, en particulier la permittivité.

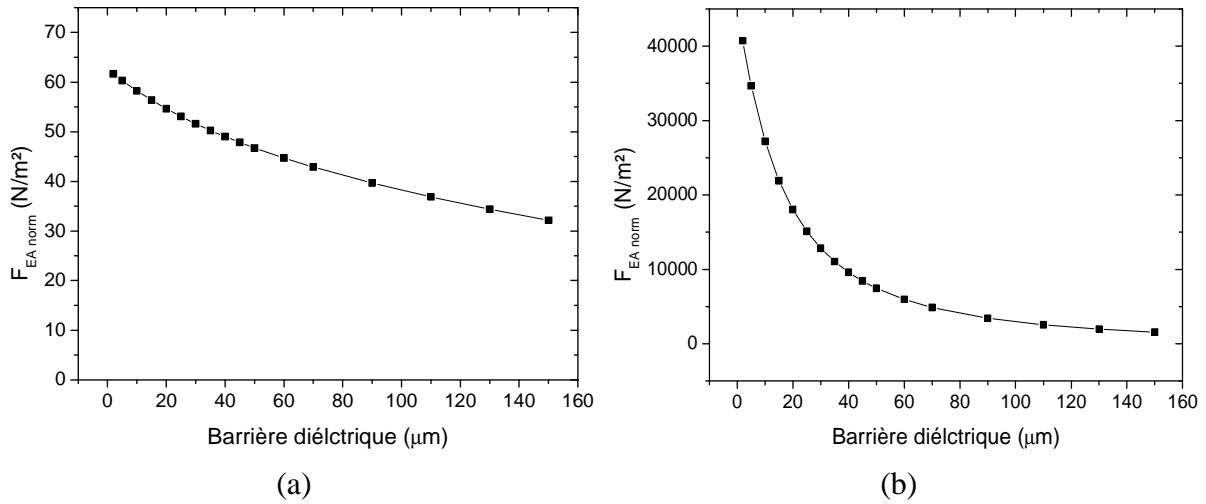


Figure II.11. Variation de la force d'EA en fonction l'épaisseur de la barrière diélectrique dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_3 = 0.01 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r4} = 3$, $\epsilon_{r3} = 1$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$, $V_p = 1000 \text{ V}$, $V_n = -1000 \text{ V}$

II.2.4. Effet de la permittivité de la barrière diélectrique

Les caractéristiques diélectriques du matériau de la barrière isolante est également importante sur l'effet électro-adhésif. L'effet de la permittivité relative de ce matériau est analysé dans cette partie de l'étude.

La Figure II.12 représente la variation de la force d'EA par unité de surface en fonction de la permittivité relative de la barrière diélectrique. Les résultats montrent que dans le cas d'un substrat diélectrique, la force augmente avec la permittivité de la barrière diélectrique, avant d'atteindre son maximum à partir de $\epsilon_{r2} = 8$. Pour le cas du substrat conducteur, les courbes indiquent également que la force augmente lorsque la permittivité relative de la barrière diélectrique augmente, mais cette fois-ci aucune saturation n'est pas observée pour $\epsilon_{r2} < 10$.

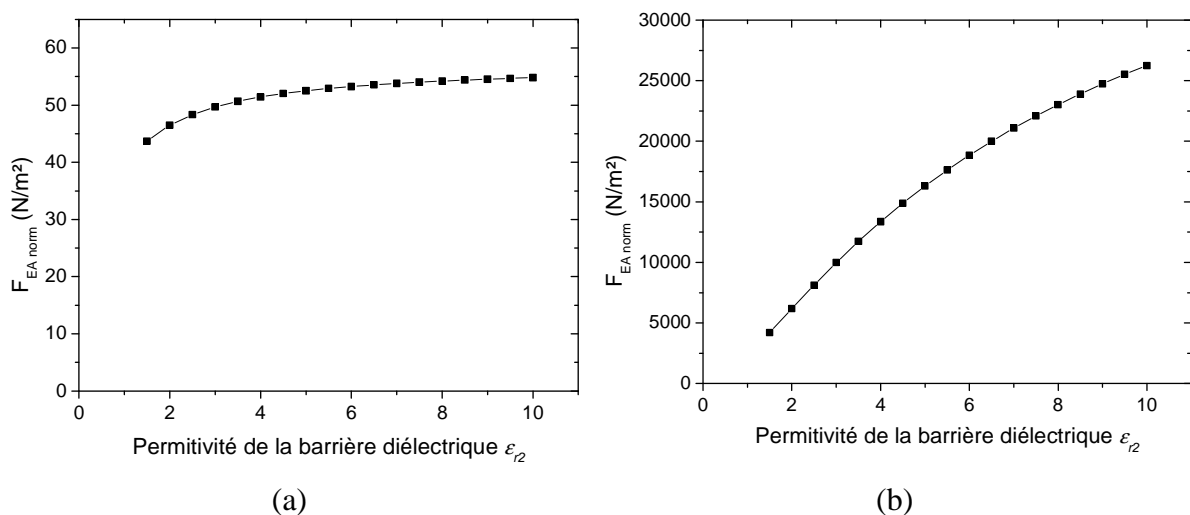


Figure II.12. Evolution de la force d'EA en fonction de la permittivité relative de la barrière diélectrique dans les cas du substrat : (a) diélectrique et (b) conducteur. Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.035 \text{ mm}$, $d_3 = 0.01 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r3} = 1$, $\epsilon_{r4} = 3$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$, $V_p = 1000 \text{ V}$, $V_n = -1000 \text{ V}$.

Vu que les matériaux diélectriques se polarisent mieux avec une permittivité relative plus importante, le renforcement du champ électrique résultant (appliqué et induit par polarisation) entre les électrodes permet d'augmenter la force d'adhésion électrostatique.

II.2.5. Effet de la permittivité du substrat

L'effet de la permittivité relative du substrat diélectrique sur la force d'électro-adhésion est illustré sur la Figure II.13. Les résultats montrent une augmentation quasi-linéaire de la force avec la permittivité relative lorsqu'elle est inférieure à 10 (Figure II.13.a). Pour les résultats obtenus avec des valeurs de permittivité supérieures, présentée sur une échelle semi-logarithmique (Figure II.13.b), la force d'EA augmente rapidement avec la permittivité de l'isolant dans la gamme 10 à 1000 avant de se stabiliser pour des valeurs supérieures à 1000. En effet, un matériau avec une plus grande valeur de permittivité relative est facilement polarisable, conduisant à avoir plus de charges aux interfaces, de ce fait la force d'adhésion est plus forte [190].

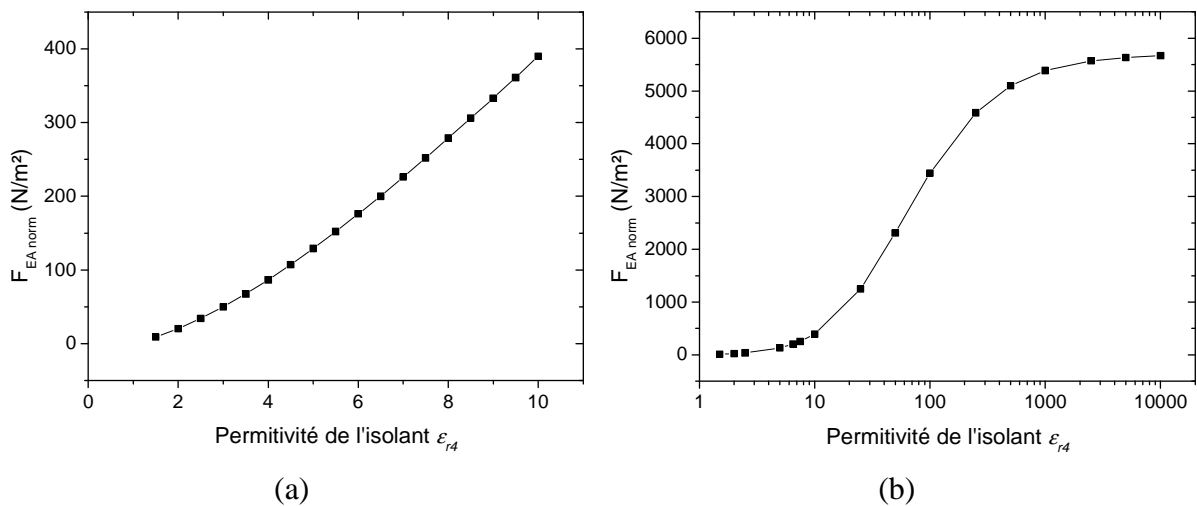


Figure II.13. Evolution de la force d'EA en fonction de la permittivité relative du substrat diélectrique : (a) à petite échelle et (b) à grande échelle. Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.035 \text{ mm}$, $d_3 = 0.01 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r3} = 1$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$, $V_p = 1000 \text{ V}$, $V_n = -1000 \text{ V}$.

À partir des résultats obtenus, il est possible de constater que les effets de la permittivité relative de la barrière diélectrique sur la force d'EA est moins significatif par rapport à un substrat diélectrique. Mais, il ne faut pas oublier que la barrière a un rôle qui se limite essentiellement à la protection de l'actionneur contre le claquage électrique, alors que le substrat doit être susceptible à l'adhésion électrostatique sur la surface des actionneurs.

II.2.6. Effet de la forme des électrodes

La géométrie des électrodes est un autre paramètre sur lequel on peut agir pour optimiser la force d'adhésion électrostatique. Dans cette partie de l'étude, trois géométries des électrodes ont été analysées. Il s'agit de la forme rectangulaire, semi-ellipsoïdale et triangulaire. Ces trois configurations géométriques sont représentées schématiquement sur la Figure II.14.

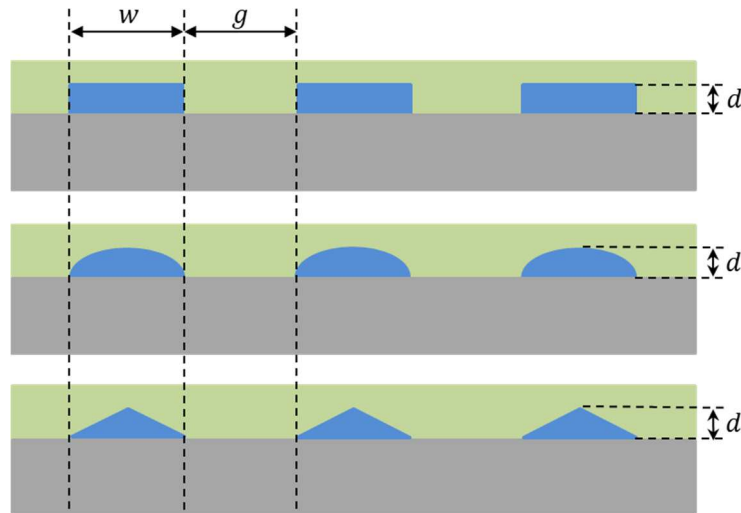


Figure II.14. Représentation schématique des formes d'électrodes étudiées.

La Figure II.15 représente l'effet de la forme d'électrodes sur la force d'EA en fonction de la tension appliquée pour trois configurations géométriques des électrodes : rectangulaire, semi-elliptique ou triangulaire. Les trois courbes ont la même tendance. En revanche, la force d'adhésion est plus élevée dans le cas des électrodes rectangulaires. L'uniformité de la surface des électrodes, en interaction avec la surface du substrat diélectrique (Figure II.15.a) et conducteur (Figure II.15.b), conduit à avoir un champ électrique plus uniforme et plus intense, qui induit une force d'électro-adhésion plus importante.

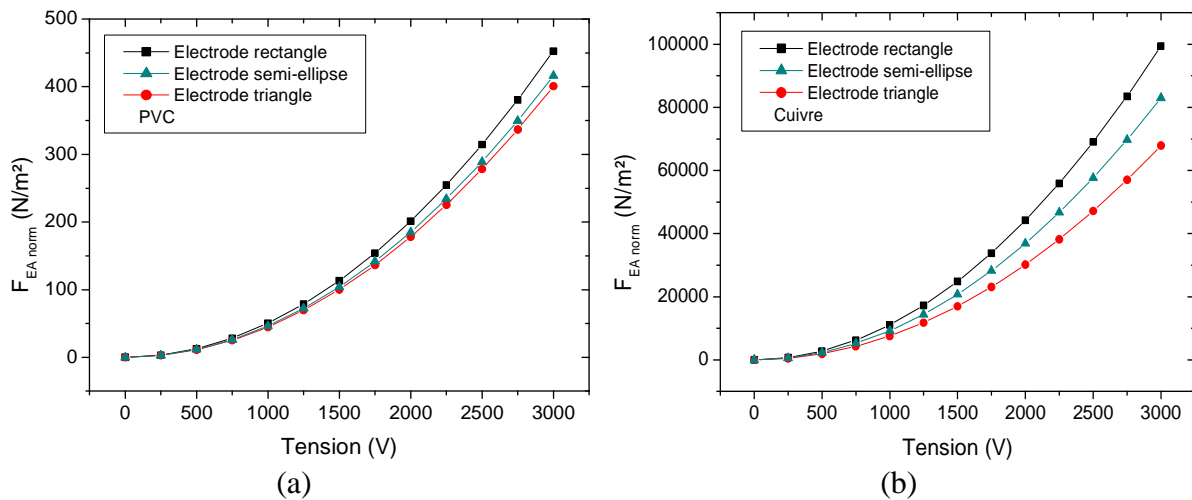


Figure II.15. Evolution de la force d'EA en fonction de la tension appliquée pour les trois formes d'électrodes dans les cas du substrat : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur.

Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.035 \text{ mm}$, $d_3 = 0.01 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r3} = 1$, $\epsilon_{r4} = 3$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$, $V_p = 1000 \text{ V}$, $V_n = -1000 \text{ V}$.

II.3. Autres paramètres complémentaires

Dans cette partie de l'étude, l'effet de plusieurs paramètres électriques et géométriques complémentaires sur la force d'électro-adhésion des matériaux conducteurs et diélectriques sera étudié dans le but d'évaluer l'applicabilité de la séparation électrostatique du mélange des matériaux métal/polymère. Plus précisément, il sera question de comparer l'ordre de grandeur

de la force d'adhésion électrostatique sur des matériaux conducteurs et diélectriques, d'abord sous la forme de plaque rectangulaire avant d'aborder le cas de particules.

II.3.1. Electro-adhésion de plaques

II.3.1.1. Influence de la rugosité

Les mêmes paramètres de simulation ont été employés pour cette étude à l'exception de la géométrie des substrats, qui prend la forme d'une plaque carrée avec une surface de $20 \times 20 \text{ mm}^2$. Pour intégrer l'effet de la rugosité dans la simulation de façon simple, la surface lisse est remplacée par une succession de dents et d'encoches (largeur = $100 \mu\text{m}$, profondeur = $100 \mu\text{m}$) comme illustré sur le schéma de la Figure II.16. La Figure II.17 présente la variation de la force d'EA en fonction de la tension appliquée pour les deux substrats (conducteur et diélectrique) et pour les deux surfaces (lisse et rugueuse). La présence des irrégularités sur les surfaces des substrats impacte négativement la force que ce soit pour un conducteur ou pour un diélectrique. Car, la force se concentre essentiellement dans les zones sous les dents du substrat rugueux, là où le champ électrique est évidemment plus intense.

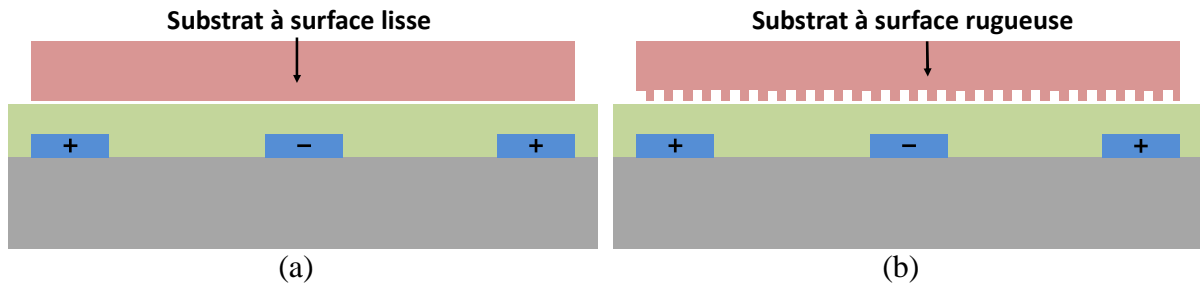


Figure II.16. Représentation schématique de l'état des surfaces (a) lisse et (b) rugueuse utilisé dans la modélisation pour le calcul de la force d'EA

Dans la suite de ce chapitre, nous allons considérer que la surface du substrat est lisse, dans le but de réduire le temps de calcul des simulations numériques sur les autres cas de l'étude.

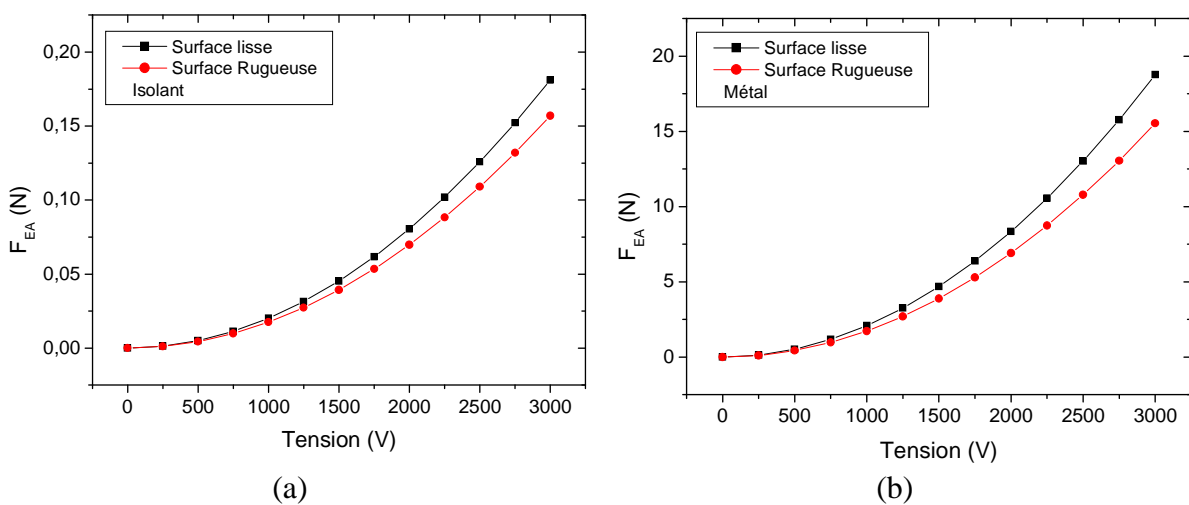


Figure II.17. Variation de la force d'EA en fonction de la tension appliquée pour les surfaces lisse et rugueuse : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.035 \text{ mm}$, $d_3 = 0.01 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r3} = 1$, $\epsilon_{r4} = 3$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$, $f = 100 \text{ Hz}$.

II.3.1.2. Influence de la tension

La Figure II.18 présente la variation de la force d'EA en fonction de la tension appliquée pour les substrats isolant et conducteur à surface lisse. L'écart entre les deux courbes est d'environ deux décades sur une large plage de tension. Car, les charges responsables du phénomène d'adhésion électrostatique apparaissent principalement par induction électrostatique dans le cas d'un substrat conducteur. L'accumulation des charges sur la surface des matériaux diélectriques est limitée par les processus de polarisation, ce qui génère une force d'adhésion plus faible.

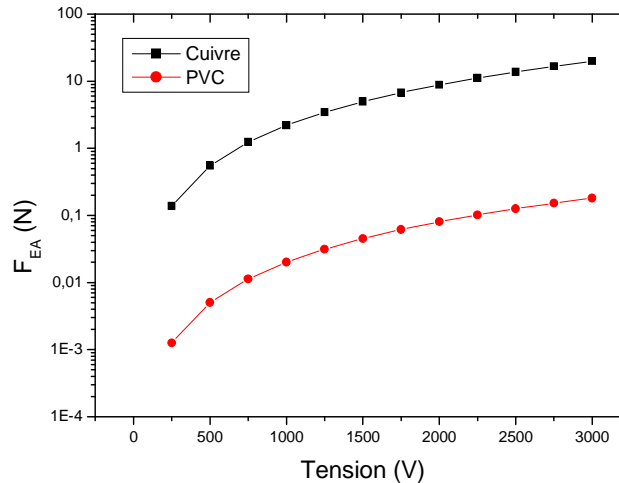


Figure II.18. Comparaison entre l'adhésion de PVC et de cuivre en fonction de la tension.

Conditions : $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.035 \text{ mm}$, $d_3 = 0.01 \text{ mm}$, $d_4 = 10 \text{ mm}$, $\epsilon_{r1} = 4.3$, $\epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r3} = 1$, $\epsilon_{r4} = 3$, $g = w = 1 \text{ mm}$, $L = 4 \text{ mm}$, $f = 100 \text{ Hz}$.

II.3.1.3. Influence de la masse du substrat

Dans cette partie de l'étude, nous allons comparer la force d'adhésion électrostatique avec la force de gravité selon la situation indiquée sur la Figure II.19. La masse de la plaque de l'étude (diélectrique ou conductrice) est imposée par la variation de l'épaisseur de la plaque, tout en gardant la même surface utile de $20 \times 20 \text{ mm}^2$.

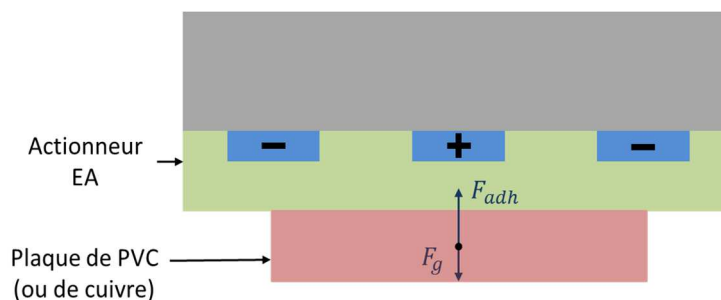


Figure II.19. Illustration schématique d'un substrat (plaque en PVC ou en Cuivre) soumis à la force de gravité et la force d'EA.

La Figure II.20 montre les différentes courbes de la variation des forces d'électro-adhésion et de gravité en fonction de la masse des matériaux (PVC et cuivre) pour plusieurs niveaux de tension. Dans le cas du diélectrique (Figure II.20.a), les résultats montrent que la force d'EA augmente avec la masse (ou l'épaisseur) du substrat, avant de se stabiliser. Car,

l'augmentation excessive de l'épaisseur du substrat n'a pas d'effet considérable sur les phénomènes de polarisation du substrat. Le point d'équilibre entre la force d'EA et la force de gravité (qui augmente linéairement avec la masse) se déplace avec l'augmentation de la tension. Par exemple, pour maintenir une plaque de PVC de 2 g, il est nécessaire d'appliquer une tension de 1000 V avec l'actionneur de l'étude. Dans le cas d'un substrat conducteur (Figure II.20.b), la force d'électro-adhésion n'ait pas sensible à la variation de la masse (dans la plage de l'étude), car les charges induites s'accumulent essentiellement sur la surface (ou en subsurface) du cuivre. Pour une tension donnée, le point d'intersection entre les courbes des forces d'EA et de gravité correspond à une masse beaucoup plus importante que celle du diélectrique.

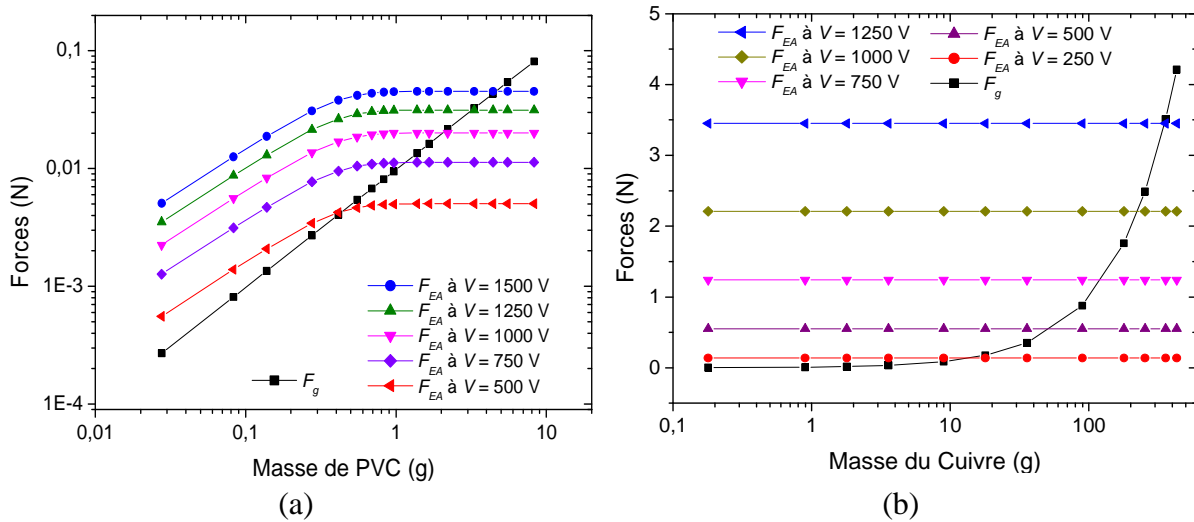


Figure II.20. Variation de la force d'EA et la force de gravité en fonction de la masse des substrats pour différentes valeurs de tension. (a) Cas du diélectrique. (b) Cas du conducteur.

A partir de ces données, il est possible d'analyser la variation des masses critiques des deux substrats en fonction de la tension, indiquée sur la Figure II.21. Il est à noter que la masse critique augmente en fonction de la tension appliquée dans les deux cas. Dans la zone supérieure de la figure délimitée par la courbe, la force d'EA domine la force de gravité, et *vice-versa* pour la partie inférieure de la figure. L'écart de masse critique entre les substrats conducteur et diélectrique augmente avec la tension, ce qui favorise la séparation du mélange métal/polymère.

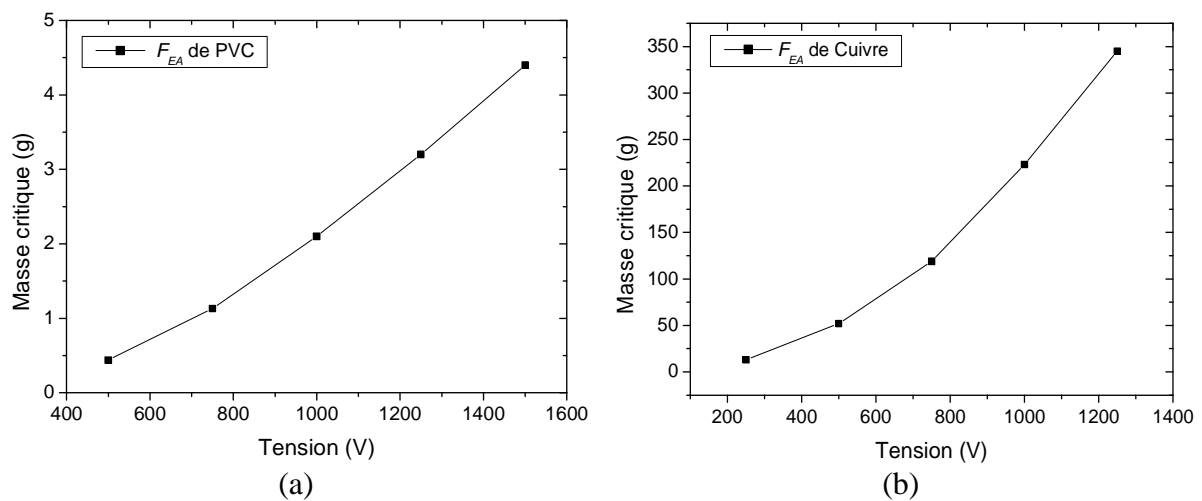


Figure II.21. Evolution de la masse critique de l'électro-adhésion des matériaux en fonction de la tension appliquée : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur.

II.1.1.3. Influence de la tension alternative

L'électro-adhésion est également possible sous excitation alternative, qui peut être intéressante dans une application de séparation de mélange métal/polymère. En plus du niveau de tension appliquée, ce mode d'alimentation présente plusieurs paramètres de control supplémentaires : la fréquence, la forme d'onde, ainsi que les temps de montée et de descente sous excitation pulsée ou carrée, entre autres. Dans cette étude, nous analyserons par simulation numérique l'effet de l'utilisation des tensions alternatives carrées ou sinusoïdales sur la force d'adhésion électrostatique appliquée à des substrats diélectrique (PVC) et conducteur (Cuivre).

La variation de la force d'EA en fonction du temps pour une tension carrée est représentée sur les Figure II.22 pour une tension de 1000 V et une fréquence de 100 Hz (période de 10 ms). La force est relativement stable dans le temps, à l'exception des courts laps de temps traduisant le changement de polarité de la tension (environ 20 ns dans cette simulation).

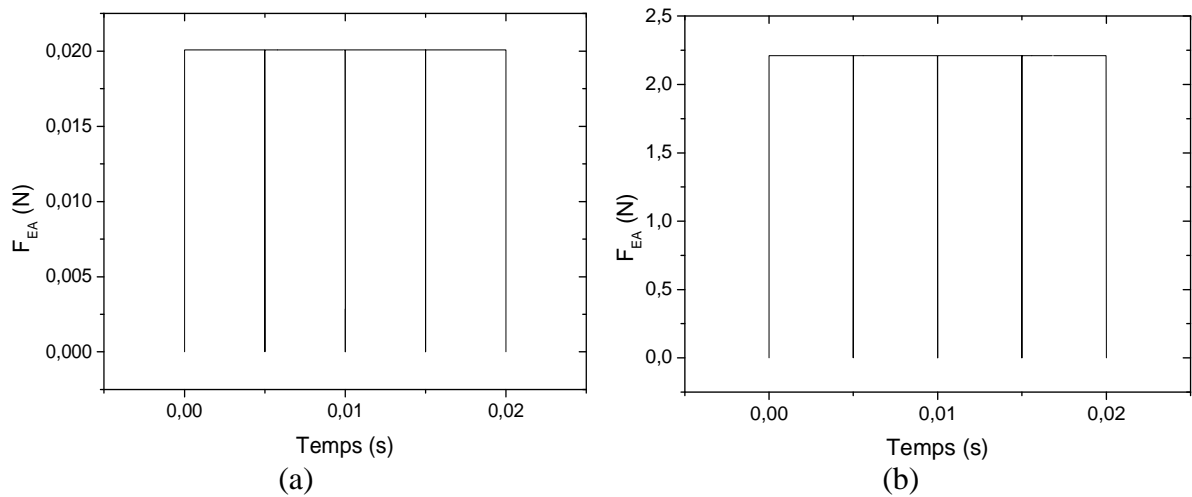


Figure II.22. Variation de la force d'EA exercée sur (a) le PVC et (b) le Cuivre en fonction du temps pour une tension carrée. Conditions : Temps de montée et de descente de la tension = 20 ns ; $V = 1000$ V ; $f = 100$ Hz

La Figure II.23 indique la variation de la force d'adhésion exercée sur les matériaux (PVC et Cuivre) en fonction du temps pour le cas d'une tension sinusoïdale.

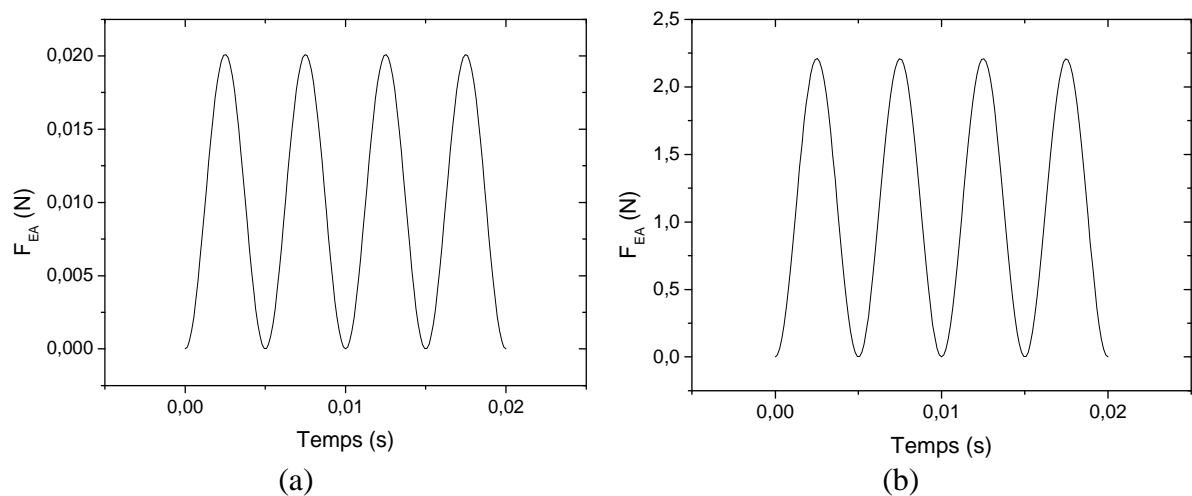


Figure II.23. Variation de la force d'EA exercée sur (a) le PVC et (b) le Cuivre en fonction du temps pour une tension sinusoïdale. Conditions : $V = 1000$ V ; $f = 100$ Hz

Les résultats montrent que la forme d'onde de la force est sinusoïdale avec un offset qui lui permet de rester toujours positive, puisque la force dépend du carré de la tension appliquée. Cela permet de penser que le maintien des matériaux sur l'actionneur sous excitation sinusoïdale est beaucoup plus difficile qu'avec une tension carrée.

La Figure II.24 montre une comparaison de l'effet des tensions carrée et sinusoïdale sur la valeur moyenne de la force d'adhésion. Les courbes montrent que la force d'adhésion est d'une part plus importante avec une tension alternative carrée, et d'autre part l'écart entre les deux signaux augmente avec l'augmentation de la tension.

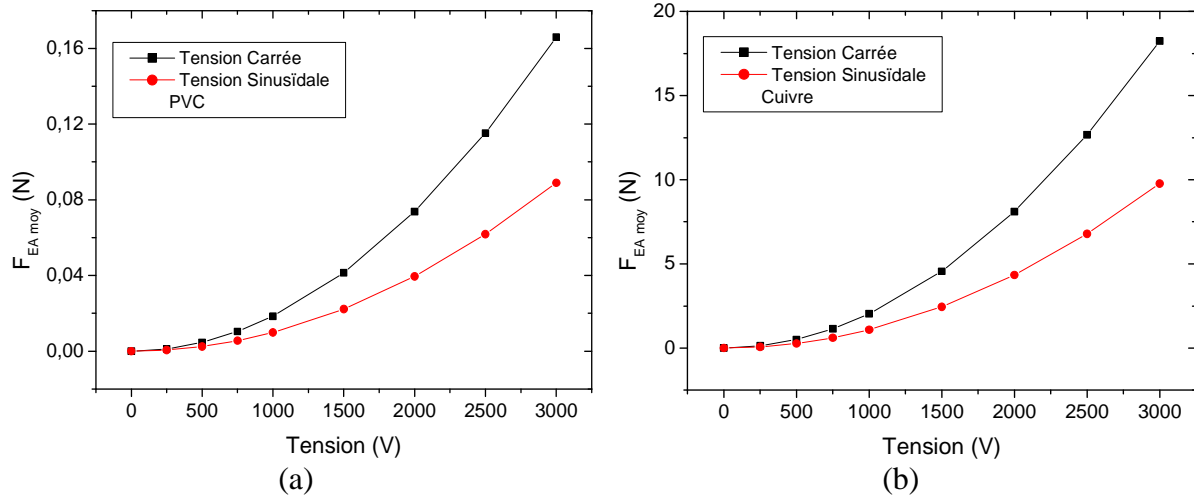


Figure II.24. Comparaison entre la force d'EA moyenne exercée sur (a) le PVC et (b) le Cuivre en fonction de la tension appliquée. Conditions : $f = 100$ Hz

II.1.1.4. Influence du temps de monté en tension carrée

En théorie, la force d'électro-adhésion devrait être constante si le temps de transition entre les polarités positive et négative était nul. Mais, en pratique, ce temps est limité par les caractéristiques physiques des alimentations électriques, matérialisées par le paramètre « slew rate ».

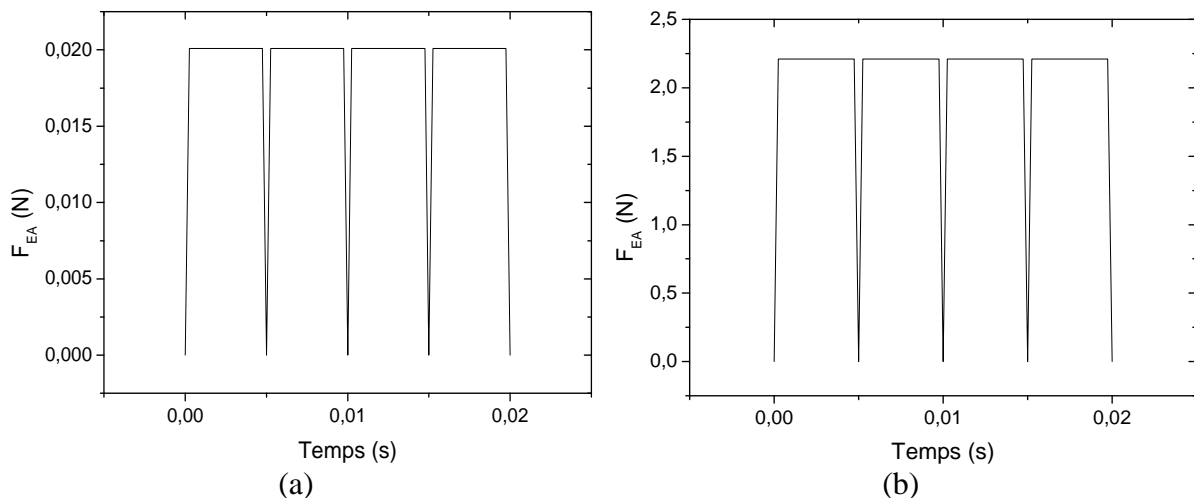


Figure II.25. Comparaison entre la force d'EA exercée sur (a) le substrat diélectrique et (b) le substrat conducteur en fonction du temps pour une tension carrée. Conditions : Temps de variation montée et de descente de la tension = $20 \mu\text{s}$; $V = 1000$ V ; $f = 100$ Hz.

Pour une dynamique de $100 \text{ V}/\mu\text{s}$ (cas des alimentations utilisées dans cette thèse), la forme d'onde de la force d'EA pour une tension carrée, indiquée sur la Figure II.25, montre des baisses de valeurs brèves liées à chaque transition de polarité de la tension carrée. Ceci a un impact non-négligeable sur le niveau de la force moyenne.

La Figure II.26 indique la variation de la force d'adhésion moyenne exercée sur des plaques diélectriques et conductrices en fonction de la fréquence pour une tension carrée. On peut noter que la force d'adhésion reste constante pour une fréquence inférieure à 1000 Hz . Au-delà, la force diminue avec la fréquence dans les deux cas. Ainsi, le temps de changement polarité devient non-négligeable par rapport à la période à très haute fréquence.

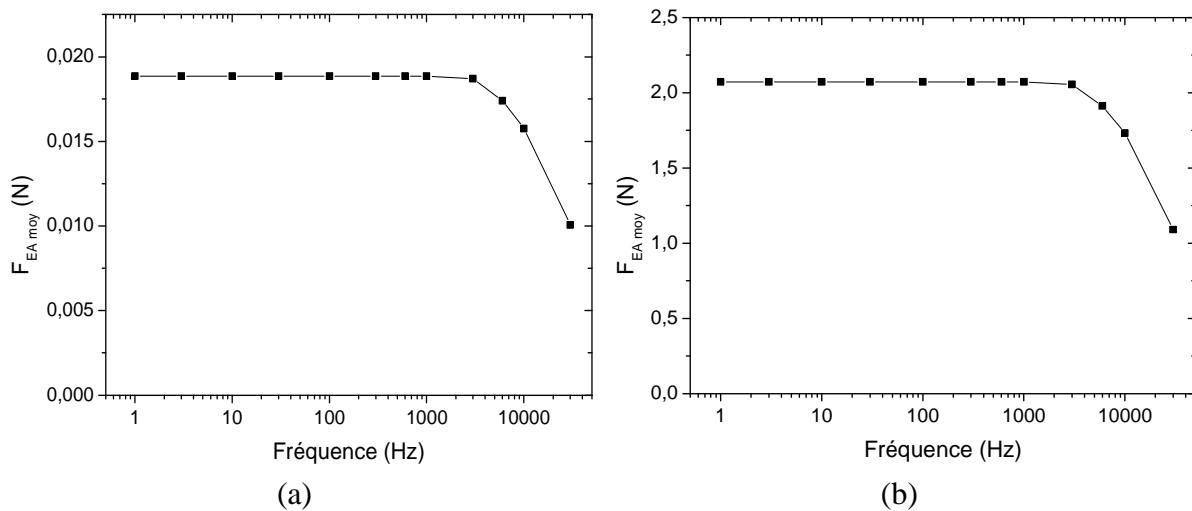


Figure II.26. Comparaison entre la force d'EA moyenne exercée sur des substrats (a) diélectrique ou (b) conducteur en fonction de la fréquence pour une tension carrée. Conditions : Temps de variation montée et de descente de la tension = $20 \mu\text{s}$; $V = 1000 \text{ V}$.

II.3.2. Electro-adhésion des particules

II.3.2.1. Cas de plusieurs particules

Pour se rapprocher du cas de la séparation électrostatique des mélanges de matériaux, nous avons réalisé des simulations sur l'adhésion de particules diélectriques et conductrices en fonction du rapport géométrique g/w . Les valeurs de g et w considérées dans cette simulation sont indiquées dans les Tableaux II.1 et II.2. Il est important de préciser que le champ électrique réduit E_r a été maintenu constant dans ces simulations ($E_r = V/g = 1000 \text{ V}/\text{mm}$). La longueur de chaque particule de l'étude est de 2 mm et l'écart entre deux particules successives est maintenu à 1 mm . Les particules ont été alignées sur la surface de l'actionneur à des positions fixes. Ainsi, selon le cas de l'étude, les positions des particules peuvent être soit sur ou entre les électrodes. Pour toutes les simulations, le nombre de particules a été fixé à 23. Par conséquent, le nombre d'électrodes varie en fonction de la variation des facteurs g et w . Il est évident que l'augmentation du nombre de particules a vocation d'améliorer les résultats des simulations pour des rapports g/w extrêmes. Mais, l'augmentation du temps de calcul devient déraisonnable par rapport aux objectifs qualitatifs des simulations.

Tableau II.1. Valeurs g/w étudiées pour w constant.

g (mm)	0,0625	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64
w (mm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$R = g/w$	0,0625	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64

Tableau II.2. Valeurs g/w étudiées pour g constant.

g (mm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
w (mm)	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,0625	0,0312	0,0156
$R = g/w$	0,0625	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64

A) Particules diélectriques

La Figure II.27 montre une représentation schématique de la répartition typique des particules sur trois types d'actionneurs dont les rapports g/w sont de : 0,125 ; 1 et 8. La courbe de la force d'EA exercée sur des particules diélectriques en fonction du rapport g/w est illustrée sur la Figure II.28. L'effet du rapport g/w dans ce cas est étudié par la variation de g et le maintien de w à une valeur constante. Le champ électrique réduit est également fixé à 1000 V/mm. L'adhésion de chaque particule est liée à la position relative par rapport aux électrodes. Ainsi, la force d'adhésion est exprimée par unité de surface, puisqu'elle est intégrée sur la totalité des particules. La courbe passe par un maximum pour un rapport $R = 4$.

En effet, la conséquence de l'augmentation du rapport g/w sur la force est double. D'une part, le niveau de la tension augmente pour maintenir le champ réduit constant, ce qui augmente au final la force. D'autre part, la surface utile des électrodes diminue, ce qui dégrade l'adhésion des particules. Ces deux effets expliquent en grande partie l'allure de la courbe.

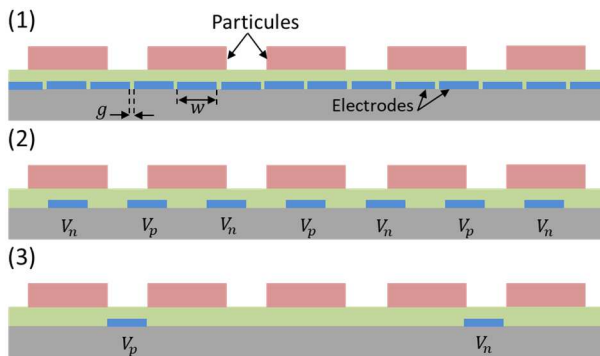


Figure II.27. Représentation schématique de la répartition des particules sur les trois actionneurs : (1) $g/w = 0.0125$, (2) $g/w = 1$, et (3) $g/w = 8$ avec $w = 1$ mm.

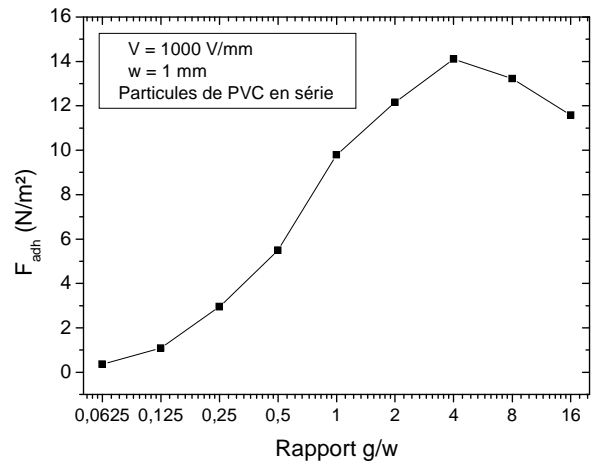


Figure II.28. Evolution de la force d'EA exercée sur les particules diélectriques en fonction du rapport g/w , pour g variable et w constant.

Lorsque le gap inter-électrodes est maintenu constant, la distribution typique des particules sur l'actionneur est représentée schématiquement sur la Figure II.29 pour trois actionneurs correspondant aux rapports 0,125 ; 1 et 8. Les résultats de la simulation, indiqués sur la Figure

II.30, donnent l'évolution de la force exercée sur les particules en fonction du rapport g/w (w variable et g constant). La force d'EA est maximale lorsque $R = 8$. L'augmentation de la force avec le rapport R s'explique par une meilleure répartition des charges positives et négatives le long des particules. Car, une particule adhère mieux lorsqu'elle est positionnée entre deux électrodes connectées à deux tensions de polarités différentes.

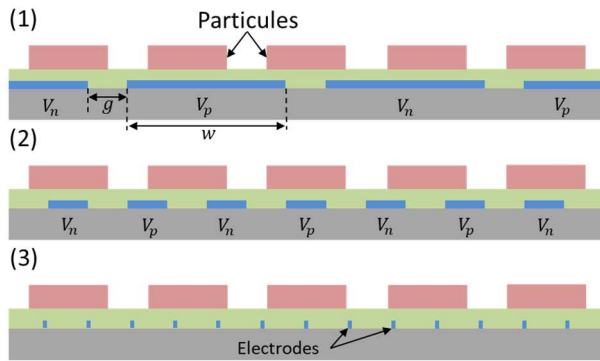


Figure II.29. Représentation schématique de la répartition des particules sur les trois actionneurs : (1) $g/w = 0.125$, (2) $g/w = 1$, et (3) $g/w = 8$ pour $g = 1$ mm.

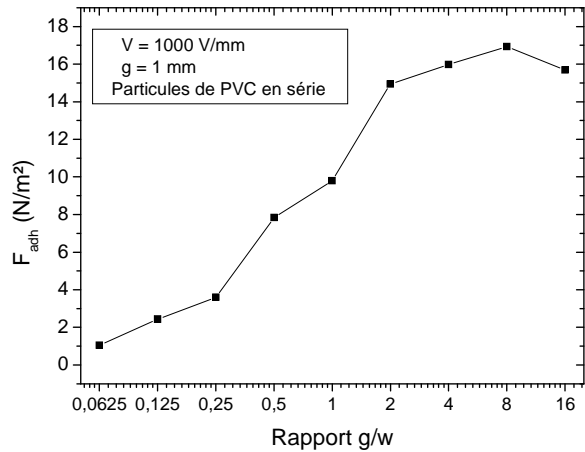


Figure II.30. Evolution de la force d'EA exercée sur des particules diélectriques en fonction du rapport g/w , pour g constant et w variable.

B) Particules conductrices

L'évolution de la force d'adhésion des particules conductrices en fonction du rapport g/w est représentée sur la Figure II.31.

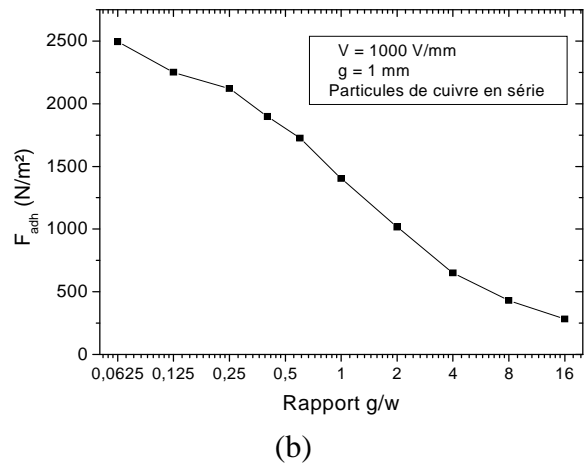
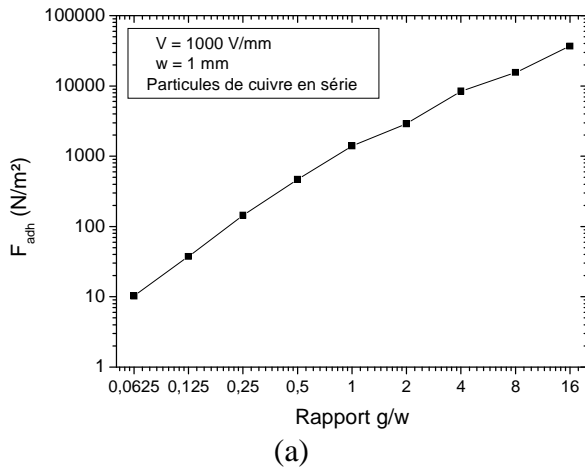


Figure II.31. Variation de la force d'EA exercée sur des particules conductrices en fonction du rapport g/w . (a) g variable et w constant. (b) g constant et w variable.

Pour g variable et w constant (Figure II.31.a), la force d'EA appliquée sur les particules de cuivre augmente avec le rapport g/w , en raison de l'augmentation de la tension (pour avoir un champ réduit constant). Le passage par un optimum n'est pas observé dans la gamme du rapport g/w de l'étude. Les résultats de la Figure II.31.b indique que la force diminue avec le

rapport g/w lorsque le gap est maintenu constant. Cette tendance s'explique par la réduction de la surface utile des électrodes sous les particules à l'origine de l'électro-adhésion.

II.3.2.2. Cas d'une seule particule

A) Particule diélectrique

Dans cette partie de l'étude, nous avons réduit le nombre de particule à 1. L'objectif est l'étude de la variation du rapport g/w sur la force d'électro-adhésion pour un positionnement idéal de la particule sur la surface de l'actionneur. Le schéma de la Figure II.32 représente la disposition de la particule entre deux électrodes sur l'actionneur d'EA pour les trois configurations typiques avec les rapports g/w suivants : 0,125 ; 1 et 8.

Les résultats de la force exercée sur une particule de PVC, pour g variable et w constant, sont représentés sur la Figure II.33. Comme indiqué sur la courbe, la force augmente, passe par un maximum avant de décroître avec l'augmentation du rapport g/w . La force augmente avec l'augmentation de la tension d'une part, mais diminue aussi avec la réduction de la surface active sous la particule (face aux électrodes), d'autre part. Le maximum de l'adhésion est atteint pour des valeurs g/w comprises entre 1,6 et 1,8. On peut noter que ces valeurs sont particulièrement proches de la taille de la particule.

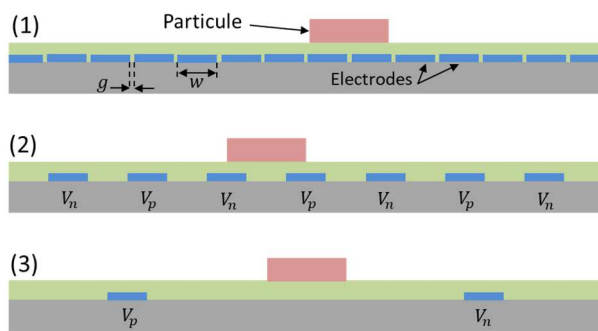


Figure II.32. Représentation schématique de la disposition d'une particule entre deux électrodes pour les trois actionneurs : (1) $g/w = 0.125$, (2) $g/w = 1$, et (3) $g/w = 8$ avec $w = 1$ mm.

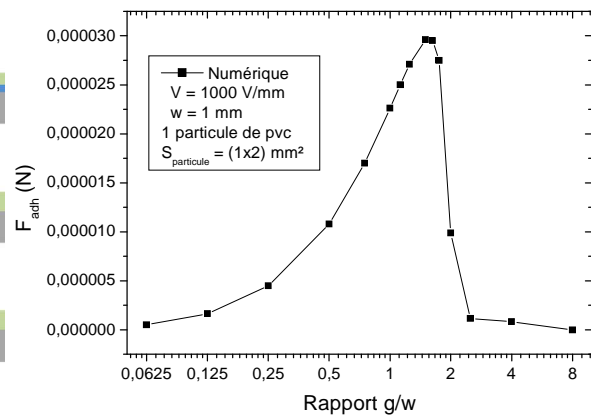


Figure II.33. Variation de la force d'EA exercée sur une particule diélectrique en fonction du rapport g/w , pour g variable et w constant.

Dans le cas où la largeur des électrodes varie, la représentation schématique du positionnement de la particule de PVC déposée entre deux électrodes adjacentes des trois actionneurs typiques est indiquée sur la Figure II.34. Pour un écartement constant et une largeur d'électrode variable, la Figure II.35 indique que la force d'EA exercée sur la particule de PVC augmente, en fonction de la progression du rapport g/w , jusqu'au maximum équivalent au rapport $R = 4$, puis elle diminue. L'augmentation de la force avec la réduction de la taille des électrodes est probablement due à l'augmentation des gradients de champ électrique proche des bords. Alors que la diminution de cette force est liée à la réduction de la surface utile sous la particule.

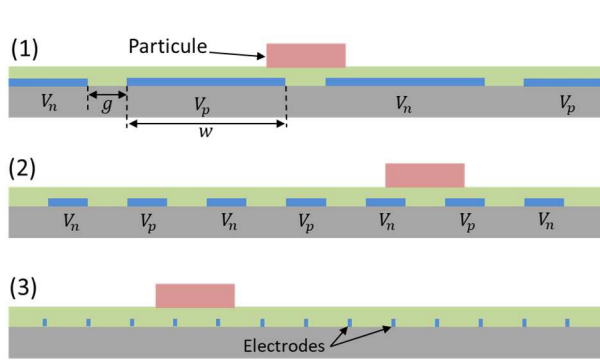


Figure II.34. Représentation schématique de la disposition d'une particule entre deux électrodes pour les trois actionneurs. (1) $g/w = 0,125$, (2) $g/w = 1$, et (3) $g/w = 8$ avec $g = 1$ mm.

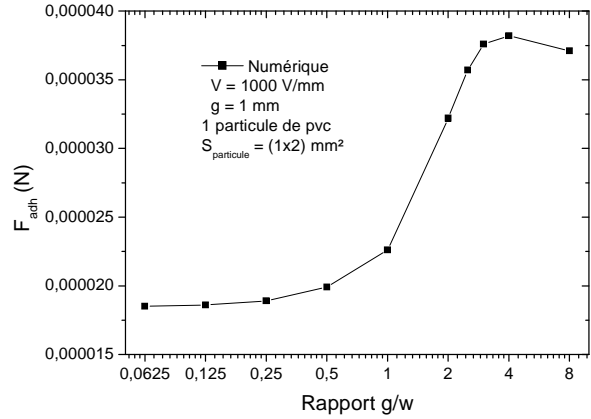
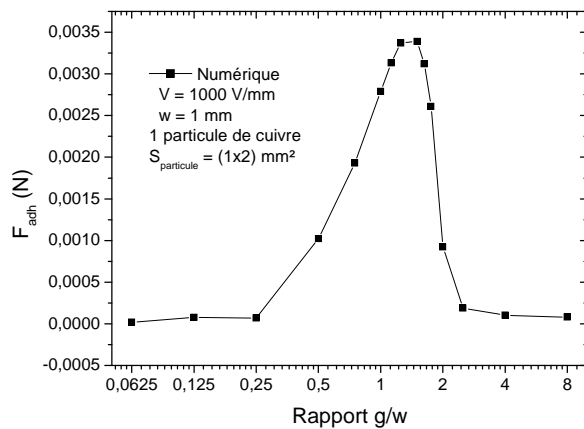


Figure II.35. Variation de la force d'EA exercée sur une particule diélectrique en fonction du rapport g/w , pour g constant et w variable.

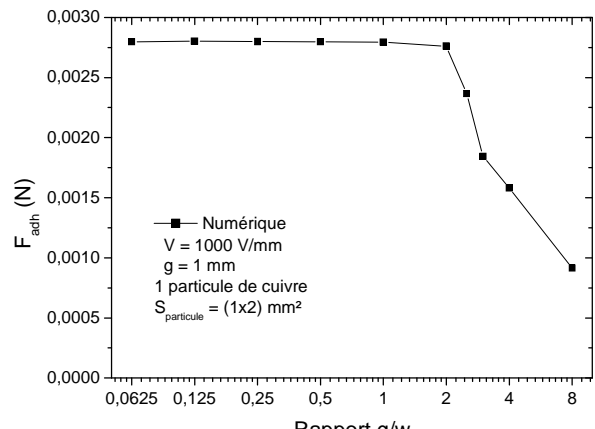
B) Particule conductrice

La variation de la force d'adhésion d'une particule de cuivre en fonction du rapport g/w est illustrée sur la Figure II.36. La tendance de la courbe pour une largeur d'électrodes constante, indiquée sur la Figure II.36.a, est similaire au cas d'une particule diélectrique. L'adhésion électrostatique maximale est obtenue pour les rapports g/w compris entre 1,5 et 1,7. Les interprétations du cas PVC sont valables aussi dans le cas d'une particule de cuivre.

Les résultats obtenus avec une particule conductrice lorsque l'espace inter-électrodes est constant sont indiqués sur la Figure II.36.b. Dans ce cas, la force d'EA reste constante lorsque les valeurs du rapport g/w sont comprises entre 0,125 et 2, avant de décroître pour des rapports supérieurs. Ces résultats sont différents du cas particule diélectrique. Donc, tant que la surface utile sous une particule conductrice est constante, même si les électrodes sont larges, la force d'électro-adhésion est constante. Si cette surface diminue, alors la force diminue aussi. C'est exactement ce qui se produit lorsque la taille des électrodes devient inférieure à 0,5 mm (rapport $g/w > 2$).



(a)



(b)

Figure II.36. Variation de la force d'EA exercée sur une particule conductrice en fonction du rapport g/w . (a) g variable et w constant. (b) g constant et w variable.

II.4. Conclusion

Le présent chapitre a pour objectif de renforcer la compréhension théorique des phénomènes physiques relatifs à l'électro-adhésion des matériaux diélectriques et conducteurs, en relation avec l'application de la séparation électrostatique. Nous avons étudié, analytiquement et numériquement, l'influence de plusieurs paramètres électriques et géométriques, qui caractérisent un actionneur d'adhésion électrostatique, sur la force appliquée à des substrats (mais aussi des particules) diélectriques et conducteurs.

Les résultats obtenus nous ont permis de constater que l'adhésion d'un matériau conducteur est nettement plus grande que dans le cas d'un matériau diélectrique. C'est ce qui donne de l'intérêt aux actionneurs électro-adhésifs dans une application de tri électrostatique de mélange métal /polymère, qui fera l'objet de nos investigations dans les des prochains chapitres. Les résultats peuvent être résumés dans les points suivant :

- La force d'électro-adhésion des deux matériaux augmente avec l'augmentation de la tension électrique appliquée, qui augmente le champ électrique généré.
- L'augmentation de l'épaisseur de la barrière diélectrique réduit significativement l'adhésion des matériaux.
- La présence du gap d'air, et par conséquent la rugosité aux interfaces, diminue la valeur de la force d'électro-adhésion. L'accroissance de l'écartement entre les électrodes influe négativement sur l'adhésion d'un diélectrique ou un conducteur.
- L'augmentation de la permittivité de la barrière diélectrique et du substrat diélectrique a un rôle positif sur la force d'adhésion.
- La conception d'électrodes optimale est celle de forme rectangulaire, puisqu'elle génère un champ électrique plus ou moins uniforme, entre l'actionneur et les substrats, par rapport aux électrodes de formes semi-ellipsoïdale ou triangulaire.
- La force d'électro-adhésion acquise par l'application d'une tension continue est plus grande par rapport à celle d'une tension alternative.
- L'influence du rapport g/w sur l'adhésion des matériaux dépend des surfaces d'interaction entre un substrat (ou les particules) et l'actionneur. Il a été constaté que l'emplacement d'une particule entre deux électrodes adjacentes et l'application d'une tension élevée génèrent une importante force d'adhésion.
- La masse critique de l'adhésion d'un matériau augmente avec l'augmentation de la tension appliquée.

La comparaison du calcul analytique avec la simulation numérique permet de constater que les résultats sont proches. L'écart entre les deux méthodes peut être expliqué par les aspects suivants : l'approximation linéaire du potentiel électrique qui se traduit par des valeurs du champ électrique élevées sur les bords et dans l'espace inter-électrodes ; mais également l'épaisseur des électrodes négligée dans le modèle analytique, alors qu'elle ne peut pas être trop fine au niveau du maillage du modèle de simulation par éléments finis.

Le chapitre suivant est consacré à l'étude expérimentale du processus d'électro-adhésion des mélanges de matériaux métal/polymère. L'analyse du comportement des matériaux a été

réalisée sur un dispositif rotatif à 180° sur lequel les actionneurs d'adhésion électrostatique sont fixés.

CHAPITRE III

Effet des paramètres électriques et géométriques sur l'électro-adhésion

Chapitre III

Effet des paramètres électriques et géométriques sur l'électro-adhésion

L'objectif du travail présenté dans le cadre de ce chapitre est d'analyser expérimentalement le processus d'adhésion d'un mélange de particules « métal/polymère » en utilisant des actionneurs à électro-adhésion (AEA) en configurations biphasées et triphasées. Comme il a été mentionné précédemment, ces actionneurs sont également utilisés dans la technique des ondes voyageuses et portent les noms « convoyeurs électrostatiques à ondes progressives (COP) et ondes stationnaires (COS) » pour des configurations d'électrodes triphasées et biphasées, respectivement.

Suite à l'analyse numérique et théorique effectuée dans le chapitre II, la stratégie expérimentale de cette partie consiste à déterminer, séparément, les interactions de chaque matériau (métal et/ou polymère) avec les forces générées par l'AEA, avant de passer à l'application de la séparation électrostatique qui sera abordée dans le chapitre IV. Cette étude est très importante pour le sujet traité dans le cadre de cette thèse, car elle permet de comprendre le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à l'action d'adhésion électrostatique. Par conséquent, une bonne connaissance de ces propriétés est très utile pour l'interprétation des résultats de séparation électrostatique des mélanges de matériaux « métal/polymère ». Plusieurs paramètres électriques et géométriques permettant de contrôler et d'agir sur l'efficacité de l'électro-adhésion des matériaux sont analysés. Parmi les paramètres électriques étudiés, on peut citer : la forme d'onde de la tension, la fréquence, le rapport cyclique, le déphasage ou encore le nombre de phases. Les paramètres géométriques étudiés sont principalement : la largeur des électrodes et l'espace inter-électrodes.

III.1. Installation expérimentale

Les phénomènes d'adhésion électrostatique entre deux surfaces chargées électriquement, ou entre matériaux granulaires et les parois d'électrodes portées à des forts potentiels électriques, ont déjà fait l'objet de nombreuses investigations scientifiques [2] [211] [212]. Cette étude qui consiste à évaluer l'influence des paramètres électriques et géométriques de l'AEA sur des matériaux en métal et en polymère, nécessite une installation expérimentale adaptée. Le banc expérimental mis en place durant cette thèse est présenté dans cette partie. Le but visé par l'utilisation de ce système est de soumettre les matériaux uniquement aux forces d'adhésion électrostatique et de gravité (Figure III.1). Il s'agit d'analyser l'évolution de la masse de chaque matériau adhérent à la surface de l'AEA en fonction des facteurs d'entrée. Les matériaux utilisés sont des granules de cuivre et de PE déchiquetés provenant des déchets de câbles électriques. Leur taille varie de quelques centaines de micromètres à quelques millimètres.

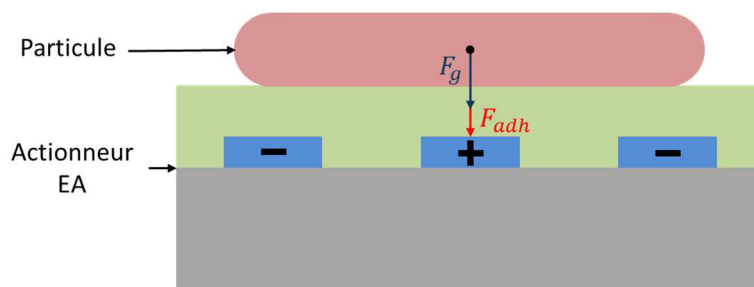


Figure III.1. Représentation schématique d'un matériau (Cu ou PE) soumis aux forces d'EA et de gravité.

III.2.1. Description du banc expérimental

La présente section décrit l'installation expérimentale qui a été conçue pour déterminer les caractéristiques d'adhésion des matériaux. Le banc utilisé pour effectuer les essais, représenté sur la Figure III.2, peut être divisé en deux entités : le système de réglage des paramètres électriques et le dispositif d'actionnement et de mesure de l'adhésion électrostatique.

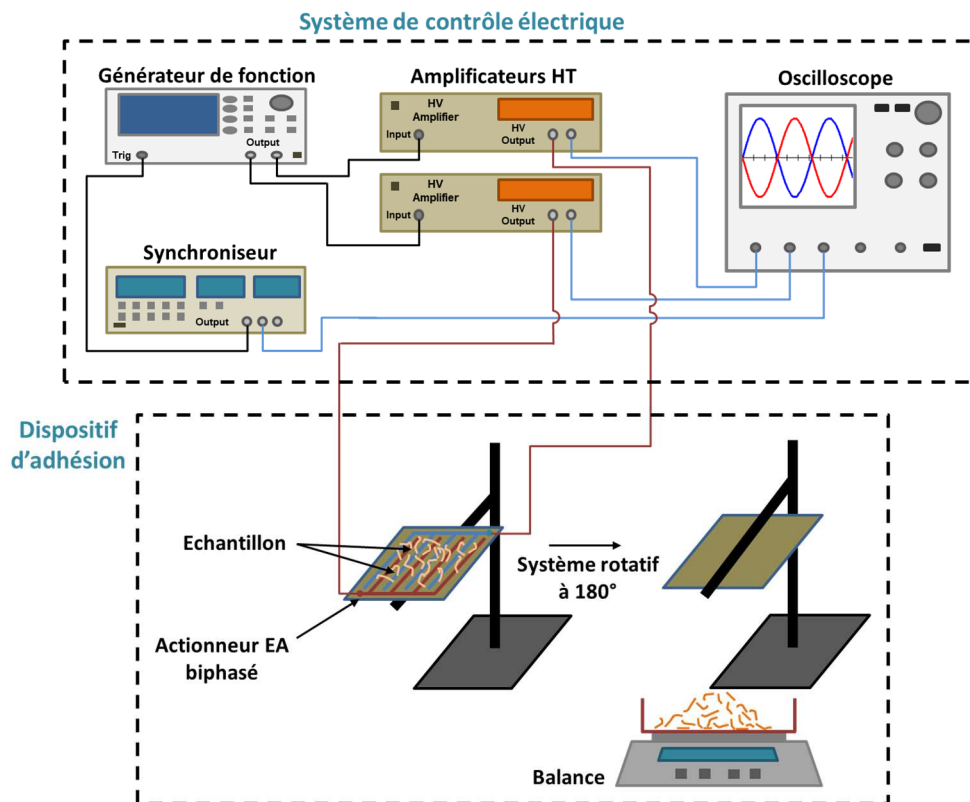


Figure III.2. Schéma de l'installation expérimentale.

Dans la première partie de l'installation expérimentale, le potentiel électrique de chaque phase qui alimente le dispositif est généré par un amplificateur haute tension (Trek, modèle 2220, ± 2 kV, ± 20 mA) contrôlé par un générateur de fonction (TTi, model TGA1240, 16 MHz) et un synchronisateur (Stanford, modèle DG645). Pour la deuxième partie, le moyen d'action sur les matériaux est le dispositif rotatif à 180° qui est équipé d'un actionneur à électro-adhésion. L'alimentation de ce dernier en tension génère les forces d'EA qui maintient les particules à sa surface. Le fait de tourner le dispositif à 180° met les particules intégralement

sous l'effet de la force d'EA et de gravité. Les résultats de l'adhésion sont déterminés à partir des mesures de masse des matériaux qui restent collés à la surface de l'AEA à l'aide d'une balance électronique (Kern, modèle 440), et sont exprimés en fonction du taux d'adhésion de chaque matériau. La méthode de calcul de ce taux est décrite dans la partie ci-dessous. Les signaux sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope numérique (Lecroy, modèle Wave Surfer 424, 200 MHz, 2 GS/s). Les plaques d'AEA du dispositif sont contrôlées par des facteurs électriques et conçues avec des facteurs géométriques spécifiés dans les prochains paragraphes.

III.2.2. Configurations des actionneurs étudiés

La Figure III.3 illustre la répartition des phases dans les actionneurs d'EA biphasé et triphasé sur le plan x-y pour le cas d'un signal sinusoïdal.

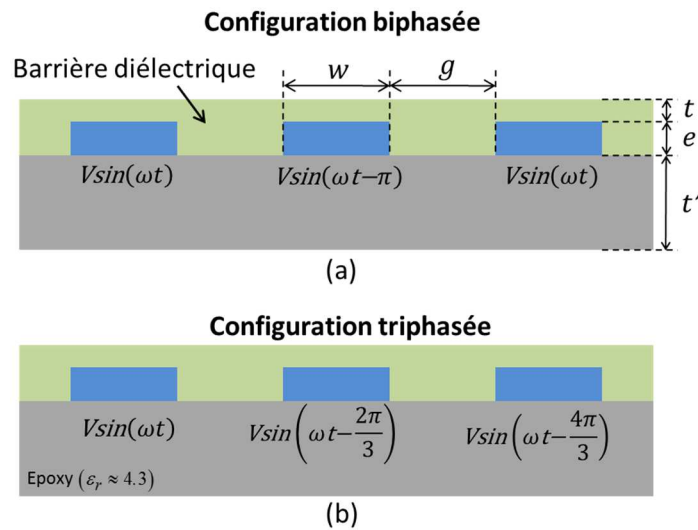
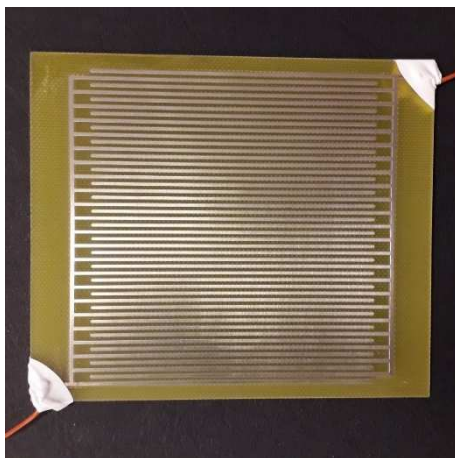
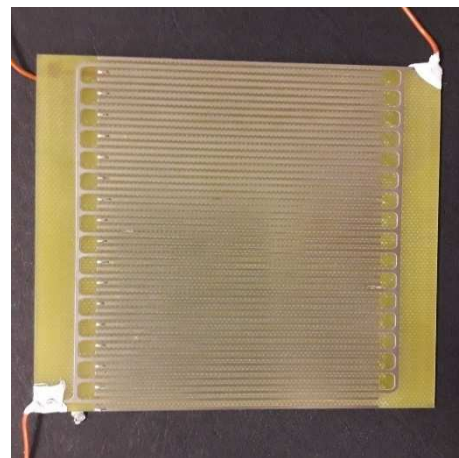


Figure III.3. Démonstration des facteurs géométriques d'un AEA avec la répartition des phases.

Les images de la Figure III.4 montrent les photographies des deux actionneurs biphasé et triphasé de référence ($g/w = 1$; $g = w = 1$ mm) utilisés durant les expériences. Les photographies ont été prises pour ces actionneurs avant la mise en place de la barrière diélectrique au-dessus des électrodes.



a) Configuration biphasée



b) Configuration triphasée

Figure III.4. Photographies des deux actionneurs sans barrière diélectrique.

Le Tableau III.1 regroupe les dimensions géométriques correspondant aux actionneurs utilisés durant les expériences. Les plaques des AEA ont été réalisées de telle sorte que le rapport R (g/w) entre l'espacement inter-électrodes g et la largeur de l'électrode w varie régulièrement dans l'intervalle $[0,125 ; 4]$. La caractérisation du comportement des matériaux (Cuivre et PE) sous l'effet des paramètres électriques pour les deux configurations d'électrodes (biphasée et triphasée) a été réalisée en utilisant un actionneur de référence correspondant aux dimensions $g = 1$ mm et $w = 1$ mm.

Tableau III.2. Données géométriques des actionneurs à électro-adhésion.

g (mm)	0,5	1	1	1	2	4
w (mm)	4	4	2	1	1	1
$R = g/w$	0,125	0,25	0,5	1	2	4

Les actionneurs sont composés de plusieurs électrodes en cuivre de $35 \mu\text{m}$ d'épaisseur et de largeur w , imprimées parallèlement sur une support diélectrique de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ avec un écartement g entre ces électrodes. Le support diélectrique employé est en résine d'époxy renforcée par des fibres de verre ($\epsilon_r = 4.3$). L'ensemble des électrodes est couvert par une barrière diélectrique en Kapton ($\epsilon_r = 3.3$). Les tensions appliquées, carrées ou sinusoïdales, sont déphasées de π pour une configuration biphasée et de $2\pi/3$ pour une configuration triphasée. Les formes d'ondes typiques de ces tensions sont indiquées sur la Figure III.5.

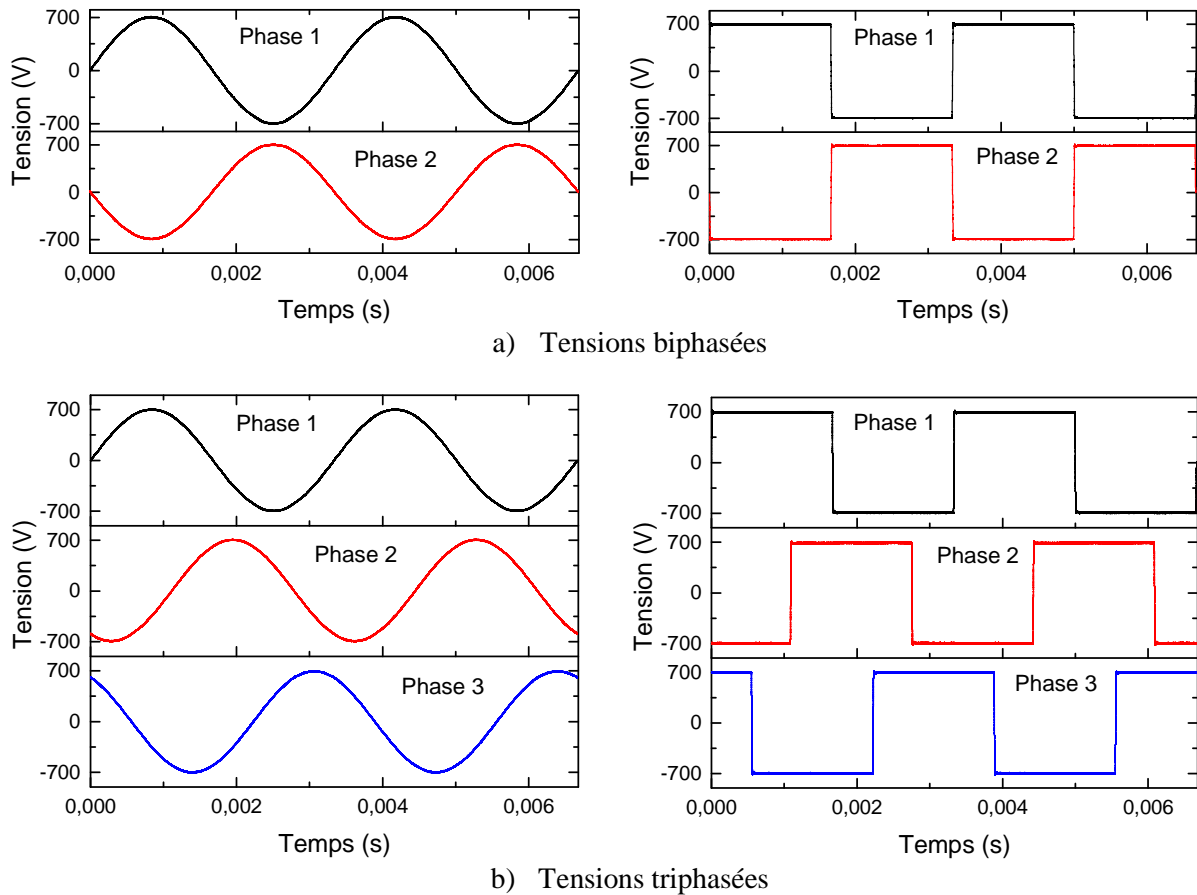


Figure III.5. Les formes d'ondes typiques des tensions appliquées dans les deux configurations d'électrodes. Conditions : $V_{max} = 700 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

III.2.3. Protocole expérimental

De manière générale, l'ordre opérationnel des expériences consiste à déposer une masse de 2 g d'un matériau (Cuivre ou PE) en monocouche sur la plaque de l'AEA initialement mise en position horizontale. Après l'activation de la tension, le dispositif est orienté avec un angle de 180° par rapport à la position initiale afin de prendre les mesures des quantités du matériau collé ou décollé, par le biais de la balance électronique. Trois masses des particules peuvent être mesurées, il s'agit des masses des particules déposées initialement, des particules collées, et des particules décollées.

Chaque point des caractéristiques présentant les résultats a été obtenu à partir de la valeur moyenne de trois mesures répétées successivement. Les erreurs de mesures causées par la balance électronique et par les pertes dans le système ont été estimées à 3% et négligées. Comme il a été cité précédemment, les résultats sont interprétés par le taux d'adhésion de chaque produit sur la surface de l'AEA et calculés de la façon suivante :

$$R_R = (M_R/M_{tot}) \times 100 \quad (III.1)$$

Avec,

R_R : taux d'adhésion du matériau,

M_R : masse du matériau (Cu ou PE) restant collé sur l'AEA,

M_{tot} : masse totale du matériau initialement déposé sur l'AEA.

$$M_{tot} = M_R + M_t \quad (III.2)$$

Où M_t est masse du matériau décollé et récupéré dans la boîte de collecte.

Avant de passer à l'analyse paramétrique détaillée, quelques essais préliminaires ont été opérés afin de démontrer le fonctionnement du dispositif. Les particules de PE utilisées ont une taille comprise entre 500 µm et 1 mm, alors que la taille des particules de cuivre varie entre 500 µm et 4 mm. La Figure III.6 illustre les photographies des matériaux initialement déposés sur la surface de l'AEA en position horizontale. Le dispositif est ensuite orienté à 90° (position verticale) après environ 1 s de la mise sous tension (signal carré, 600 V, 100 Hz).

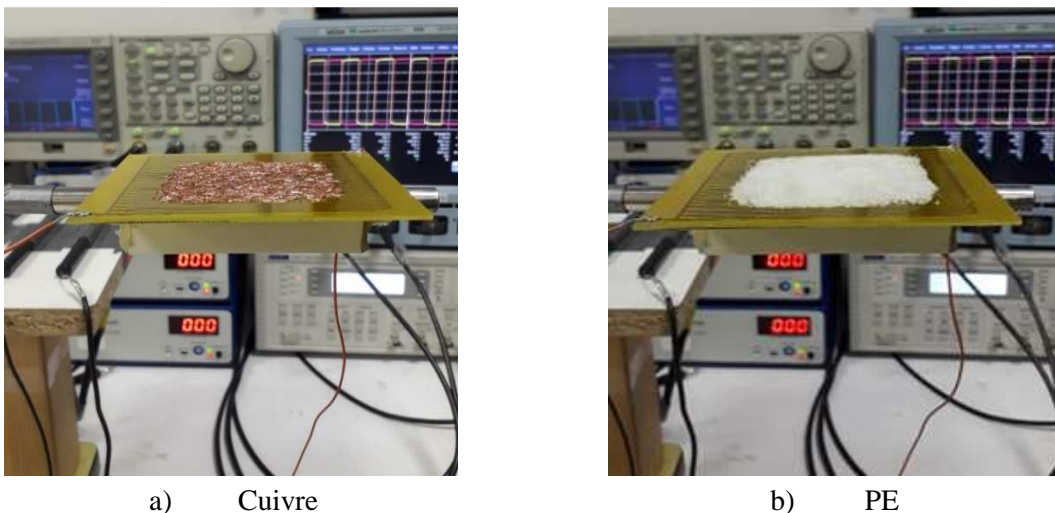


Figure III.6. Photographies des matériaux déposés en monocouche sur l'actionneur mis dans une position horizontale. Conditions : $V_{max} = 600 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$; $g/w = 1$.

L'image de la Figure III.7 illustre les matériaux collés à l'AEA en position verticale. On peut noter que la majorité des particules de cuivre reste collée à la surface de l'actionneur contrairement aux particules de PE pour lesquelles l'électro-adhésion est négligeable.

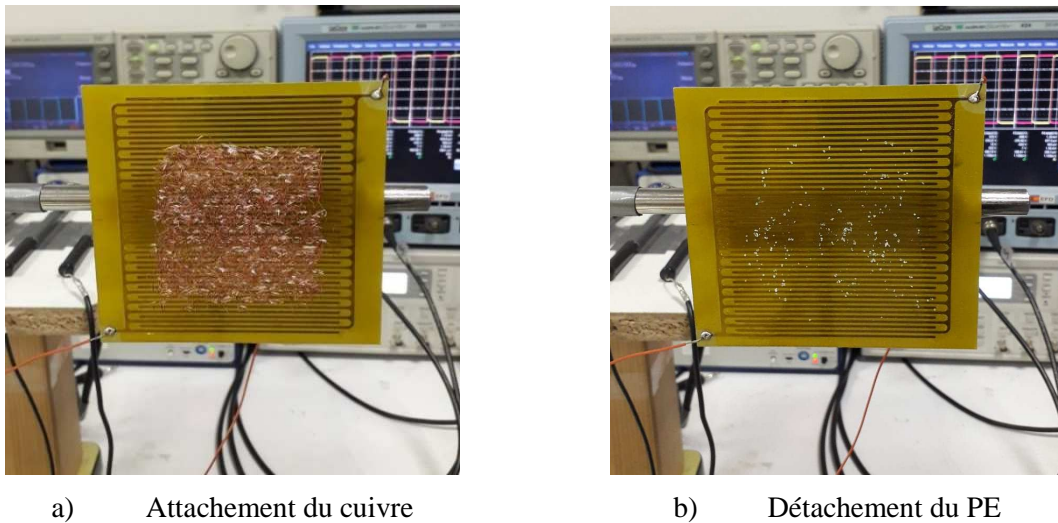


Figure III.7. Photographies des matériaux collés à la surface de l'actionneur en position verticale.
Conditions : $V_{max} = 600 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$; $g/w = 1$.

Les expériences de cette étude ont été réalisées à température ambiante ($T = 23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) et une humidité relative comprise entre 40 et 55 %. La plage de valeurs d'humidité relative correspond à la gamme de valeurs mesurées dans la salle des expériences au moment des manipulations. Malgré son importance indéniable, l'influence de l'humidité n'a pas été étudiée dans le cadre de cette thèse par manque de moyens expérimentaux adaptés (salle ou enceinte régulée en température et en humidité).

III.2. Adhésion du métal

Les plaques de l'AEA du dispositif rotatif sont contrôlées par des facteurs électriques dont : la forme d'onde de la tension, la fréquence des signaux, le rapport cyclique, le nombre de phases (deux ou trois) et le déphasage entre celles-ci. Les plaques sont conçues avec des facteurs géométriques qui sont essentiellement : la largeur des électrodes et l'écartement inter-électrodes. Dans cette section, les effets de ces paramètres sur l'efficacité de l'adhésion électrostatique des particules de métal (cuivre) sont analysés. L'AEA qui a été utilisé pour déterminer l'influence des paramètres électriques correspond à l'actionneur de référence.

III.2.1. Effet de la fréquence

Dans cette partie, l'effet de la fréquence sur l'efficacité d'adhésion électrostatique des particules de cuivre est étudié pour les configurations d'électrodes biphasées et triphasées. L'effet de la forme d'onde est introduit aussi dans cette analyse. Les mesures du taux d'adhésion en fonction de la fréquence ont été prises pour quatre valeurs de tension 10 V, 200 V, 400 V et 700 V. La plage de la fréquence varie de 0,1 Hz à 10 kHz. La tension 700 V est considérée comme étant le cas de référence pour interpréter la dynamique de l'attachement des particules.

A) Configuration biphasée

La Figure III.8 illustre les résultats de l'évolution du taux d'adhésion électrostatique des particules en fonction de la fréquence pour une configuration d'électrodes biphasée. Les phases des AEA sont alimentées par des tensions alternatives carrée ou sinusoïdale avec un déphase de 180° .

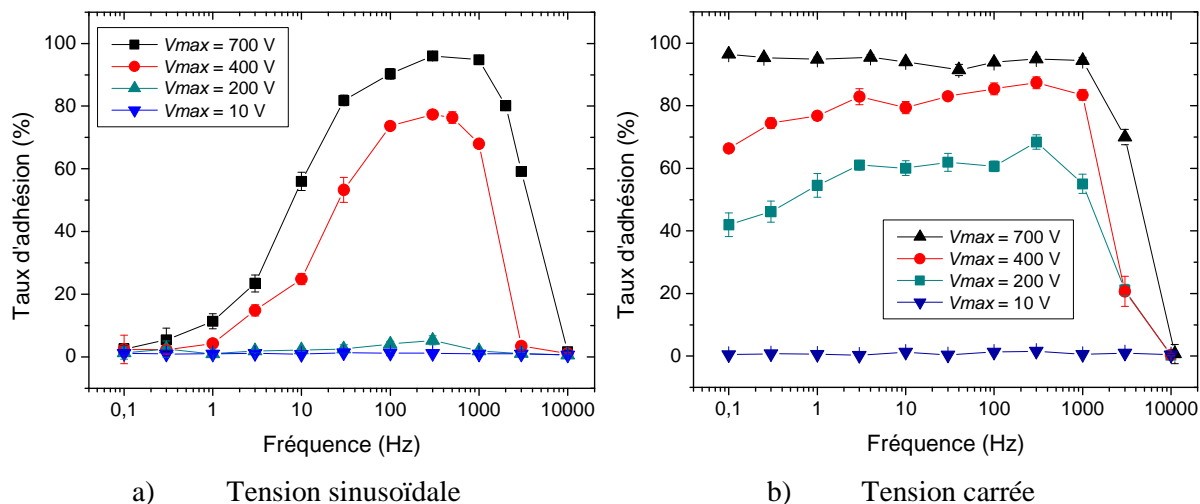


Figure III.8. Evolution du taux d'adhésion de cuivre en fonction de la fréquence dans une configuration biphasée. Conditions : $g/w = 1$.

Les résultats montrent que l'adhésion du cuivre augmente avec l'augmentation du niveau de la tension pour les deux formes d'ondes. Dans le cas du signal sinusoïdal, l'efficacité d'adhésion augmente rapidement pour des fréquences comprises entre 0,1 Hz et 300 Hz, avant de se stabiliser dans la gamme comprise entre 300 Hz et 1 kHz ; pour les valeurs de fréquence supérieures à 1 kHz l'adhésion baisse jusqu'à 0 %. La valeur maximale (95 %) est obtenue pour une fréquence de 300 Hz et une tension de 700 V.

Dans le cas du signal carré, le taux d'adhésion augmente légèrement pour la gamme de fréquences comprise entre 0,1 et 300 Hz. Au-delà, l'efficacité de maintien des particules de cuivre sur la surface de l'AEA baisse jusqu'à son annulation. On peut noter que le signal carré offre de meilleures performances sur une large gamme de fréquences. Ceci s'explique par la différence de potentiel ΔV entre deux électrodes adjacentes comme on peut le voir sur la Figure III.5.a qui indique les formes d'onde typiques utilisées pour la mise sous tension de l'actionneur indiqué. Pour le signal carré, ΔV reste constante, sauf pendant les brefs moments de changement de polarité. Ainsi, le champ électrique instantané au-dessus de l'actionneur est plus élevé durant quasiment toute la période, contrairement au cas de la tension sinusoïdale pour lequel le champ électrique évolue avec le temps.

La diminution du taux d'adhésion observée à haute fréquence pour les deux signaux est probablement due à une valeur faible du « slew rate » de l'alimentation (environ 100 V/ μ sec d'après la documentation technique du fabricant). En effet, le signal de la haute tension sinusoïdale devient presque triangulaire à très haute fréquence, tandis que le signal HT carré ressemble à une forme d'onde trapézoïdale. Car, en augmentant la fréquence, la durée nécessaire aux changements de polarité devient non négligeable par rapport à la période de la tension. En

conséquence, l'efficacité d'attachement des particules de cuivre sur l'actionneur se dégrade à haute fréquence.

B) Configuration triphasée

L'effet de la fréquence sur l'efficacité d'adhésion du cuivre pour la configuration d'électrode triphasée est indiqué sur la Figure III.9. Les signaux alternatifs utilisés sont de type carré ou sinusoïdal avec un déphasage de 120° . Les résultats montrent encore une fois que la tension a un effet positif sur l'efficacité d'adhésion dans le cas d'une configuration triphasée.

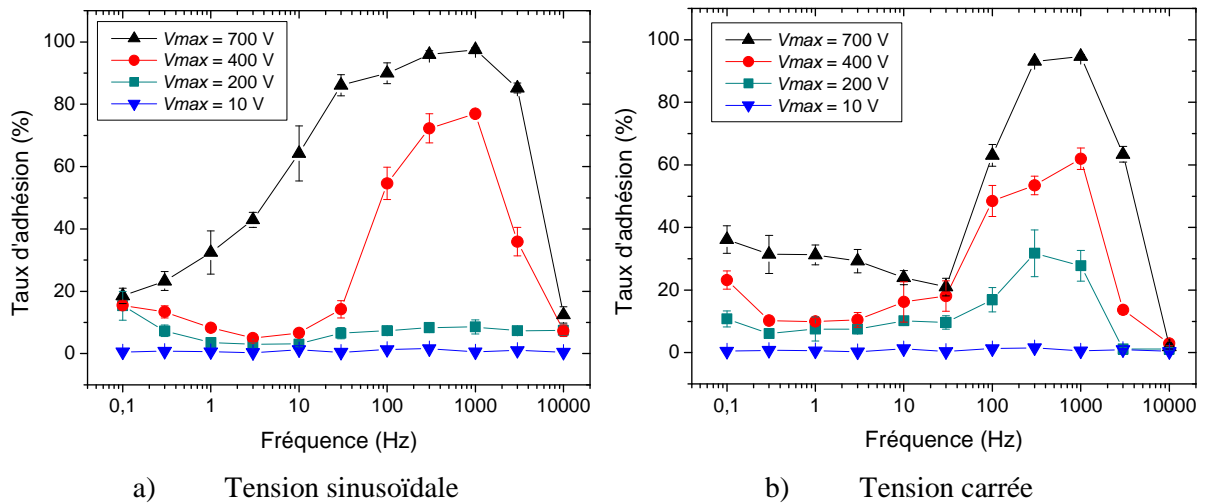


Figure III.9. Evolution du taux d'adhésion de cuivre en fonction de la fréquence dans une configuration triphasée. Conditions : $g/w = 1$.

Par ailleurs, on note que l'efficacité d'attachement des particules en fonction de la fréquence passe par un maximum pour les deux signaux. A titre d'exemple, trois phases différentes sont observées pour la tension sinusoïdale typique de 700 V. Pour des fréquences inférieures ou égales à 300 Hz, le taux d'adhésion du cuivre progresse jusqu'au maximum et se stabilise entre 300 et 1 kHz. Pour des fréquences supérieures à 1 kHz, l'attachement des particules s'affaiblit ce qui se traduit par la décroissance du taux d'adhésion.

Dans le cas de la tension carrée de référence (700 V), quatre phases de variations sont observées. Pour des fréquences inférieures à 30 Hz, l'efficacité de l'adhésion du cuivre diminue. Dans la gamme de fréquences comprise entre 30 Hz et 300 Hz, le taux d'adhésion augmente avant de se stabiliser entre 300 Hz et 1 kHz. Pour les fréquences supérieures à 1 kHz, les particules se détachent plus facilement de la surface de l'actionneur d'adhésion électrostatique ce qui se traduit par une diminution de l'efficacité du système.

Le nombre de phases a un effet important sur la distribution du champ électrique au-dessus des électrodes, et l'existence des ondes de potentiel électrique progressives [26]. Cependant, les résultats de l'adhésion du cuivre en utilisant un actionneur biphasé sont globalement meilleurs, en particulier avec un signal carré. Dans ce cas particulier, la différence de potentiel entre deux électrodes successives est au niveau le plus élevé pendant presque toute la période des signaux alternatifs.

Dans le cas d'une tension carrée triphasée, une particule de cuivre placée entre deux électrodes adjacentes subit une différence de potentiel nulle pendant une longue période (par

exemple $T/6$ lorsque les valeurs des tensions appliquées sont maximales). Cet intervalle de temps favorise le détachement des particules conductrices. Il en est de même pour le cas d'une tension sinusoïdale lorsque les deux signaux ont tendance à se croiser dans le temps, comme le montre la Figure III.5.

III.2.2. Effet de la tension

L'effet de la tension électrique sur l'efficacité d'attachement des particules de cuivre est analysé dans cette partie pour les configurations d'électrodes biphasée et triphasée. En plus des signaux alternatifs, carré et sinusoïdal, le cas d'un signal continu a été considéré dans cette étude. La fréquence des tensions alternatives a été fixée à 300 Hz.

La Figure III.10 illustre l'évolution du taux d'adhésion de cuivre en fonction de la tension appliquée aux deux électrodes adjacentes pour la configuration biphasée. Trois modes d'alimentation en tension continue ont été étudiés dans cette expérience tout en gardant les mêmes valeurs de différence de potentiel entre deux électrodes adjacentes. Dans le premier mode, il s'agit d'utiliser deux sources de tension continue, une négative et l'autre positive. Le deuxième mode consiste à brancher une phase à la masse et l'autre à la source de tension négative. Enfin, le troisième mode est similaire au deuxième sauf que la source de tension est cette fois positive. Il est important de noter que la figure à gauche montre les résultats de la variation du taux d'adhésion en fonction du niveau de tension V sur chaque électrode HT, alors que les résultats de la figure à droite sont en fonction de la tension ΔV entre deux électrodes adjacentes.

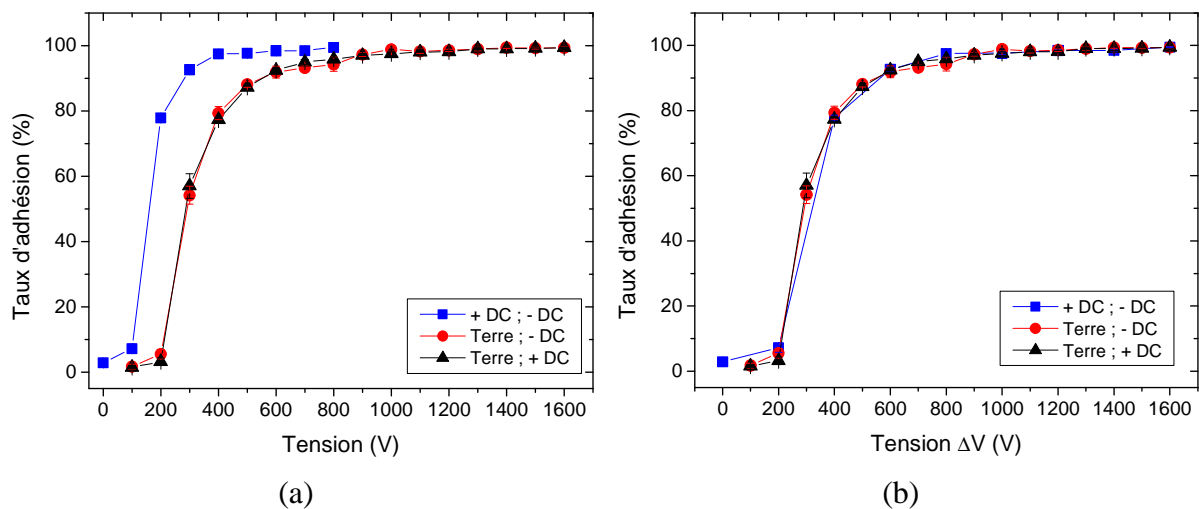


Figure III.10. Progression du taux d'adhésion de cuivre en fonction des tensions continues. (a) Tension sur l'électrode haute tension ; (b) tension entre deux électrodes adjacentes. Conditions : $g/w = 1$.

Les résultats montrent que le taux d'adhésion du cuivre s'accroît avec la croissance de la tension entre deux électrodes adjacentes. Il est remarqué que l'attachement obtenu pour le cas d'un actionneur alimenté par deux sources de tensions est similaire aux cas de l'utilisation d'un branchement masse-source de tension (positive ou négative). Par conséquent, il est préférable d'utiliser le mode de branchement masse-source (avec une seule source de tension) dans une application industrielle.

La Figure III.11 représente la progression du taux d'adhésion du cuivre en fonction de la tension appliquée pour trois formes d'ondes en utilisant l'actionneur d'EA biphasé. Dans le cas des trois signaux biphasés utilisés, l'efficacité totale du système varie entre 0 % et 96 % ($\pm 2\%$) pour des tensions allant de 0 à 700 V. Ceci s'explique par le fait que la force d'électro-adhésion est proportionnelle au carré de la tension appliquée.

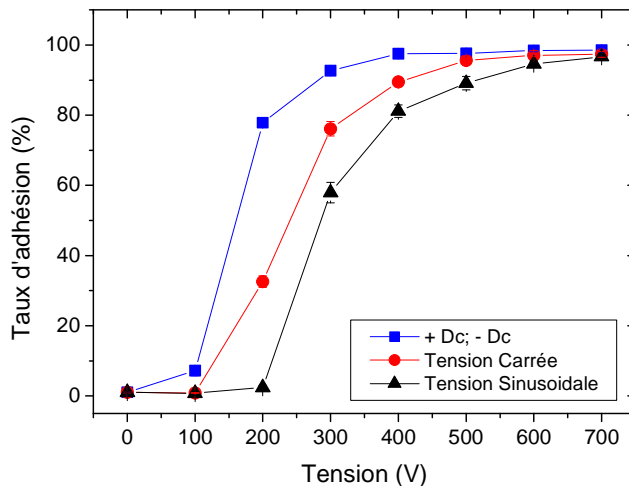


Figure III.11. Progression du taux d'adhésion de cuivre en fonction de la forme d'onde de la tension. Conditions : $f = 300 \text{ Hz}$; $g/w = 1$.

En revanche, les effets de l'électro-adhésion sont perceptibles à des tensions plus faibles avec des signaux continus. En effet, la mise sous tension déclenche des mouvements de charges électriques dans le cuivre de telle sorte que les électrons sont attirés par l'électrode de signe positif alors que les trous sont attirés par l'électrode de signe négatif. La distribution équilibrée des charges au niveau des particules est la source des forces d'adhésion électrostatique. Cet effet est moins important dans le cas d'une alimentation alternative, car les temps de transition de tension (entre polarité positive et négative) sont non-négligeables (formes d'onde carrée ou sinusoïdale) ce qui favorise le détachement des particules de cuivre.

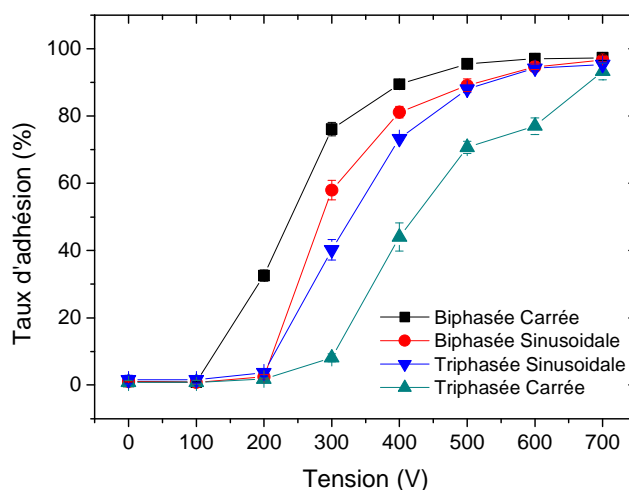


Figure III.12. Comparaison des caractéristiques taux d'adhésion - tension pour différentes configurations. Conditions : $f = 300 \text{ Hz}$; $g/w = 1$.

La Figure III.12 représente une comparaison entre les résultats obtenus avec des configurations biphasées et triphasées pour les deux types de tensions alternatives (carrées et

sinusoïdales). Les meilleures performances sont obtenues avec une configuration biphasée connectée à des tensions carrées, et les moins bonnes sont obtenus avec des actionneurs triphasés connectés à des tensions carrées. Ce résultat s'explique par la différence du potentiel électrique entre deux électrodes successives pour chaque configuration.

III.2.3. Effet du rapport cyclique et du déphasage

Le rendement d'attraction de cuivre en fonction du rapport cyclique et du déphasage pour un signal carré est illustré sur la Figure III.13. La tension a été fixée à 700 V pour une fréquence égale à 300 Hz. Les résultats montrent clairement que la récupération de cuivre sur la surface du dispositif d'adhésion est maximale pour un rapport cyclique de 100 % et un déphasage de 180°. En revanche, il est possible de maintenir ce niveau élevé sur une large plage de rapports cycliques (70 % - 100 %) et déphasages (120°-180°).

Il est à noter que, plus la largeur du plateau de tension appliquée tend à occuper l'intervalle de temps dans une demi-période, plus l'efficacité est maximale. Pour le déphasage, on constate que lorsque les deux tensions sont en phase (déphasage = 0 °) le rendement est nul, par contre lorsqu'elles ont tendance à s'opposer (déphasage = 180°) l'adhésion devient maximale.

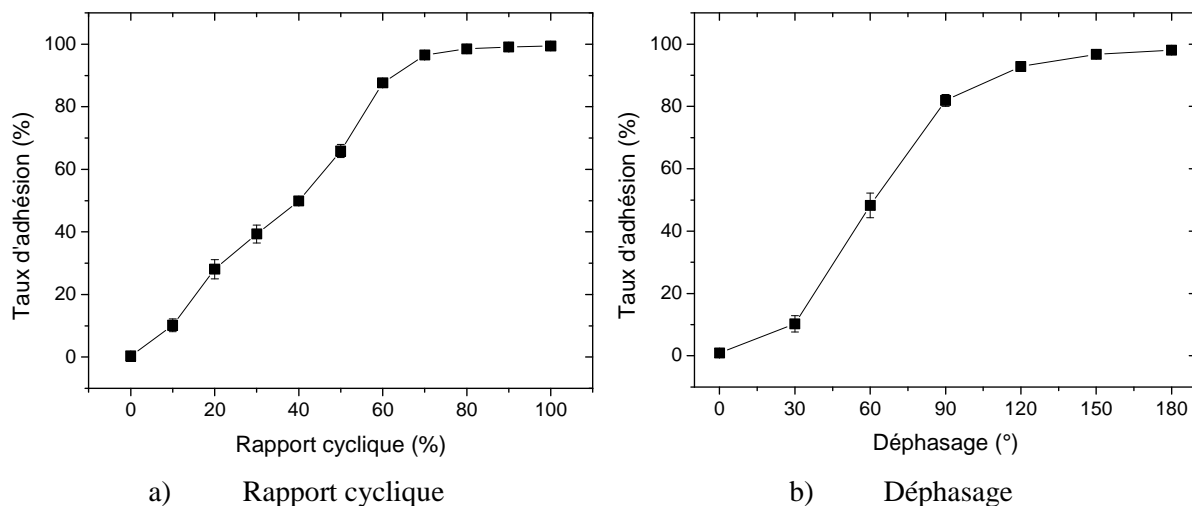


Figure III.13. Variation du taux d'adhésion du cuivre en fonction du rapport cyclique et du déphasage pour une configuration biphasée avec une tension carrée. Conditions : $V_{max} = 700 \text{ V}$; $f = 300 \text{ Hz}$; $g/w = 1$.

III.2.4. Effet de la largeur d'électrodes et l'espace inter-électrodes

L'influence du rapport $R = g/w$ sur les performances d'adhésion des particules de cuivre est illustrée sur la Figure III.14. Six plaques d'actionneurs d'EA à configuration d'électrodes biphasée et à différents rapports g/w ont été réalisées selon les dimensions précisées dans le Tableau III.1. Le dispositif rotatif est doté d'un système de fixation permettant d'interchanger facilement les actionneurs pour réaliser les expériences. Dans cette partie, la tension d'alimentation des électrodes a été fixée de telle sorte que le champ électrique réduit (Er) entre les phases de chaque actionneur soit de 1000 V/mm (quelle que soit la géométrie). Les mesures ont été prises pour des tensions carrées et sinusoïdales, et pour les quatre valeurs de fréquence : 1 Hz, 10 Hz, 100 Hz et 1 kHz.

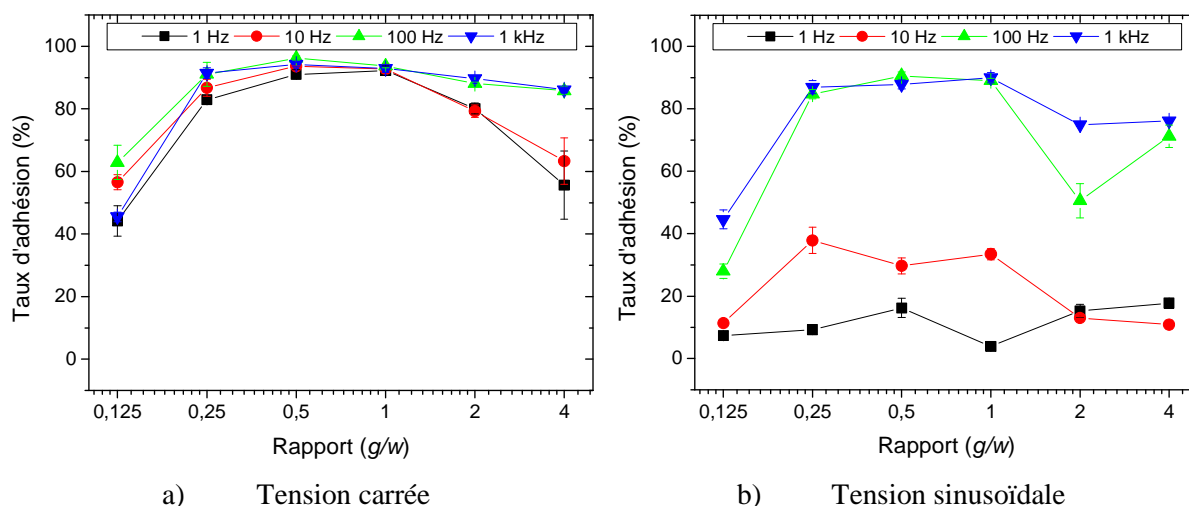


Figure III.14. Variation du taux d'adhésion de cuivre en fonction du rapport géométrique g/w . Conditions : configuration biphasée, $E_r = 1000$ V/mm.

Quel que soit le niveau de fréquence de la tension carrée, le taux d'adhésion augmente avec le rapport g/w , atteint un maximum, puis diminue avec les plus hauts rapports écartement/largeur des électrodes. Le rapport optimal est compris entre 0,5 et 1. Ce résultat est lié à la taille des particules de cuivre de l'étude. Pour une largeur d'électrode élevée (faible rapport g/w), certaines particules de cuivre pourraient être entièrement positionnées sur une électrode comme le montre la Figure III.15, aucune force d'électro-adhésion n'est donc créée. Pour un rapport g/w élevé, certaines particules de cuivre pourraient être positionnées dans l'espace inter-électrodes, ce qui réduit l'accumulation de charge sous les particules.

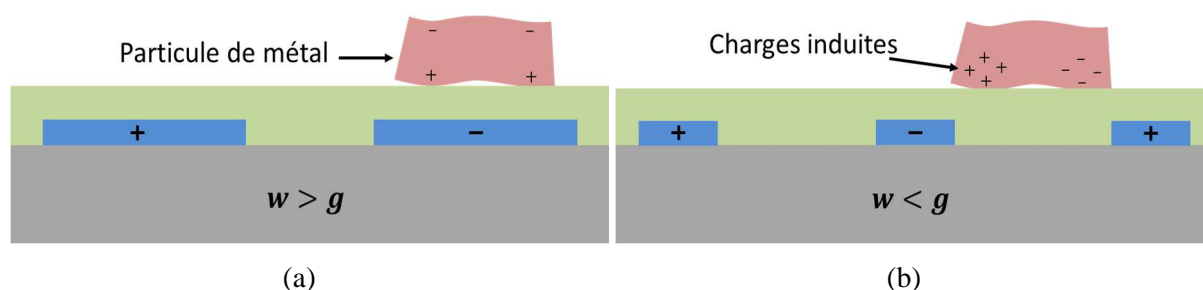


Figure III.15. Représentation schématique de la position possible de la particule sur l'actionneur pour : (a) une largeur d'électrode élevée et (b) un écart élevé.

Avec un signal sinusoïdal, la dynamique de variation du taux d'adhésion avec le rapport g/w est proche du cas carré pour les hautes fréquences. Cependant, les résultats obtenus à faibles fréquences ne permettent pas de conclure sur la dynamique des courbes et le rapport g/w optimal.

La Figure III.16 représente les courbes de l'efficacité d'adhésion obtenues pour les deux signaux carré et sinusoïdal avec une fréquence de 100 Hz. Les résultats confirment que l'adhésion obtenue pour le signal carré sont importants par rapport aux résultats du signal sinusoïdal, pour les six actionneurs étudiés. L'actionneur qui donne les meilleures performances possède un rapport g/w de 0,5 ($g = 1$ mm et $w = 2$ mm).

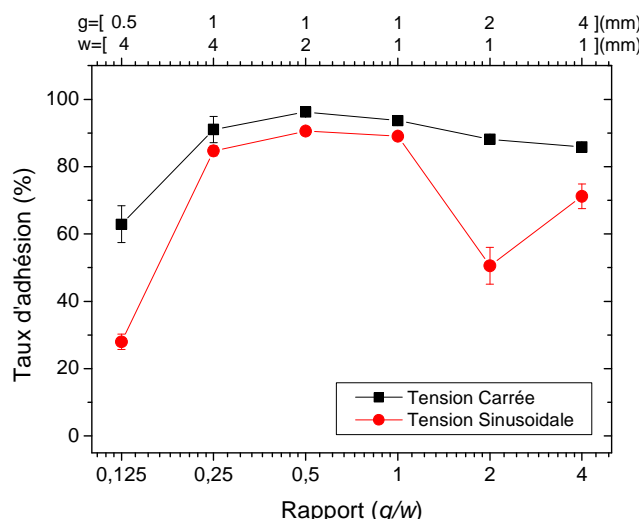


Figure III.16. Comparaison de l'effet du rapport géométrique g/w sur le taux d'adhésion de cuivre. Conditions : Configuration biphasée ; $E_r = 1000 \text{ V/mm}$; $f = 100 \text{ Hz}$; $g/w = 1$.

III.3. Adhésion du polymère

Les sections précédentes ont indiqué que les particules métalliques pourraient être attirées efficacement sur la surface de l'actionneur électro-adhésif dans le cas d'un signal carré biphasé. Dans cette section, nous allons étudier l'effet d'un actionneur sur des particules de polymère, afin d'envisager l'opération de tri électrostatique des deux matériaux.

Cette section est consacrée à l'étude de l'effet de la tension, la fréquence et la forme d'onde sur le comportement de deux polymères (PVC, PE) placés sur l'actionneur. Les deux configurations d'électrodes biphasée et triphasée sont utilisées dans cette analyse. La géométrie des électrodes dans cette partie de l'étude correspond à l'AEA de référence avec une largeur d'électrodes et un écartement de 1 mm chacun.

A) Configuration biphasée

Dans le cas de la configuration biphasée, l'évolution de l'adhésion du PE en fonction de la fréquence pour les trois valeurs de tension 200 V, 400 V et 700 V, est représentée sur la Figure III.17. L'influence des signaux alternatifs carré et sinusoïdal est incluse dans cette étude.

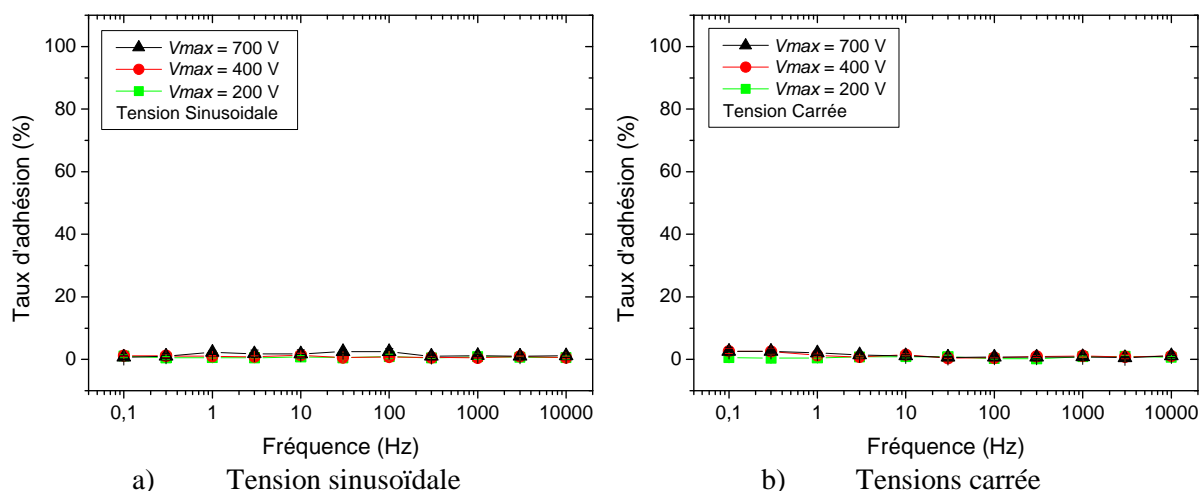


Figure III.17. Variation du taux de récupération de PE en fonction de la fréquence pour les tensions biphasées. Conditions : $g/w = 1$.

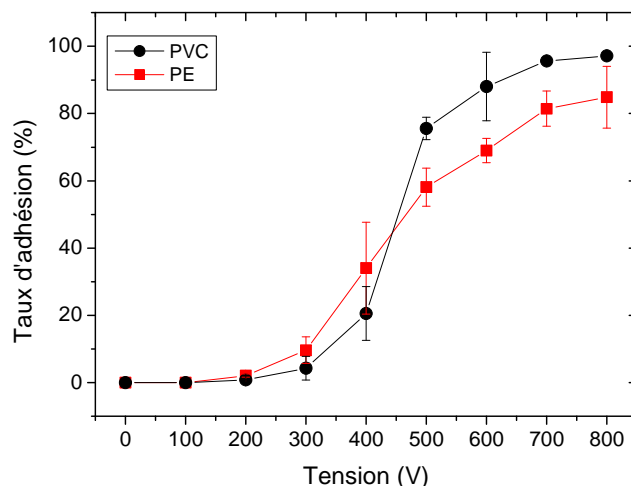
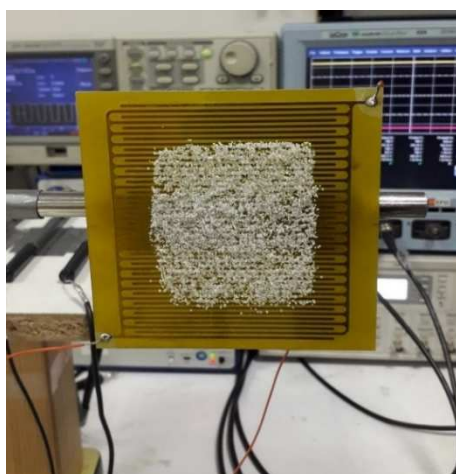


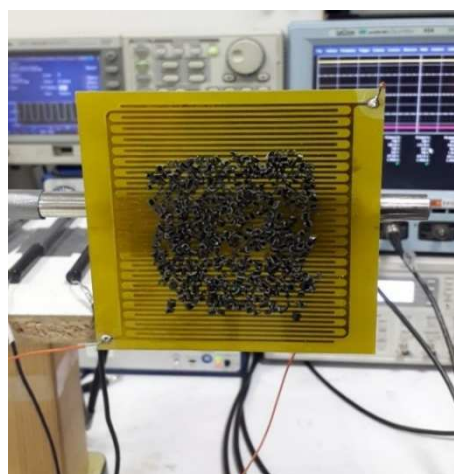
Figure III.18. Evolution du taux d'adhésion des particules de polymère en fonction de la tension continue biphasée. Conditions : $g/w = 1$.

Afin de compléter l'analyse, nous avons décidé de remplacer les sources de tension alternatives par des sources continues (polarité positive sur une électrode et négative sur les électrodes adjacentes). La Figure III.18 illustre l'évolution du taux d'attachement des polymères (PVC, PE) en fonction du niveau de la tension continue. Les résultats montrent que l'efficacité de l'adhésion des matériaux polymère augmente avec l'augmentation de la tension. Ceci s'explique par le fait que les particules de polymère se polarisent de façon permanente sous l'effet d'un champ électrique continu. Ainsi, la force d'électro-adhésion peut vaincre la force de gravité à haute tension. En conclusion, l'utilisation d'une tension continue n'est pas avantageuse pour l'application de la séparation électrostatique.

L'image de la Figure III.19 représente une photographie prise pour des particules de polymère (PE et PVC) placées sur un actionneur biphasé (en position verticale) sous tension continue. Les résultats montrent clairement que les particules peuvent se maintenir à la surface malgré l'effet de la force de gravité si la tension continue est suffisante.



a) Attachement du PE



b) Attachement du PVC

Figure III.19. Photographies de particules de polymère sur l'actionneur mis dans une position verticale. Conditions : $V_{max} = 600 \text{ V}$; $g/w = 1$.

B) Configuration triphasée

Dans cette partie de l'étude, le comportement de particules de polymère sur un actionneur triphasé est analysé. La Figure III.20 illustre l'évolution du taux d'adhésion du PE en fonction de la fréquence pour les deux formes d'onde de la tension (carrée et sinusoïdale). Le niveau de tension de cette expérience a été fixée à 700 V. Les résultats montrent que pour toute la plage de la fréquence de l'étude, l'efficacité d'attachement est nulle comme pour le cas biphasé sous excitation alternative.

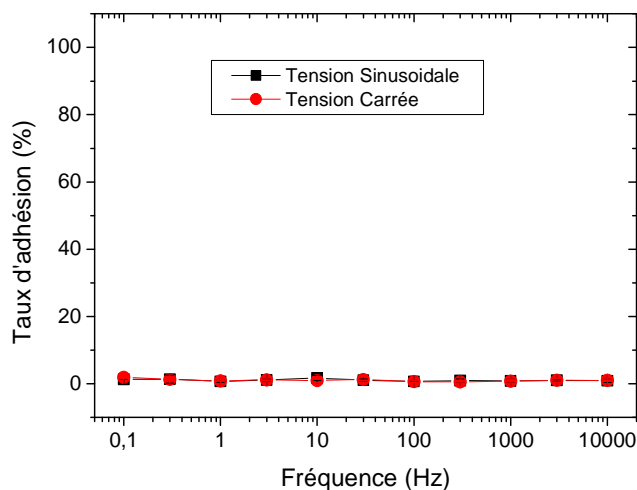


Figure III.20. Variation du taux de récupération de PE en fonction de la fréquence pour les tensions triphasées carrée et sinusoïdale. Conditions : $V_{max} = 700 \text{ V}$; $g/w = 1$.

En conclusion, en raison d'une conductivité électrique faible dans le cas des polymères, la force d'adhérence électrostatique est également faible par rapport à d'autres forces mécaniques, qui favorise la non-adhérence de ce matériau. Dans les mêmes conditions, l'électro-adhésion des particules de cuivre a été très efficace. Car, la mobilité de charge dans le métal permet à la force EA de dominer la force de gravité. Ces résultats sont très intéressants, puisqu'ils ouvrent la perspective du développement du procédé de séparation électrostatique du mélange métal/polymère. Les conditions pour lesquelles une telle séparation est possible sont analysées dans les prochains paragraphes.

III.4. Comparaison entre l'adhésion du métal et du polymère

Une comparaison entre l'efficacité d'adhésion du cuivre et du PE est présentée dans cette partie. L'analyse du comportement des matériaux pour les trois signaux (sinusoïdal, carré et continu) est considérée. L'étude est réalisée en exploitant les résultats des configurations biphasées de référence. Pour les signaux alternatifs, l'évolution de l'attachement des matériaux est exprimée en fonction de la fréquence pour une tension fixée à 700 V. Pour le cas du signal continu, la progression de l'adhésion des matériaux est exprimée en fonction de la tension appliquée.

Les Figures III.21 illustrent des résultats de comparaison entre le taux d'adhésion du cuivre et du PE en fonction de la fréquence pour les signaux sinusoïdal et carré, respectivement.

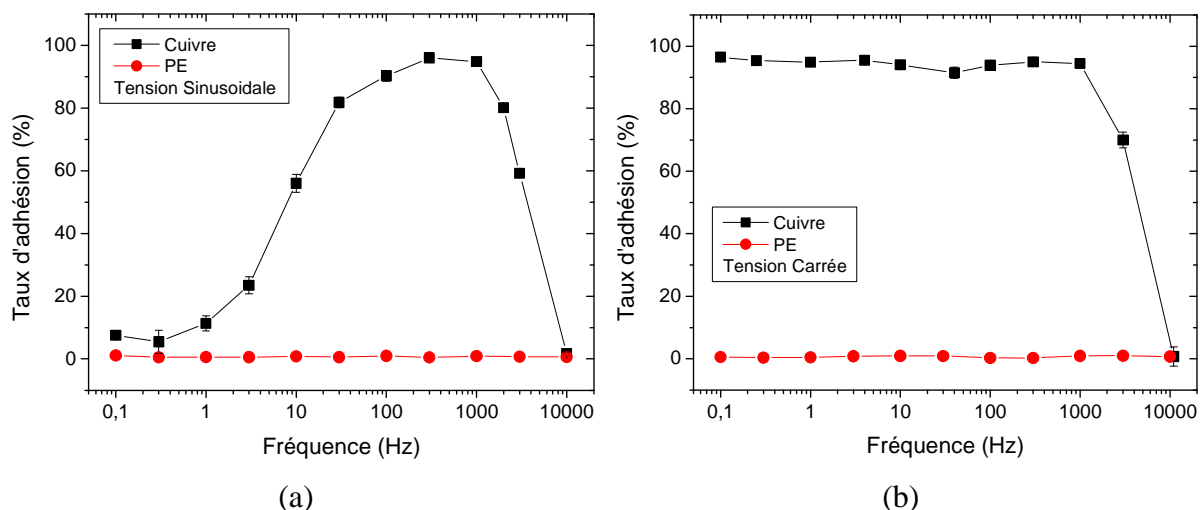


Figure III.21. Comparaison de l'effet de la fréquence sur le taux d'adhésion de cuivre et du PE pour une tension biphasée. (a) Tension Sinusoïdale ; (b) tension carrée. Conditions :

$$V_{max} = 700 \text{ V} ; g/w = 1.$$

Les résultats de l'efficacité d'adhésion de cuivre et de PE montrent qu'il est possible de soumettre les deux matériaux aux forces d'adhésion électrostatique de sorte que le cuivre s'attache et le PE se détache de la surface de l'actionneur. La plage de fonctionnement utile en fréquence est beaucoup plus large avec un signal carré (entre 0,1 et 1 kHz).

La Figure III.22 illustre l'évolution du taux de récupération de métal et de polymère en fonction de la tension dans le cas d'une excitation continue (polarité positive sur une électrode et négative sur les électrodes adjacentes).

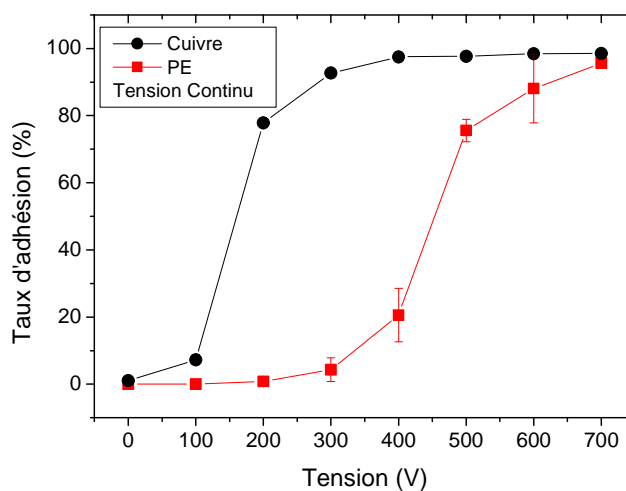


Figure III.22. Comparaison de l'effet de la tension biphasée continue sur le taux d'adhésion de cuivre et du PE. Conditions : $g/w = 1$.

On peut noter que le taux d'adhérence augmente avec l'amplitude de la tension continue pour les deux matériaux. Cependant, les particules de cuivre adhèrent beaucoup mieux à une tension inférieure par rapport aux particules de PE. Cet effet est dû à la mobilité des porteurs de charges libres dans le cas des matériaux conducteurs. En d'autres termes, une charge d'induction électrostatique est induite dans les particules conductrices tandis qu'une charge de polarisation

est produite dans les particules diélectriques. Par conséquent, la charge d'induction étant très supérieure à la charge de polarisation, les niveaux de tension nécessaires à l'adhésion de chaque matériau sont différents. Il est important de noter que la plage de tension pour laquelle la séparation des mélanges métal/polymère est possible reste étroite, entre 300 V et 400 V.

III.5. Conclusion

La force d'électro-adhésion est générée par un champ électrique au-dessus de la surface de l'actionneur d'adhésion électrostatique. Les matériaux placés au-dessus de la surface du dispositif d'adhésion sont soumis aux phénomènes d'induction d'électrostatique et de polarisation. Dans ce chapitre, il a été possible d'identifier les paramètres électriques et géométriques permettant d'obtenir la configuration optimale nécessaire pour le contrôle de l'adhésion électrostatique de matériaux en métal et en polymère.

Pour atteindre cet objectif, des particules de cuivre, de PE et du PVC déchiquetés issus du broyage des câbles électriques ont été utilisées durant les expériences. Il a été démontré que le cuivre peut s'attacher à la surface de l'actionneur pour toutes les formes d'onde étudiées. En revanche, le polymère n'adhère pas dans le cas d'un signal alternatif. Dans le cas d'un signal continu, le polymère peut se maintenir à la surface de l'actionneur à haute tension, ce qui rend difficile l'opération de séparation électrostatique d'un mélange métal / polymère. Le passage par la configuration triphasée n'est pas favorable à l'électro-adhésion du cuivre, car la différence de potentiel électrique entre deux électrodes successives est plus faible en comparaison avec le cas biphasé. Le meilleur rendement est obtenu pour une configuration biphasée à tension carrée, fréquence dans la gamme 0,1 à 1 kHz à 700 V, avec un rapport cyclique proche de 100 %, un déphasage de 180° et un rapport g/w dans la gamme [0,5 ; 1].

Afin d'appliquer le principe d'électro-adhésion à la séparation électrostatique du mélange, il est nécessaire de réaliser une installation expérimentale améliorée et adaptée avec les paramètres d'optimisation obtenue précédemment, ceci est l'objectif du prochain chapitre de cette étude.

CHAPITRE IV

Etude du procédé de séparation par
électro-adhésion

Chapitre IV.

Etude du procédé de séparation par électro-adhésion

Dans la littérature, les travaux existants sur le sujet de la séparation électrostatique des matériaux conducteurs et non-conducteurs sont généralement basés sur des montages expérimentaux avec des tensions très élevées et font souvent appel à une décharge électrique de type couronne [122]. L'objectif de ce chapitre est de préciser les solutions techniques essentielles à la conception et à la réalisation d'un dispositif de tri électrostatique qui ne nécessite pas l'application des niveaux de tension élevés ni l'utilisation d'une décharge couronne. Le principe de fonctionnement sera basé sur l'utilisation d'un actionneur d'adhésion électrostatique. Dans cette partie, les bilans de l'étude présentée dans le chapitre III seront exploités afin de réaliser un prototype de séparation électrostatique adapté au mode de tri par électro-adhésion.

Deux bancs expérimentaux ont été réalisés pour étudier le processus de la sélection électrostatique d'un mélange provenant de déchets de câbles électriques contenant du cuivre et du PVC. Le premier banc est un démonstrateur dans lequel l'AEA est fixé sur un plan incliné vibrant. L'étude de cette installation repose sur l'utilisation des paramètres optimaux obtenus dans le chapitre III afin de les appliquer au procédé de tri. Le deuxième banc est un dispositif de séparation à tambour rotatif avec un AEA de forme cylindrique. Cette conception assure une sélection continue et autonome des matériaux et ne nécessite pas l'intervention d'un opérateur pour récupérer les particules de cuivre collées sur la surface de l'AEA cylindrique.

L'intérêt de l'étude sur ces deux installations est de prouver la possibilité de réaliser des tâches de séparation de telle sorte que le PVC se sépare du mélange sous l'effet des vibrations ou par la force centrifuge, alors que le cuivre s'attache à l'actionneur sous l'effet de la force électro-adhésive.

Le présent chapitre est divisé en deux sections. Chacune est dédiée à la description d'une des deux installations expérimentales et de son protocole, suivi d'une analyse des résultats obtenus. Les paramètres expérimentaux étudiés dans cette investigation sont principalement : la fréquence, la tension, et l'écartement inter-électrodes, mais aussi l'effet de l'inclinaison dans le premier dispositif ou encore la vitesse de rotation du tambour dans le deuxième dispositif. L'évaluation des performances de ces bancs expérimentaux consistera à déterminer l'efficacité du processus de tri du mélange granulaire par électro-adhésion en analysant la quantité de matériaux récupérés dans les compartiments de collection ainsi que les taux de récupération et de pureté.

IV.1. Séparateur à plan incliné vibrant

Avant de proposer un prototype quasi-industriel basé sur la méthode de séparation par électro-adhésion pour le tri de mélanges de matériaux granulaires conducteur/isolant issus de déchets de câbles électriques, un premier séparateur de conception simple a été mis en place pour prouver le potentiel des actionneurs par adhésion électrostatique. Ce dispositif, appelé

« séparateur à plan incliné vibrant », a été utilisé pour réaliser des expériences sur des particules modèles provenant de câbles électriques. Dans les prochains paragraphes, l'installation, le protocole et les résultats expérimentaux seront présentés en détail.

IV.1.1. Installation expérimentale

La photographie de la Figure IV.1 représente le modèle de laboratoire du dispositif de tri à plan incliné vibrant réalisé à l'institut Pprime sur le site du Futuroscope (Université de Poitiers).

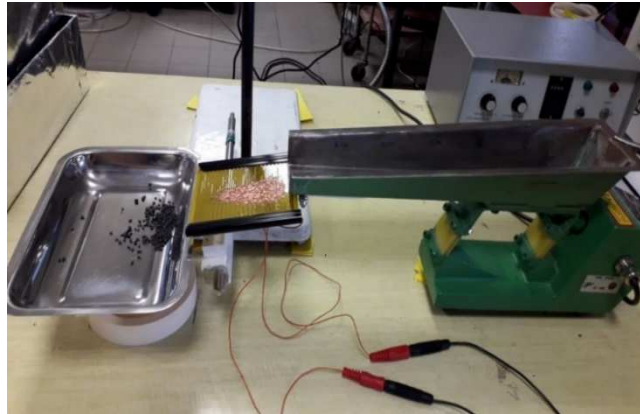


Figure IV.1. Photographie du dispositif de tri à plan incliné vibrant.

L'installation expérimentale de tri à plan incliné, représentée schématiquement sur la Figure IV. 2, est composée de deux modules. Le premier comporte les éléments de commande des paramètres électriques tandis que le deuxième module est constitué d'un vibro-transporteur sur lequel est fixé un support de l'AEA qui permet de varier l'angle d'inclinaison de 0° à 180° . Ce module est le siège de toutes les actions sur les particules y compris les mesures des masses des matériaux triés.

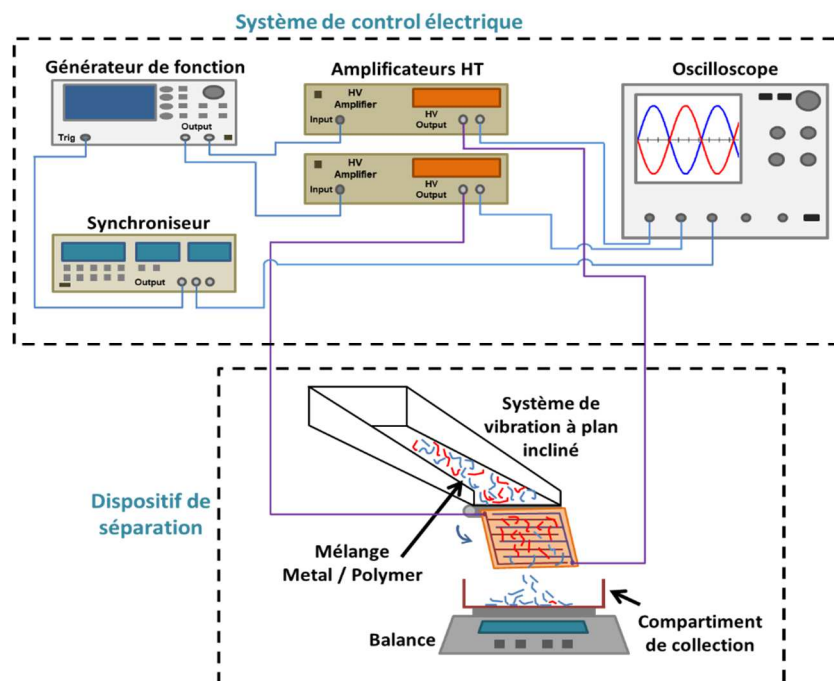


Figure IV.2. Représentation schématique de l'installation expérimentale de tri à plan incliné vibrant.

Dans une première série d'expériences permettant d'évaluer la faisabilité de la séparation électrostatique des mélanges conducteur/isolant, un câble électrique souple a été déchiqueté. Le câble se compose d'une multitude de brins en cuivre enrobés d'une couche de PVC. Les particules de ce mélange composé de cuivre et de PVC se caractérisent par une dispersion de leurs tailles (1 mm à 5 mm) et de leurs formes. La Figure IV.3 donne des photographiques des particules utilisées.

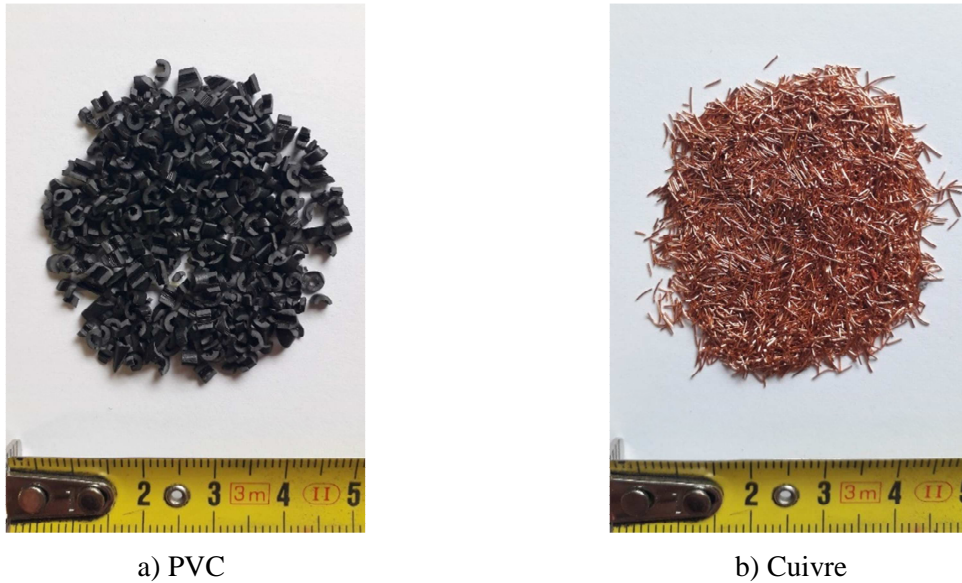


Figure IV.3. Photographie des échantillons de polymère et de métal.

IV.1.2. Méthodologie expérimentale

Le processus de tri des matériaux dépend de tous les facteurs permettant le contrôle de l'adhésion électrostatique, en particulier : la fréquence du signal, la forme d'onde et la valeur de la tension appliquée, la configuration des électrodes (biphasée ou triphasée) et la géométrie des électrodes (rapport g/w).

Sur la base des résultats du chapitre III, entre autres, l'étude expérimentale a été effectuée en tenant compte des paramètres de référence suivants :

- Une tension carrée fixée à 400 V alimente la plaque de l'AEA pour une fréquence de 300 Hz et un déphasage de 180°
- Les actionneurs utilisés correspondent aux AEA avec une géométrie optimale. Ainsi, la répartition d'électrodes est de type biphasé avec un rapport g/w appartenant à la gamme $[0,5 ; 1]$.
- Le vibro-transporteur est réglé pour fournir les matériaux avec un débit de distribution uniforme sur l'AEA.
- Le degré d'inclinaison du support sur lequel est placé l'AEA varie de 10° à 60° .
- La fixation du support de l'AEA sur le vibro-transporteur permet d'assurer une synchronisation des vibrations mécaniques entre ces deux éléments.

Pour chaque essai, les étapes du processus de tri et de mesure par le présent dispositif peuvent être décrites comme suit :

- Une quantité de 4 g du mélange de cuivre et de PVC répartie en deux parts égales est déposée de façon homogène sur le vibro-transporteur.
- La mise en marche du vibro-transporteur permet de transporter les particules jusqu'à l'AEA.
- L'alimentation de l'actionneur en tension permet d'attirer les brins de cuivre sous l'effet de la force d'électro-adhésion, alors que les particules de PVC glissent sous l'effet des vibrations au-dessus de la surface pour atteindre le compartiment de collection.
- Après chaque opération de séparation, les quantités de cuivre et de PVC collées sur l'actionneur ou récupérées dans le compartiment de collection sont déterminées à l'aide d'une balance électronique dotée d'une résolution de 0,001 g.
- L'efficacité de la séparation des matériaux est étudiée en fonction de l'effet du degré d'inclinaison de l'actionneur tout en fixant les autres paramètres.

L'évaluation de la performance du procédé de la séparation est interprétée par la détermination des deux critères suivants : récupération et pureté. Chaque expérience a été répétée trois fois afin de calculer l'écart-type et d'estimer les erreurs de mesure. A la fin de chaque essai, les masses du produit collé sur la plaque de l'actionneur ou transporté dans le compartiment de collection sont mesurées afin de déduire les deux critères : récupération et pureté.

➤ **La récupération :**

Ce critère exprime le taux (en pourcentage) du produit récupéré par rapport au produit total introduit.

$$Rec(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (IV.1)$$

Avec,

m_{ic} : masse du produit i considéré collecté dans la partie du collecteur qui lui est dédié ;

m_{it} : masse totale du même produit i introduit dans le séparateur.

➤ **La pureté :**

Ce critère exprime la pureté (en pourcentage) du produit collecté.

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (IV.2)$$

Avec,

m_{ic} : masse du produit i considéré collecté dans la partie qui lui est réservée ;

m_{tc} : masse totale (des deux produits) collectée dans une même partie.

Sous l'action de la force d'adhésion électrostatique générée sur la surface des actionneurs, les particules de cuivre sont attirées par les électrodes de l'AEA. Une particule de cuivre collée sur l'actionneur se localise généralement entre deux électrodes adjacentes de polarités opposées. Sous l'effet de l'induction électrostatique, les électrons libres du cuivre migrent vers le côté de l'électrode positive et des trous prennent naissance au-dessus de l'électrode négative

d'où l'apparition de la force d'adhésion. L'attachement de cuivre est expliqué par le fait que la valeur de la force d'adhésion dépasse la somme des autres forces.

D'après les résultats de l'étude numérique du chapitre II, une particule isolante est exposée également à cette force d'adhésion. Cependant, en raison de sa faible conductivité et le temps de passage sur la surface de l'actionneur, qui est très court à cause des vibrations et de sa masse, il est difficile pour une particule isolante d'acquérir une charge électrique surfacique importante par polarisation ou par triboélectricité qui peut la maintenir à la surface de l'actionneur. Ainsi, les forces des vibrations et de gravité dépassent la force d'adhésion électrostatique ce qui empêche l'attachement de la particule sur l'actionneur. Ces contraintes constituent un avantage très significatif dans l'application de tri électrostatique des deux matériaux.

Les expériences ont été réalisées à température ambiante ($T = 25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) et une humidité relative comprise entre 30 % et 50%.

IV.1.3. Résultats et discussion

Les résultats présentés dans cette section portent sur le comportement du mélange de cuivre et de PVC dans le démonstrateur de tri électrostatique à plan incliné. L'actionneur avec un rapport $g/w = 0,5$ est considéré comme étant le cas de référence, puisque le meilleur rendement d'adhésion de cuivre a été obtenu pour ce rapport. L'efficacité de la séparation est analysée en fonction de l'angle d'inclinaison sur une plage qui varie entre 10° et 60° .

La Figure IV.4 illustre les résultats du taux de récupération de chaque produit sur la surface de l'actionneur en fonction du degré d'inclinaison du support de l'AEA. Il est à noter que la récupération de cuivre diminue avec l'augmentation de l'inclinaison. La valeur maximale de récupération est obtenue pour la plus faible inclinaison de l'actionneur (à 10°). Par ailleurs, la récupération du PVC a été quasiment nulle sur toute la plage de l'étude, ce qui prouve sa non-adhésion sur la surface de l'AEA. Avec une inclinaison de 60° , ni les particules de cuivre ni celles de PVC ne peuvent être maintenues à la surface de l'actionneur.

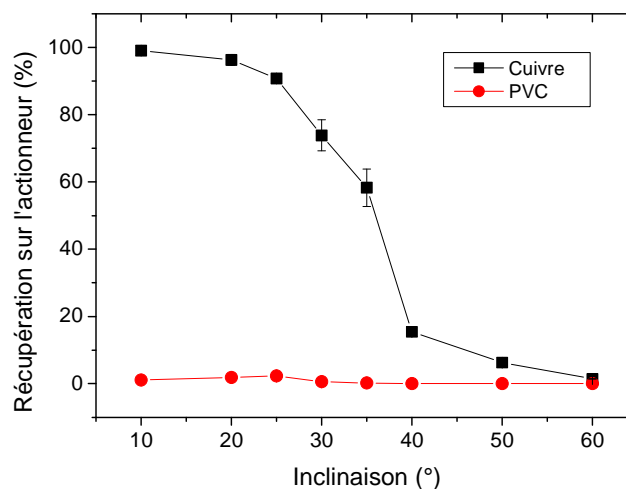


Figure IV.4. Evolution de la récupération des matériaux sur la surface de l'actionneur en fonction de l'inclinaison. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400 \text{ V}$; $f = 300 \text{ Hz}$ et $g/w = 0,5$.

La Figure IV.5 montre le taux de pureté du métal sur la surface de l'actionneur en fonction de l'angle d'inclinaison. Les résultats montrent que malgré la diminution de la récupération du cuivre en fonction de l'angle, la pureté reste à des niveaux élevés proches de 100 %. Il est important de signaler que des particules de PVC en quantité très faible peuvent être bloquées entre les particules de cuivre à la surface de l'actionneur à faible inclinaison. Ceci empêche la pureté du cuivre à atteindre 100 %.

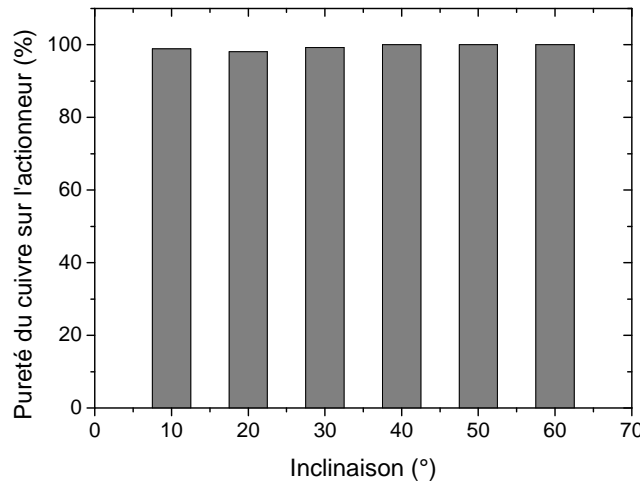


Figure IV.5. Taux de pureté du cuivre récupéré sur la surface de l'actionneur. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V; $f = 300$ Hz et $g/w = 0,5$.

L'évolution du taux de récupération des échantillons traités en fonction du niveau d'inclinaison est représentée sur la Figure IV.6. Il s'agit des particules qui s'accumulent dans le compartiment de collection placé à l'extrémité de l'actionneur.

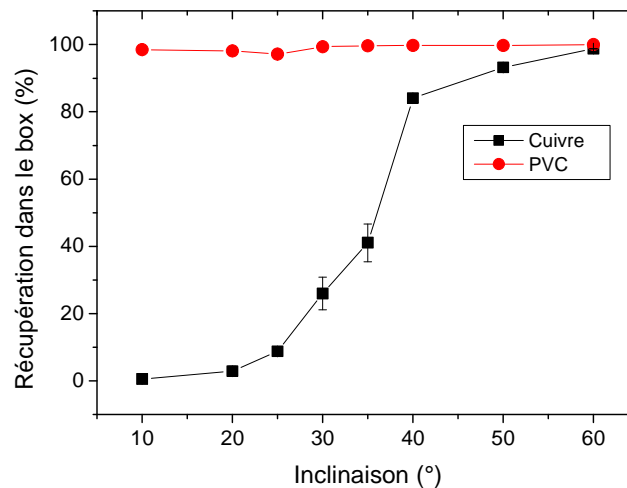


Figure IV.6. Evolution de la récupération des matériaux dans le compartiment de collection en fonction de l'inclinaison. Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V; $f = 300$ Hz et $g/w = 0,5$.

Les résultats montrent que la récupération des particules de cuivre dans le compartiment de collection (dédié aux particules de PVC) augmente avec l'augmentation du niveau d'inclinaison, ce qui confirme le détachement de ces particules de la surface de l'actionneur. En effet, sous l'effet de l'entraînement des particules par les vibrations mécaniques et la force

de gravité (qui augmente avec le niveau d'inclinaison), les particules de cuivre ne peuvent plus se maintenir sur la surface de l'actionneur par l'unique force normale d'adhésion électrostatique. Concernant les particules de PVC, la récupération est maximale dans le compartiment dédié (taux proche de 100 %), ce qui prouve la non-adhésion du PVC sur l'actionneur. Les résultats obtenus permettent de valider la possibilité de séparer un mélange composé de métal et de polymère en exploitant l'adhésion électrostatique.

Dans le compartiment de collection, l'évolution de la pureté du PVC en fonction de l'inclinaison de l'actionneur est présentée sur la Figure IV.7. Avec l'augmentation de l'inclinaison, la pureté du PVC diminue en raison de la présence de plus en plus importante des particules de cuivre qui ne peuvent pas se maintenir sur l'actionneur. La pureté du PVC est maximale à une inclinaison de 10°, mais elle n'est que de 50 % à une inclinaison de 60°. Car, la quasi-totalité du mélange ne peut se maintenir sur l'actionneur pour une forte inclinaison.

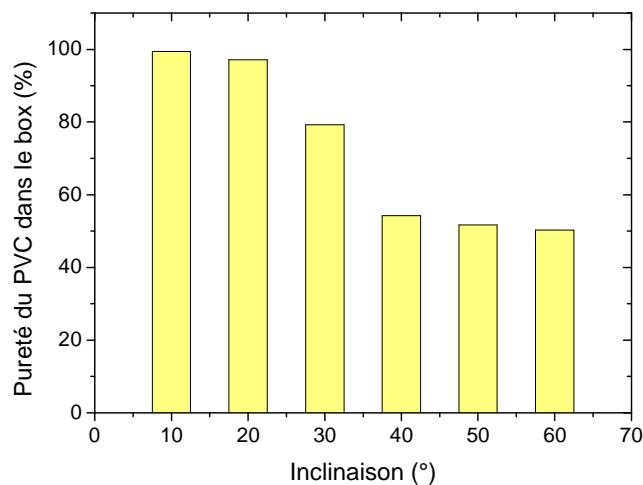


Figure IV.7. Taux de pureté des matériaux récupérés dans le compartiment de collection.

Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V; $f = 300$ Hz et $g/w = 0,5$.

Dans les prochains paragraphes, l'effet du rapport R entre l'espace inter-électrodes g et la largeur de l'électrode w sur les performances de séparation est étudié. Il s'agit de comparer l'actionneur de référence avec deux autres actionneurs (rapport géométrique $g/w = 0,25$ et $g/w = 1$).

Afin d'éviter des redondances dans les interprétations des résultats, la Figure IV.8 présente uniquement la comparaison entre les taux de récupération de cuivre sur la surface des trois actionneurs. Car, la dynamique de récupération dans le comportement de collection traduit des résultats extrapolables comme on l'a vu avec le cas de référence présenté précédemment.

Donc, les résultats montrent que la récupération diminue avec l'augmentation de l'inclinaison pour les trois actionneurs. Si on doit classer les trois actionneurs selon leurs efficacités dans la plage de variation de l'inclinaison de l'étude, l'AEA à $g/w = 0,5$ occupera la première place suivie de celui de $g/w = 1$ alors que l'AEA à $g/w = 0,25$ prendra la dernière place. Il faut noter que les trois actionneurs offrent un rendement satisfaisant pour des inclinaisons inférieures à 30°.

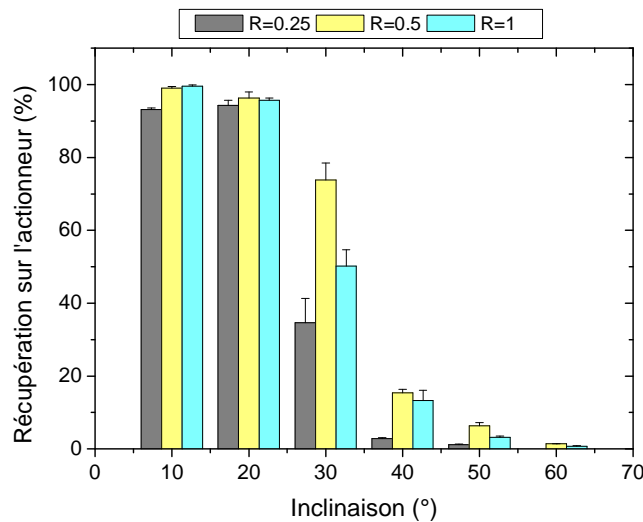


Figure IV.8. Comparaison de la récupération de cuivre en fonction de l'inclinaison sur les trois actionneurs correspondants aux rapports : $R = 0,25$; $R = 0,5$ et $R = 1$.
Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V ; $f = 300$ Hz.

La Figure IV.9 illustre l'évolution du taux de pureté du PVC dans le compartiment de collection en fonction de l'angle d'inclinaison pour les trois actionneurs. En accord avec les données de récupération, les résultats d'efficacité aboutissent au même classement des trois actionneurs. Le cas de référence reste le meilleur choix pour l'opération de tri avec le dispositif à plan incliné dans les conditions de l'expérience.

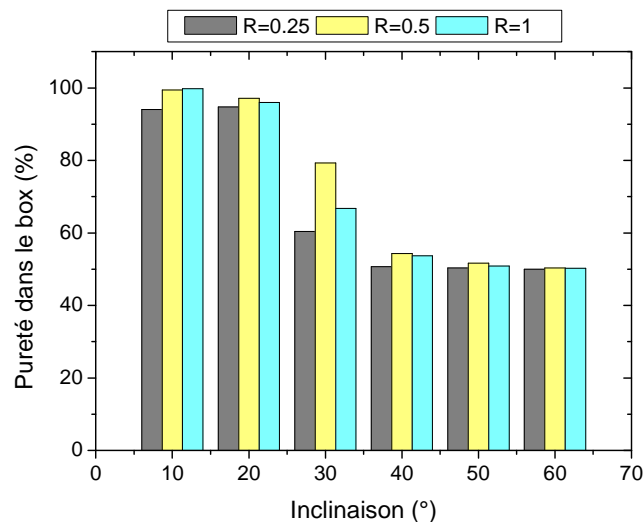


Figure IV.9. Comparaison de la pureté de PVC dans le compartiment de collection en fonction de l'inclinaison pour les trois actionneurs correspondants aux rapports : $R = 0,25$; $R = 0,5$ et $R = 1$.
Conditions : tension biphasée carrée, $V = 400$ V ; $f = 300$ Hz.

L'étude présentée dans la première partie de ce chapitre a permis de montrer l'intérêt du dispositif à plan incliné vibrant dans une application de tri électrostatique d'un mélange de matériaux granulaires métal/polymère. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les paramètres de référence pour de faibles angles d'inclinaison (entre 10° et 20°).

Afin de traiter des quantités de matériaux plus importantes à une échelle quasi-industrielle, ce prototype doit être configuré différemment pour augmenter ses capacités de

séparation. Pour réussir ce défi, il est indispensable de réaliser les modifications suivantes : 1) installer un système d'alimentation continue en matériaux à trier, qui doit être synchronisé avec le vibro-transporteur ; 2) équiper le plan incliné d'une raclette latérale et d'un rotor pour basculer l'actionneur dans une position verticale ; et enfin 3) configurer le système de vibration afin de pouvoir collecter le cuivre collé dans un autre bac placé en dessous de l'actionneur.

IV.2. Séparateur à tambour rotatif

Un des principaux objectifs de ce travail de recherche est la mise au point d'un dispositif réaliste de tri électrostatique des matériaux métal/polymère contenus dans les déchets granulaires de câbles électriques. Les résultats présentés dans la première partie de ce chapitre ont permis de démontrer la capacité du prototype de laboratoire à plan incliné à trier ces matériaux. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons une conception de séparateur originale et différente permettant le tri électrostatique continu à l'aide d'un actionneur à électro-adhésion. La conception de ce séparateur est sous la forme d'un tambour dont sa surface est couverte par un AEA.

L'idée initiale qui a permis l'élaboration du dispositif de l'AEA cylindrique a été inspirée du Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires baptisé SELMEG dont le principe de fonctionnement est inverse à la solution que nous proposons [18]. Dans le cas du SELMEG (Figure VI.10), le principe consiste à capter les particules isolantes sur la surface du tambour par chargement corona et d'attirer les particules conductrices vers le compartiment de collection dédié en modifiant leur trajectoire par le biais d'une électrode elliptique statique.

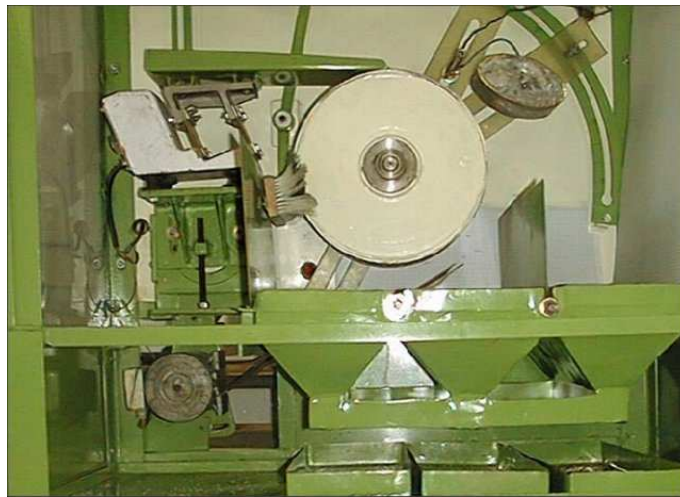


Figure IV.10. Séparateur électrostatique de laboratoire SELMEG.

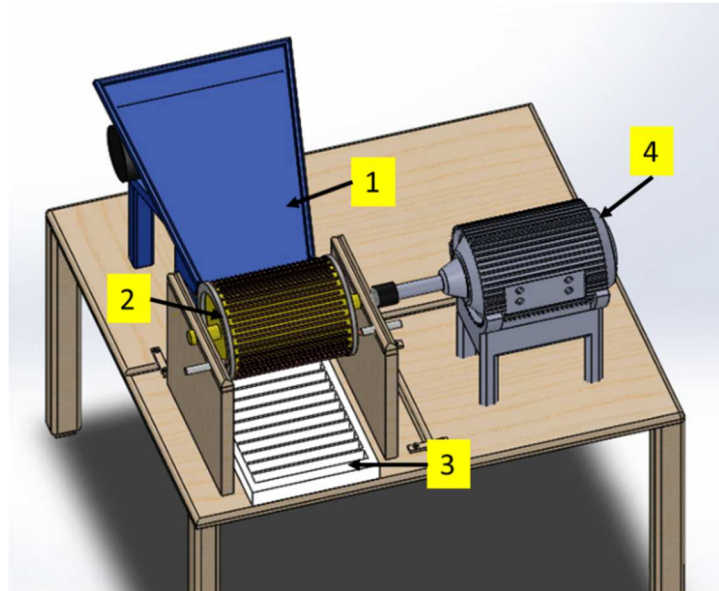
Les prochains paragraphes seront consacrés à la description générale du nouveau séparateur électrostatique des matériaux conducteur/isolant basé sur la technique d'adhésion électrostatique avant la représentation des résultats expérimentaux obtenus [2].

IV.2.1. Banc d'essai

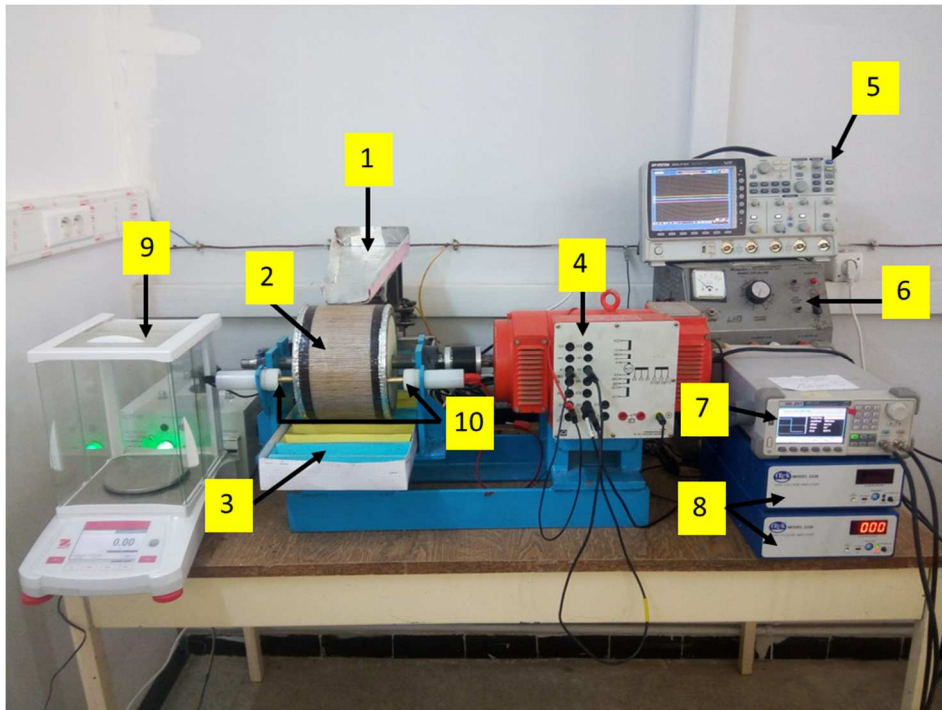
Nous avons réalisé le séparateur tambour à AEA cylindrique dans le but de capter les particules de cuivre du mélange sous l'effet la force d'électro-adhésion et de projeter les particules de PVC sous l'action des forces centrifuge et de gravité. Ce modèle de séparateur est

multifactoriel, et peut offrir plusieurs possibilités de réglage des différents éléments constitutifs afin d'étudier l'influence de chacun d'eux sur l'efficacité de tri de mélange typique des matériaux métal/polymère.

La Figure IV.11 présente le schéma descriptif et la photographie du dispositif de séparation à tambour rotatif réalisé au sein du laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbes, en collaboration avec le laboratoire LGEO de l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf.



a) Schéma descriptif



b) Photographie de l'installation

Figure IV.11. Le banc expérimental de tri à tambour rotatif.

- 1) Vibro-transporteur; 2) AEA cylindrique; 3) Compartiments de collection; 4) Moteur DC; 5) Oscilloscope; 6) Source de tension DC; 7) Générateur de fonction; 8) Amplificateurs HT; 9) Balance électronique; 10) Connecteurs HT.

Le but visé par cette installation est de confirmer, dans un premier temps, le potentiel des AEA dans un procédé de tri électrostatique continu des mélanges conducteur/isolant. Dans un deuxième temps, l'installation devrait permettre de trouver les facteurs d'échelle à adopter pour concevoir un prototype industriel.

Le banc expérimental de tri à tambour rotatif est composé de trois principaux modules, à savoir :

- Le module de commande de la rotation du tambour et du vibro-transporteur. Cette fonction est assurée par un variateur de vitesse, un moteur à courant continu et un variateur d'amplitude des vibrations du vibro-transporteur.
- Le module de contrôle de l'alimentation en haute tension. Ce module permet le contrôle des paramètres électriques des tensions appliquées aux électrodes de l'actionneur.
- Le module de séparation des mélanges granulaires et de collecte. Ce module est composé des éléments suivants : le tambour de séparation, la brosse pour détacher les granules collés et les compartiments de collection.

La performance du séparateur électrostatique à tambour rotatif dépend de plusieurs paramètres interdépendants les uns des autres, à savoir :

- La position et l'inclinaison du vibro-transporteur ;
- L'amplitude des vibrations permettant de contrôler le débit des granules sur le vibro-transporteur ;
- La vitesse de rotation du moteur à courant continu ;
- L'amplitude, la fréquence et la forme d'onde de la tension appliquée ;
- Le diamètre du tambour ;
- L'écartement inter-électrodes.

Le siège d'action sur les granules du mélange est le tambour rotatif montré à la Figure IV.12 sur lequel l'actionneur d'adhésion électrostatique est fixé.

Le cylindre est en Téflon dont le diamètre et la longueur sont de 240 mm et 150 mm, respectivement. L'actionneur est constitué par des segments de fil électrique de 1 mm de diamètre et de 100 mm de longueur fixés le long de la surface cylindrique extérieure. Le réseau d'électrodes est de configuration biphasée d'où la distribution intercalée avec un écartement g . L'ensemble des électrodes sur la surface est recouvert par une couche de vernis isolant afin d'empêcher l'apparition de décharges électriques entre deux électrodes adjacentes et d'éviter les courts-circuits lors de la capture des granules conducteurs.

Les deux côtés du cylindre sont équipés de deux couronnes en acier dont les valeurs de l'épaisseur et la largeur sont respectivement 15 mm et 10 mm (Figure IV.13). Les électrodes de chaque phase sont connectées à un de ces deux anneaux métalliques qui possèdent le même diamètre que celui du cylindre. Afin d'alimenter ce système d'électrodes en tension, les deux couronnes sont connectées à des sources HT par l'intermédiaire de deux balais (un pour chaque phase) placés sur les côtés gauche et droit du cylindre.

Le tambour est doté d'un axe métallique de 30 mm de diamètre permettant de le maintenir sur le support fixe. L'entraînement est assuré par la rotation de l'arbre du moteur couplé mécaniquement à l'axe métallique. Deux roulements sont fixés sur le support pour garantir une

rotation stable du tambour, sans contact mécanique et sans frottement des parties tournantes avec les parties fixes.

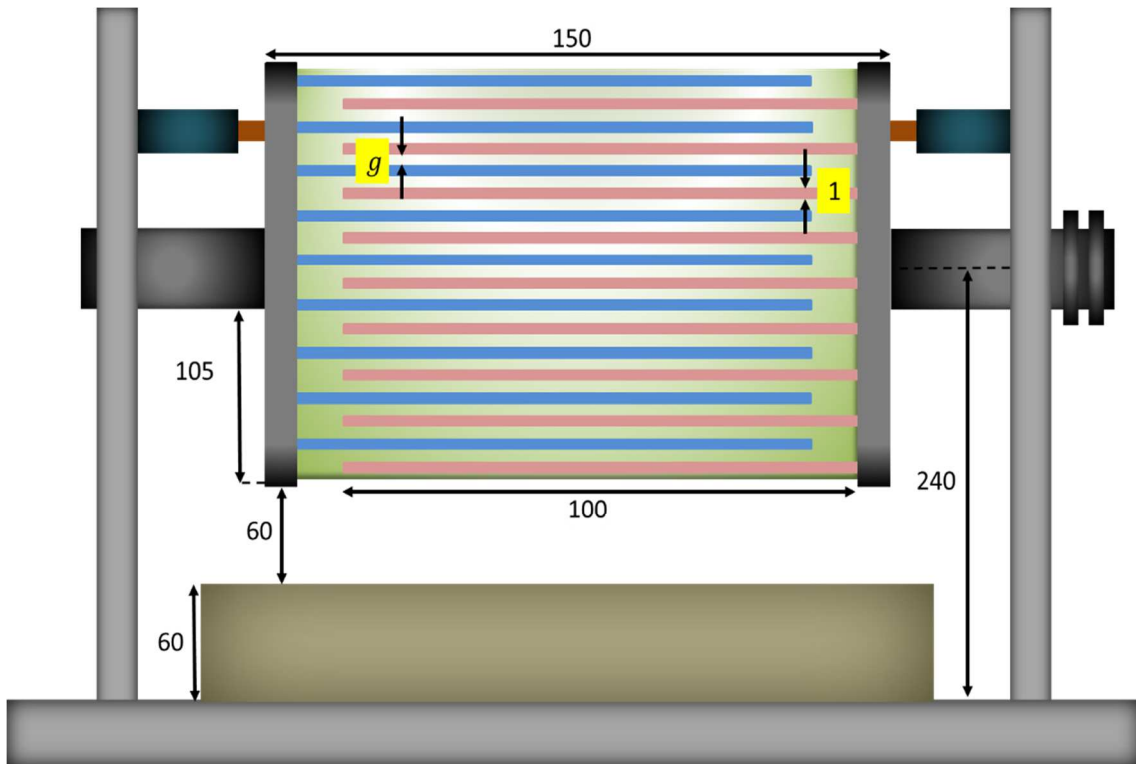


Figure IV.12. Schéma frontal du tambour avec ses dimensions en mm.

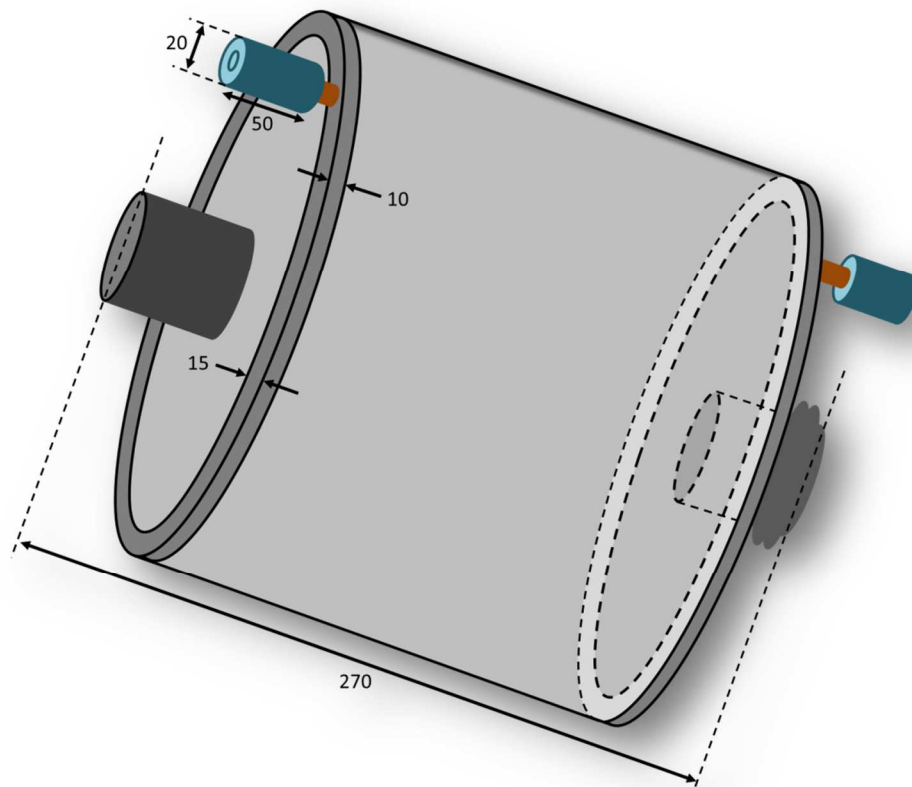


Figure IV.13. Schéma du cylindre en téflon qui montre les deux couronnes métalliques et les contacts HT (les dimensions indiquées sont en mm).

IV.2.2. Protocole expérimental

Les caractéristiques particulières du dispositif de séparation à tambour permettent le contrôle des paramètres suivants :

- La vitesse de rotation ;
- La position du vibro-transporteur et le niveau de vibration qui control la vitesse de transport des particules ;
- La position de la brosse ;
- La géométrie et la position des électrodes de l'actionneur sur la surface cylindrique ;
- La répartition et le positionnement des compartiments de collection ;
- Les paramètres électriques qui commandent le système d'adhésion électrostatique.

Afin d'assurer un meilleur rendement, il est indispensable de trouver le réglage optimal de l'installation. L'étude expérimentale présentée dans les prochains paragraphes permettra d'évaluer l'influence de chaque facteur pour identifier le point de fonctionnement optimal du procédé de tri des mélanges de matériaux conducteur/isolant.

L'étude est effectuée avec un échantillon de 20 g issu de la granulation des câbles électriques composés de 10 g de particules de cuivre rigide et de 10 g de particules de PVC, de dimensions granulométriques moyennes variant de 1 mm à 10 mm. La Figure IV.14 montre des photographies des échantillons utilisés ainsi que les tailles moyennes des particules.



Figure IV.14. Photographies des échantillons granulaires de métal et de polymère utilisés dans le cadre de l'étude du séparateur à tambour.

Le processus de séparation consiste à introduire le mélange d'échantillon dans le vibro-transporteur, après la mise en marche du moteur à courant continu et l'alimentation de l'actionneur d'adhésion-électrostatique en haute tension. Le débit des particules imposé par le vibro-transporteur est maintenu constant afin d'assurer une distribution en monocouche sur la surface de l'actionneur rotatif. Comme il est montré sur le schéma de la Figure IV.15, les particules de PVC ne se maintiennent pas à la surface du cylindre tandis que les particules de cuivre se collent à la surface. Le détachement des particules conductrices est effectué par le biais d'une brosse placée au-dessus du compartiment de collection dédié à ces particules.

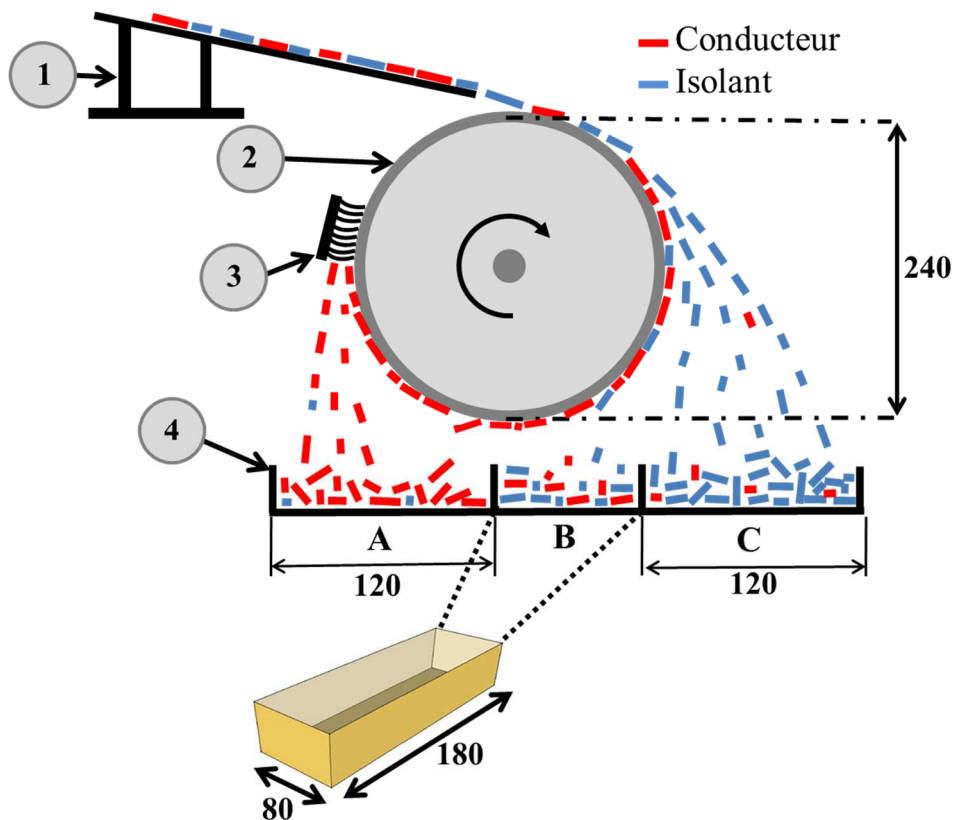


Figure IV.15. Schéma descriptif du processus de séparation.

- 1) Vibro-transporteur ; 2) AEA cylindrique ; 3) Brosse ; 4) Compartiments de collection.
Toutes les dimensions indiquées sont en mm.

Le principe opérationnel du séparateur à tambour rotatif est basé sur la génération des forces d'adhésion électrostatique pour attirer les particules de cuivre [2]. En négligeant la force de friction avec le cylindre, les principales forces appliquées sur les particules sont illustrées à la Figure IV.16.

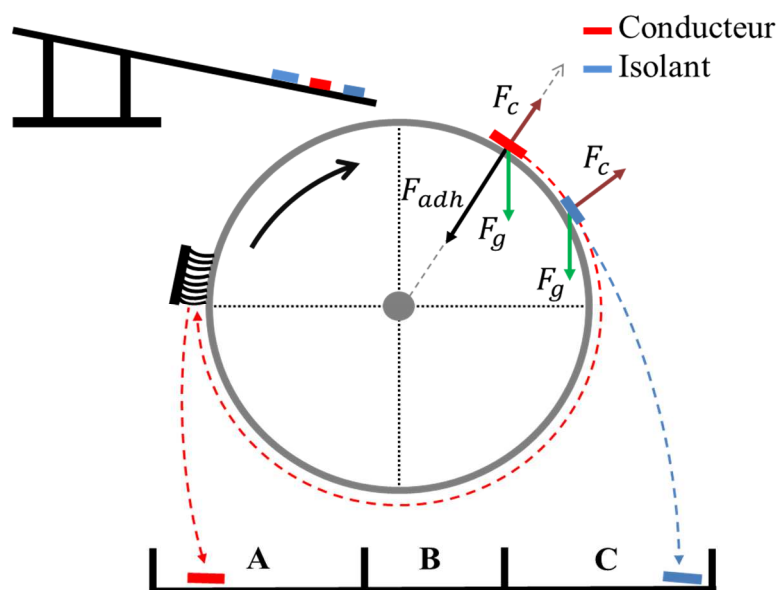


Figure IV.16. Schéma descriptif du bilan des forces exercées sur les particules à la surface du tambour.

\vec{F}_g , \vec{F}_c et \vec{F}_{adh} sont respectivement, la force de gravité, la force centrifuge et la force d'adhésion électrostatique.

Avec :

$$F_c = m \cdot w^2 \cdot R \quad (IV.5)$$

Où : m est la masse de la particule (kg), w est la vitesse angulaire (rad/s) et R le rayon du cylindre (m).

Nous verrons plus loin que parmi les forces auxquelles les particules de mélange sont soumises, la force d'électro-adhésion est celle qui permet l'attachement du cuivre sur la surface du cylindre, alors que le détachement des particules de PVC est principalement dû à la force centrifuge.

La récupération des produits triés est assurée par un collecteur à trois compartiments. Les boxes « A », « B » et « C » sont respectivement dédiés à la récupération du cuivre, du produit mixte et du PVC. Sur les courbes de résultats, nous donnerons à ces compartiments les noms suivants : « métal », « mixte » et « polymère ».

Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions atmosphériques stables de température (entre 20 °C et 24 °C) et d'humidité relative (entre 50 % et 55 %). Les mesures ont été répétées trois fois et la valeur moyenne a été retenue pour le traçage des courbes.

L'efficacité de la séparation est déduite à partir des masses des matériaux récupérés dans les compartiments de collection, et interprétée en fonction des facteurs d'entrée, par la détermination des critères : récupération et pureté. La méthode de calcul de ces deux critères a été définie dans le paragraphe IV.2.2 de ce chapitre.

Les facteurs étudiés durant les expériences de tri électrostatique par le séparateur à tambour rotatif sont : la valeur de la tension maximale appliquée entre deux phases pour un signal carré qui varie de 1 kV à 2 kV, la fréquence du signal qui varie entre 0,1 Hz à 600 Hz et la vitesse de rotation qui varie de 10 tr/min à 80 tr/min.

Dans le but d'analyser l'effet de chaque facteur sur l'efficacité de sélection des matériaux granulaires, l'approche expérimentale adoptée consiste à faire varier un seul facteur à la fois tout en fixant les deux autres, sur la base des résultats obtenus lors des manipulations préliminaires. Certains paramètres sont maintenus constants pour toutes les expériences. Il s'agit du débit du vibro-transporteur, de la position et la répartition des compartiments de collection, la position de la brosse et le déphasage entre les tensions appliquées (déphasage de 180° pour toutes les expériences).

Cette analyse est suivie par une comparaison de l'effet de l'écartement inter-électrodes sur le rendement de la séparation. Pour des raisons de concision, les résultats de cette comparaison sont représentés uniquement pour montrer l'évolution des quantités de cuivre séparées ainsi que leurs taux de récupération et pureté.

Il est important de noter que pour certaines expériences, la masse du produit collecté dans le compartiment dédié au polymère peut dépasser la masse de 10 g (c'est-à-dire la masse du PVC initialement mise dans le vibro-transporteur), en raison de la présence des particules de

cuivre qui peuvent être entraînées dans ce compartiment. C'est pour cette raison que nous allons calculer la récupération et la pureté des matériaux dans les trois compartiments du collecteur.

IV.2.3. Résultats et discussion

L'étude de l'efficacité de séparation d'un mélange de matériaux granulaires contenant du cuivre et du PVC est effectuée pour deux espacements inter-électrodes : $g = 3$ mm et $g = 6$ mm. Trois paramètres d'entrée ont été considérés lors des deux séries d'expériences associées à chaque espacement inter-électrodes.

IV.2.3.1. Espacement inter-électrodes $g = 3$ mm

a) Effet de la tension

Les résultats obtenus pour un espacement inter-électrodes $g = 3$ mm sont représentés sur la Figure IV.17 en affichant la variation de la masse récupérée du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la tension appliquée. La fréquence et la vitesse de rotation sont fixées respectivement à 350 Hz et 30 tr/min. Les résultats montrent que la masse du métal récupéré augmente considérablement avec le niveau de la tension appliquée. On peut noter aussi la décroissance de la quantité des matériaux dans la compartiment « mixte ». Ces deux résultats traduisent clairement l'amélioration de la séparation avec l'augmentation de la tension appliquée.

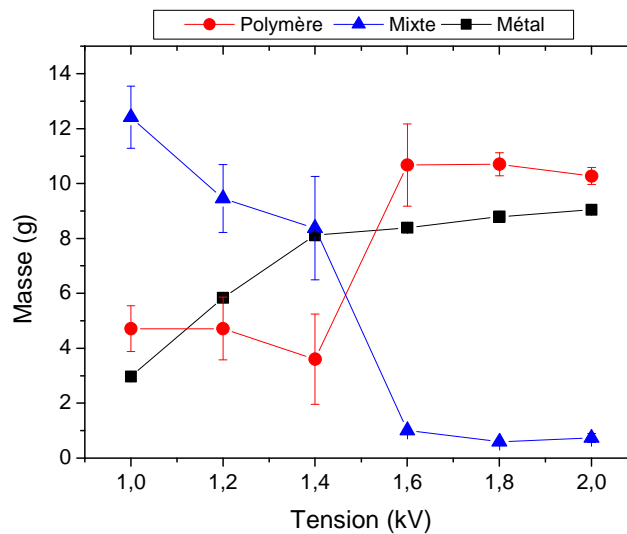


Figure IV.17. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la tension appliquée. Conditions : tension biphasée carré, $f = 350$ Hz, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.

La Figure IV.18 représente la variation du taux de récupération et de pureté du cuivre et de PVC en fonction de la tension, respectivement dans les deux compartiments polymère et métal. D'après les histogrammes, l'augmentation de la tension se traduit par l'amélioration du taux de récupération du cuivre dans les compartiments de collection dédiés, ce qui se manifeste automatiquement par la diminution de ce taux dans le compartiment des produits mixtes. On peut noter que le taux de pureté du cuivre est très élevé dans le compartiment réservé. Les résultats montrent également que les taux de récupération et de pureté du PVC sont très élevés dans le compartiment « polymère », même à des tensions modérées.

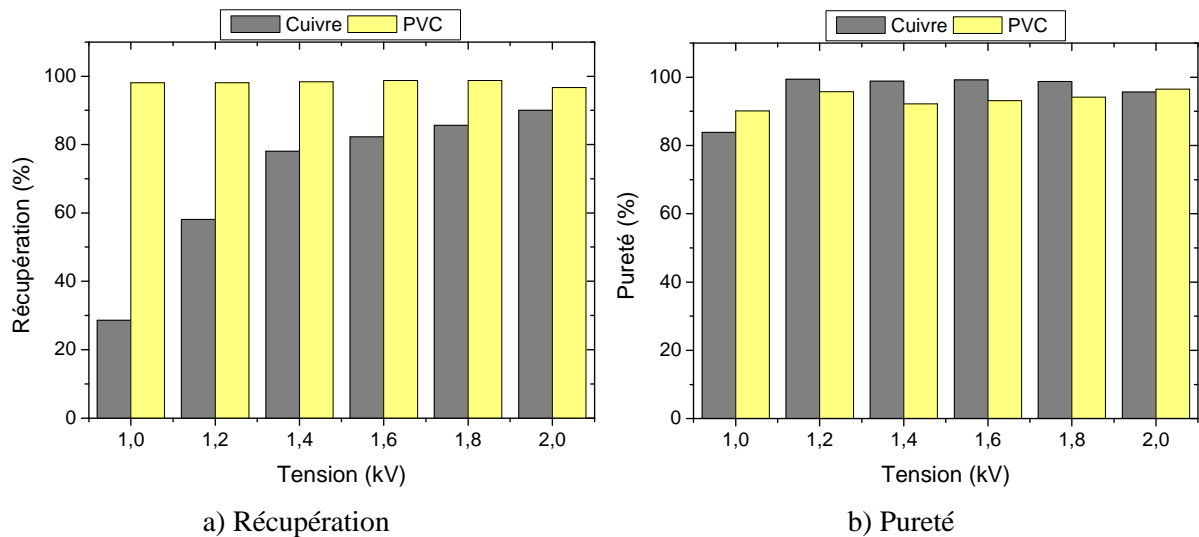


Figure IV.18. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre et de PVC, respectivement dans les compartiments de collection métal et polymère, en fonction de la tension appliquée.
Conditions : $f = 350$ Hz, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.

Comme on peut le voir sur la Figure IV.19, lorsqu'une particule conductrice se retrouve au-dessus des électrodes, elle est soumise au phénomène d'induction électrostatique qui crée une charge électrique de polarité opposée à celle de la tension appliquée. Par conséquent, une force électrostatique attractive est générée et provoque la fixation des particules de cuivre à la surface de l'actionneur. Une particule isolante acquiert quant à elle une faible charge par polarisation au-dessus de chaque électrode. En revanche, cette charge n'est pas suffisante pour la fixation des particules de PVC sur la surface de l'actionneur d'adhésion cylindrique.

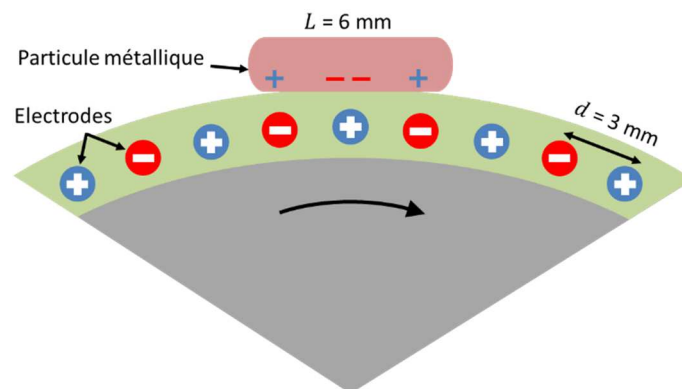


Figure IV.19. Illustration schématique de la charge électrique induite dans une particule métallique.

Les particules utilisées durant les expériences sont de taille millimétrique. Ainsi, il est difficile d'envisager le mouvement des particules par les ondes voyageuses sous l'effet des forces générées par les électrodes polyphasées. Le principal effet du système d'électrodes polyphasé reste la force d'attraction électrostatique appliquée sur les particules conductrices [213]. Cependant, dans d'autres expériences récentes [69] [70], la séparation a été rendue possible dans le cas de mélanges composés de particules micronisées. Dans ce cas, le principe de la séparation du mélange est basé sur ces deux mécanismes. Les particules conductrices sont maintenues sur l'actionneur sous l'effet de la force électro-adhésive. Alors que les particules

isolantes sont entraînées par la force de Coulomb générée par les ondes voyageuses en raison des interactions entre le champ électrique polyphasé et les particules.

b) Effet de la fréquence

La Figure IV.20 représente les résultats liés à la variation de la masse récupérée en fonction de la fréquence. Les valeurs de la tension maximale appliquée et de la vitesse de rotation sont maintenues à 2 kV et 30 tr/min, respectivement. Dans la plage de fréquence étudiée comprise entre 50 et 600 Hz, l'évolution de la masse des produits triés ne semble pas être affectée par la fréquence. Quelle que soit la valeur de la fréquence, l'efficacité de la séparation reste élevée, puisque plus de 8 g de particules conductrices sont récupérées. On peut noter que la masse du produit mixte reste assez faible (environ 1 g en moyenne).

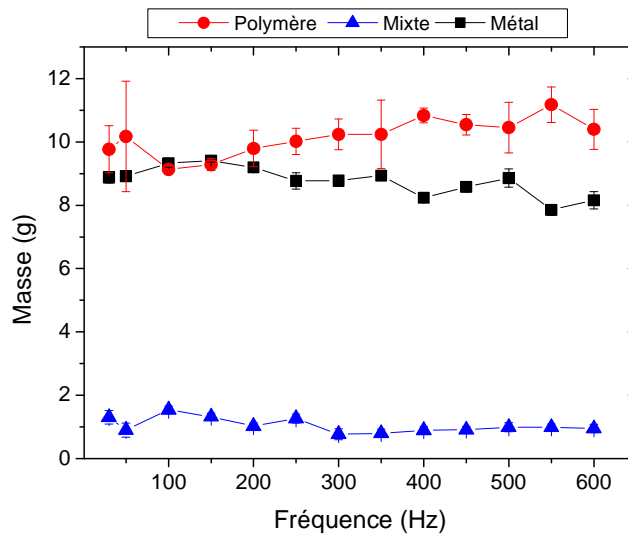


Figure IV.20. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.

La variation de la récupération et la pureté du cuivre et de PVC dans les compartiments correspondants, en fonction de la fréquence est illustrée sur la Figure IV.21.

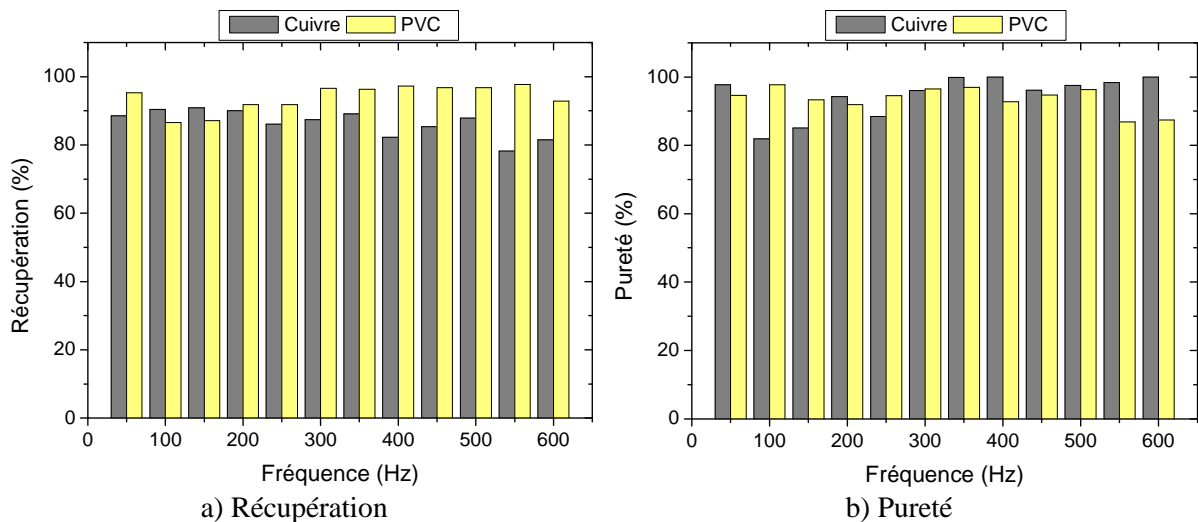


Figure IV.21. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre et du PVC dans les deux compartiments de collection réservés en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm.

On peut noter à partir des résultats que la fréquence n'affecte pas significativement les performances de séparation en termes de récupération et de pureté. Même si la pureté du cuivre dans la gamme 300-600 Hz semble donner de résultats meilleurs dans le compartiment dédié. Dans le cas du PVC, les résultats montrent également que l'efficacité de récupération et de pureté n'est pas affectée de façon significative par la variation de la fréquence. Malgré cela, une légère amélioration des performances est observée pour une fréquence de 350 Hz. À cette fréquence, 90 % du cuivre est récupéré pour une pureté de 99 %, et 96 % de PVC récupéré pour une pureté équivalente à 96 %. Ces données représentent le meilleur rendement du séparateur pour la plage de fréquence analysée.

Pour compléter l'étude sur le tri du mélange des matériaux, la gamme de fréquence analysée a été étendue aux basses fréquences dans la gamme entre 0,1 Hz et 3 Hz. La Figure IV.22 représente la variation de la masse récupérée du conducteur, du produit mixte et de l'isolant en fonction de la fréquence. On peut noter que la masse des particules collectées de cuivre augmente progressivement avec la fréquence avant de se stabiliser à partir de 1,5 Hz, ce qui a un effet significatif sur les performances de la séparation. A titre d'exemple, une masse de 7,7 g de cuivre a été collecté pour une fréquence de 1,5 Hz. Ce résultat s'explique par le fait que le temps de polarisation de la barrière diélectrique devient non-négligeable devant la période à très basse fréquence. Par ailleurs, la récupération du PVC reste quasi-constante sur la plage de fréquence étudiée.

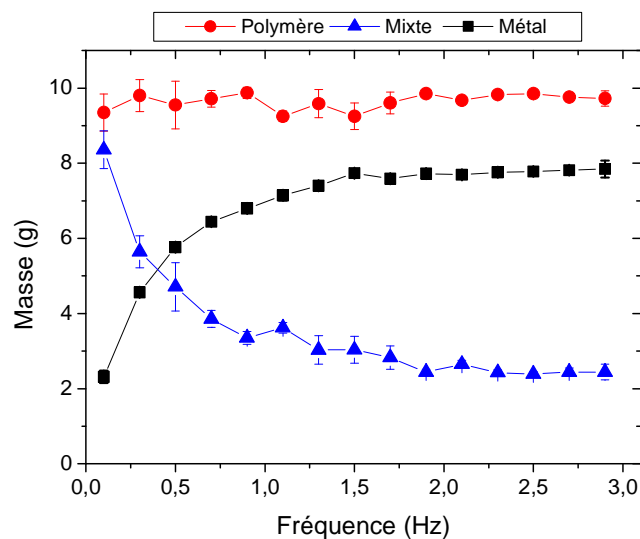


Figure IV.22. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV, $n = 30$ tr/min et $g = 3$ mm .

c) Effet de la vitesse de rotation du tambour

La Figure IV.23 illustre la variation des performances de la séparation en fonction de la vitesse de rotation de l'actionneur cylindrique. Les résultats montrent que la masse récupérée des particules de cuivre diminue de manière significative lorsque la force centrifuge augmente, avant de devenir supérieure à la force électro-adhésive. La décroissance de la masse de cuivre est accompagnée d'une augmentation de la masse du produit récupéré dans le compartiment dédié au polymère en raison de l'entraînement des particules de cuivre dans ce compartiment par

la force centrifuge. Dans les conditions de l'expérience, une vitesse de rotation de $n = 50$ tr/min semble être une limite pour un fonctionnement optimal de ce dispositif de séparation.

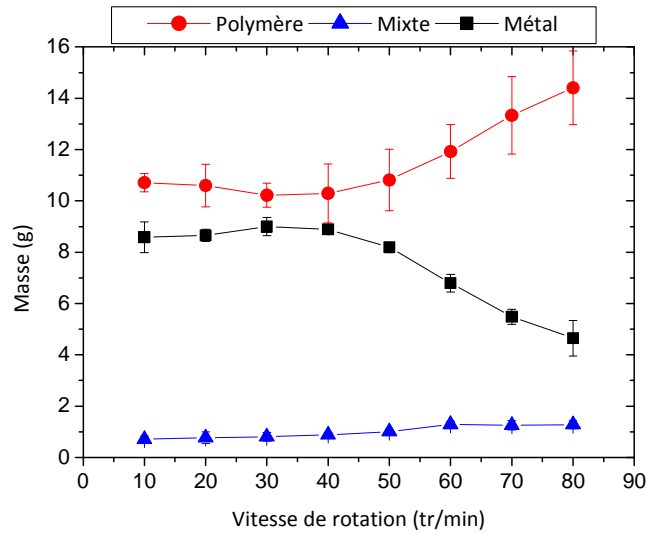


Figure IV.23. Evolution de la masse du métal, du polymère et du produit mixte en fonction de la vitesse de rotation du tambour. Conditions : $V = 2$ kV, $f = 350$ Hz et $g = 3$ mm.

La Figure IV.24 illustre la variation de la récupération et de la pureté des matériaux séparés dans les compartiments dédiés en fonction de la vitesse de rotation. On peut noter que le maximum de récupération du cuivre est obtenu pour une vitesse comprise entre 30 tr/min et 40 tr/min. La pureté du cuivre est très grande pour tous les niveaux de vitesse sauf pour le cas correspondant à la vitesse 10 tr/min. À cette faible vitesse, quelques particules de PVC se confinent entre les particules de cuivre sur la surface du tambour, ce qui permet de les collecter dans le compartiment « métal » et conduit à la réduction de la pureté.

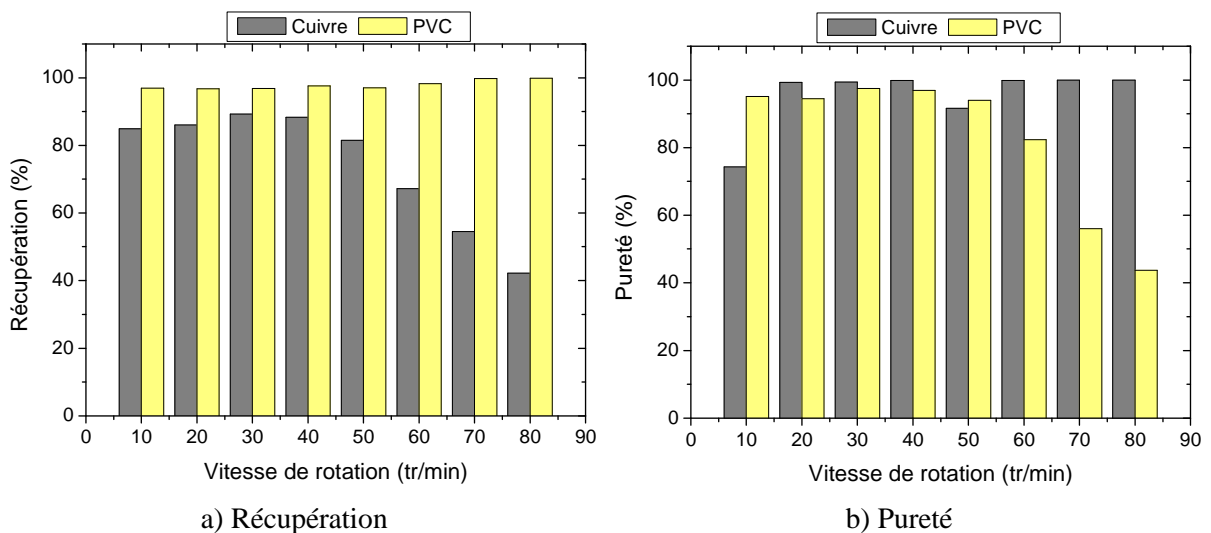


Figure IV.24. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre et de PVC dans les deux compartiments de collection, métal et polymère en fonction de la vitesse de rotation du tambour. Conditions : $V = 2$ kV ; $f = 350$ Hz et $g = 3$ mm.

Le taux de récupération du PVC est maximal pour toute la plage de vitesse étudiée. Ceci prouve encore une fois que le PVC n'est pas fortement affecté par la force d'adhésion

électrostatique en comparaison avec le cuivre. Pour les vitesses de rotation faibles, la collecte des particules de PVC est principalement due à l'action de la force de gravité. Pour les niveaux de vitesse élevés, les particules PVC sont alors projetées dans le compartiment dédié sous l'effet dominant de la force centrifuge. On peut noter que la pureté du PVC dans le compartiment « polymère » diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation, en raison de la présence des particules de cuivre entraînées par la force centrifuge.

IV.2.3.2. Espacement inter-électrodes $g = 6 \text{ mm}$

Dans une deuxième série d'expériences, l'effet de la distance inter-électrodes sur les performances de séparation a été analysé. Pour cela, un deuxième tambour a été conçu avec un écartement de 6 mm entre deux électrodes successives. Malheureusement, il n'a pas été possible d'étudier des écartements plus faibles que 3 mm pour des raisons techniques.

Dans des conditions expérimentales identiques, les expériences réalisées sur un tambour avec un espacement inter-électrodes $g = 3 \text{ mm}$ ont été répétées à l'identique pour un espacement $g = 6 \text{ mm}$.

Les résultats illustrés sur la Figure IV.25 représentent une comparaison de la quantité de cuivre récupéré dans le compartiment de collection correspondant en fonction de la tension appliquée pour les deux écartements inter-électrodes. Même si la dynamique des courbes est similaire, la masse de cuivre récupéré dans le compartiment dédié est globalement plus faible avec un écartement inter-électrodes de 6 mm. Avec l'augmentation de la tension, l'écart entre les deux configurations diminue. Lorsque la longueur d'une particule est inférieure à l'écartement entre deux électrodes adjacentes, son maintien sur la surface cylindrique par électro-adhésion requière des niveaux de tension élevés.

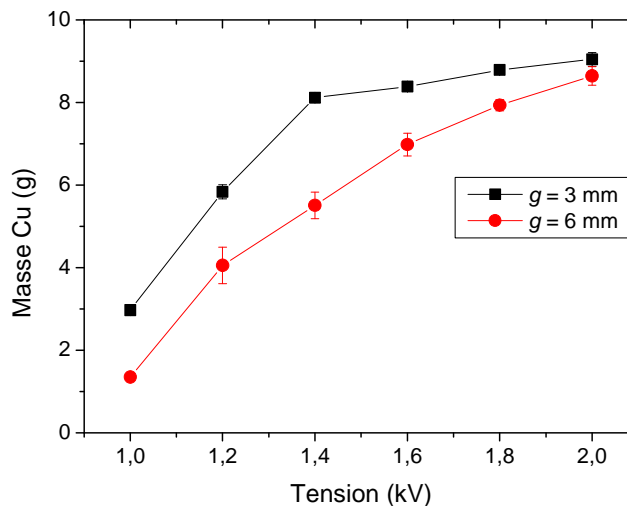


Figure IV.25. Evolution de la masse du cuivre dans le compartiment dédié en fonction de la tension appliquée pour deux espacements inter-électrodes : $g = 3 \text{ mm}$ et $g = 6 \text{ mm}$. Conditions : $f = 350 \text{ Hz}$ et $n = 30 \text{ tr/min}$.

La Figure IV.26 représente les taux de récupération et de pureté du cuivre liés aux courbes de la Figure IV.25. Les résultats montrent que l'écart entre les deux configurations en termes de taux de récupération diminue avec l'augmentation de la tension. Cependant, le taux de pureté est très élevé pour les deux configurations même à faible tension.

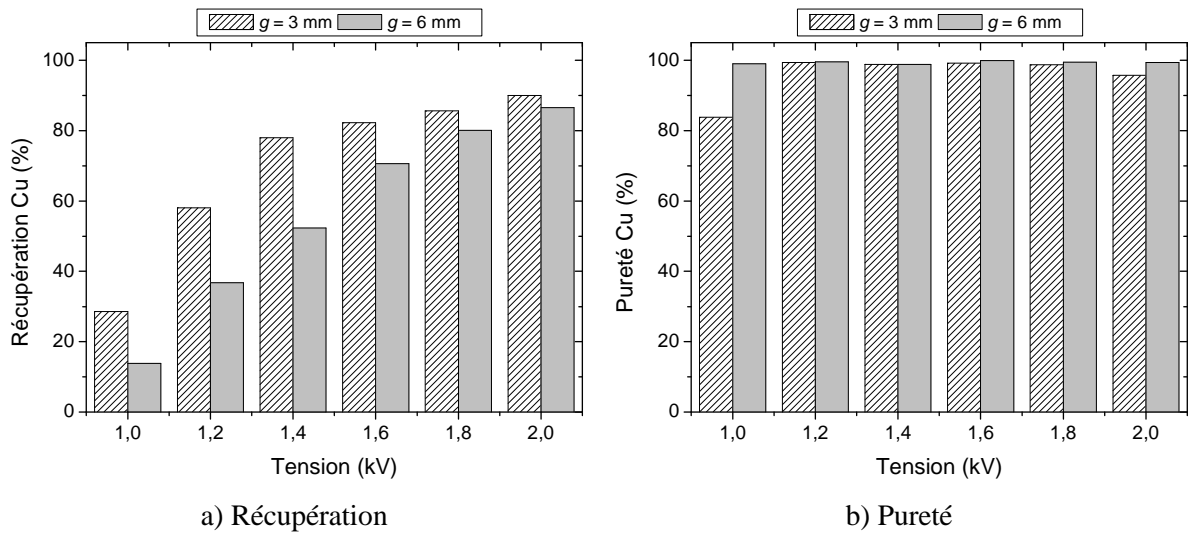


Figure IV.26. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre dans le compartiment correspondant en fonction de la tension appliquée. Conditions : $f = 350$ Hz et $n = 30$ tr/min.

L'effet de la fréquence sur la performance du séparateur pour les deux écartements inter-électrodes est illustré sur la Figure IV.27. On peut constater que la masse de cuivre dans le compartiment dédié ne varie pas considérablement sur la plage de fréquences de l'étude pour les deux configurations.

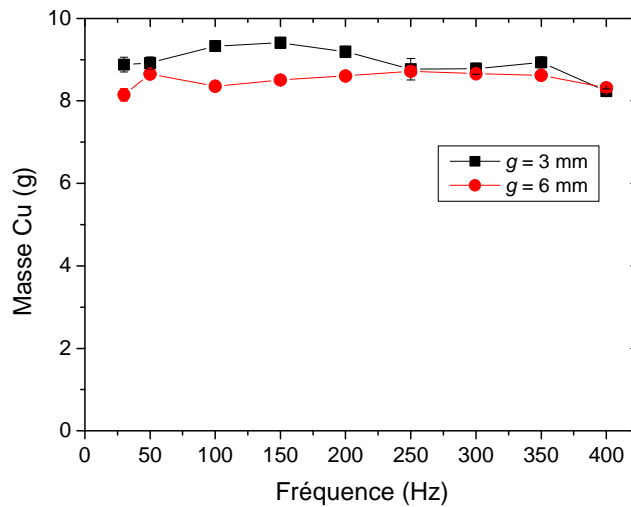


Figure IV.27. Evolution de la masse de cuivre dans le compartiment dédié en fonction de la fréquence pour deux espacements inter-électrodes : $g = 3$ mm et $g = 6$ mm. Conditions : $V = 2$ kV et $n = 30$ tr/min.

L'évolution des taux de récupération et de pureté du cuivre dans le compartiment de collection dédié est illustrée sur la Figure IV.28. La récupération varie entre 80 % et 90 % pour les deux configurations. En revanche, une meilleure pureté du cuivre est obtenue pour le cas $g = 6$ mm sur toute la plage de variation de la fréquence.

La Figure IV.29 présente les résultats de la comparaison entre les deux écartements inter-électrodes pour différentes vitesses de rotation de l'actionneur d'adhésion électrostatique cylindrique. La tension et la fréquence ont été fixées respectivement à 2 kV et 350 Hz. Sur toute la gamme de vitesse de l'étude, la masse de cuivre récupéré est légèrement inférieure pour un

espacement $g = 6$ mm. Cette différence s'explique par le fait que les particules de cuivre dont la taille est comprise entre 3 et 6 mm ne peuvent pas être maintenue sur la surface de l'actionneur avec un écartement inter-électrodes de 6 mm (Figure. VI.30).

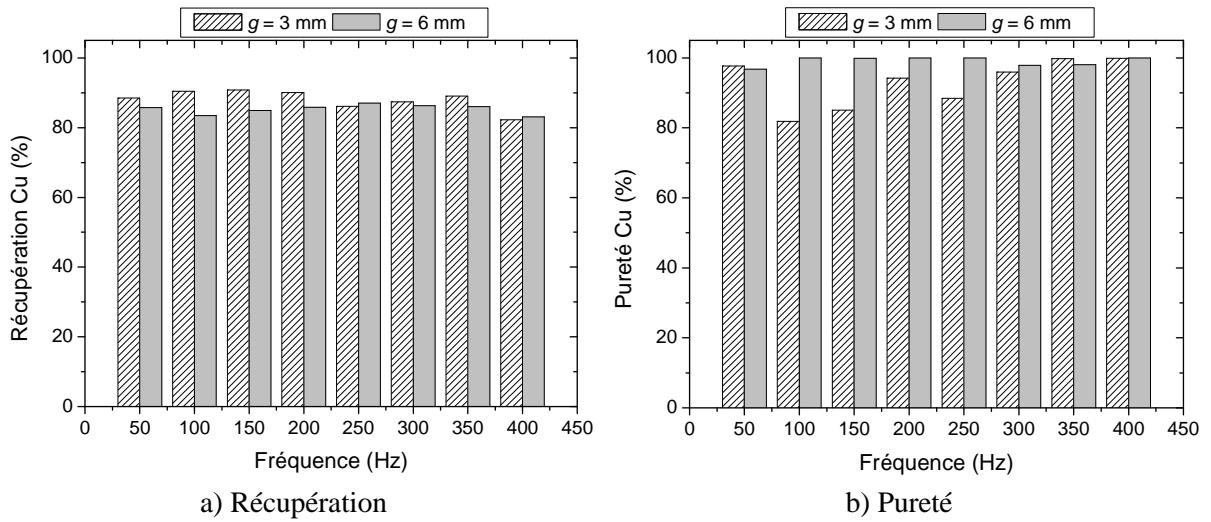


Figure IV.28. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre dans le compartiment correspondant en fonction de la fréquence. Conditions : $V = 2$ kV et $n = 30$ tr/min.

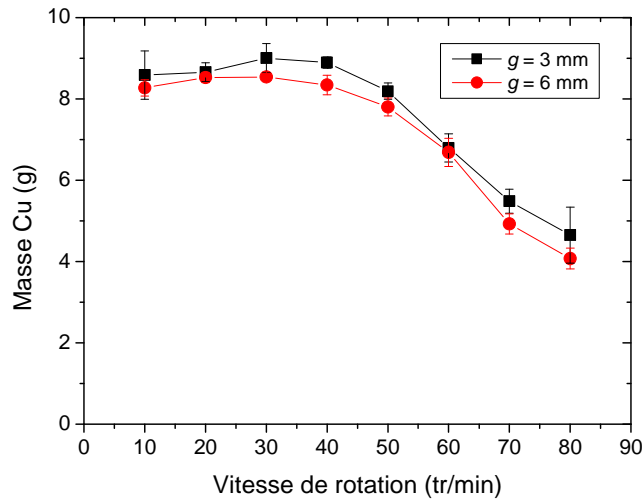


Figure IV.29. Evolution de la masse de cuivre dans le compartiment dédié en fonction de la vitesse de rotation du tambour pour deux espacements inter-électrodes : $g = 3$ mm et $g = 6$ mm. Conditions : $V = 2$ kV et $f = 350$ Hz

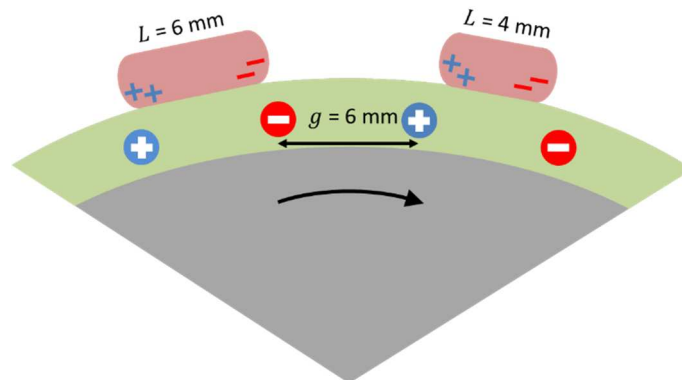


Figure IV.30. Représentation schématique de deux particules de longueurs différentes pour un écartement d'électrodes $g = 6$ mm

La variation des taux de récupération et de pureté en fonction de la vitesse de rotation est représentée sur la Figure IV.31. Pour les deux écartements, le rendement optimal est atteint pour une vitesse de rotation comprise entre 30 tr/min et 40 tr/min.

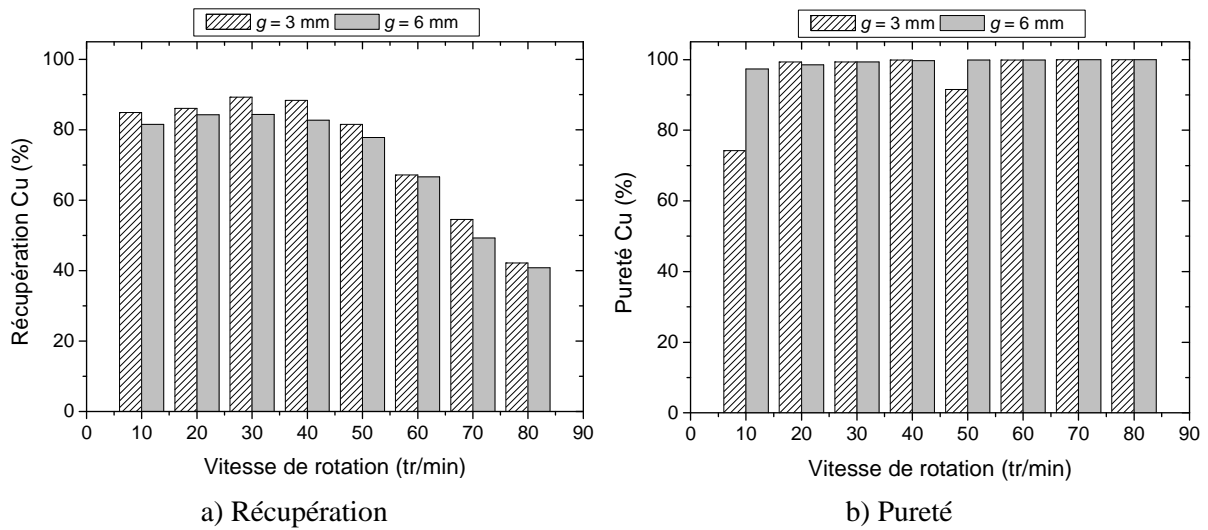


Figure IV.31. Variation du taux de récupération et de pureté du cuivre dans le compartiment correspondant en fonction de la vitesse de rotation. Conditions : $V = 2$ kV et $f = 350$ Hz

On peut noter que l'augmentation de l'écartement inter-électrodes n'a pas un effet positif sur le taux de récupération du cuivre sur la plage de variation de la vitesse étudiée.

IV.3. Etude de l'effet de la charge électrique initiale sur la séparation

Les particules qui parcourent un milieu exposé à un champ électrique peuvent être facilement chargés ou polarisés. A cause des caractéristiques physiques différentes des particules, la charge acquise diffère tout comme leurs trajectoires [122].

Les particules peuvent se charger (positivement ou négativement) selon trois principaux mécanismes physiques : l'effet couronne, l'induction électrostatique ou encore l'effet tribo-électrique [122]. Le chargement des particules est important dans les processus du tri électrostatique, même s'il est possible aussi de manipuler des particules neutres mais polarisables sous champ électrique non uniforme [26].

L'objectif de cette partie de l'étude est d'analyser l'influence de la charge électrique des particules sur la séparation électrostatique par électro-adhésion. Pour cela, nous allons mesurer la charge massique des particules de cuivre et de PVC avant et après l'opération de tri dans différentes situations expérimentales.

IV.3.1. Montage expérimental et protocole de mesure

La mesure de la charge électrique est un processus fortement sensible aux conditions environnementales, qui peuvent être la source de nombreuses erreurs lors du traitement des données. C'est pour cela que l'interprétation des données ne peut être faite que par la bonne compréhension des processus physiques mis en jeu et les hypothèses prises en compte [121].

La charge électrique des particules, dans les expériences de la séparation électrostatique, est le plus souvent mesurée à l'aide d'une cage de Faraday [121]. Ce dispositif est constitué

d'un récipient et d'un boîtier, tous les deux métalliques, séparées par un diélectrique solide (en Teflon dans cette étude). Le boîtier extérieur est relié à la terre pour réduire les perturbations électromagnétiques externes tandis que le récipient est connecté à un électromètre afin de mesurer la charge électrique des particules collectées. Pour calculer le rapport entre la charge et la masse des particules à la sortie du séparateur à plan incliné vibrant, l'électromètre et la balance électronique sont connectés à un ordinateur comme indiqué sur le schéma de la Figure VI.32.

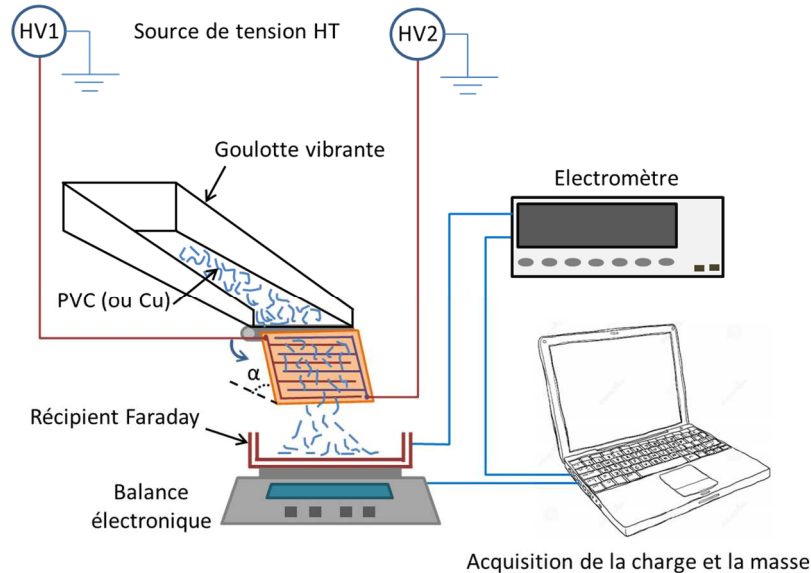


Figure IV.32. Banc expérimental dédié à la mesure de la charge massique.

Le protocole des expériences se déroule comme suit : une masse de 2 g de PVC ou de cuivre est déposée au fond de la goulotte vibrante. Une fois que le système est mis en marche, les particules traversent l'actionneur à électro-adhésion hors ou sous tension et tombent dans le récipient de la cage de Faraday. Durant les expériences, les charges des particules de PVC et de cuivre ont été mesurées avant et après leur passage sur l'actionneur, mais également avec et sans tribo-chargement préalable. Le chargement préliminaire a été réalisé avec un dispositif vibrant constitué d'un boîtier métallique en aluminium relié à la terre et fixé sur un vibreur (Tamiseuse de laboratoire de la marque Endecotts, modèle Octagon D200).

Les expériences se sont déroulées dans des conditions de température et d'humidité relative dont les valeurs sont comprises dans les intervalles [20 C°, 23 C°] et [32 %, 38 %], respectivement.

IV.3.2. Résultats et discussion

En plus du transfert mutuel de charges électrostatiques, les particules de cuivre et de PVC peuvent échanger des charges à différents lieux du montage :

- Au niveau du récipient de stockage des particules en acier inoxydable (connecté à la terre) ;
- Au contact de la goulotte vibrante en acier inoxydable (également connectée à la terre) ;
- Sur l'actionneur à électro-adhésion incliné et vibrant, mais plus précisément au contact de la barrière diélectrique en Kapton ;

- Au contact du boîtier métallique en aluminium au niveau du dispositif de pré-chargement (relié à la terre).

La polarité de la charge dépend essentiellement de l'ordre dans la série tribo-électrique des matériaux mis en jeux dans cette étude comme indiqué dans le Tableau IV.1.

Tableau VI.1. Extrait d'un exemple de série tribo-électrique.

Charge positive +	Aluminium Acier Cuivre Polyimide (Kapton) Polychlorure de vinyle (PVC)
Charge négative -	

IV.3.2.1. Charge au niveau de la goulotte et de l'actionneur

La première partie de l'étude consiste à analyser l'effet de l'agitation des particules au-dessus de la goulotte vibrante sur leur niveau de charge. Pour cela, nous avons mesuré la charge initiale des particules, puis nous avons mesuré la charge des particules après leur passage sur la goulotte métallique avec et sans la présence de l'actionneur (hors tension).

La Figure VI.33 donne la charge des particules de PVC et de cuivre avant et après le passage sur le dispositif vibrant. Dans le cas du PVC, les résultats montrent que la charge massique (négative) augmente après le passage sur la goulotte (Figure VI.33.a). Mais, on peut constater que le passage des particules de PVC sur l'actionneur (ou plus précisément sur la couche de Kapton) réduit la charge acquise par contact/fortement sur la goulotte vibrante.

Les particules de cuivre en contact avec la goulotte vibrante n'acquièrent pas une charge significative (Figure VI.33.b). En revanche, le contact/frottement sur la barrière diélectrique de l'actionneur permet de donner une charge positive très significative aux particules de cuivre.

On peut noter que les signes de charges sont en bon accord avec la série tribo-électrique du Tableau IV.1.

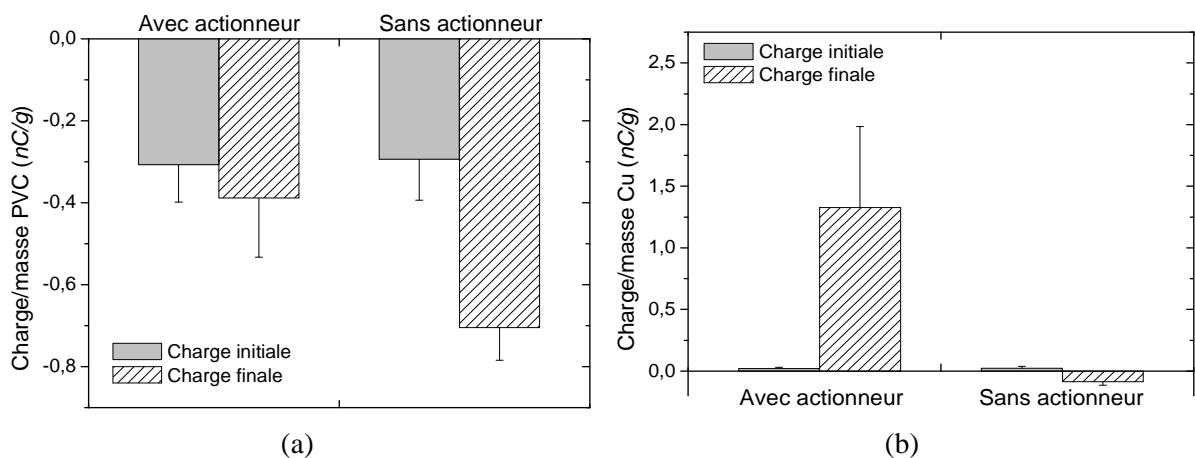


Figure IV.33. Charge massique acquise par les particules dans le vibro-transporteur et sur l'actionneur incliné de 10° en absence de tension électrique : (a) PVC et (b) cuivre.

IV.3.2.2. Effet du pré-chargement sur la charge finale

Les résultats de la mesure de la charge des particules avec ou sans préchargement sont illustrés sur la Figure VI.34. Sans tribo-chargement préalable, les particules de PVC n'acquièrent pas une charge massique élevée après leur passage sur l'actionneur (Figure. VI.34.a) contrairement aux particules de cuivre dont la charge massique acquise est importante (Figure .VI.34.b). Avec un pré-chargement de 3 minutes dans le dispositif de chargement, la charge massique acquise par les particules de PVC augmente, mais leur passage sur l'actionneur incliné et vibrant permet de la réduire. La charge des particules de cuivre acquise par tribo-chargement est très faible, mais la charge finale, acquise après le passage sur l'actionneur, est toujours importante.

Globalement, après le contact entre les particules et l'actionneur (ou plus précisément la barrière diélectrique en Kapton), la charge des particules de PVC est négative et la charge de cuivre est positive, ce qui est en bon accord avec les séries tribo-électriques disponibles dans la littérature.

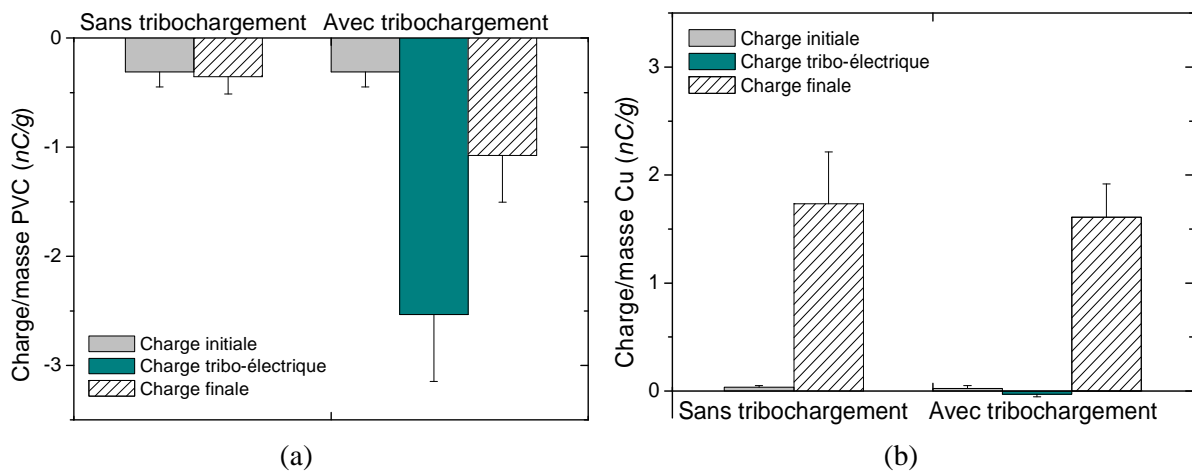


Figure IV.34. Charge massique mesurée avant et après le passage des particules sur l'actionneur à électro-adhésion incliné de 10°; avec et sans tribo-chargement dans le cas du (a) PVC et du (b) cuivre.

IV.3.2.3. Effet de la tension de l'actionneur sur la charge finale

Afin d'étudier l'interaction entre les particules et l'actionneur sous tension, nous avons mesuré la charge acquise par les particules de PVC et de cuivre qui glissent sur la surface de cet actionneur, en fonction de son angle d'inclinaison, avec et sans application de la haute tension.

Les résultats obtenus pour le cas du PVC sont illustrés sur la Figure VI.35. En l'absence de la haute tension, la charge massique acquise par les particules de PVC augmente systématiquement après le passage au-dessus de l'actionneur. En revanche, l'augmentation de la charge est plus importante avec l'angle d'inclinaison de 30° (Figure VI.35).

Dans le cas où l'actionneur est sous haute tension (Figure VI.35.b), la charge massique des particules n'augmente que pour un angle supérieur ou égale à 30°. L'actionneur peut avoir un effet négligeable pour un angle de 20°, voire un effet neutralisant pour un angle de 10° (les particules de PVC perdent 77 % de leur charge massique initiale dans ce cas).

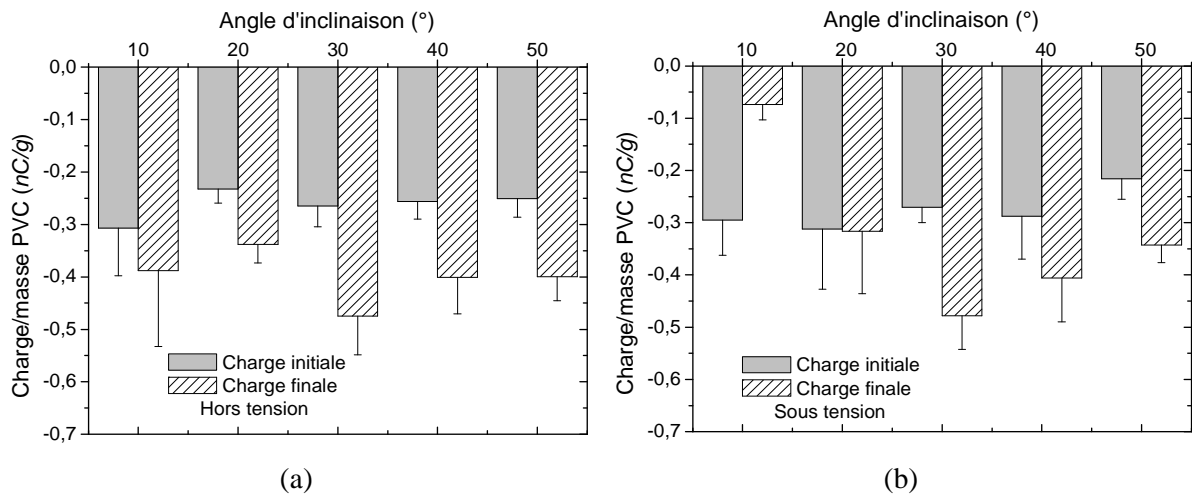


Figure IV.35. Effet de l'angle d'inclinaison sur la charge massique des particules de PVC : (a) hors tension et (b) sous tension AC carrée ($V=400\text{ V}$, $f=300\text{ Hz}$).

Les résultats obtenus pour les particules de cuivre sont représentés sur la Figure VI.36. On peut remarquer que la charge massique du cuivre augmente systématiquement après le passage sur l'actionneur que ce soit avec ou sans haute tension. En augmentant l'angle d'inclinaison, la charge massique finale des particules de cuivre augmente pour un angle entre 10° et 20° , avant de décroître pour les angles supérieurs. Encore une fois, l'état électrique de l'actionneur n'a que très peu d'effet sur cette dynamique.

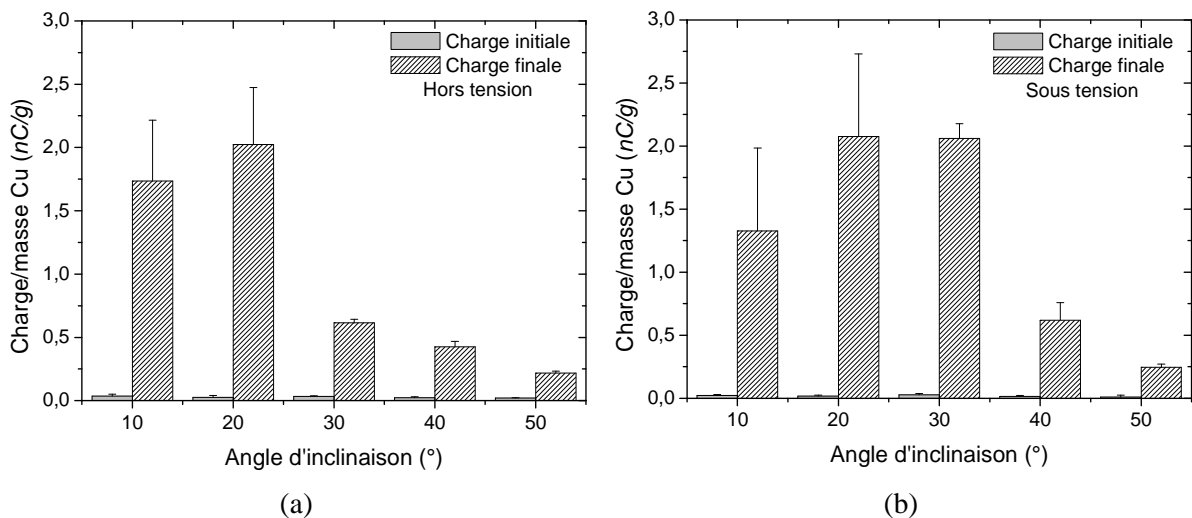


Figure IV.36. Effet de l'angle d'inclinaison sur la charge massique des particules de cuivre : (a) hors tension et (b) sous tension AC carrée ($V=400\text{ V}$, $f=300\text{ Hz}$).

L'influence de l'angle d'impact d'une particule sur une cible a fait l'objet de nombreuses études [214] [215] [216]. L'augmentation de la charge avec l'angle d'impact (pour une vitesse constante) se traduit par une augmentation de la composante tangentielle de la vitesse, ce qui augmente la surface de contact [216]. En revanche, la baisse de la charge pour des angles d'impact élevés a été expliquée par le changement du mouvement mécanique de la particule en surface [215]. Dans notre cas, la baisse de la charge pour un angle supérieur à 30° pourrait être expliquée par la réduction du nombre d'impacts des particules sur l'actionneur.

Nous avons constaté dans le chapitre III que la forme d'ondes influe sur le taux d'électro-adhésion des matériaux. Il était alors indispensable d'analyser cet effet sur la charge des particules de PVC et de cuivre. La Figure VI.37 montre l'influence du type de la tension appliquée sur la charge électrique. Les résultats montrent que la charge acquise par les particules de PVC est plus grande dans le cas d'une tension continue par rapport au cas d'une tension alternative de forme d'onde carrée (Figure VI.37.a). Le même comportement est observé pour le cas des particules de cuivre (Figure VI.37.b).

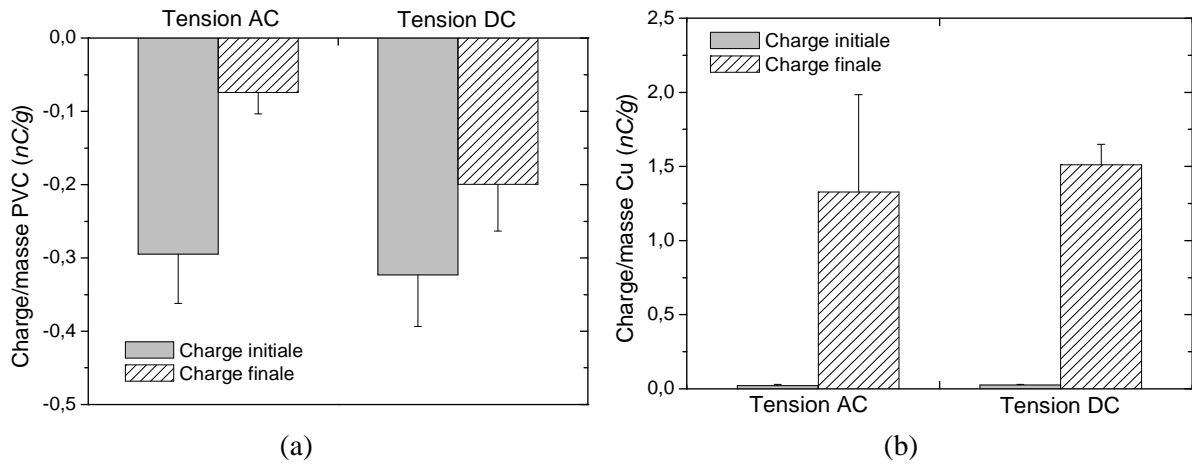


Figure IV.37. Effet du type de la tension (AC carré ou DC, avec $V = 400\text{ V}$ et $f = 300\text{ Hz}$) sur la charge acquise par les particules lors du passage sur l'actionneur incliné à 10° : (a) PVC et (b) cuivre.

IV.3.2.4. Effet de la charge des particules sur la séparation

Dans le but d'évaluer l'effet de la charge électrostatique des particules sur l'efficacité de séparation, en utilisant une tension alternative carrée ($V = 400\text{ V}$, $f = 300\text{ Hz}$), un mélange granulaire composé de 2 g de particules de cuivre et de 2 g de particules de PVC tribo-chargées a été utilisé. Les résultats de récupération et de pureté, présentés sur la Figure VI.38, montrent que la charge initiale des particules de PVC n'affecte pas beaucoup les performances de séparation par électro-adhésion.

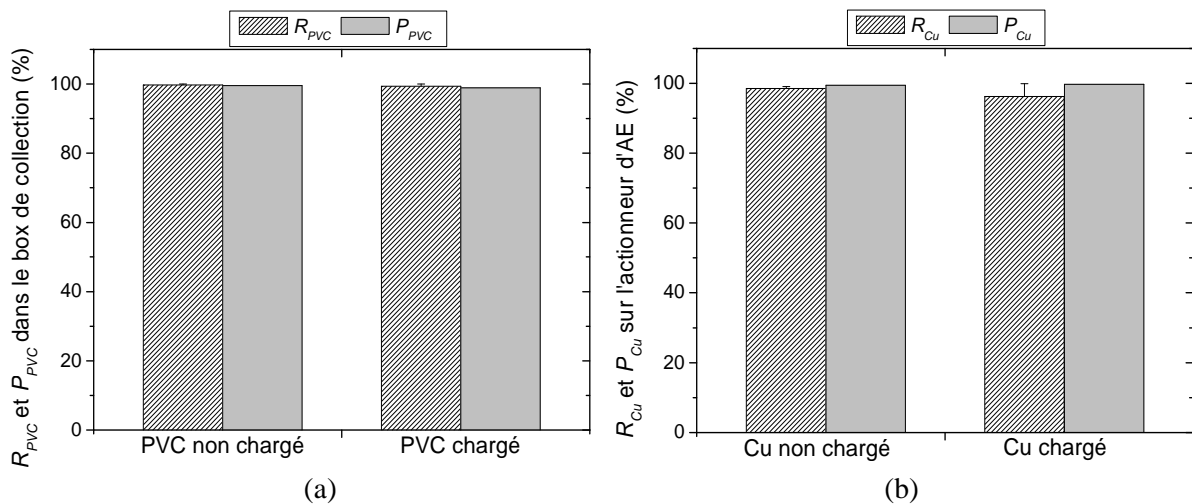


Figure IV.38. Effet de la charge électrique initiale sur la pureté et le taux de récupération des particules de : (a) PVC dans le box de collection et (b) cuivre sur la surface de l'actionneur à électro-adhésion (angle d'inclinaison = 10°).

IV.4. Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons étudié l'efficacité de séparation d'un mélange de particules cuivre/PVC à l'aide de deux installations expérimentales qui intègrent des actionneurs d'adhésion électrostatique.

Dans la première installation, un séparateur à plan incliné vibrant a été utilisé pour réaliser des expériences sur des particules issues du broyage de câbles électriques. Les résultats ont permis de montrer l'intérêt du dispositif dans une application de tri électrostatique d'un mélange de matériaux granulaires métal/polymère. Plus précisément, l'étude paramétrique a permis de montrer que l'angle d'inclinaison optimale de l'actionneur est compris entre 10° et 20°.

Afin de traiter une quantité de particules plus importante, une deuxième installation a été conçue et étudiée. Celle-ci utilise un principe de séparation original permettant le tri électrostatique continu des matériaux contenus dans les déchets des câbles électriques. La conception de ce séparateur est sous la forme d'un tambour dont sa surface est couverte par un actionneur électro-adhésif. Les résultats obtenus ont confirmé les performances élevées de la séparation, en termes de récupération et de pureté. Le rendement de la séparation dépend principalement de la distance inter-électrodes, la fréquence du signal, la tension appliquée et la vitesse de rotation de l'actionneur. Le chargement triboélectrique des particules sur l'actionneur n'a en revanche que très peu d'effet sur le tri électrostatique.

Des résultats bien meilleurs peuvent être obtenus si des niveaux plus élevés de la tension appliquée sont utilisés. Cependant, le dispositif de tri électrostatique doit être amélioré avec une isolation adaptée pour éviter l'apparition des décharges électriques entre les électrodes adjacentes.

Le chapitre suivant est réservé à l'étude des décharges électriques induites à haute tension sur la surface de l'actionneur d'adhésion-électrostatique en présence de particules de cuivre. Un des objectifs de l'étude est l'évaluation des conséquences de la présence de ces décharges sur le processus d'électro-adhésion.

CHAPITRE V

Décharges électriques induites sur un convoyeur

Chapitre V

Décharges électriques induites sur un convoyeur

Au cours des expériences d'électro-adhésion sur des particules de métal, synthétisées dans le chapitre III, des décharges électriques ont été observées à proximités des aspérités de ces particules, en particulier pour des tensions et des fréquences élevées. La présence de ces décharges se manifeste entre autres par : la génération d'ozone, la production d'un bruit acoustique et l'apparition d'une lueur bleue visible à faible luminosité. L'objectif de ce chapitre est de comprendre l'origine physique de ces décharges et d'identifier leurs caractéristiques ainsi que les conséquences sur le processus d'électro-adhésion.

Le chapitre est divisé en trois parties. Dans la première partie, le montage expérimental est présenté avec les différents outils de caractérisation des décharges. La deuxième partie est consacrée à l'étude des caractéristiques électriques des décharges (courant, charge et puissance). Dans la dernière partie de ce chapitre, les effets de l'apparition des décharges sur l'électro-adhésion de particules de cuivre seront étudiés et discutés en détail.

V.1. Protocole expérimental

V.1.1. Dispositif expérimental et outils de caractérisation

Le schéma général de l'installation de caractérisation électrique des décharges induites est illustré sur la Figure V.1. Le dispositif inclut essentiellement deux modules, à savoir : le module « actionneur », et le module d'alimentation et de mesures électriques. Chacun de ces deux modules est détaillé dans les prochains paragraphes.

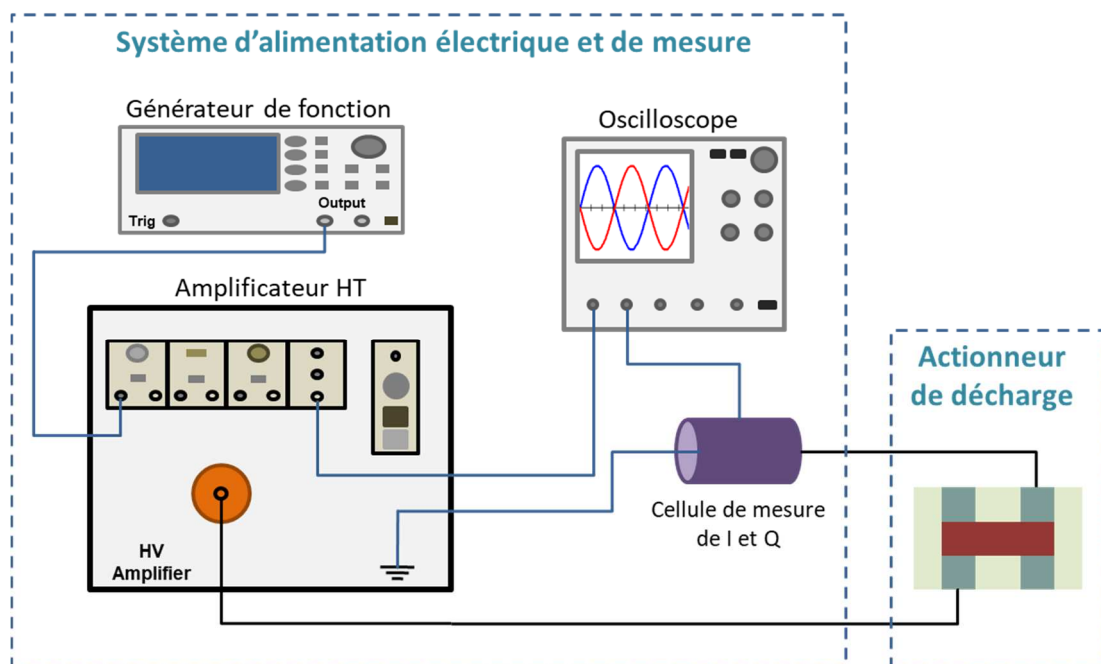


Figure V.1. Représentation schématique de l'installation expérimentale utilisée pour la caractérisation électrique des décharges induites.

V.1.1.1. Module « actionneur »

L'actionneur est constitué de deux électrodes posées sur un support diélectrique rigide et recouvertes par une couche diélectrique en polyimide (Kapton). Une des deux électrodes est connectée à une source haute tension alors que la deuxième est reliée à la terre. Les électrodes ont pour rôle de générer un champ électrique intense permettant d'induire une décharge électrique à proximité d'une autre électrode à potentiel électrique flottant (PEF) placée au-dessus de la barrière diélectrique. Les trois configurations d'actionneur utilisées dans le cadre de ce chapitre sont représentées schématiquement sur la Figure V.2.

La première configuration d'actionneur (type 1, dit plan-plan) est constituée de deux électrodes de dimensions $80 \times 12 \text{ mm}^2$ avec un écartement de 12 mm. Dans ce cas, l'électrode à potentiel flottant en cuivre de forme rectangulaire a une longueur de 36 mm et une largeur de 25 mm.

La deuxième configuration (type 2, dit fil-plan) utilise les mêmes électrodes actives que le précédent actionneur. En revanche, l'électrode à potentiel flottant est un fil en cuivre de 36 mm de longueur et de $100 \mu\text{m}$ de diamètre.

Le dernier actionneur (de type 3, dit particules-plan) reproduit la même configuration utilisée pour la séparation de mélange cuivre/PVC (voir dimensions indiquées dans le tableau V.1).

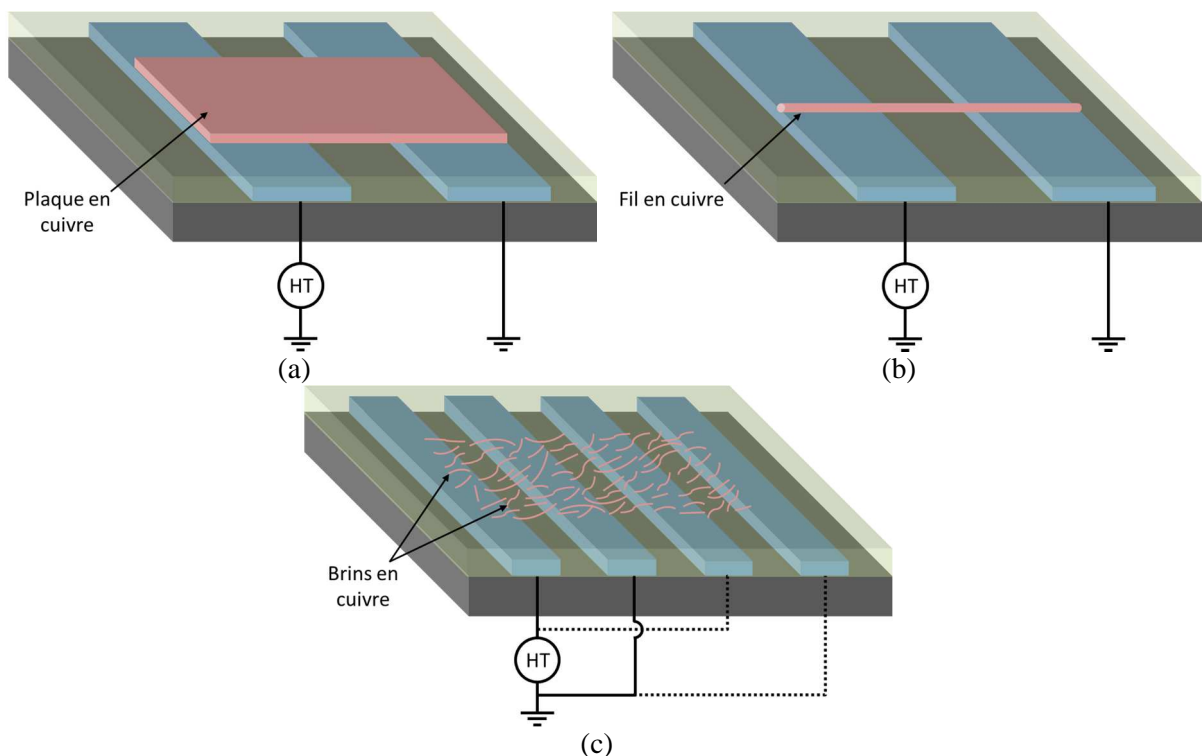


Figure V.2. Représentation schématique des trois configurations d'actionneur.

Tableau V.1. Dimensions des six actionneurs utilisés.

g (mm)	0,5	1	1	1	2	4
w (mm)	4	4	2	1	1	1
$R = g/w$	0,125	0,25	0,5	1	2	4

V.1.1.2. Module d'alimentation et de mesure électrique

Ce module inclut les unités suivantes : l'alimentation électrique, les instruments de visualisation et d'acquisition des signaux et des sondes de mesure de la charge électrique transférée ou du courant de décharge. Une description détaillée de ces différents éléments est donnée dans la section ci-après.

V.1.2. Système d'alimentation électrique et de mesure

V.1.2.1. Alimentation électrique

Durant cette étude, une alimentation haute tension alternative a été utilisée. Elle est composée d'un amplificateur haute tension de la marque TREK® (modèle 20/20 C, ± 20 kV, ± 20 mA, 20 kHz) et d'un générateur de forme d'onde arbitraire TTI (modèle TGA1244, 40Mhz), permettant de générer les signaux électriques à amplifier. L'amplificateur est protégé par une résistance en céramique de 500 k Ω placée en série entre le générateur et l'actionneur.

De façon générale, l'amplitude de la haute tension varie de 0,25 à 4 kV et la fréquence varie dans une plage comprise entre 0,1 et 2 kHz. Pour simplifier la terminologie utilisée pour le reste du chapitre, l'amplitude de la tension sinusoïdale ou carrée sera tout simplement appelée « Tension ».

V.1.2.2. Eléments de visualisation et d'acquisition

Les taches de visualisation des signaux et leurs enregistrements ont été réalisées à l'aide d'un oscilloscope numérique de la marque LECROY (modèle 424, avec une bande passante de 200 MHz). Afin d'effectuer une lecture sur l'oscilloscope, les signaux sortant de l'amplificateur passent par une sonde de tension (interne à l'amplificateur) avec un facteur de réduction du signal de 1/2000.

V.1.2.3. Boitier de mesures électriques

Le boitier de mesures électriques est une cage de Faraday incluant une résistance shunt de 100 Ω pour visualiser le courant, ou un condensateur de 47 nF pour mesurer la charge transférée. Afin de protéger l'oscilloscope en cas de surtension accidentelle, un éclateur à gaz de type A80 – C90X est placé en parallèle à chacun des deux composants. Le condensateur doit être choisi de telle sorte que sa valeur ne soit ni trop faible (la mesure risque d'être intrusive car la capacité s'apparenterait à la capacité parasite des câbles et autres composants), ni trop grande (risque de filtrage des signaux mesurés) [37] [45].

V.1.3. Méthodes de mesure des grandeurs électriques

V.1.3.1. Acquisition des formes d'ondes de la tension et du courant

Dans le but de mesurer la charge (ou le courant), nous avons utilisé une sonde avec un facteur d'atténuation de 1/10. Elle permet de diviser la tension aux bornes du condensateur (ou la résistance) par 10 à l'entrée de l'oscilloscope. Ce dernier multiplie à son tour cette mesure par 10 pour visualiser les valeurs réelles sur l'écran. Le dispositif d'acquisition des formes d'ondes est représenté sur la Figure V.3. C'est également à partir de ce dispositif qu'on relève la puissance consommée par la décharge [37].

Les formes d'ondes de la tension, du courant et de la charge sont sauvegardées généralement sur 2 périodes avec l'acquisition d'un total de 250000 points. Les formes d'onde de la tension et de la charge (ou courant) sont capturées sur deux voies différentes de l'oscilloscope.

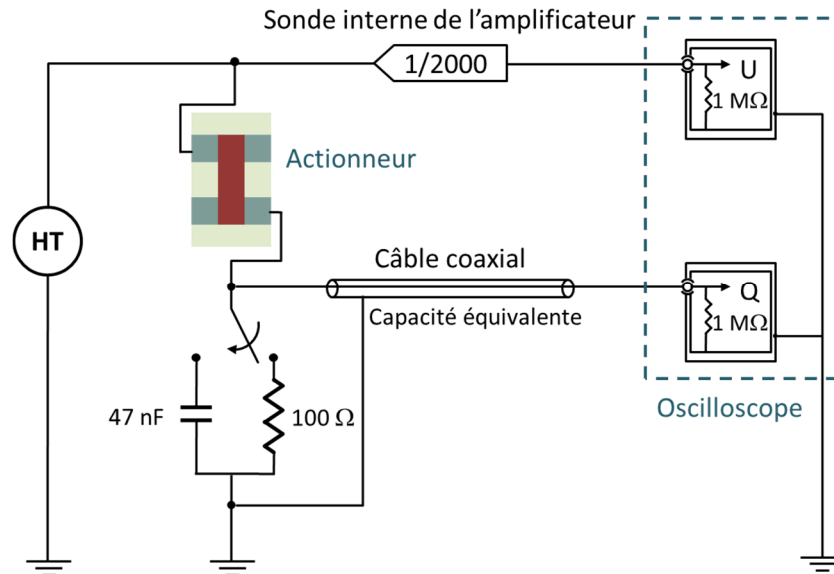


Figure V.3. Montage électrique de mesure de la charge (ou du courant) et de la tension.

V.1.3.2. Mesure de la puissance électrique consommée

Il existe deux manières de mesure de la puissance électrique consommée par la décharge. La première est la méthode de Lissajous qui permet de déterminer la puissance consommée à partir de la caractéristique charge-tension du circuit [217] tandis que la deuxième est la méthode du produit des valeurs instantanées de la tension appliquée et du courant. Des études comparatives au sein de l'équipe EFD ont montré que les deux méthodes offrent des résultats similaires [45]. Le prochain paragraphe donne une explication détaillée des formules de calcul de chaque méthode.

A) Méthode de Lissajous

La mesure de la puissance de la décharge électrique par la méthode de Lissajous nécessite la mise en série d'un condensateur C avec l'actionneur comme indiqué sur la Figure V.3 [46]. La valeur de ce condensateur doit être très supérieure à celle du condensateur équivalent de l'actionneur. Le schéma équivalent du circuit de mesure est illustré sur la Figure V.4 [46].

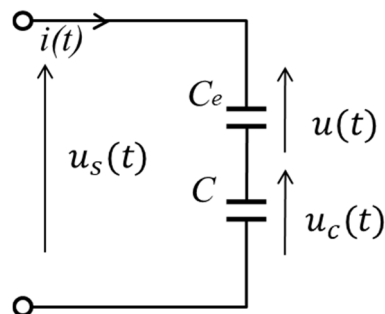


Figure V.4. Circuit électrique équivalent du montage expérimental.

La charge transférée par la décharge q est déterminée à partir de la tension aux bornes du condensateur C . Pour obtenir le cycle de Lissajous, il est nécessaire de tracer la courbe de la charge en fonction de la tension.

La puissance active instantanée de la décharge est donnée par :

$$p(t) = u(t).i(t) = u(t).\frac{dq}{dt} \quad (\text{V.1})$$

$u(t)$ et $i(t)$ représentent la tension et le courant de la décharge.

Puisque la décharge est modélisée par le condensateur C_e qui est en série avec C alors :

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq_c}{dt} = C \frac{du_c}{dt} \quad (\text{V.2})$$

u_c est la tension au bornes du condensateur C qui est très petite par rapport à la tension de source u_s (parce que C doit être très grande devant C_e). On peut considérer donc, que :

$$u(t) = u_s(t) - u_c(t) \approx u_s(t) \quad (\text{V.3})$$

Dans ce cas, la puissance active instantanée peut être donnée par :

$$p(t) = u_s(t).C \frac{du_c}{dt} \quad (\text{V.4})$$

Alors, la valeur moyenne de la puissance de la décharge est exprimée par la relation suivante :

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t).dt = \frac{f}{n} \int_0^{nT} u_s(t).dq_c \quad (\text{V.5})$$

Il est même possible de déduire l'énergie consommée par la décharge comme suit :

$$E = P.nT = \int_0^{nT} u_s(t).dq_c \quad (\text{V.6})$$

La puissance est calculée à partir de l'intégrale du produit des valeurs instantanées de la tension appliquée et de la variation de charge. Cette intégrale correspond à l'aire de la surface entourée par le cycle de Lissajous. Par conséquent, le calcul de cette aire permet d'avoir l'énergie consommée pour n périodes. Si on considère que sur une période de la tension il y a deux décharges (une pour l'alternance positive et une deuxième pour l'alternance négative), alors la quantité totale d'énergie est la somme de l'énergie consommée par ces deux décharges.

Le calcul de la puissance consiste à sauvegarder 1 fois 2 périodes de la charge et de la tension appliquée avec une mémoire d'acquisition de 250000 points/voie. Une fois multiplié, chaque grandeur mémorisée par les coefficients adéquats, la formule mathématique V.5 peut être exécutée, ce qui nous permet d'avoir la valeur moyenne de la puissance [45].

B) Méthode du produit instantané

Cette méthode exige la mise en série d'une résistance R avec l'actionneur comme indiqué sur la Figure V.3 (il faut basculer vers la résistance dans le circuit de mesure). Le courant est déterminé à partir de la tension aux bornes de cette résistance. De même, la puissance moyenne

est calculée à partir de l'intégrale du produit des valeurs instantanées, de la tension appliquée et du courant. Il s'agit de la valeur instantanée donnée par l'équation suivante :

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (\text{V.7})$$

A partir de cette puissance instantanée, la puissance moyenne de la décharge peut être calculée comme suit :

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) \cdot dt = \frac{f}{n} \int_0^{nT} u_s(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (\text{V.8})$$

Avec,

P : puissance moyenne consommée par la décharge (W),

T : période du signal (s),

$u_s(t)$: tension de source (V),

$i(t)$: courant mesuré (A),

n : nombre de périodes entières du signal.

Il est important de signaler que le mode de calcul de la puissance de la décharge employé dans cette étude est celui de Lissajous, car elle est moins sensible aux bruits de mesure en particulier dans le cas des décharges filamenteuses.

V.2. Caractérisations électriques

Dans cette section, une étude préliminaire sur la dynamique des décharges induites et ses propriétés électriques est présentée. Pour les déterminer, il est nécessaire de mesurer les paramètres qui les caractérisent, à savoir le courant de décharge, la charge transférée et la puissance électrique consommée. Les paramètres électriques qui sont à la commande de ces décharges sont : la tension électrique, la fréquence et la forme d'onde du signal.

L'élément clé de ce travail est l'étude du processus d'électro-adhésion-électrostatique des matériaux conducteurs, mais il n'est pas évident de quantifier les facteurs électriques qui caractérisent une décharge élémentaire générée par une seule particule de cuivre. Afin d'augmenter l'effet d'échelle, nous avons choisi les configurations (a) et (b) de la Figure V.1 (une plaque de 25×36 mm² et un fil de 36 mm de longueur) comme étant les cas de référence. Dans les prochains paragraphes, nous présenterons les formes d'ondes typiques du courant et de la charge des deux configurations de référence.

V.2.1. Etude du courant

La Figure V.5 représente un exemple typique des courbes de la tension et du courant en fonction du temps obtenues avec la configuration d'actionneur de type 1 (plan-plan) pour les deux signaux, sinusoïdal et carré. Au cours d'une période, la signature de deux décharges est observée, une décharge durant l'alternance positive et une autre durant l'alternance négative. Le courant est caractérisé par une série d'impulsions qui portent le même signe que celui de la tension appliquée. La forme d'onde du courant est similaire à celle induite par une décharge à barrière diélectrique (DBD) de surface.

Il est facile de constater que le courant mesuré résulte de la superposition de trois composantes : le courant capacitif, le courant pseudo-synchrone et le courant impulsionnel.

Le courant capacitif est dû à la capacité créée entre les électrodes actives et l'électrode plane flottante. Le courant pseudo-synchrone (deux pics larges d'une amplitude inférieure au mA) est dû à des décharges électriques de forme plutôt homogène créées au voisinage d'un des deux bords de l'électrode plane à potentiel flottant.

Au niveau de l'autre bord de l'électrode plane à potentiel flottant, des décharges électriques de type Trichel se développent. Elles induisent des pulses de courant de l'ordre de quelques mA sur le courant mesuré. La forme des deux décharges a été étudiée à l'aide d'une caméra ICCD, dont les résultats seront présentés dans la section (V.2.2).

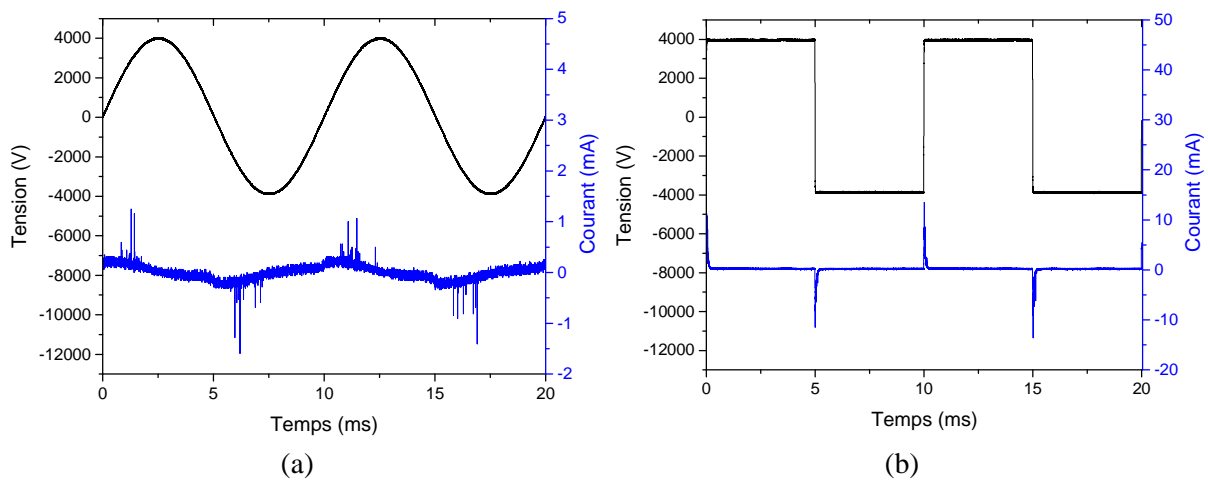


Figure V.5. Forme d'onde de la tension et du courant en fonction du temps dans le cas d'une électrode plane à potentiel flottant pour une tension appliquée (a) sinusoïdale ou (b) carrée. Conditions : $V = 4000 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

La Figure V.6 représente la variation du courant mesuré pour la deuxième configuration d'actionneur dite fil-plan.

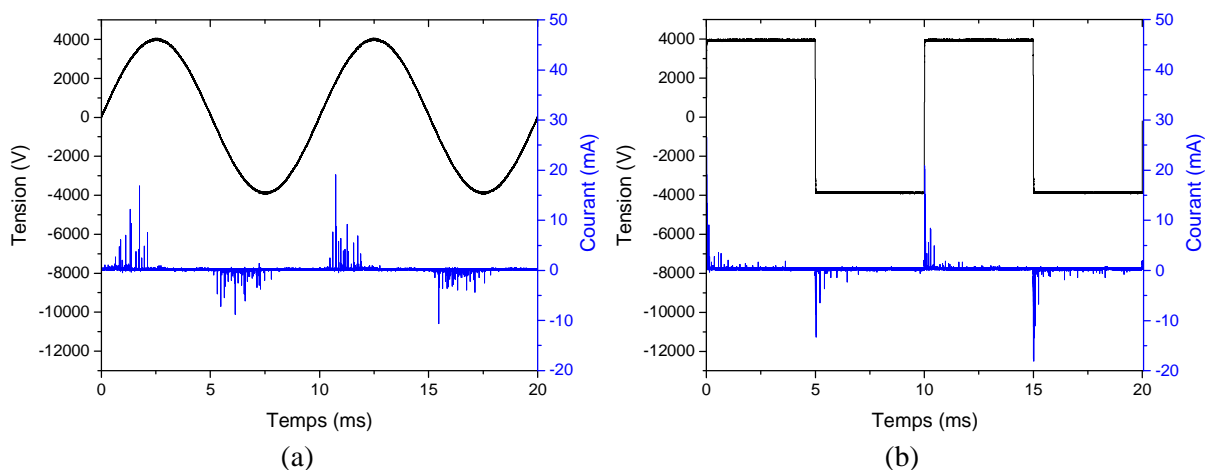


Figure V.6. Forme d'onde de la tension et du courant en fonction du temps dans le cas du fil à potentiel flottant pour une tension appliquée (a) sinusoïdale ou (b) carrée. Conditions : $V = 4000 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

Dans ce cas d'étude, le fil est considéré comme une particule de cuivre comprise entre deux électrodes à plus grande échelle. Le courant se manifeste principalement par des impulsions de courant pouvant atteindre 25 mA. Ils sont la signature de micro-décharges de type streamers.

Il est intéressant de constater que les impulsions du courant dans ce cas prennent des valeurs très élevées par rapport au courant généré par les décharges induites par une électrode à potentiel flottant plane. Ceci s'explique par la distribution et l'intensité du champ électrique dans chaque cas. Celui-ci est très probablement plus intense dans le cas d'une électrode plane qui possède un rayon de courbure plus faible (épaisseur de 35 μm pour la plaque contre 100 μm pour le fil).

A partir des courbes de courant, il est possible de montrer que les impulsions apparaissent aux moments de la transition de la tension appliquée. Les niveaux d'intensité de ces impulsions au cours des alternances positive et négative sont quasi-équilibrés.

V.2.2. Morphologie de la décharge de surface

Afin de confirmer les régimes des décharges surfaciques et mieux comprendre leurs activités au-dessus des actionneurs, il est très important de faire appel à la technique d'imagerie. Dans ce paragraphe, nous traitons les morphologies des décharges à partir des images rapides et intensifiées. Les images qui seront présentées sont obtenues par l'utilisation des signaux électriques typiques illustrés sur la Figure V.5 et la Figure V.6. La technique d'imagerie nous a permis également de comparer le développement des décharges dans le cas des configurations plan-plan et fil-plan en fractionnant la période du signal électrique en 4 séquences, chacune dure environ 1/4 de période.

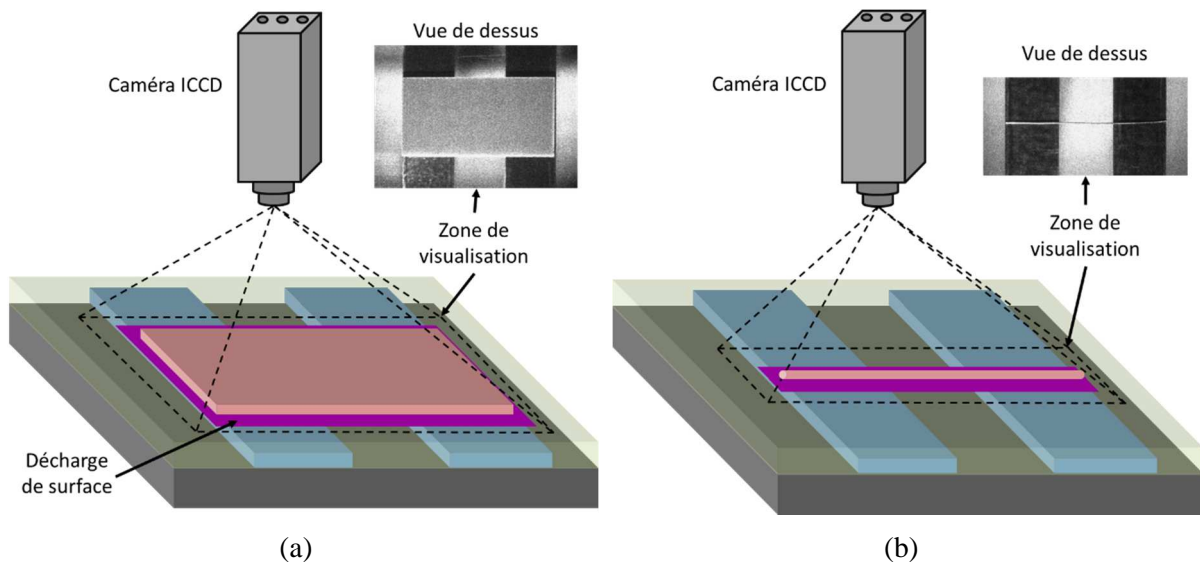


Figure V.7. Schémas illustrant le positionnement de la caméra par rapport aux électrodes pour les configurations de type 1 (a) et de type 2 (b).

Une caméra rapide ICCD (Intensified Charge Coupled Device) de type Princeton Instruments (modèle Pi-Max/Gen2 avec une résolution de 1024 \times 1024 pixels²) a été synchronisée avec un générateur de fonction afin d'enregistrer les images. Pour visualiser la

zone de propagation des décharges, la caméra ICCD est installée au-dessus des actionneurs, comme schématisé sur la Figure V.7. La taille des images capturées est d'environ $50 \times 40 \text{ mm}^2$.

Pour mieux comprendre l'origine et le comportement des décharges induites, il est important de préciser schématiquement la distribution simplifiée des charges dans les actionneurs en l'absence de décharges électriques (Figure V.8). En effet, pendant les alternances positive et négative de la tension, des charges de signes opposés se concentrent sur les bords du matériau à potentiel flottant au-dessus des électrodes connectées au circuit électrique. L'ionisation de l'air est conditionnée par le niveau du champ électrique entre les électrodes actives et l'électrode à potentiel flottant.

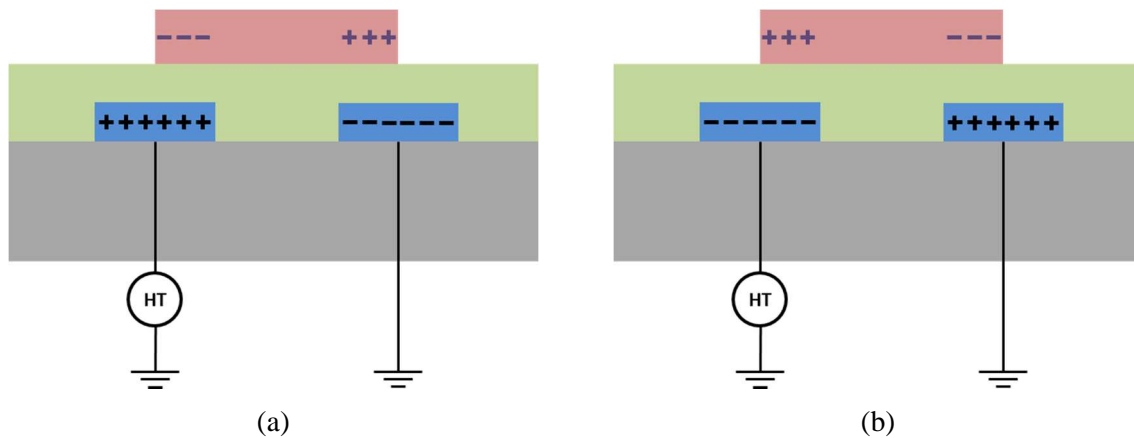


Figure V.8. Représentation schématique de la distribution de charges sans décharges électriques lors de (a) l'alternance positive et (b) l'alternance négative.

A partir d'une valeur critique du champ électrique, des charges libres s'accumulent sur la surface de la barrière diélectrique à proximité des bords de l'électrode à potentiel flottant, et se manifestent par l'apparition de décharges induites surfaciques. Les courbes typiques du courant pour les actionneurs de type 1 (Figure V.5) et de type 2 (Figure V.6) ont montré que le signe du courant de la décharge est le même que celui de la tension appliquée. En effet, les charges surfaciques transférées portent le même signe que celui des charges induites dans l'électrode à potentiel flottant durant chaque alternance, comme indiqué sur la Figure V.9.

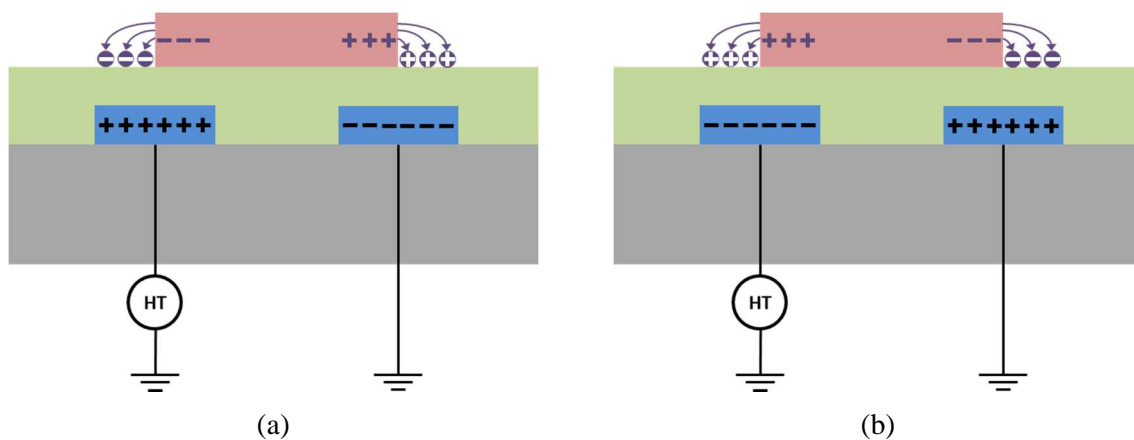
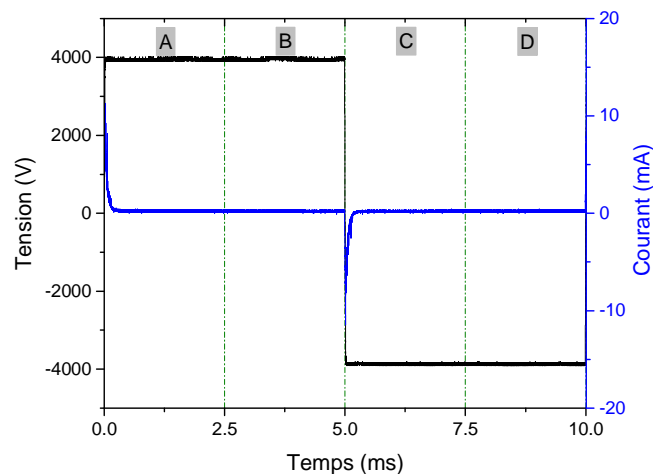


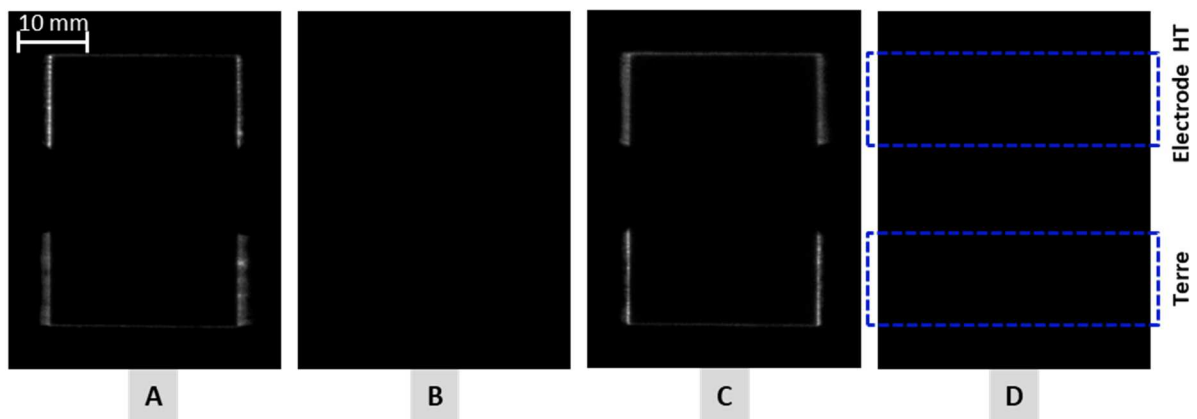
Figure V.9. Représentation schématique de la distribution des charges générées par les décharges surfaciques entre l'électrode à potentiel flottant et les électrodes actives : (a) pendant l'alternance positive et (b) pendant l'alternance négative.

Dans les prochains paragraphes, nous allons analyser la morphologie des décharges induites pour différentes formes d'électrodes à potentiel flottant et pour différents signaux de tension. L'objectif est de confirmer les hypothèses sur les régimes de décharges proposées à partir de l'analyse des signaux de courant dans la section V.2.1.

Les Figures V.10 et V.11 illustrent la morphologie des décharges (vue de dessus), au niveau des actionneurs plan-plan et fil-plan, respectivement. L'amplitude et la fréquence de la tension carrée appliquée sont fixées à 4000 V et 100 Hz, respectivement. Les images enregistrées sont les résultats de l'intégration de 50 photographies, capturées sur des séquences de 2,5 ms de sorte qu'elles correspondent aux quatre périodes d'ouvertures de la caméra indiquées sur les Figures V.10.a et V.11.a.



(a) Périodes d'ouverture de la caméra par rapport aux signaux électriques

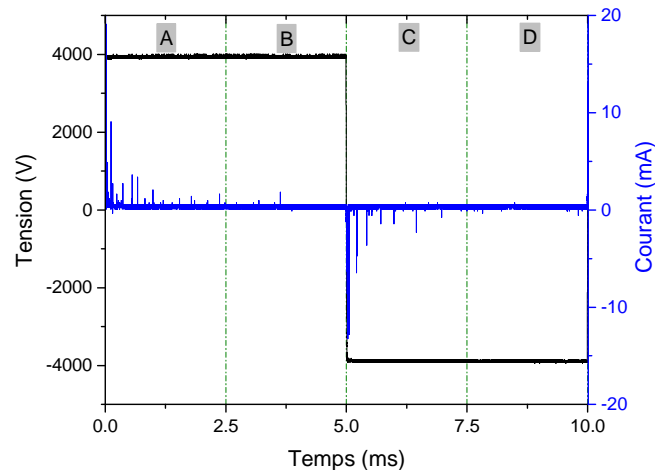


(b) Images des décharges (temps d'intégration = 2,5 ms)

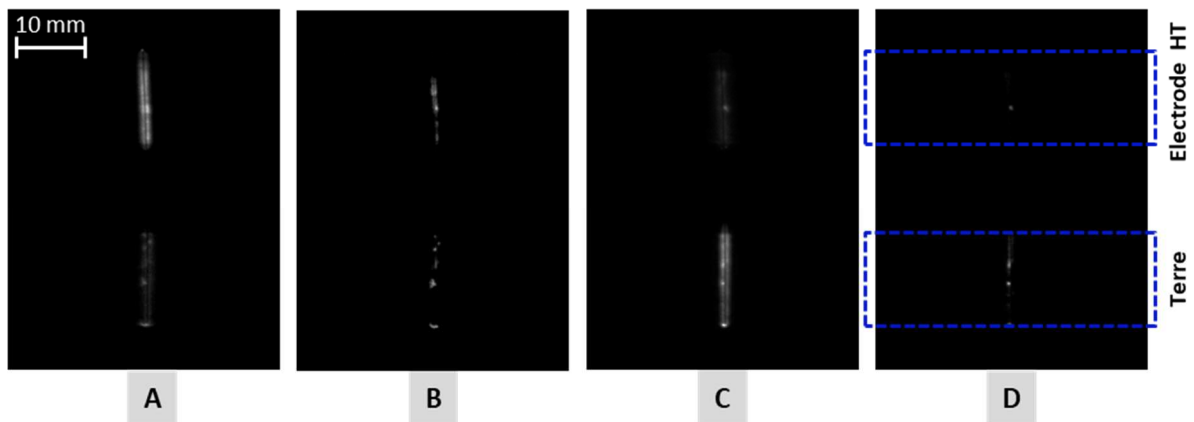
Figure V.10. Morphologie des décharges en polarités positive et négative pour la configuration de type 1 avec une tension carrée. Conditions : $V = 4000 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

Les lueurs supérieures qui apparaissent sur les images de la Figure V.10.b sont dues à des décharges superficielles qui se développent sur la barrière diélectrique entre la plaque de cuivre et l'électrode reliée à la source HT. Pour les lueurs inférieures, il s'agit de décharges électriques qui prennent naissance à proximité de l'électrode reliée à la terre.

L'image de la fenêtre A de la Figure V.10.b montre que les lueurs supérieures sont caractérisées par des spots lumineux tandis que les lueurs inférieures apparaissent sous forme de bandes lumineuses larges et homogènes (jusqu'à environ 2 mm du bord de l'électrode à potentiel flottant). Ainsi, le courant de la décharge, mesuré lors de la transition positive de la tension, traduit la présence de deux décharges avec deux régimes différents. Il s'agit très probablement de décharge de type Trichel près de l'électrode reliée à la source HT (dépôt de charges électriques négatives) et une décharge de type corona-glow à proximité de l'électrode reliée à la terre (dépôt de charges électriques positives).



(a) Périodes d'ouverture de la caméra par rapport aux signaux électriques



(b) Images des décharges (temps d'intégration = 2,5 ms)

Figure V.11. Morphologie des décharges en polarités positive et négative pour la configuration de type 2 avec une tension carrée. Conditions : $V = 4000 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

Aucune lumière n'est visible sur la fenêtre B, ce qui prouve l'absence de décharges pendant cet intervalle de temps. Ce résultat est en bon accord avec les mesures de courant qui ne montre aucune activité durant cette phase.

En analysant l'image de la fenêtre C associée à la transition négative de la tension, on peut noter que les spots lumineux apparaissent à côté de l'électrode reliée à la terre alors que les bandes lumineuses larges apparaissent près de l'électrode HT. Ceci peut s'expliquer par l'inversion de signes des charges électriques par rapport à la fenêtre A.

Comme pour l'image de la fenêtre B, aucune décharge n'a été observée sur l'image de la fenêtre D. Ces observations permettent de constater que le courant de décharge obtenu pendant les alternances positives et négatives de la tension, est une superposition de deux courants associés à deux régimes de décharge différents.

L'étude de la morphologie des décharges induites dans le cas fil-plan (Figure V.11) montre des résultats différents par rapport au cas plan-plan. Durant l'alternance positive de la tension (fenêtres A et B), les lueurs supérieures sont plus intenses et plus homogènes. De plus, l'activité de la décharge se poursuit durant tout le plateau de la tension. Les sports lumineux observés dans le cas plan-plan ne sont plus visibles dans ce cas. Par ailleurs, les lueurs inférieures sont cette fois moins intenses et moins homogènes que dans le cas plan-plan. Par exemple, la signature de décharges filamenteuses faiblement distribuées est observée durant le plateau de la tension (fenêtre B). L'analyse des images de l'alternance négative (fenêtres C et D) montre les mêmes différences entre les cas fil-plan et plan-plan.

Un tel résultat s'explique par les différences au niveau des surfaces recouvertes par les deux électrodes à potentiel flottant mais aussi par l'écart entre les épaisseurs de ces électrodes.

V.2.3. Etude de la charge

Les formes d'onde typiques de la charge et la tension appliquée obtenues avec les deux configurations d'actionneur sont illustrées sur la Figure V.12. Pour des raisons de concision évidente, seul le cas d'une tension sinusoïdale est présenté.

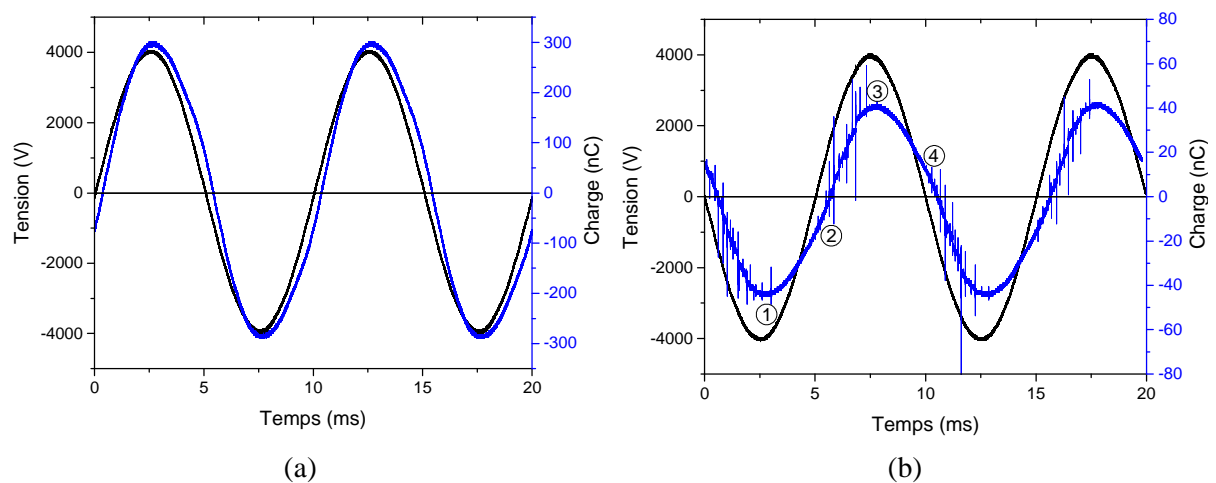


Figure V.12. Formes d'ondes typiques de la charge et de la tension sinusoïdale appliquée pour les cas plan-plan et fil-plan. Conditions : $V = 4000 \text{ V}$; $f = 1000 \text{ Hz}$.

La charge évolue périodiquement avec un léger décalage temporel par rapport à la tension. Les résultats de la Figure V.12 indiquent que les décharges associées aux deux configurations se développent suivant des régimes différents.

Généralement, il est plus facile d'interpréter le comportement de la décharge dans une seule courbe incluant la variation de la charge en fonction de la tension appliquée dite « cycle de Lissajous », comme le montre la Figure V.13.

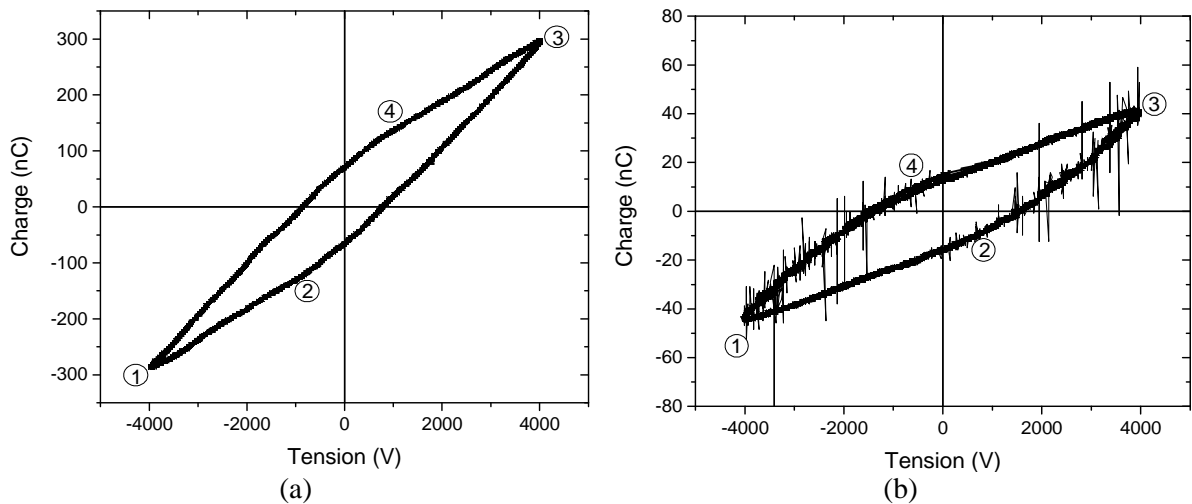


Figure V.13. Caractéristiques charge-tension de référence des actionneurs de type 1 (a) et de type 2 (b). Conditions : Tension sinusoïdale ; $V = 4000 \text{ V}$; $f = 1000 \text{ Hz}$.

Les résultats permettent de déduire que la charge transférée dans le cas de la configuration plan-plan est plus importante que celle de la configuration fil-plan. Ceci s'explique principalement par une surface de contact active plus importante entre l'électrode plane à potentiel flottant et l'actionneur. De ce fait, la capacité équivalente est plus élevée.

Les étapes $1 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 4$ des cycles de Lissajous correspondent aux phases « capacitives » de la décharge avant activité, car l'actionneur et l'électrode à potentiel flottant se comporte électriquement comme un condensateur, que ce soit dans la configuration plan-plan ou fil-plan. Les étapes $2 \rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 1$ sont liées à la partie active de la décharge ; la capacité équivalente est modifiée par la présence des décharges électriques au-dessus de la surface de l'actionneur.

La forme des deux cycles traduit des régimes de décharge différents pour les deux configurations :

- Régime filamentaire (cas fil-plan) : c'est le mécanisme de décharge généralement observé dans les DBD à pression atmosphérique. Celui-ci est caractérisé par la création d'une multitude de streamers se développant indépendamment les uns des autres et conduisant à la formation de micro-décharges distribuées dans l'espace et dans le temps (Figure V.13.b) [37].
- Régime homogène (cas plan-plan) : Il est possible sous certaines conditions d'obtenir une décharge homogène, c'est le cas de la configuration plan-plan (Figure V.13.a).

V.3. Etude paramétrique

Dans cette section, l'influence des différents paramètres électriques et géométriques sur les décharges induites est étudiée, dans le but d'évaluer l'énergie dissipée par l'actionneur. L'intérêt de la séparation électrostatique par électro-adhésion est de ne pas être énergivore, donc la présence de ces décharges induites réduit considérablement l'avantage de cette technologie par rapport aux autres techniques de séparation métal/plastique.

V.3.1. Cas plan-plan

V.3.1.1. Influence de la position de la zone de contact

Pour cette étude, les décharges induites sont étudiées pour différentes positions de l'électrode plane à potentiel flottant (longueur = 36 mm) par rapport aux électrodes actives (largeur = 12 mm, écartement = 12 mm). La position de référence correspond à la situation où l'électrode à potentiel flottant recouvre les deux électrodes actives bord-à-bord (Figure V.14). Dans cette étude, neuf positions ont été considérées suivant l'axe ox par pas de 3 mm entre la position $x = -12$ mm et la position à $x = +12$ mm.

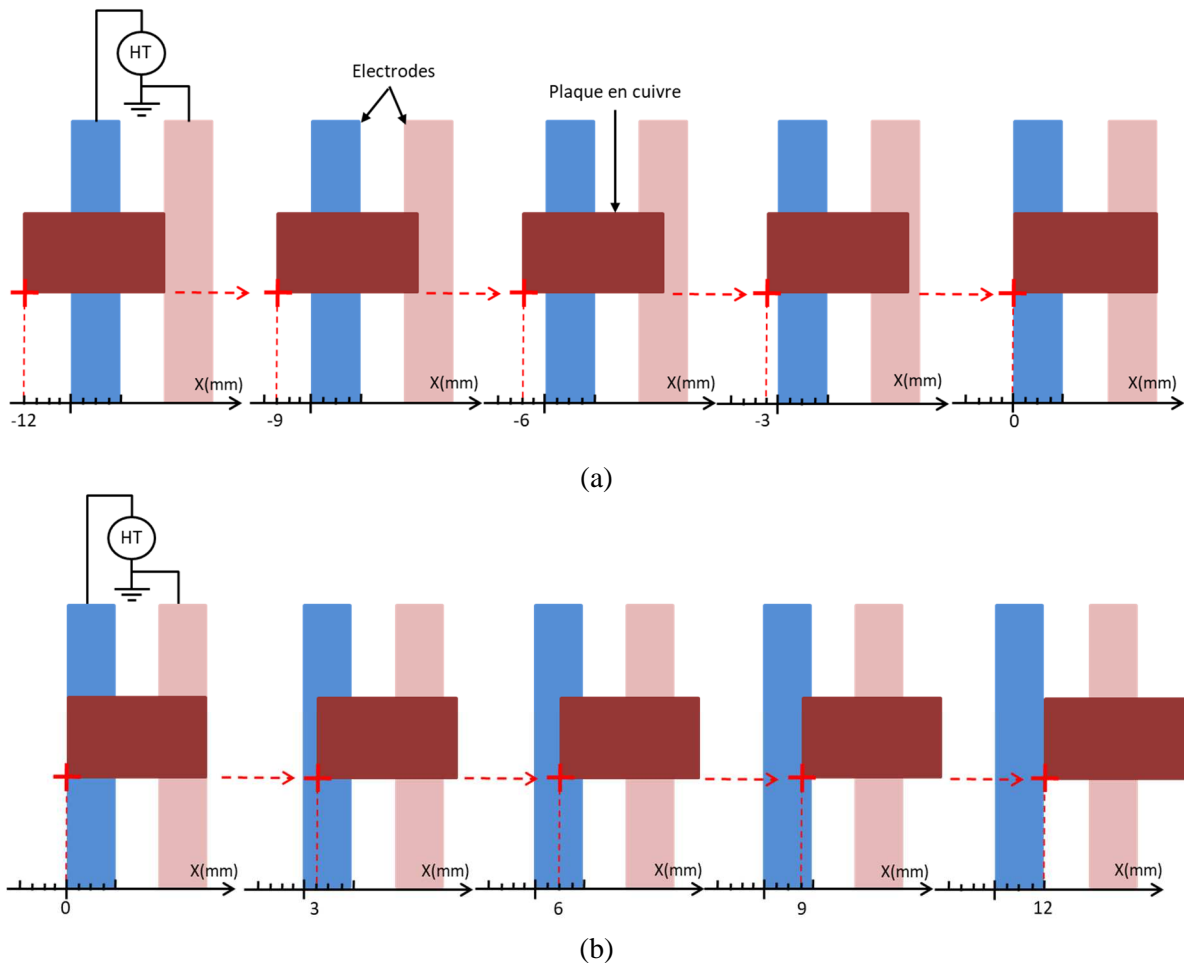


Figure V.14. Représentation schématique des emplacements étudiés de la plaque de cuivre sur l'actionneur. (a) changement de position du côté gauche vers la position de référence (b) déplacement de la position de référence vers le côté droit.

Pour chaque emplacement de l'électrode à potentiel flottant, le cycle de Lissajous correspondant (caractéristique charge transférée – tension) a été relevé pour les deux signaux de la tension appliquée : sinusoïdal et carré. Les Figures V.15 et V.16 illustrent les résultats obtenus pour les emplacements compris entre la position $x = -12$ mm et la position $x = 0$ mm (position de référence), puis entre cette position et la position finale à $x = +12$ mm.

Pour les deux formes d'onde de la tension appliquée, les résultats montrent que l'aire du cycle de Lissajous augmente graduellement en fonction de la position de l'électrode active entre $x = -12$ mm et $x = 0$ mm avant de décroître par la suite pour les positions comprises entre

$x = 0$ mm et $x = +12$ mm. La valeur maximale est obtenue pour le cas de référence ($x = 0$ mm).

L'inclinaison du cycle de Lissajous avec une tension appliquée sinusoïdale est la traduction de la variation de la capacité équivalente hors-décharge. Celle-ci est plus importante pour le cas de référence, car la surface des électrodes actives recouverte par l'électrode à potentiel flottant est plus importante (Figures V.15 et V.16). De même, il semblerait que l'activité de la décharge est plus importante lorsque la surface active sous l'électrode à potentiel flottant augmente.

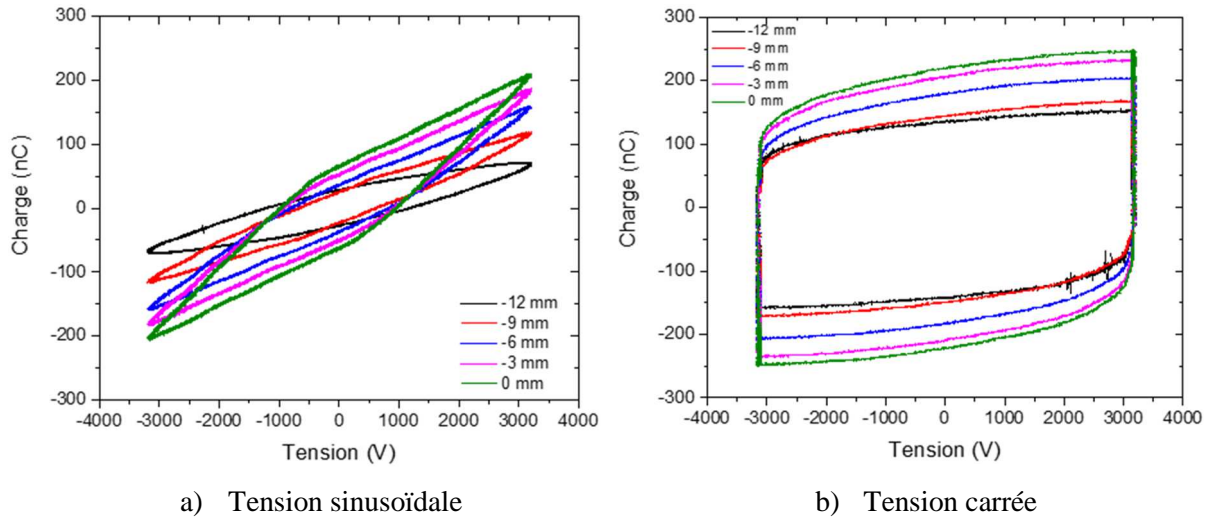


Figure V.15. Caractéristiques charge-tension obtenues pour les emplacements de l'électrode active plane entre $x = -12$ mm et 0 mm. Conditions : $V = 3200$ V ; $f = 100$ Hz.

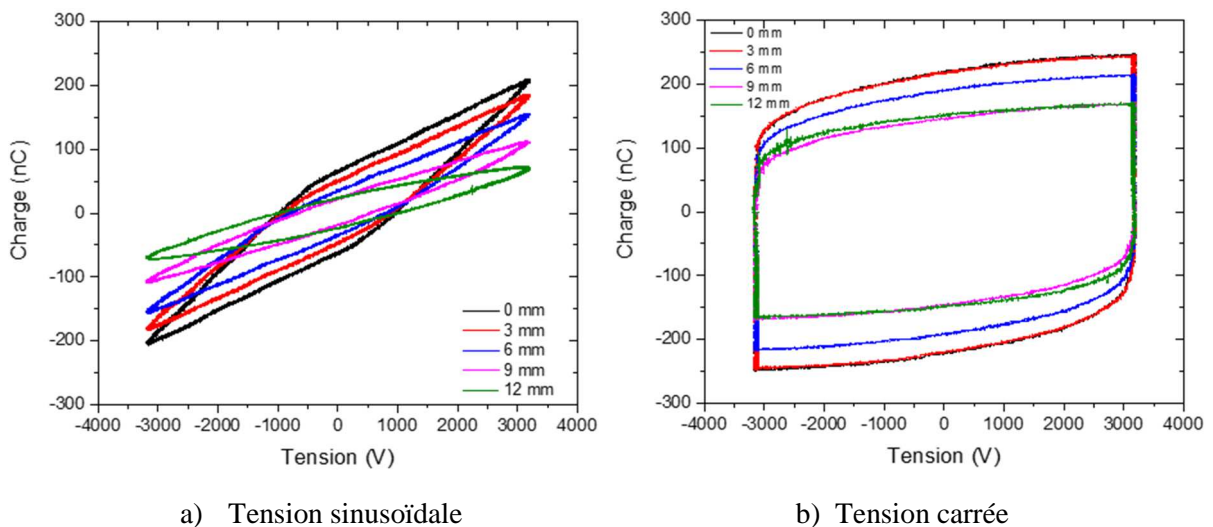


Figure V.16. Caractéristique charge-tension obtenues pour les emplacements de l'électrode active plane entre $x = 0$ mm et +12 mm. Conditions : $V = 3200$ V ; $f = 100$ Hz.

La variation de la puissance électrique consommée, calculée à partir de l'air des courbes de Lissajous, en fonction de la position de l'électrode active est illustrée sur la Figure V.17 pour les deux signaux de tension. Les résultats indiquent encore une fois que la décharge est intense pour le cas de référence ($x = 0$ mm), pour lequel la capacité équivalente est la plus importante.

La forme de la courbe $P(x)$, qui semble être quasi-symétrique par rapport à la position de référence, est très différente en fonction de la forme d'onde de la tension. De plus, la puissance consommée avec la tension carrée est jusqu'à 5 fois plus importante par rapport à celle obtenue avec le signal sinusoïdal. Le renversement rapide de polarité de la tension carrée combiné avec un plateau occupant quasiment la moitié d'une période sont très favorables au développement de décharges induites intenses.

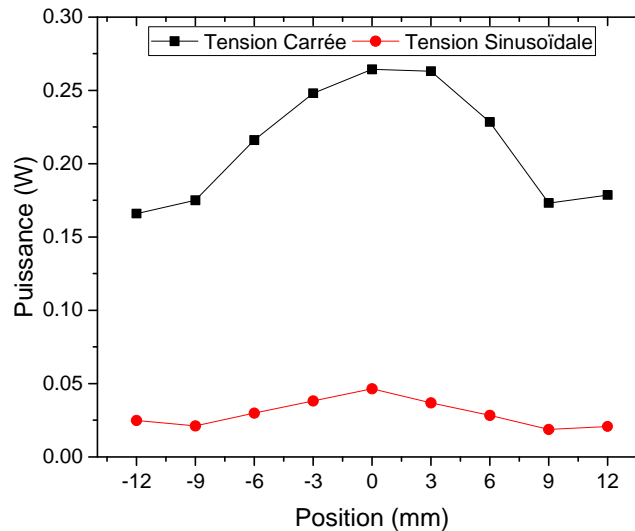


Figure V.17. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la position pour les deux signaux de tension : sinusoïdal et carré. Conditions : $V = 3200 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

Dans la suite de l'étude, il sera question d'évaluer l'effet de la tension et la fréquence, entre autres, sur la puissance consommée par les décharges induites.

V.3.1.2. Influence de la tension

Pour analyser l'effet de la tension sur les décharges induites, l'actionneur plan-plan est utilisé en plaçant l'électrode plane à potentiel flottant au niveau de la position de référence. La Figure V.18 illustre les cycles de Lissajous obtenus pour des tensions appliquées entre 800 V et 4000 V avec une fréquence de 100 Hz. Les deux formes d'ondes sont considérées dans cette étude.

L'aire balayée par la charge et la tension s'accroît en fonction de l'augmentation des niveaux de tensions appliquées aux bornes de l'actionneur, en raison de l'intensification des décharges induites. Quelle que soit la tension appliquée, les aires des cycles avec le signal carré sont nettement plus grandes par rapport à celles du signal sinusoïdal.

Ce résultat se confirme sur la variation de la puissance moyenne consommée par l'actionneur en fonction de la tension représentée sur la Figure V.19. On peut constater que la puissance augmente avec la tension suivant une loi de puissance. L'évolution en loi de puissance est typique des décharges électriques (DBD ou DC) de surface ou de volume.

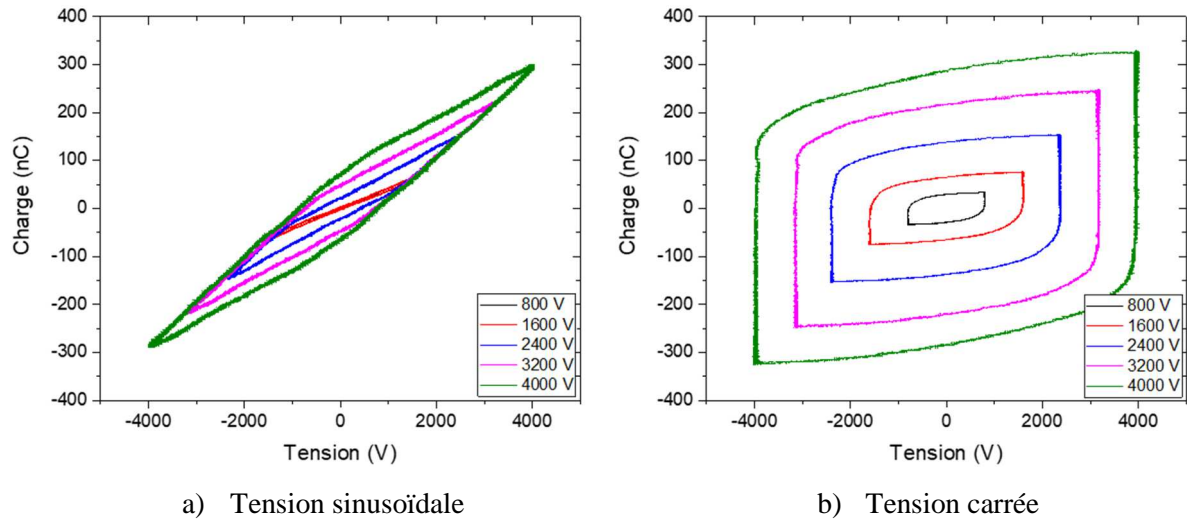


Figure V.18. Caractéristique charge-tension obtenues pour différentes amplitudes de la tension appliquée ($f = 100$ Hz).

Dans la littérature, plusieurs interprétations de la loi qui régit l'évolution de la puissance sont disponibles [37]. En ce qui concerne notre cas d'étude, nous avons opté pour l'approche abordé par l'équipe EFD dans un travail antérieur [37]. Selon cette approche, la puissance est donnée par l'équation V.9.

$$P = C \cdot f \cdot V(V - V_0) \tag{V.9}$$

Où P indique la puissance, V la tension appliquée, V_0 la tension d'amorçage de la décharge, f la fréquence et C une constante. A partir de cette équation, nous obtenons sur la Figure V.19, les deux courbes d'interpolation des données expérimentales avec l'Equation (V.9).

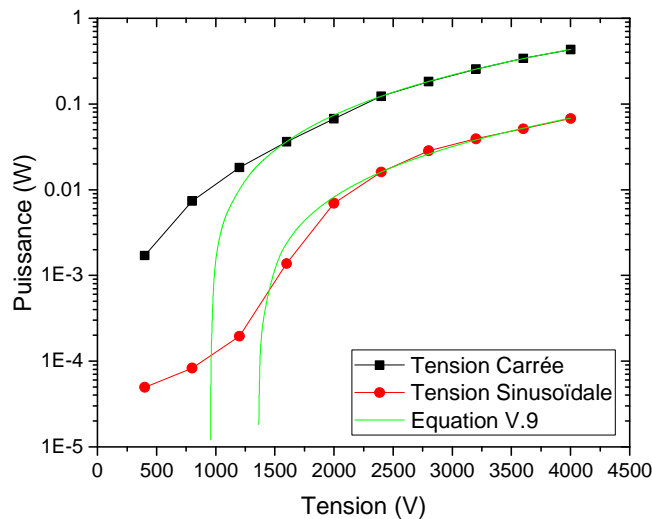


Figure V.19. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension appliquée ($f = 100$ Hz)

Il est important de noter que l'écart de puissance consommée avec les deux signaux se réduit avec l'augmentation de la tension appliquée (rapport de 7 à 4000 V au lieu de 35 à 400 V). Cet effet peut s'expliquer par l'accroissement du niveau de la tension d'ionisation avec un signal sinusoïdal comme le montre le modèle d'ajustement sur la Figure V.19.

V.3.1.3. Influence de la fréquence

L'effet de la fréquence sur la variation de la puissance électrique consommée est représenté sur la Figure V.20. Les résultats indiquent que la puissance électrique augmente également au fur et à mesure de l'accroissement de la fréquence (Figure V.20). Pour des raisons d'illustration, la puissance est représentée en échelle logarithmique sur les deux axes de coordonnées (repère log-log). La progression de la puissance pour les deux signaux de tension est linéaire dans la gamme de fréquences 3– 1000 Hz (l'ajustement des données avec l'équation V.9 est également valable dans cette gamme). Pour la gamme de fréquence inférieure, le niveau de puissance consommée est relativement faible, au point où l'effet du bruit de mesure devient non négligeable. Ainsi, il est très difficile de conclure sur l'allure de la courbe de puissance dans cette gamme de fréquence.

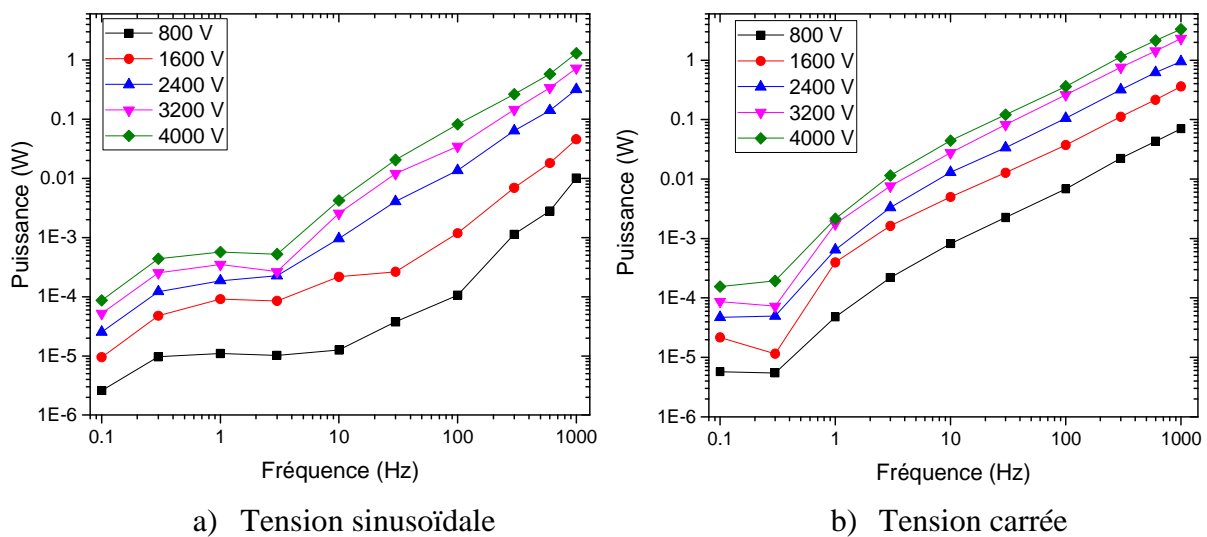


Figure V.20. Progression de la puissance moyenne consommée en fonction de la fréquence pour plusieurs niveaux de tension.

L'accroissement linéaire de la puissance en fonction de la fréquence est une caractéristique typique des décharges à barrière diélectrique de surface ou de volume, pour lesquelles l'énergie injectée par cycle est quasi-constante pour les niveaux de fréquence étudiés [46].

V.3.1.4. Influence de l'épaisseur de la barrière diélectrique

Afin d'évaluer l'influence de l'épaisseur de la barrière diélectrique (entre les électrodes actives et l'électrode à potentiel flottant) sur la puissance consommée, le nombre des couches de Kapton a été varié. L'épaisseur d'une couche élémentaire est de 27 μm . Nous avons donc déterminé la charge transférée et la puissance de la décharge électrique pour les valeurs double et quadruple de l'épaisseur de la couche élémentaire.

Le cycle de Lissajous est très sensible à la variation de l'épaisseur de la barrière diélectrique comme on peut le voir sur la Figure V.21. D'une part, l'aire du cycle diminue avec l'augmentation de l'épaisseur du diélectrique, en raison de la réduction du champ électrique entre les électrodes. D'autre part, l'inclinaison du cycle pour une tension sinusoïdale diminue

avec l'augmentation de l'épaisseur en raison de l'affaiblissement de la capacité électrique équivalente hors décharge électrique.

Les conséquences de l'accroissement de l'épaisseur sur la puissance électrique consommée pour plusieurs niveaux de tension sont indiquées sur la Figure V.22. Pour la même tension appliquée, la puissance est plus importante à faibles épaisseurs pour les deux signaux de la tension appliquée. En revanche, l'impact de l'accroissement de l'épaisseur sur la puissance est plus prononcé avec une tension sinusoïdale, qui s'explique par l'accroissement du niveau de la tension d'ionisation.

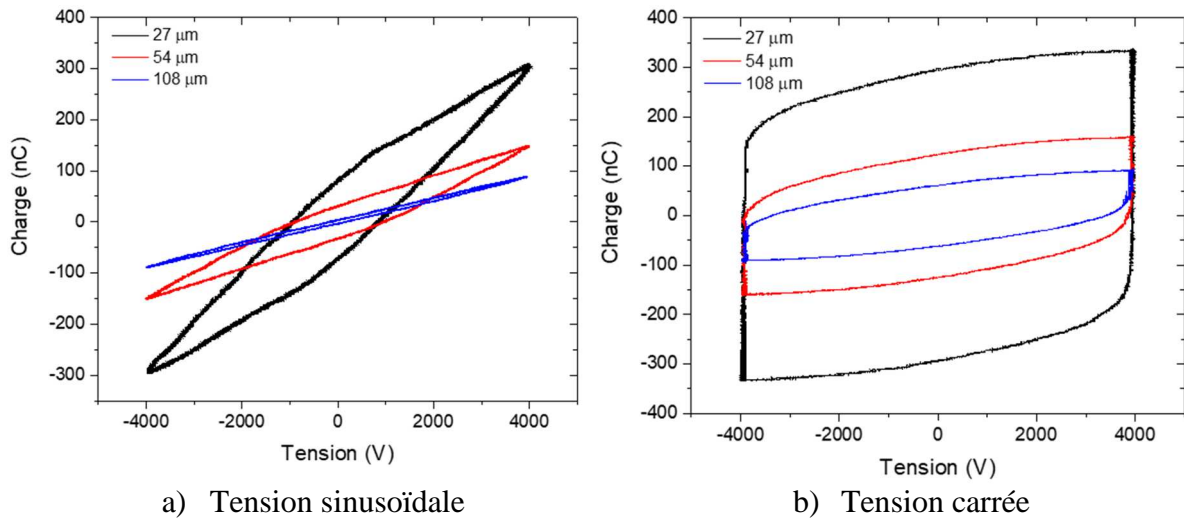


Figure V.21. Caractéristiques charge-tension pour plusieurs épaisseurs de la barrière diélectrique. Conditions : $V = 4000 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

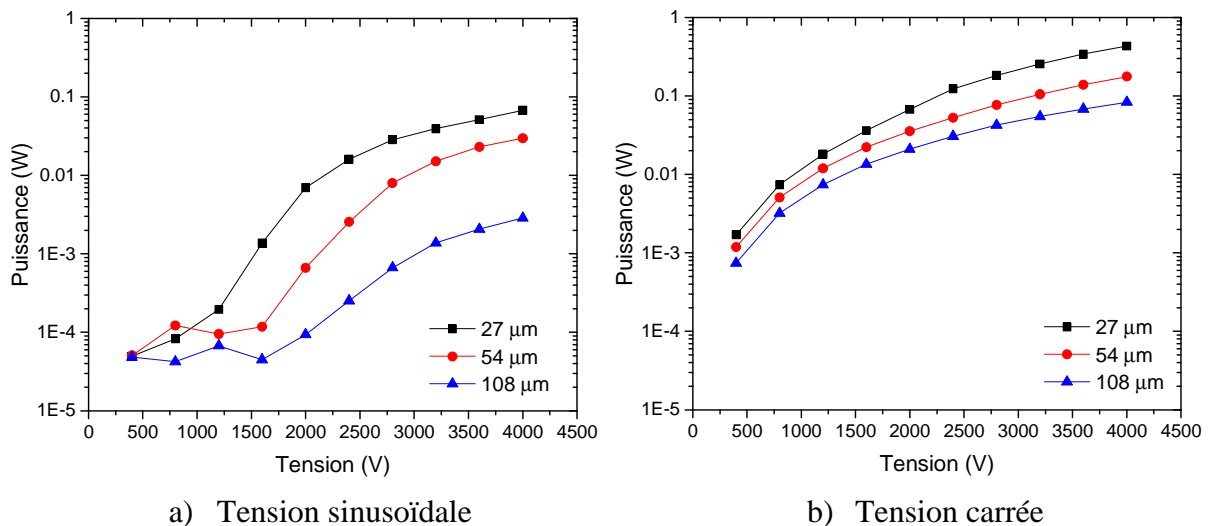


Figure V.22. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension appliquée pour plusieurs épaisseurs de la barrière diélectrique ($f = 100 \text{ Hz}$).

V.3.1.5. Influence du rapport écartement/largeur d'électrodes

L'effet du rapport écartement / largeur d'électrodes sur l'adhésion du cuivre a été étudié dans le chapitre III. Dans cette partie, nous avons fait appel aux convoyeurs représentés schématiquement sur la Figure V.23 avec les dimensions indiquées sur le tableau V.1 pour déterminer l'effet du rapport R sur la puissance consommée par les décharges induites au voisinage de leur surface. Dans ce contexte, l'actionneur de type 1 est remplacé par ces actionneurs. L'électrode à potentiel flottant est une plaque en cuivre de forme rectangulaire (longueur = 36 mm, largeur = 25 mm).

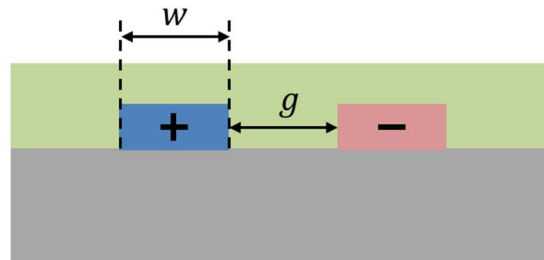


Figure V.23. Représentation schématique de l'actionneur utilisé.

La Figure V.24 illustre la variation de la puissance en fonction du champ électrique réduit E_r (rapport entre la tension et l'écartement inter-électrodes) pour les six actionneurs (de rapport g/w variable), et pour les deux formes d'ondes de la tension appliquée. Les résultats montrent que la puissance augmente avec le champ réduit pour toutes les configurations géométriques. Dans les cas où l'écartement entre les électrodes est constant ($g/w = 1$), les courbes de puissance consommée sont très proches. A champ électrique réduit constant, la puissance consommée augmente avec le rapport R . En effet, plus l'écartement entre les électrodes augmente plus la tension augmente pour maintenir le champ constant, ce qui conduit au final à l'intensification de la décharge.

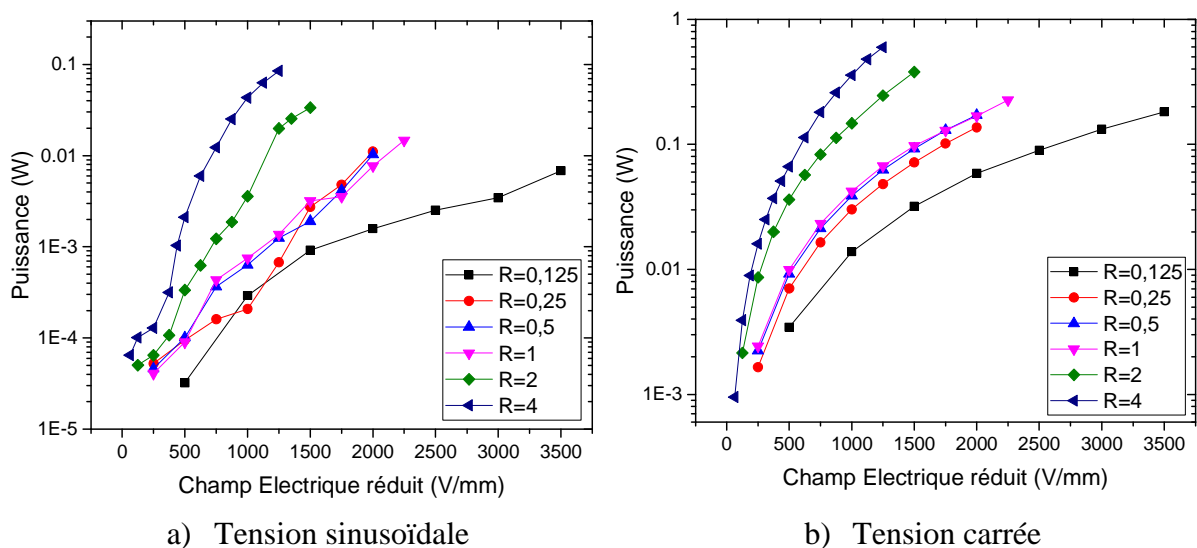


Figure V.24. Évolution de la puissance moyenne consommée en fonction du champ Electrique réduit appliquée pour chaque actionneur ($f = 100$ Hz).

V.3.2. Cas fil-plan

L'étude de la configuration plan-plan était limitée au cas d'une électrode à potentiel flottant plane. Celle-ci a été utile pour étudier l'effet de plusieurs paramètres sur le comportement des décharges induites et sur la puissance électrique consommée. Pour se rapprocher un peu plus d'une configuration géométrique similaire à celle d'une application industrielle, l'électrode à potentiel flottant plane est remplacée par un fil en cuivre, similaire à celui utilisé dans la fabrication des câbles électriques multibrins. Cette situation correspond à la configuration d'actionneur de type 2 dite fil-plan. Avec un fil de 36 mm de longueur et des électrodes actives de 12 mm de largeurs, les mesures électriques bénéficient d'un rapport signal/bruit supérieur au cas multibrins-plan (les résultats seront présentés dans les prochaines sections).

La Figure V.25 montre la variation de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension et de la fréquence pour les deux formes d'onde de la tension dans le cas fil-plan.

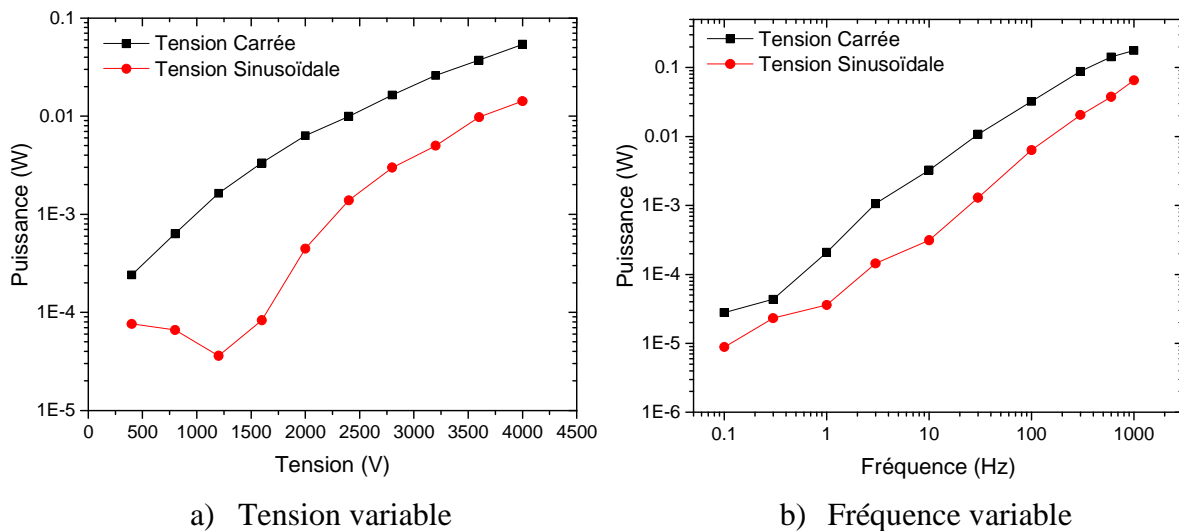


Figure V.25. Variation de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension (a) et de la fréquence (b) pour le cas des deux formes d'onde de la tension.

Les tendances des courbes sont similaires au cas plan-plan discutées précédemment. Ainsi, même avec une surface active (ou une capacité équivalente) plus faible, la naissance des décharges induites est possible avec un fil de faible rayon de courbure même si l'écartement entre les électrodes actives est relativement important. Il est important de signaler qu'en l'absence du fil, l'existence des décharges induites n'est pas possible pour les niveaux de tensions étudiées (< 4 kV).

Une comparaison de la consommation de puissance entre les cas fil-plan et plan-plan est illustrée sur la Figure V.26. Pour cette étude, la fréquence est maintenue constante à 100 Hz, alors que la tension appliquée (sinusoïdale et carrée) varie dans la gamme 400 – 4000 V. Les résultats montrent que la configuration plan-plan consomme plus de puissance pour les deux formes d'onde de la tension. Le rapport de puissance entre les deux configurations est souvent plus d'une décade sur une large plage de tension. Ce résultat s'explique par une surface active plus importante dans le cas plan-plan.

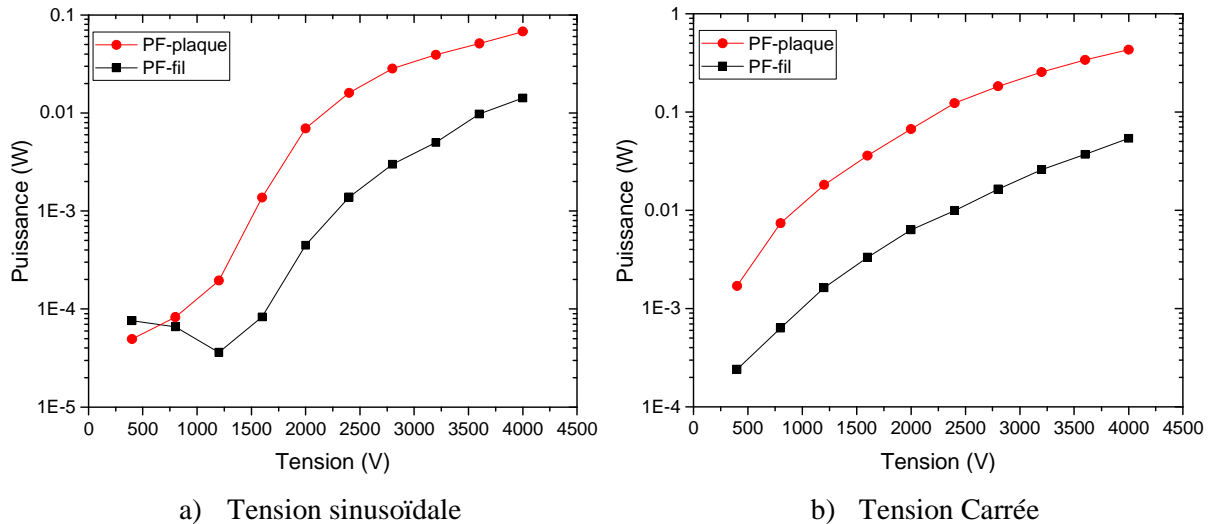


Figure V.26. Comparaison de l'évolution de la puissance moyenne consommée en fonction de la tension appliquée pour les configurations fil-plan et le plan-plan ($f = 100$ Hz)

V.3.3. Cas brins-plan

V.3.3.1. Particules de cuivre

Cette section traite l'action des différents actionneurs présentés précédemment sur un échantillon de particules de cuivre dérivé d'un déchet de câbles électriques. L'objectif est d'étudier les effets de la présence des décharges électriques induites sur le mécanisme d'adhésion électrostatique. La Figure V.27 montre la gamme de tailles des particules de cuivre utilisées durant les expériences. La distribution en nombre a été obtenue pour une masse de 1 g. La taille des particules est comprise entre 0,5 et 5 mm avec une taille typique d'environ 1,5 mm.

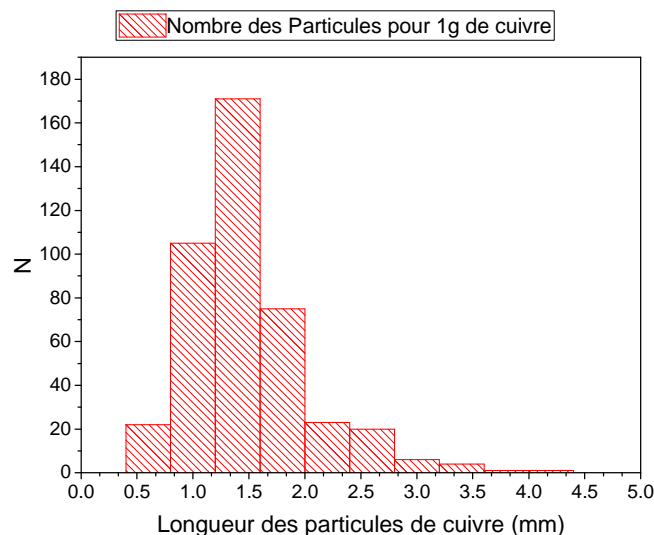


Figure V.27. Distribution granulométrique en nombre pour une échantillon de particules de cuivre de 1 g.

La Figure V.28 illustre un exemple typique des courbes de la tension et du courant en fonction du temps obtenus avec les particules de cuivre (actionneur de type 3, $R = 1$) pour les

deux signaux : sinusoïdal et carré. La signature de l'activité de décharges induites est observée au cours des alternances positive et négative d'une période, cependant les amplitudes du courant sont très faibles. Comme expliqué précédemment, les impulsions de courant possèdent le même signe que celui de la tension appliquée.

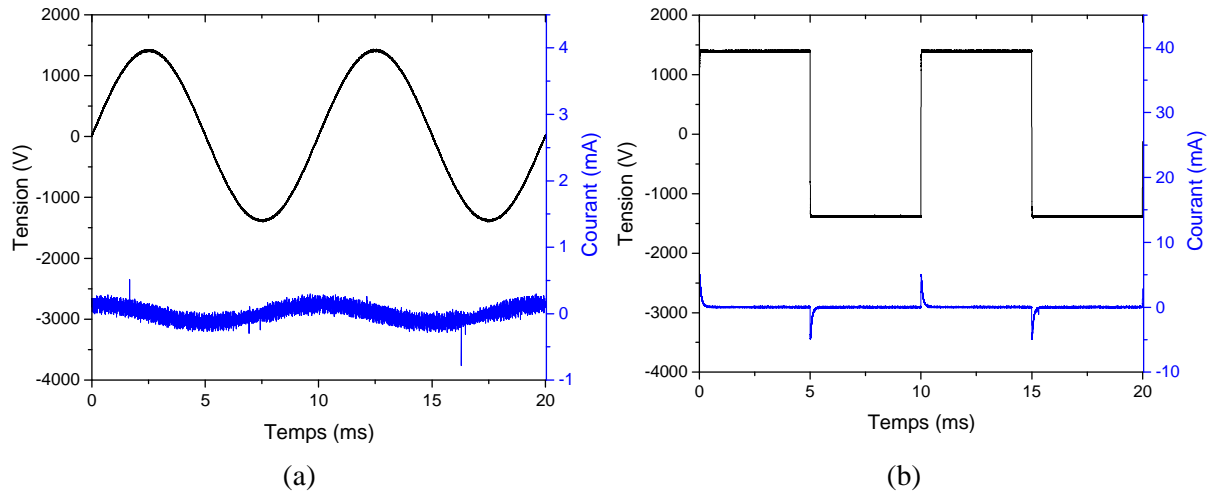


Figure V.28. Forme d'onde de la tension et du courant en fonction du temps dans le cas des particules de cuivre. Tensions appliquées, (a) sinusoïdal ; (b) carré. Conditions : $V = 1400 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

Les formes d'onde typique de la charge en fonction de la tension appliquée obtenues avec les particules de cuivre pour les deux signaux, sinusoïdal et carré, sont illustrées sur la Figure V.29. Les résultats montrent que la charge transférée par les particules lors de l'application d'une tension carrée est nettement plus importante que celle de la tension sinusoïdale.

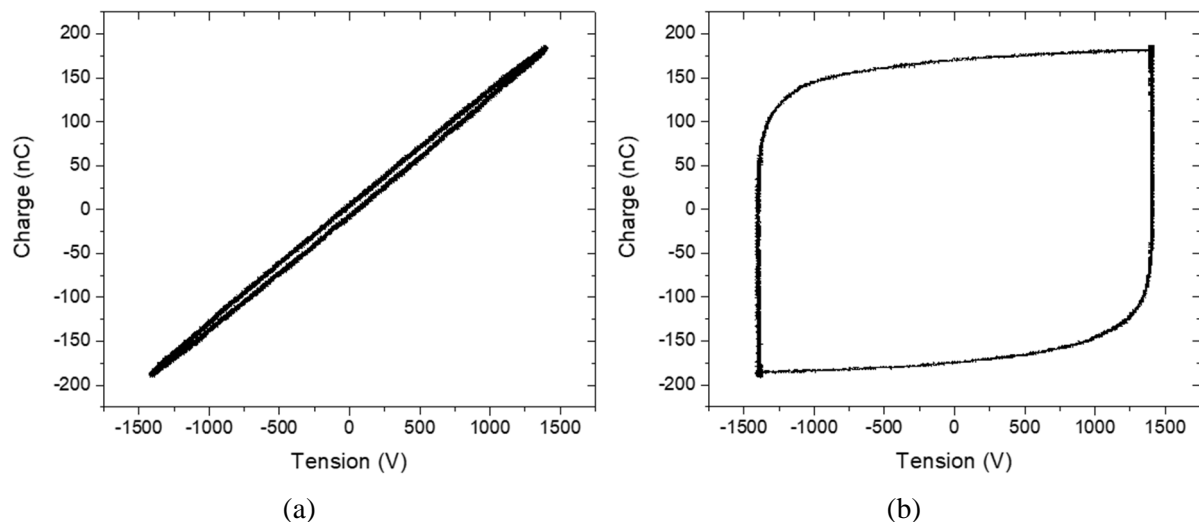


Figure V.29. Caractéristiques charge-tension de référence des actionneurs de type 3 pour des tensions appliquées (a) sinusoïdale et (b) carrée. Conditions : $V = 1400 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

La Figure V.30 représente schématiquement le montage expérimental utilisé pour observer les décharges superficielles qui se développent à partir des pointes des particules de cuivre. Uniquement le cas d'une forme d'onde carrée est présenté en raison d'une intensité plus forte de la décharge.

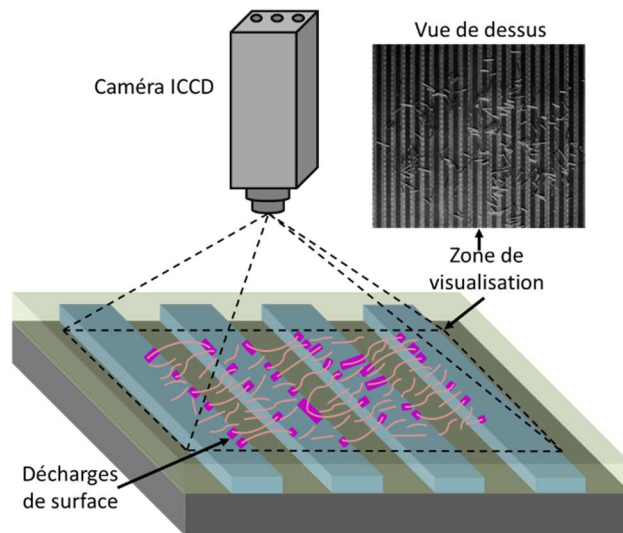
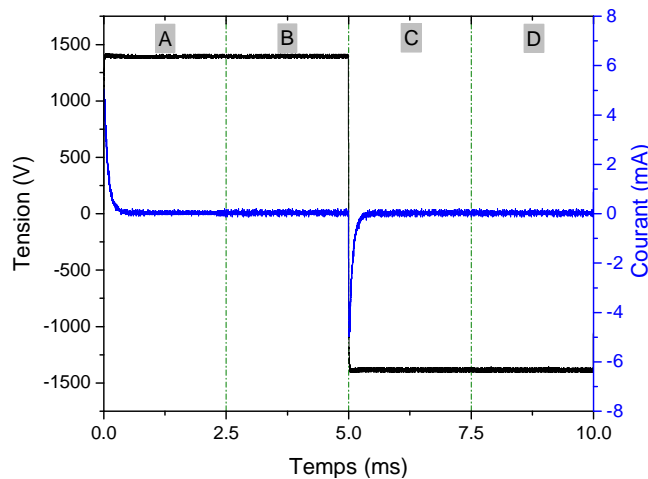
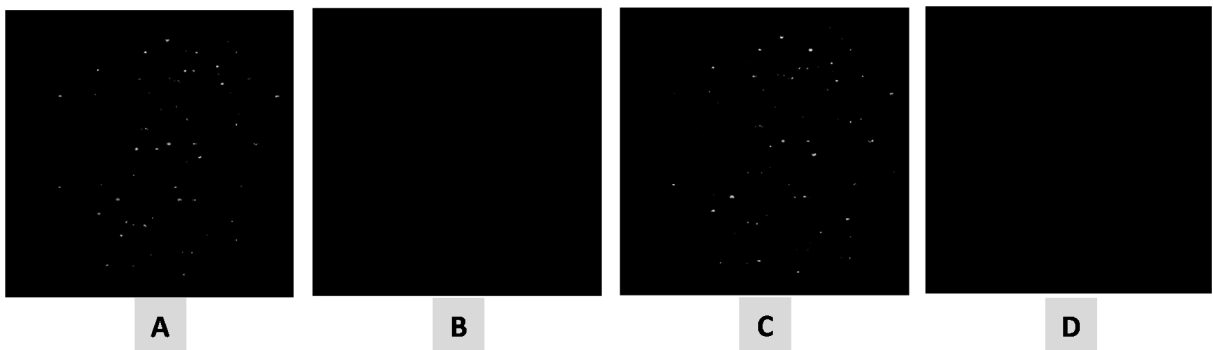


Figure V.30. Schéma du positionnement de la caméra au-dessus de l'actionneur de type 3.

Les Figures V.31 illustrent la morphologie des décharges (vue de dessus). L'amplitude et la fréquence des tensions appliquées sont fixées à 1400 V et 100 Hz, respectivement. Comme pour les cas des configurations plan-plan et fil-plan, les mêmes périodes d'ouverture de la caméra ont été conservées (2,5 ms).



(a) Périodes d'ouverture de la caméra sur les signaux de courant



(b) Images des décharges (temps d'intégration = 2,5 ms)

Figure V.31. Morphologie des décharges en polarités positive et négative pour la configuration de type 3 avec tension carrée. Conditions : $V = 1400 \text{ V}$; $f = 100 \text{ Hz}$.

Pour le signal carré, les images des fenêtres A et C, qui caractérisent les transitions positive et négative de la tension, montrent la présence de spots lumineux à proximité des extrémités des particules placées entre deux électrodes actives successives. En revanche, aucune activité des décharges induites n'est observée sur les fenêtres B et D.

V.3.3.2. Etude de la puissance consommée par les décharges induites

Dans cette étude, une monocouche de particules de cuivre a été étalée sur la surface des différents actionneurs de type 3 (dimensions indiquées dans le Tableau V.1) dans le but de quantifier la puissance consommée par les décharges induites pour différents paramètres électriques et géométriques.

La Figure V.32 illustre l'évolution de la puissance consommée par les décharges induites en fonction du rapport écartement/largeur d'électrodes à différentes fréquences. La courbe de puissance augmente lorsque $R \in]0,125 ; 0,5]$, puis elle se stabilise pour $R \in]0,5 ; 1]$, avant d'augmenter fortement lorsque $R \in]1 ; 4]$. Cette tendance s'explique principalement par l'effet de l'augmentation de la tension pour maintenir le champ réduit constant. Il est intéressant de constater que l'écart entre les courbes de puissance reste quasi-constant. L'analyse des données prouve encore une fois que la puissance augmente proportionnellement avec la fréquence (à l'exception des faibles valeurs de puissance).

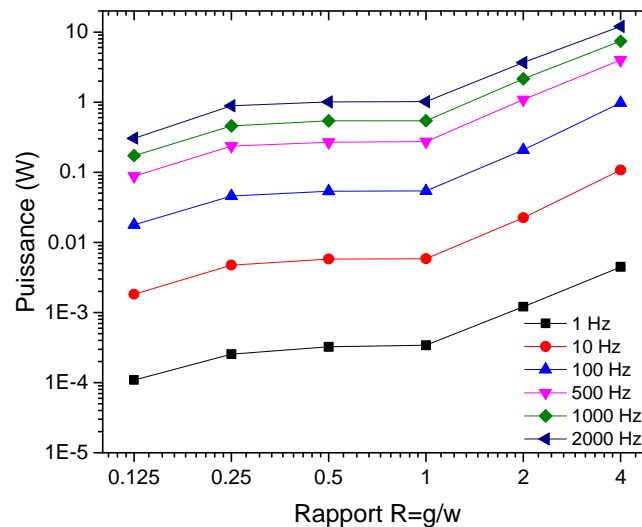


Figure V.32. Variation de la puissance consommée par les décharges induites en fonction du rapport g/w pour différentes valeurs de fréquence. Conditions : Tension appliquée carrée ; $E_r = 1000$ V/mm.

L'étude de l'effet du champ électrique réduit sur la puissance consommée à fréquence constante a permis d'aboutir aux résultats indiqués sur la Figure V.33. Ainsi, pour un rapport écartement/largeur d'électrodes donné, la puissance augmente avec la tension. Compte tenu d'un écart quasi-constant entre les courbes, on peut penser que l'effet du niveau de tension sur les décharges est sensiblement le même pour les 6 configurations géométriques.

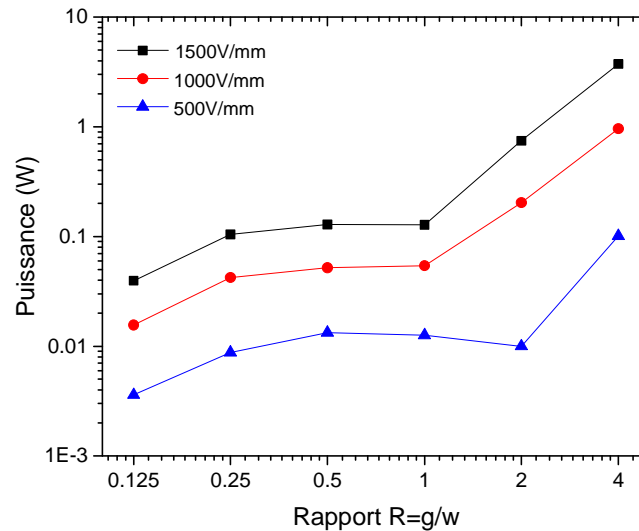


Figure V.33. Variation de la puissance consommée par les décharges induites en fonction du rapport g/w et pour différentes valeurs de champ réduit. Conditions : Tension carré appliquée ; $f = 100$ Hz.

La Figure V.34 présente la variation de la puissance consommée par les décharges induites en fonction du rapport g/w pour les deux signaux de tension: sinusoïdal et carré. Le champ électrique réduit entre deux électrodes de chaque actionneur est maintenu à une valeur constante de 1000 V/mm.

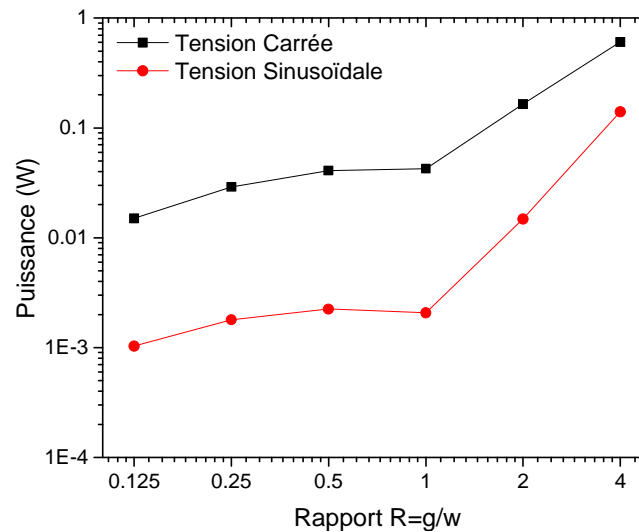


Figure V.34. Effet de la forme d'onde de la tension appliquée sur la variation de la puissance moyenne consommée en fonction du rapport g/w . Conditions : $E_r = 1000$ V/mm ; $f = 100$ Hz.

Les résultats montrent que l'application d'une tension carrée implique une consommation de puissance électrique supérieure par rapport à une tension sinusoïdale. En revanche, l'écart de puissance se réduit lorsque le rapport varie entre 1 et 4, dû à l'augmentation de l'écartement entre les électrodes. Par conséquent, plus la tension appliquée est importante, plus l'écart de puissance entre les cas carré et sinus se réduit. Ceci s'explique par le fait que l'initiation de la décharge s'opère à des tensions plus élevées en sinus, en raison d'une faible variation de tension au moment du changement de polarité par rapport à un signal carré. Il est important de

noter que la dynamique de variation de la tension pour un signal carré est limitée par le type d'amplificateur utilisé. Pour le modèle d'amplificateur Trek 20/20 C, le Slew Rate est d'environ 450 V/ μ s.

V.3.3.3. Effet des décharges sur la récupération du cuivre

Dans les précédentes parties de ce chapitre, nous avons étudié les paramètres électriques et optiques des décharges électriques induites autour de matériaux conducteurs placés au-dessus des actionneurs. Dans cette section, les conséquences de la présence de ces décharges sur l'adhésion électrostatique d'un métal (cas du cuivre) sont analysées.

Les expériences ont été réalisées suivant le protocole du plan rotatif à 180°, utilisé dans la section « modélisation expérimentale » du chapitre III. Les résultats de cette étude sont traduits par les facteurs de récupération du cuivre et la puissance consommée par les décharges induites en fonction des paramètres électriques et géométriques. Les graphes de la Figure V.35 illustrent l'évolution de ces deux facteurs en fonction du rapport écartement/largeur d'électrodes pour les deux formes d'onde de la tension (carrée et sinusoïdale) à fréquence et champ réduit constants. Les résultats ne montrent pas un impact direct des décharges sur la récupération de cuivre. Lorsqu'on analyse le cas de la tension carrée, l'augmentation importante ($\times 20$) de la puissance consommée entre $R = 1$ et $R = 4$ ne se traduit que par une chute du taux de récupération que de quelques %. On peut noter que les deux meilleures configurations géométriques ($R = 0,5$ et $R = 1$) ne font pas partie des cas pour lesquelles la puissance des décharges est importante ($< 0,05$ W). En conclusion, le choix de la configuration géométrique d'une application industrielle doit tenir compte aussi de la puissance consommée et la performance de séparation égale.

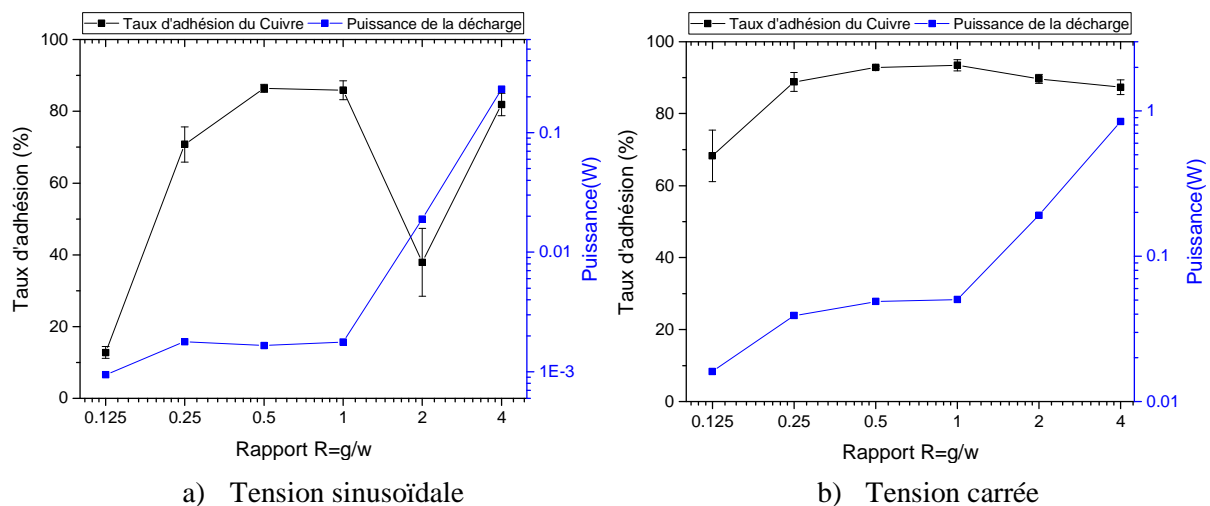


Figure V.35. Variation de la puissance moyenne consommée et le taux de récupération des particules de cuivre en fonction du rapport g/w . Conditions : $E_r = 1000$ V/mm ; $f = 100$ Hz.

Les valeurs de tension et de fréquence ont à la fois un effet sur le taux de récupération et la puissance consommée par des décharges induites comme on peut le voir sur la Figure V.36 (cas de l'actionneur avec un rapport $g/w = 1$). En effet, l'augmentation de la tension se traduit par une augmentation importante de la puissance ($P \propto V^2$), alors que le taux de récupération n'augmente que légèrement pour les fortes valeurs de tension entre 1000 et 1800 V. En d'autres

termes, le gain sur la récupération de cuivre au-delà d'une tension de 1000 V nécessite une consommation de puissance très importante, mais surtout inutile au fonctionnement global de l'installation.

Par ailleurs, l'accroissement de la fréquence se traduit par une augmentation linéaire de la puissance consommée par les décharges induites, alors que le taux de récupération augmente légèrement dans la gamme 1-300 Hz avant de décroître pour les valeurs de fréquence supérieures. Ainsi, le gain en termes de taux de récupération entre 1 et 300 Hz est difficilement acceptable compte tenu des dépenses énergétiques importantes du système (une augmentation de plus de 2 décades).

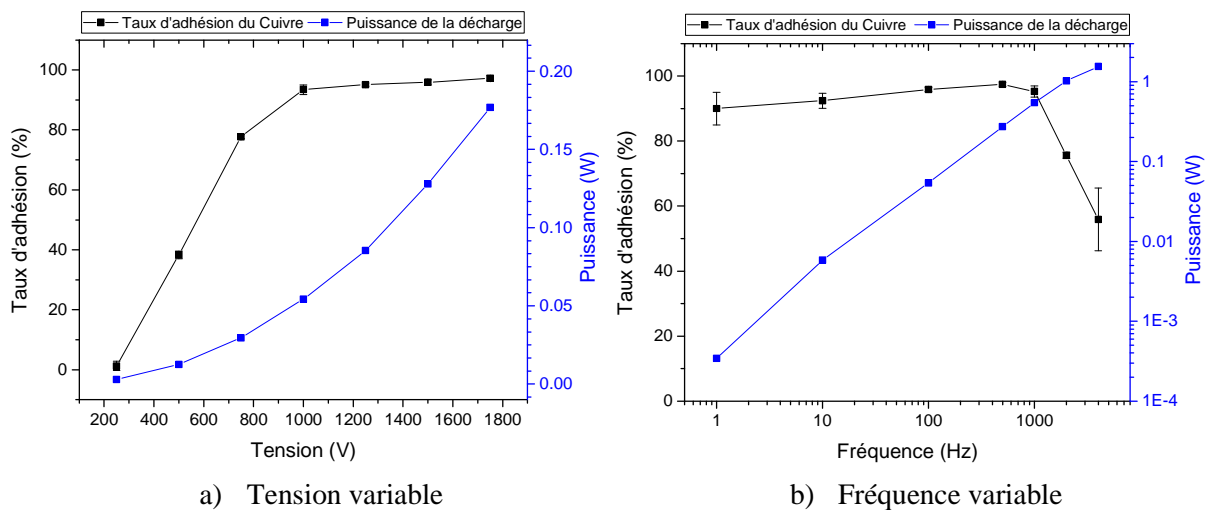


Figure V.36. Evolution de la récupération des particules de cuivre en fonction de la tension et de la fréquence pour le cas de l'actionneur correspondant au rapport $g/w = 1$. Conditions : Tensions carrée ; $E_r = 1000$ V/mm ; $f = 100$ Hz.

Pour choisir la configuration d'actionneur optimale, le niveau de puissance consommée par les décharges induites doit être pris en compte. Ainsi, l'analyse du rapport « taux de récupération / puissance » peut être très utile à la comparaison des différents cas de l'étude. Plus ce rapport est élevé, plus le rendement de l'actionneur est meilleur.

A titre d'exemple, la Figure V.37 montre la variation du rapport taux de récupération / puissance en fonction de la fréquence ou du rapport g/w à champ réduit constant. Si le signal carré est meilleur que le signal sinusoïdal en termes de taux de récupération, la tendance s'inverse lorsqu'on considère le rapport taux de récupération / puissance consommée. Ce résultat s'explique par le fait que les décharges induites, très actives avec un signal carré, n'apporte pas une contribution significative au mécanisme d'adhésion électrostatique.

On peut noter que le meilleur rendement de l'actionneur est obtenu en sinus, à faible fréquence et pour un rapport largeur / écartement inter-électrodes de 0,5.

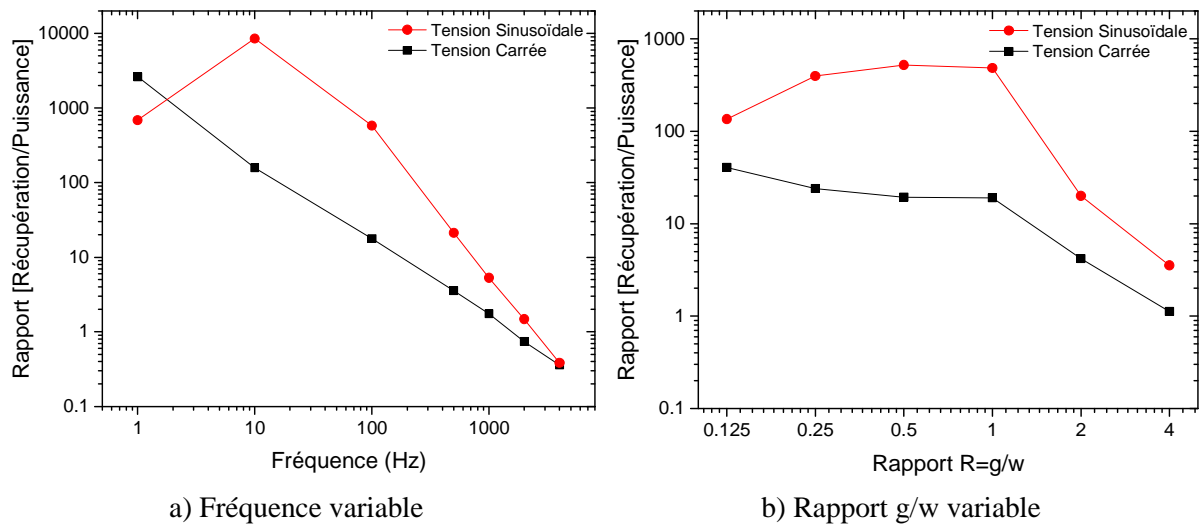


Figure V.37. Variation du rapport taux de récupération / puissance en fonction de la fréquence ($g/w = 1$; $E_r = 1000$ V/mm) et du rapport g/w ($E_r = 1000$ V/mm ; $f = 100$ Hz) pour les deux formes d'onde de la tension appliquée

V.4. Conclusion

L'objectif des travaux réalisés dans le cadre de ce chapitre était d'identifier les caractéristiques des décharges induites au voisinage de la surface de l'actionneur d'adhésion électrostatique lors de la manipulation des particules de cuivre. L'ensemble des informations obtenues ont permis de déterminer l'influence des formes d'ondes, les niveaux de tension, la fréquence des signaux et l'épaisseur de la barrière diélectrique sur le comportement des décharges induites mais aussi la puissance consommée.

L'étude des formes d'onde typiques de la tension, de la charge et du courant a montré que la décharge induite est plutôt homogène et de type « corona-glow » pour la configuration Plan-Plan, alors qu'elle est filamentaire en configuration Fil-Plan. La tension et la fréquence ont un impact direct sur la puissance de la décharge. L'amplitude des impulsions du courant avec une électrode à potentiel flottant sous forme d'un fil est plus importante par rapport à une électrode plane avec un faible rayon de courbure. Contrairement au cas de la charge, il a été observé que la charge transmise dans la configuration Plan-Plan est plus grande par rapport à la configuration Fil-Plan, cela est dû à une surface active plus importante. La même tendance de la puissance a été obtenue lors de l'utilisation des brins de cuivre.

Il a été constaté aussi que l'emploi d'un signal sinusoïdal permet de générer des décharges induites avec une puissance environ 10 fois moins importante qu'un signal carré. En ce qui concerne l'attachement des particules de cuivre sous tension, les résultats n'ont pas montré que les décharges induites ont un impact négatif sur le processus d'électro-adhésion. Enfin, le choix de la configuration optimale en vue d'une application industrielle peut s'appuyer sur la puissance consommée par les décharges induites pour réduire le coût énergétique global de l'installation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Bilan et contributions

Cette thèse s'inscrit dans la volonté de la protection de l'environnement et le développement durable en étudiant un nouveau procédé de séparation électrostatique d'un mélange constitué de matériaux conducteurs et diélectriques à l'échelle de laboratoire, basé sur la technologie des réseaux d'électrodes interposées. La simplicité, le coût réduit de réalisation et la faible consommation d'énergie sont parmi les avantages qui encouragent à utiliser ce type de technologie. La synthèse bibliographique des principaux travaux existant dans la littérature nous a confortée dans l'idée d'utiliser cette technique dans l'application du tri électrostatique de particules. Ceci nous a conduit à mener des études théoriques et appliquées avec des approches multiples (numérique, analytique et expérimentale) traitant l'action de l'électro-adhésion dans le processus du tri électrostatique des mélanges granulaires métal/polymère. Les études réalisées ont permis de dresser un bilan des différents aspects du sujet de thèse.

Sur le plan théorique, la compréhension des phénomènes physiques, relatifs à l'électro-adhésion des matériaux diélectriques et conducteurs, a été renforcée par l'étude analytique et numérique des effets des paramètres électriques et géométriques caractérisant un actionneur d'électro-adhésion, sur la force appliquée à ces matériaux. La comparaison du calcul analytique avec la simulation numérique a permis de constater que les résultats sont proches. Les principaux résultats de cette étude peuvent être synthétisés comme suit :

- L'ordre de grandeur de la force d'électro-adhésion appliquée à un matériau conducteur est nettement plus grand par rapport au cas d'un matériau diélectrique. Le champ électrique généré par le réseau d'électrodes intercalées augmente avec l'augmentation de la tension appliquée, ce qui augmente aussi la force d'EA pour chaque type de matériau.
- L'augmentation de l'épaisseur réduit le risque de claquage lors de la manipulation d'un matériau conducteur, d'une part, et diminue significativement l'adhésion des matériaux diélectriques et conducteurs, d'autre part. La présence des irrégularités aux interfaces de contact cause la diminution de la force d'électro-adhésion.
- L'augmentation de la permittivité de la barrière et le substrat diélectriques influe positivement sur la valeur de la force d'adhésion.
- L'application d'une tension continue génère une force d'électro-adhésion plus grande par rapport à celle générée par une tension alternative. Les résultats de comparaison entre les deux tensions alternatives carrée et sinusoïdale ont montré que la force d'adhésion est plus importante sous une excitation carrée.
- L'influence du rapport entre l'écartement et la largeur des électrodes (g/w) sur l'électro-adhésion dépend des surfaces d'interaction entre l'actionneur et les matériaux. Il a été constaté que la force d'EA est importante lorsqu'une particule est placée entre deux électrodes adjacentes alimentées par une tension suffisamment élevée. L'augmentation de l'écartement entre les électrodes a un effet négatif sur l'adhésion des matériaux.

Sur le plan expérimental, le travail de la thèse a été divisé en trois parties. La première partie a été dédiée à l'analyse du comportement des matériaux sous l'influence des paramètres électriques et géométriques. L'étude paramétrique a mis en évidence les éléments suivants :

- Les matériaux placés au-dessus de la surface d'un actionneur à électro-adhésion sont soumis aux phénomènes d'induction d'électrostatique et de polarisation. Il a été démontré que des particules en métal peuvent s'attacher facilement à la surface de l'actionneur pour toutes les formes d'onde étudiées. En revanche, des particules en polymère n'adhèrent pas dans le cas d'un signal alternatif.
- L'utilisation d'une tension continue n'est pas favorable à l'opération de tri électrostatique, vu que les deux matériaux adhèrent à la surface de l'actionneur.
- La configuration biphasée est plus avantageuse à l'électro-adhésion du métal en comparaison avec le cas triphasé, car la différence de potentiel électrique entre deux électrodes successives est nettement plus grande.

L'objectif de la deuxième partie expérimentale était d'étudier le processus de la séparation d'un mélange granulaire métal/polymère, issues du broyage des câbles électriques, par l'élaboration de deux démonstrateurs de séparation (vibrant et rotatif). La première installation utilise un séparateur dont l'AEA était fixé sur un plan incliné vibrant, alors que la deuxième installation utilise un séparateur dont l'AEA possède une forme cylindrique qui a été conçue pour traiter des mélanges de matériaux en continu. La réalisation et la validation fonctionnelle du dispositif de séparation à cylindre tournant font partie des contributions originales et majeures de cette thèse. L'étude de la séparation d'un mélange de particules comportant le cuivre et le PVC a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Les résultats de l'étude paramétrique sur le séparateur à plan incliné ont montré que l'angle d'inclinaison optimale de l'actionneur est compris entre 10° et 20° .
- Les résultats obtenus sur le séparateur à cylindre tournant ont approuvé les rendements élevés de la séparation, en matière de récupération et de pureté. La performance de la séparation a été sensible aux valeurs de la distance inter-électrodes, la fréquence du signal, la tension appliquée et la vitesse de rotation de l'actionneur.

La troisième partie de l'étude expérimentale a fait l'objet de la caractérisation de la décharge électrique induite et son impact sur l'électro-adhésion. Les résultats de cette étude ont montré l'influence des formes d'ondes, des niveaux de tension, de la fréquence et de l'épaisseur de la barrière diélectrique sur le comportement des décharges induites et la puissance consommée, de sorte que :

- Les formes d'onde typiques de la tension, de la charge et du courant ont montré que les décharges induites dans le cas de la manipulation des particules de cuivre sont filamenteuses.
- La puissance de la décharge augmente simultanément avec l'augmentation de la tension (quadratiquement) et de la fréquence (linéairement). L'amplitude des impulsions de courant est plus grande lorsque le matériau à manipuler possède un rayon de courbure important.

- La valeur de la charge transmise entre l'électrode à potentiel flottant et les électrodes du système, est plus grande lorsque la surface active est importante.
- L'utilisation d'un signal sinusoïdal permet de générer des décharges induites avec une puissance environ 10 fois moins importante qu'un signal carré.
- Malgré la présence de décharges induites autour des particules de cuivre sur la surface de l'AEA, les résultats n'ont pas révélé que ces décharges impactent négativement le processus de l'électro-adhésion.
- Dans une application industrielle de tri par électro-adhésion, le choix de la configuration optimale doit prendre en compte la puissance consommée par les décharges induites afin de réduire le coût énergétique global de l'installation.

Perspectives

Les travaux de recherche sur la séparation électrostatique des matériaux métal/polymère par la technique des réseaux d'électrodes intercalées en exploitant le phénomène d'électro-adhésion sont loin d'être finis. D'autres travaux peuvent être initiés en partant des conclusions de cette thèse.

- Pour renforcer les connaissances théoriques sur le sujet, il serait intéressant d'utiliser les modèles analytiques et numériques sur des particules en mouvement. Ce développement permettra d'introduire toutes les physiques qui peuvent agir sur les particules dans le but de prévoir leurs trajectoires.
- La séparation électrostatique a été étudiée sur un mélange granulaire issu des déchets des câbles électriques et comportant du cuivre et du PVC. Il serait utile d'étudier le tri électrostatique d'autres types de déchets avec des mélanges comportant plus de deux matériaux. Il serait également intéressant d'analyser l'effet de la taille des particules sur le processus de la séparation par cette technologie.
- Il serait intéressant de concevoir des actionneurs d'électro-adhésion sur des supports flexibles pour qu'il puisse s'adapter facilement avec des surfaces courbées.
- La réalisation d'un séparateur avec un actionneur à électro-adhésion de forme cylindrique est une preuve de concept. Des adaptations plus importantes sont nécessaires pour passer de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle.

Annexe 1

A) Validation des modèles existants dans la littérature

La reproduction des cas étudiés par Mao *et al.* [6][16] nous a permis d'obtenir les résultats qui sont représentés sur la figure suivante.

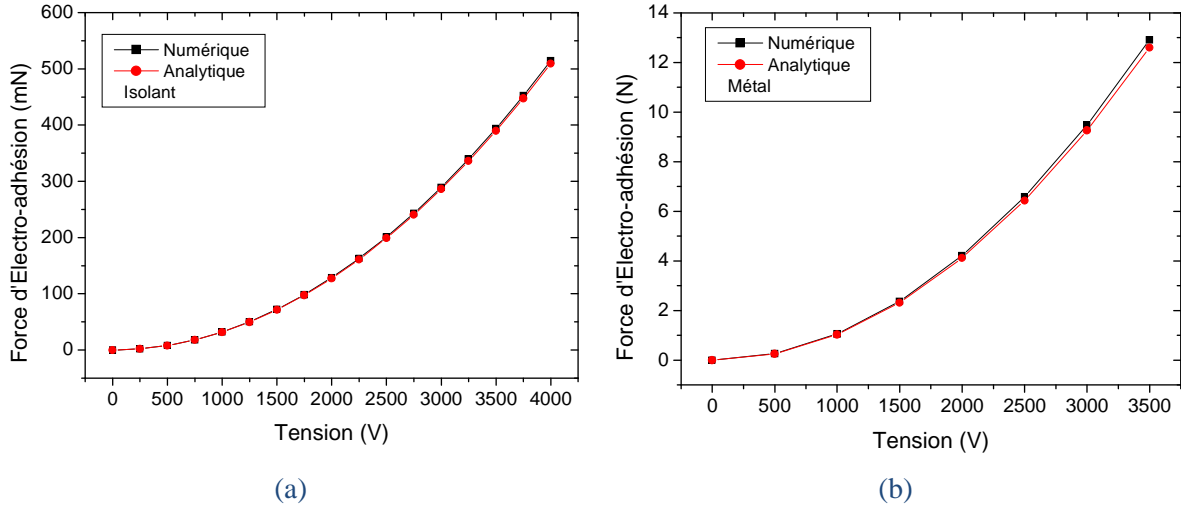


Figure A.1. Evolution de la force d'EA en fonction de la tension appliquée dans les cas : (a) substrat diélectrique et (b) substrat conducteur. Conditions : $d_1 = 0.020$ mm, $d_2 = 0.04$ mm, $d_3 = 0.005$ mm, $d_4 = 20$ mm, $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 3.5$, $\epsilon_{r3} = 1$, $\epsilon_{r4} = 6.4$, $g = w = 1$ mm, $L = 75$ mm.

B) Résolution de l'équation (II.9)

A partir de la solution générale du potentiel électrique dans chaque couche et l'analogie des équations selon les conditions aux limites des interfaces, il est possible de déduire les coefficients suivants :

$$\begin{cases} C_1 = C_2 = C_3 = 0 \\ D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = \frac{V_p + V_n}{2} \end{cases}$$

Par l'utilisation de l'outil de résolution Mathématica et les différentes conditions de continuité, le reste des coefficients qui correspond à chaque couche sont exprimés en fonction de la différence des potentiels V_d qui alimentes les électrodes, les propriétés diélectriques des matériaux et les paramètres de conception du système d'électro-adhésion [207]. Ces coefficients sont donnés comme suit :

$$G_1 = V_d \eta(n) \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{\epsilon_1} \times \frac{\beta \gamma e^{4\lambda d_2} + \alpha \gamma e^{2\lambda d_2} + \alpha \gamma e^{2\lambda d_3} + e^{2\lambda(d_2+d_3)}}{W(n)},$$

$$H_1 = V_d \eta(n) \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{\epsilon_1} \times \frac{\alpha \beta \gamma e^{4\lambda d_2} + \gamma e^{2\lambda d_2} + \beta e^{2\lambda d_3} + \alpha e^{2\lambda(d_2+d_3)}}{W(n)},$$

$$G_2 = 2V_d \eta(n) \frac{e^{2\lambda h_2} (\beta \gamma e^{2\lambda d_2} + e^{2\lambda d_3})}{W(n)},$$

$$H_2 = 2V_d \eta(n) \frac{\gamma e^{2\lambda d_2} + \beta e^{2\lambda d_3}}{W(n)},$$

$$G_3 = 4V_d \eta(n) \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} \frac{e^{2\lambda(d_2+d_3)}}{W(n)},$$

$$H_3 = 4V_d \eta(n) \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} \frac{\lambda e^{2\lambda d_2}}{W(n)},$$

$$G_4 = 8V_d \eta(n) \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3} \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_3 + \varepsilon_4} \frac{e^{2\lambda(d_2+d_3)}}{W(n)},$$

Lorsque,

$$V_d = V_p - V_n, \quad \lambda = \frac{2n\pi}{L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad \beta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}, \quad \gamma = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_4}{\varepsilon_3 + \varepsilon_4},$$

$$\eta(n) = \frac{L}{n^2 \pi^2 (L/2 - 2w)} \cos\left(\frac{2n\pi w}{L}\right),$$

$$W(n) = \beta \gamma e^{4\lambda d_2} + \gamma e^{2\lambda d_2} + \beta e^{2\lambda d_3} + e^{2\lambda(d_2+d_3)}.$$

Références bibliographiques

- [1] BIPRO, Deloitte, Direction générale de l'environnement (Commission européenne), M. Kling, F. Zotz, et D. Huranova, *WEEE compliance promotion exercise: final report*. LU: Office des publications de l'Union européenne, 2018. Consulté le: oct. 05, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/918821>
- [2] H. Louati, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Alibida, et N. Zouzou, « New separation technique of metal/polymer granular materials using an electrostatic sorting device », *J. Electrostat.*, vol. 103, p. 103410, janv. 2020, doi: 10.1016/j.elstat.2019.103410.
- [3] M. N. V. Prasad, M. Vithanage, et A. Borthakur, *Handbook of Electronic Waste Management: International Best Practices and Case Studies*. Butterworth-Heinemann, 2019.
- [4] S. M. Grimes et D. Maguire, « Assessment of priorities in critical material recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment », *Resour. Policy*, vol. 68, p. 101658, oct. 2020, doi: 10.1016/j.resourpol.2020.101658.
- [5] A. K. Gupta, A. Kumar, et V. P. Singh, « Study on Important Techniques and Processes for the Management of Waste Electrical Wires », in *Advances in Industrial and Production Engineering*, Singapore, 2021, p. 147-158. doi: 10.1007/978-981-33-4320-7_13.
- [6] V. Basliu, A. Ciocan, et B. Tudor, « Recovery of Copper from Waste Cables Used in Electrical Applications », *Ann. "Dunarea Jos" Univ. Galati Fascicle IX Metall. Mater. Sci.*, vol. 38, n° 1, Art. n° 1, mars 2015.
- [7] F. Pita et A. Castilho, « Separation of Copper from Electric Cable Waste Based on Mineral Processing Methods: A Case Study », *Minerals*, vol. 8, n° 11, Art. n° 11, nov. 2018, doi: 10.3390/min8110517.
- [8] G. Chauhan, P. R. Jadhao, K. K. Pant, et K. D. P. Nigam, « Novel technologies and conventional processes for recovery of metals from waste electrical and electronic equipment: Challenges & opportunities – A review », *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, n° 1, p. 1288-1304, févr. 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.01.032.
- [9] F. Arslan, C. Celik, et C. Arslan, « Recycling of waste electrical cables », *Mater. Sci. Eng. Int. J.*, vol. 3, janv. 2019, doi: 10.15406/mseij.2019.03.00099.
- [10] A. Merahi, K. Medles, B. M. Bardadi, et A. Tilmatine, « Design and development of a low cost technique for sorting household wastes using eddy current separation process », *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 73, n° 2, p. 203-213, mars 2016, doi: 10.1080/00207233.2015.1135584.
- [11] J. Cui et E. Forsberg, « Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review », *J. Hazard. Mater.*, vol. 99, n° 3, p. 243-263, mai 2003, doi: 10.1016/S0304-3894(03)00061-x.
- [12] R. Q. Honaker, N. Singh, et B. Govindarajan, « Application of dense-medium in an enhanced gravity separator for fine coal cleaning », *Miner. Eng.*, vol. 13, n° 4, p. 415-427, avr. 2000, doi: 10.1016/S0892-6875(00)00023-6.
- [13] S. Koyanaka, H. Ohya, S. Endoh, H. Iwata, et P. Ditzl, « Recovering copper from electric cable wastes using a particle shape separation technique », *Adv. Powder Technol.*, vol. 8, n° 2, p. 103-111, janv. 1997, doi: 10.1016/S0921-8831(08)60469-0.
- [14] N. Aslan, « Modeling and optimization of Multi-Gravity Separator to produce celestite concentrate », *Powder Technol.*, vol. 174, n° 3, p. 127-133, mai 2007, doi: 10.1016/j.powtec.2007.01.007.
- [15] P. M. Gallegos-Acevedo, J. Espinoza-Cuadra, et J. M. Olivera-Ponce, « Conventional flotation techniques to separate metallic and nonmetallic fractions from waste printed circuit boards with particles nonconventional size », *J. Min. Sci.*, vol. 50, n° 5, p. 974-981, sept. 2014, doi: 10.1134/S1062739114050172.

- [16] Y. HIGASHIYAMA et K. ASANO, « Recent Progress in Electrostatic Separation Technology », *Part. Sci. Technol.*, vol. 16, n° 1, p. 77-90, janv. 1998, doi: 10.1080/02726359808906786.
- [17] J.-S. Chang, A. J. Kelly, et J. M. Crowley, *Handbook of Electrostatic Processes*. CRC Press, 1995.
- [18] A. Tilmatine, K. Medles, S.-E. Bendimerad, F. Boukholda, et L. Dascalescu, « Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures », *Waste Manag.*, vol. 29, n° 1, p. 228-232, janv. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.008.
- [19] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, et L. Dascalescu, « Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device », *J. Electrostat.*, vol. 63, n° 6, p. 937-942, juin 2005, doi: 10.1016/j.elstat.2005.03.064.
- [20] H.-S. Jeon, C.-H. Park, B.-G. Cho, et J.-K. Park, « Separation of PVC and Rubber from Covering Plastics in Communication Cable Scrap by Tribo-Charging », *Sep. Sci. Technol.*, vol. 44, n° 1, p. 190-202, janv. 2009, doi: 10.1080/01614940802286040.
- [21] G. Richard, S. Touhami, T. Zeghloul, et L. Dascalescu, « Optimization of metals and plastics recovery from electric cable wastes using a plate-type electrostatic separator », *Waste Manag.*, vol. 60, p. 112-122, févr. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.06.036.
- [22] S. Masuda, K. Fujibayashi, K. Ishida, et H. Inaba, « Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain », *Electr. Eng. Jpn.*, vol. 92, n° 1, p. 43-52, 1972, doi: 10.1002/eej.4390920106.
- [23] R. P. Krape, *Applications study of electroadhesive devices*, Nasa contractor report. Washington, 1968. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://core.ac.uk/reader/85243250>
- [24] J. Guo, J. Leng, et J. Rossiter, « Electroadhesion Technologies for Robotics: A Comprehensive Review », *IEEE Trans. Robot.*, vol. 36, n° 2, p. 313-327, avr. 2020, doi: 10.1109/TRO.2019.2956869.
- [25] H. Louati, N. Zouzou, A. Tilmatine, A. Zouaghi, et R. Ouiddir, « Experimental investigation of an electrostatic adhesion device used for metal/polymer granular mixture sorting », *Powder Technol.*, vol. 391, p. 301-310, oct. 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.06.019.
- [26] A. Zouaghi, « Manipulation de particules diélectriques micrométriques par ondes électrostatiques progressives et stationnaires - Études théorique, expérimentale et numérique », thesis, Poitiers, 2019. Consulté le: mai 31, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2019POIT2296>
- [27] E. Mersch, « Etude de grains et de matière granulaire sous champs électriques », thesis, Université de Liège, Belgique, 2013. Consulté le: déc. 17, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://orbi.uliege.be/handle/2268/137529>
- [28] H. A. Pohl, *Dielectrophoresis: the behavior of neutral matter in nonuniform electric fields (cambridge monographs on physics)*. Cambridge/New York: Cambridge University Press, 1978.
- [29] A. Sayyah, M. N. Horenstein, M. K. Mazumder, et G. Ahmadi, « Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen », *J. Electrostat.*, vol. 81, p. 24-36, juin 2016, doi: 10.1016/j.elstat.2016.02.004.
- [30] T. B. Jones et T. B. Jones, *Electromechanics of Particles*. Cambridge University Press, 2005.
- [31] A. Mizuno, « Electrostatic precipitation », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 7, n° 5, p. 615-624, oct. 2000, doi: 10.1109/94.879357.
- [32] T. J. Lyons et W. D. Scott, *Principles of air pollution meteorology*. London, UK: Bellhaven Press, 1990. Consulté le: déc. 17, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/27258/>
- [33] P. H. McMurry, « A review of atmospheric aerosol measurements », *Atmos. Environ.*, vol. 34, n° 12, p. 1959-1999, janv. 2000, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00455-0.
- [34] D. B. Kittelson, « Engines and nanoparticles: a review », *J. Aerosol Sci.*, vol. 29, n° 5, p. 575-588, juin 1998, doi: 10.1016/S0021-8502(97)10037-4.

- [35] Daniel Eilstein on behalf of the Apehis group *et al.*, « Apehis: Health Impact Assessment of Long-term Exposure to PM_{2.5} in 23 European Cities », *Eur. J. Epidemiol.*, vol. 21, n° 6, p. 449-458, juin 2006, doi: 10.1007/s10654-006-9014-0.
- [36] C.-S. Tang, L.-T. Chang, H.-C. Lee, et C.-C. Chan, « Effects of personal particulate matter on peak expiratory flow rate of asthmatic children », *Sci. Total Environ.*, vol. 382, n° 1, p. 43-51, août 2007, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.04.016.
- [37] B. Dramane, « Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge à barrière diélectrique : étude électrique, granulométrique et aérodynamique », thesis, Poitiers, 2009. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2009POIT2330>
- [38] S. Souakri, « Optimisation des performances d'un procédé industriel d'électrofiltration alimenté par hautes puissances pulsées », thesis, Pau, 2016. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2016PAUU3028>
- [39] K. R. Parker, *Applied Electrostatic Precipitation*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [40] N. Zouzou, C. Mayer-Laigle, X. Rouau, A. Zouaghi, F. Kherbouche, et L. Dascalescu, « Study of Two-Stage-Type Electrostatic Precipitator in Axisymmetric Configuration Applied to Finely Ground Lignocellulosic Materials », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, n° 3, p. 3114-3121, mai 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2885964.
- [41] O. Blejan, « Contribution à l'amélioration du rendement des filtres électrostatiques », thesis, Poitiers, 2009. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2009POIT2297>
- [42] S. Remaoun, F. Miloua, A. Tilmatine, N. Hammadi, N. Zouzou, et L. Dascalescu, « Optimization of a Cost-Effective "Wire-Plate"-Type ESP for Installation in a Medical Waste Incinerator », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, n° 2, p. 1391-1396, mars 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2272607.
- [43] C. Krachai, « Experimental modelling of wire-to-multicylinder Electrostatic Precipitator », *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, n° 10, p. 181-185, oct. 2020, doi: 10.15199/48.2020.10.34.
- [44] D. RAOUTI, « Contribution a L'étude De La Dépollution Des Gaz Toxiques Par Décharges Électriques. », thesis, Oran, Algeria, 2015.
- [45] R. Gouri, « Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré. Application aux particules submicroniques », thesis, Poitiers, 2012. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2012POIT2279>
- [46] A. Aba'a Ndong, « Décharges à barrière diélectrique pulsées de volume et de surface appliquées à la précipitation électrostatique et à la régénération de surface », thesis, Poitiers, 2014. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2014POIT2322>
- [47] A. Fatihou, « Amélioration des performances des matériaux fibreux non-tissés chargés par décharge couronne utilisés pour la filtration de l'air », thesis, Poitiers, 2016. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2016POIT2286>
- [48] B. Benamar, « La faisabilité de l'électrofiltration d'une atmosphère chargée en poussières de bois : Etude expérimentale et numérique », thesis, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748529>
- [49] J.P. BORRA, *Etude des problèmes liés aux précipitateurs électrostatiques pour le traitement des cendres volantes. Conception et test d'un dispositif de mesure de la résistivité des couches poreuses*. Rapport, SUPELEC - LPGP, 1999.
- [50] L. Chen, « Etude Expérimentale de la décharge couronne pour le traitement de l'air intérieur : COV et particules », Thèse, Université Grenoble Alpes, 2018. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02134538>
- [51] M. Khalij, « Caractérisation et modélisation de l'efficacité de filtration d'un électrofiltre de type Cottrell », Thèse, Nancy, 2001. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2001NAN10240>

- [52] T. C. Manley, « The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge », *Trans. Electrochem. Soc.*, vol. 84, n° 1, p. 83, oct. 1943, doi: 10.1149/1.3071556.
- [53] J.-S. Chang, « Recent development of plasma pollution control technology: a critical review », *Sci. Technol. Adv. Mater.*, vol. 2, n° 3-4, p. 571-576, janv. 2001, doi: 10.1016/S1468-6996(01)00139-5.
- [54] U. Kogelschatz, B. Eliasson, et W. Egli, « Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications », *J. Phys. IV*, vol. 07, n° C4, p. C4-47-C4-66, oct. 1997, doi: 10.1051/jp4:1997405.
- [55] U. Kogelschatz, « Collective phenomena in volume and surface barrier discharges », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 257, p. 012015, nov. 2010, doi: 10.1088/1742-6596/257/1/012015.
- [56] V. I. Gibalov et G. J. Pietsch, « The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 33, n° 20, p. 2618-2636, sept. 2000, doi: 10.1088/0022-3727/33/20/315.
- [57] R. Mathon, « Décharge à Barrières Diélectriques à pression atmosphérique pour la charge bipolaire d'aérosol », thesis, Université Paris Saclay, 2015. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01343294>
- [58] R. Gouri, N. Zouzou, A. Tilmatine, E. Moreau, et L. Dascalescu, « Collection of submicron particles using DBD electrostatic precipitator in wire-to-square tube configuration », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 301, p. 012012, juin 2011, doi: 10.1088/1742-6596/301/1/012012.
- [59] N. Jidenko et J. P. Borra, « Self-cleaning, maintenance-free aerosol filter by non-thermal plasma at atmospheric pressure », *J. Hazard. Mater.*, vol. 235-236, p. 237-245, oct. 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.055.
- [60] A. Zouaghi, A. Mekhaldi, R. Gouri, et N. Zouzou, « Analysis of nanosecond pulsed and square AC dielectric barrier discharges in planar configuration: Application to electrostatic precipitation », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, n° 4, p. 2314-2324, 2017, doi: 10.1109/TDEI.2017.006505.
- [61] B. Tabti, « Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface », thesis, Poitiers, 2011. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2011POIT2310>
- [62] B. Tabti, M. R. Mekideche, M.-C. Plopeanu, L. M. Dumitran, L. Herous, et L. Dascalescu, « Corona-Charging and Charge-Decay Characteristics of Nonwoven Filter Media », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, n° 2, p. 634-640, mars 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2041090.
- [63] W. Zhong et N. Pan, « Aerosol Filtration by Fibrous Filters: A Statistical Mechanics Approach », *Text. Res. J.*, vol. 77, n° 5, p. 284-289, mai 2007, doi: 10.1177/0040517507078041.
- [64] A. Fatihou, N. Zouzou, et L. Dascalescu, « Particle Collection Efficiency of Polypropylene Nonwoven Filter Media Charged by Triode Corona Discharge », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, n° 4, p. 3970-3976, juill. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2678979.
- [65] B. Guo, W. Javed, B. W. Figgis, et T. Mirza, « Effect of dust and weather conditions on photovoltaic performance in Doha, Qatar », in *2015 First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, Doha, Qatar, mars 2015, p. 1-6. doi: 10.1109/SGRE.2015.7208718.
- [66] A. Sayyah, « Mitigation of soiling losses in solar collectors: removal of surface-adhered dust particles using an electrodynamic screen », thesis, BOSTON UNIVERSITY, 2015.
- [67] F. W. Schmidlin, « A new nonlevitated mode of traveling wave toner transport », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 27, n° 3, p. 480-487, juin 1991, doi: 10.1109/28.81831.
- [68] H. Kawamoto et N. Hasegawa, « Traveling Wave Transport of Particles and Particle Size Classification », *J. Imaging Sci. Technol.*, vol. 48, n° 5, p. 404-411, sept. 2004.
- [69] I. N. Mahi, « Utilisation de l'instrument virtuel dans des dispositifs électrostatiques », thesis, Sidi Bel Abbes, Algeria, 2018.

- [70] A. Belgacem, « Etude du déplacement et de la séparation des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles », thesis, Sidi Bel Abbes, Algeria, 2020.
- [71] F.B.Tatom, V.Srepel, et R.D.Johnson, *Lunar dust degradation effects and removal/prevention concepts*, Technical Report., vol. II. United States, 1967. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680011610/downloads/19680011610.pdf>
- [72] S. Masuda, « Electrodynamic behaviour of charged aerosol particles in non-uniform alternating fields and its applications in dust control », 1970, Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201300379407>
- [73] F. M. Moesner, « Transportation and manipulation of particles by an AC electric field », thesis, Zurich, 1996. doi: 10.3929/ethz-a-001730128.
- [74] M. N. Horenstein, M. Mazumder, et R. C. Sumner, « Predicting particle trajectories on an electrodynamic screen – Theory and experiment », *J. Electrostat.*, vol. 71, n° 3, p. 185-188, juin 2013, doi: 10.1016/j.elstat.2012.10.005.
- [75] C. I. Calle *et al.*, « Reduced gravity flight demonstration of the Dust Shield technology for optical systems », in *2009 IEEE Aerospace conference*, Big Sky, MT, USA, mars 2009, p. 1-10. doi: 10.1109/AERO.2009.4839567.
- [76] S. Masuda et Y. Matsumoto, « Theoretical characteristics of standing-wave electric curtains », *Electr. Eng. Jpn.*, vol. 93, n° 1, p. 71-77, 1973, doi: <https://doi.org/10.1002/eej.4390930110>.
- [77] A. C. Yen et C. D. Hendricks, « A planar electric curtain used as a device for the control and removal of particulate materials », *J. Electrostat.*, vol. 4, n° 3, p. 255-266, mai 1978, doi: 10.1016/0304-3886(78)90057-8.
- [78] S. van den Driesche, V. Rao, D. Puchberger-Enengl, W. Witariski, et M. J. Vellekoop, « Continuous cell from cell separation by traveling wave dielectrophoresis », *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 170, p. 207-214, juill. 2012, doi: 10.1016/j.snb.2011.01.012.
- [79] D. Hu, W. Balachandran, et W. W. Machowski, « Design of traveling-wave field panel for pharmaceutical powders based on computer simulation of particle trajectories », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 33, n° 3, p. 641-650, juin 1997, doi: 10.1109/28.585853.
- [80] H. Pang, « Dépoussiérage Electrostatique pour Les Particules Submicroniques en Atmosphère Usuelle (Terre)et Raréfiée (Planète Mars) », thesis, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00139238>
- [81] H. Kawamoto, M. Uchiyama, B. L. Cooper, et D. S. McKay, « Mitigation of lunar dust on solar panels and optical elements utilizing electrostatic traveling-wave », *J. Electrostat.*, vol. 69, n° 4, p. 370-379, août 2011, doi: 10.1016/j.elstat.2011.04.016.
- [82] A. Sayyah, R. S. Eriksen, M. N. Horenstein, et M. K. Mazumder, « Performance Analysis of Electrodynamic Screens Based on Residual Particle Size Distribution », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 7, n° 1, p. 221-229, janv. 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2617088.
- [83] B. Guo, W. Javed, C. Pett, C.-Y. Wu, et J. R. Scheffe, « Electrodynamic dust shield performance under simulated operating conditions for solar energy applications », *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 185, p. 80-85, oct. 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2018.05.021.
- [84] J. K. W. Chesnutt et J. S. Marshall, « Simulation of Particle Separation on an Inclined Electric Curtain », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, n° 3, p. 1104-1112, mai 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2253536.
- [85] J. R. Melcher, E. P. Warren, et R. H. Kotwal, « Traveling-wave delivery of single-component developer », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, n° 5, p. 956-961, oct. 1989, doi: 10.1109/28.41264.
- [86] K. Taniguchi *et al.*, « Improved Driving Characteristics for the Toner Transportation System », *NIP Digit. Fabr. Conf.*, vol. 2000, n° 2, p. 740-742, janv. 2000.
- [87] K. Adachi, S. Yamana, et T. Nakamura, « Development System by Toner Transportation Using Traveling Wave Electric Field », *NIP Digit. Fabr. Conf.*, vol. 2005, n° 2, p. 597-601, janv. 2005.

- [88] L. C. Weiss et D. P. Thibodeaux, « Separation of seed by-products by an AC electric field », *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 61, n° 5, p. 886-890, mai 1984, doi: 10.1007/BF02542157.
- [89] S. Masuda, M. Washizu, et M. Iwadare, « Separation of Small Particles Suspended in Liquid by Nonuniform Traveling Field », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-23, n° 3, p. 474-480, mai 1987, doi: 10.1109/TIA.1987.4504934.
- [90] H. Kawamoto et K. Seki, « Mechanism on Traveling-Wave Transport of Particles », *NIP Digit. Fabr. Conf.*, vol. 2004, n° 2, p. 1019-1026, janv. 2004.
- [91] H. Kawamoto, « Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field », *J. Electrostat.*, vol. 66, n° 3-4, p. 220-228, mars 2008, doi: 10.1016/j.elstat.2008.01.002.
- [92] M. Adachi, H. Moroka, H. Kawamoto, S. Wakabayashi, et T. Hoshino, « Particle-size sorting system of lunar regolith using electrostatic traveling wave », *J. Electrostat.*, vol. 89, p. 69-76, oct. 2017, doi: 10.1016/j.elstat.2017.08.002.
- [93] H. Kawamoto, « Electrostatic Particle-Size Classification of Lunar Regolith for In-Situ Resource Utilization », présenté à 7th Symposium on Space Resource Utilization, National Harbor, Maryland, janv. 2014. doi: 10.2514/6.2014-0341.
- [94] A. Zouaghi, N. Zouzou, et L. Dascalescu, « Assessment of forces acting on fine particles on a traveling-wave electric field conveyor: Application to powder manipulation », *Powder Technol.*, vol. 343, p. 375-382, févr. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.065.
- [95] Y. N. Gartstein et J. G. Shaw, « Many-particle effects in travelling electrostatic wave transport », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 32, n° 17, p. 2176-2180, août 1999, doi: 10.1088/0022-3727/32/17/307.
- [96] G. Q. Liu et J. S. Marshall, « Effect of particle adhesion and interactions on motion by traveling waves on an electric curtain », *J. Electrostat.*, vol. 68, n° 2, p. 179-189, avr. 2010, doi: 10.1016/j.elstat.2009.12.007.
- [97] C. E. Johnson, P. K. Srirama, R. Sharma, K. Pruessner, J. Zhang, et M. K. Mazumder, « Effect of particle size distribution on the performance of electrodynamic screens », in *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, Hong Kong, China, 2005, vol. 1, p. 341-345. doi: 10.1109/IAS.2005.1518330.
- [98] P. Atten, H. L. Pang, et J.-L. Reboud, « Study of Dust Removal by Standing-Wave Electric Curtain for Application to Solar Cells on Mars », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, n° 1, p. 75-86, 2009, doi: 10.1109/TIA.2008.2009723.
- [99] C. Calle, B. Mantovani, J. Clements, C. Mazumder, A. Biris, et A. Nowicki, *Electrodynamics shield to remove dust from solar panels on Mars*. 2004.
- [100] Q. Sun, N. Yang, X. Cai, et G. Hu, « Mechanism of dust removal by a standing wave electric curtain », *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, vol. 55, n° 6, p. 1018-1025, juin 2012, doi: 10.1007/s11433-012-4722-9.
- [101] J. Shahmoradi *et al.*, « The Effects of Martian and Lunar Dust on Solar Panel Efficiency and a Proposed Solution », présenté à AIAA Scitech 2020 Forum, Orlando, FL, janv. 2020. doi: 10.2514/6.2020-1550.
- [102] C. I. Calle, C. R. Buhler, M. R. Johansen, M. D. Hogue, et S. J. Snyder, « Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration », *Acta Astronaut.*, vol. 69, n° 11-12, p. 1082-1088, déc. 2011, doi: 10.1016/j.actaastro.2011.06.010.
- [103] C. I. Calle, C. R. Buhler, J. L. McFall, et S. J. Snyder, « Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions », *J. Electrostat.*, vol. 67, n° 2, p. 89-92, mai 2009, doi: 10.1016/j.elstat.2009.02.012.
- [104] H. Kawamoto et T. Shibata, « Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels », *J. Electrostat.*, vol. 73, p. 65-70, févr. 2015, doi: 10.1016/j.elstat.2014.10.011.

- [105] R. Sharma, C. A. Wyatt, J. Zhang, C. I. Calle, N. Mardesich, et M. K. Mazumder, « Experimental Evaluation and Analysis of Electrodynamical Screen as Dust Mitigation Technology for Future Mars Missions », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, n° 2, p. 591-596, mars 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2013542.
- [106] G. Wu, D. Li, J. Yu, T. Yin, et D. Feng, « Further Study of Electric Dust Removal with Transparent Fork Electrodes », *Am. J. Anal. Chem.*, vol. 06, n° 03, Art. n° 03, janv. 2015, doi: 10.4236/ajac.2015.63018.
- [107] A. Sayyah, M. N. Horenstein, et M. K. Mazumder, « Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels », *Sol. Energy*, vol. 107, p. 576-604, sept. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.05.030.
- [108] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, et L. L. Kazmerski, « A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, p. 698-733, juin 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.12.065.
- [109] D. Deb et N. L. Brahmhatt, « Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, p. 3306-3313, févr. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.014.
- [110] M. Mazumder *et al.*, « Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, n° 4, p. 1793-1800, 2013.
- [111] M. Grando, E. Maletz, D. Martins, H. Simas, et R. Simoni, *Robots for Cleaning Photovoltaic Panels: State of the Art and Future Prospects*. 2017.
- [112] M. Mazumder *et al.*, « Electrodynamic removal of dust from solar mirrors and its applications in concentrated solar power (CSP) plants », in *2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, Vancouver, BC, Canada, oct. 2014, p. 1-7. doi: 10.1109/IAS.2014.6978347.
- [113] M. K. Mazumder *et al.*, « Mitigation of Dust Impact on Solar Collectors by Water-Free Cleaning With Transparent Electrodynamical Films: Progress and Challenges », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 7, n° 5, p. 1342-1353, sept. 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2721462.
- [114] N. Afshar-Mohajer, B. Damit, C.-Y. Wu, et N. Sorloaica-Hickman, « Electrostatic particle collection in vacuum », *Adv. Space Res.*, vol. 48, n° 5, p. 933-942, sept. 2011, doi: 10.1016/j.asr.2011.04.030.
- [115] H. Kawamoto et B. Guo, « Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels », *J. Electrostat.*, vol. 91, p. 28-33, févr. 2018, doi: 10.1016/j.elstat.2017.12.002.
- [116] L. Dunn, B. Littmann, J. R. Caron, et M. Gostein, « PV module soiling measurement uncertainty analysis », in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Tampa, FL, USA, juin 2013, p. 0658-0663. doi: 10.1109/PVSC.2013.6744236.
- [117] A. Sayyah, M. N. Horenstein, et M. K. Mazumder, « Performance restoration of dusty photovoltaic modules using electrodynamic screen », in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, New Orleans, LA, juin 2015, p. 1-3. doi: 10.1109/PVSC.2015.7356134.
- [118] J. K. W. Chesnutt, H. Ashkanani, B. Guo, et C.-Y. Wu, « Simulation of microscale particle interactions for optimization of an electrodynamic dust shield to clean desert dust from solar panels », *Sol. Energy*, vol. 155, p. 1197-1207, oct. 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.07.064.
- [119] J. K. W. Chesnutt, B. Guo, et C.-Y. Wu, « Numerical analysis of the effects of particle-particle interactions and particle size on the performance of an electrodynamic dust shield », *J. Electrostat.*, vol. 98, p. 58-68, mars 2019, doi: 10.1016/j.elstat.2019.02.005.
- [120] C.-Y. Chen, J. K. W. Chesnutt, C.-H. Chien, B. Guo, et C.-Y. Wu, « Dust removal from solar concentrators using an electrodynamic screen », *Sol. Energy*, vol. 187, p. 341-351, juill. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.05.044.

- [121] S. Messal, « Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire », thesis, Poitiers, 2016. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2016POIT2304>
- [122] G. Richard, « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires », thesis, Poitiers, 2018. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2018POIT2260>
- [123] A. Mekhalef Benhafssa, « Etude d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux », thesis, Sidi Bel Abbes, Algeria, 2017. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://193.194.79.137/bitstream/123456789/1949/3/D3C_ETT_MEKHALEF_BENHAFSSA_A_bdelkader.pdf
- [124] A. Tilmatine, « Etude de la séparation électrostatique des particules. Exploitation industrielle. », thesis, Sidi Bel Abbes, Algeria, 2004. doi: 10.13140/RG.2.1.2148.5520.
- [125] A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani, et L. Dascalescu, « Séparation électrostatique: complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels », *J. Electrostat.*, vol. 61, n° 1, p. 21-30, mai 2004, doi: 10.1016/j.elstat.2003.11.004.
- [126] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila, et L. Dascalescu, « Comparative Experimental Study of Triboelectric Charging of Two Size Classes of Granular Plastics », *Part. Sci. Technol.*, vol. 33, n° 6, p. 652-658, nov. 2015, doi: 10.1080/02726351.2015.1019020.
- [127] I. C. Dragan, « Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro-électrostatique de matériaux plastiques granulaires », thesis, Poitiers, 2010. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2010POIT2344>
- [128] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahmi, A. Bendaoud, M. Miloudi, et L. Dascalescu, « Experimental Investigation of a New Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Fine Granular Plastics », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, n° 6, p. 4245-4250, nov. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2319584.
- [129] F. Sharmene Ali, I. I. Inculet, et A. Tedoldi, « Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed », *J. Electrostat.*, vol. 45, n° 3, p. 199-211, janv. 1999, doi: 10.1016/S0304-3886(98)00050-3.
- [130] A. Younes, H. Sayah, M. Younes, A. Samuila, et L. Dascalescu, « Behavior of Conducting Particles in a New Electrostatic Separator with Two High-Voltage Electrodes », *Part. Sci. Technol.*, vol. 28, n° 3, p. 207-216, mai 2010, doi: 10.1080/02726351.2010.481573.
- [131] A. Merahi, A. Hader, M. Bekaddour Benatia, K. Medles, et L. Dascalescu, « A new approach for the numerical analysis of an eddy current separator to recover non-ferrous metals from wastes », *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 77, n° 5, p. 749-766, sept. 2020, doi: 10.1080/00207233.2020.1723878.
- [132] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan, et L. Dascalescu, « Separation of Fine Granular Mixtures in S-Plate-Type Electrostatic Separators », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, n° 5, p. 1137-1143, 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.904359.
- [133] K. Medles, L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud, et M. Younes, « Experimental Modeling of the Electrostatic Separation of Granular Materials », *Part. Sci. Technol.*, vol. 25, n° 2, p. 163-171, avr. 2007, doi: 10.1080/02726350701257816.
- [134] Al. Iuga, L. Dăscălescu, R. Morar, I. Csorvassy, et V. Neamiu, « Corona - electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals », *J. Electrostat.*, vol. 23, p. 235-243, avr. 1989, doi: 10.1016/0304-3886(89)90051-X.
- [135] A. Iuga *et al.*, « Removal of Metallic Particles From Acrylonitrile Butadiene Styrene Wastes Using Electrostatic Separation Methods », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, n° 1, p. 322-330, janv. 2011, doi: 10.1109/TIA.2010.2091188.
- [136] L. Dascalescu *et al.*, « Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, n° 5, p. 947-956, oct. 1995, doi: 10.1109/28.464503.

- [137] Al. Iuga, M. Mihailescu, A. Cocis, et L. Dascalescu, « Particle charge neutralization in roll-type electroseparators », *J. Electrostat.*, vol. 40-41, p. 639-644, juin 1997, doi: 10.1016/S0304-3886(97)00067-3.
- [138] A. Younes, M. Younes, H. Sayah, M. Bilici, A. Samuila, et L. Dascalescu, « Effect of spark discharges on the trajectories of insulating particles in roll-type corona-electrostatic separators. Experimental and numerical study », *J. Electrostat.*, vol. 71, n° 1, p. 84-91, févr. 2013, doi: 10.1016/j.elstat.2012.10.003.
- [139] S. Touhami, K. Medles, O. Dahou, A. Tilmatine, A. Bendaoud, et L. Dascalescu, « Modeling and Optimization of a Roll-Type Electrostatic Separation Process Using Artificial Neural Networks », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, n° 4, p. 1773-1780, juill. 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2256451.
- [140] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, A. Bendaoud, A. Samuila, et L. Dascalescu, « Numerical Modeling of Insulating Particles Trajectories in Roll-type Corona-Electrostatic Separators », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, n° 3, p. 629-634, juin 2009, doi: 10.1109/TDEI.2009.5128498.
- [141] L. Dascalescu, P. Ribardière, M. Mihailescu, et P. Levin, « Numerical analysis of induction charging of conductive cylinders in non-uniform electric fields », *J. Electrostat.*, vol. 51-52, p. 597-602, mai 2001, doi: 10.1016/S0304-3886(01)00083-3.
- [142] J. Li, Z. Xu, et Y. Zhou, « Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards », *J. Electrostat.*, vol. 65, n° 4, p. 233-238, avr. 2007, doi: 10.1016/j.elstat.2006.08.004.
- [143] W. Jiang, L. Jia, et X. Zhen-ming, « A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board », *J. Hazard. Mater.*, vol. 161, n° 1, p. 257-262, janv. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.088.
- [144] M. Vakilian et B. Y. Majlis, « Study of interdigitated electrode sensor for lab-on-chip applications », in *2014 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE2014)*, Kuala Lumpur, Malaysia, août 2014, p. 201-204. doi: 10.1109/SMELEC.2014.6920831.
- [145] A. Bratov, S. Brosel-Oliu, et N. Abramova, « Label-Free Impedimetric Biosensing Using 3D Interdigitated Electrodes », in *Label-Free Biosensing*, vol. 16, M. J. Schöning et A. Poghossian, Éd. Cham: Springer International Publishing, 2017, p. 179-198. doi: 10.1007/5346_2017_7.
- [146] Z. Wang *et al.*, « Ultra miniaturized InterDigitated electrodes platform for sensing applications », *Microelectron. Eng.*, vol. 225, p. 111253, mars 2020, doi: 10.1016/j.mee.2020.111253.
- [147] K.-S. Chou et C.-H. Lee, « Fabrication of Silver Interdigitated Electrode by a Stamp Method », *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, p. 1-5, 2014, doi: 10.1155/2014/514508.
- [148] X. Zhou, H. Xu, J. Cheng, N. Zhao, et S.-C. Chen, « Flexure-based Roll-to-roll Platform: A Practical Solution for Realizing Large-area Microcontact Printing », *Sci. Rep.*, vol. 5, n° 1, p. 10402, sept. 2015, doi: 10.1038/srep10402.
- [149] T. Nguyen, « Capacitive Sensing: Water Level Application », thesis, Helsinki, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2016060311714>
- [150] S. Salomon, « Manipulation de microparticules exploitant la force de diélectrophorèse : applications dédiées au tri d'espèces biologiques et à l'assemblage de nano objets », thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. Consulté le: déc. 18, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00662858>
- [151] Y. Okuno, H. Shigemune, Y. Kuwajima, et S. Maeda, « Stretchable Suction Cup with Electroadhesion », *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, n° 1, p. 1800304, janv. 2019, doi: 10.1002/admt.201800304.
- [152] E. W. Schaler, « Thin-Film Electrostatic Actuators and Adhesives for High-Voltage Robotics », thesis, University of California, Berkeley, 2018.

- [153] R. Chen *et al.*, « Time-dependent electroadhesive force degradation », *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, n° 5, p. 055009, mars 2020, doi: 10.1088/1361-665X/ab79b5.
- [154] A. Zouaghi et N. Zouzou, « Impact of spatial harmonic waves on dielectric particles displacement in standing and traveling wave electric fields », *J. Electrostat.*, vol. 98, p. 25-33, mars 2019, doi: 10.1016/j.elstat.2019.01.006.
- [155] A. Zouaghi, N. Zouzou, et P. Braud, « Study of dielectric particles motion in traveling and standing electrostatic waves using particle tracking velocimetry », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 53, n° 38, p. 385502, juill. 2020, doi: 10.1088/1361-6463/ab93f6.
- [156] D. A. Hays, « Role of Electrostatics in Adhesion », in *Fundamentals of Adhesion*, L.-H. Lee, Éd. Boston, MA: Springer US, 1991, p. 249-278. doi: 10.1007/978-1-4899-2073-7_8.
- [157] A. Johnsen et K. Rahbek, « A physical phenomenon and its applications to telegraphy, telephony, etc. », *J. Inst. Electr. Eng.*, vol. 61, n° 320, p. 713-725, juill. 1923, doi: 10.1049/jiee-1.1923.0092.
- [158] E. Mallinckrodt, A. L. Hughes, et W. Sleator, « Perception by the Skin of Electrically Induced Vibrations », *Science*, vol. 118, n° 3062, p. 277-278, sept. 1953, doi: 10.1126/science.118.3062.277.
- [159] J. Mullenbach, M. Peshkin, et J. E. Colgate, « eShiver: Lateral Force Feedback on Fingertips through Oscillatory Motion of an Electroadhesive Surface », *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, n° 3, p. 358-370, juill. 2017, doi: 10.1109/TOH.2016.2630057.
- [160] B. N. J. Persson et J. Guo, « Electroadhesion for soft adhesive pads and robotics: theory and numerical results », *Soft Matter*, vol. 15, n° 40, p. 8032-8039, 2019, doi: 10.1039/C9SM01560D.
- [161] J. Shintake, S. Rosset, B. Schubert, D. Floreano, et H. Shea, « Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electroadhesion Based on Multifunctional Polymer Actuators », *Adv. Mater.*, vol. 28, n° 2, p. 231-238, janv. 2016, doi: 10.1002/adma.201504264.
- [162] G. Monkman, « Workpiece retention during machine processing », *Assem. Autom.*, vol. 21, n° 1, p. 61-67, mars 2001, doi: 10.1108/01445150110381754.
- [163] G. J. Monkman, « Robot Grippers for Use With Fibrous Materials », *Int. J. Robot. Res.*, vol. 14, n° 2, p. 144-151, avr. 1995, doi: 10.1177/027836499501400204.
- [164] J. Cao *et al.*, « Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators », *Extreme Mech. Lett.*, vol. 21, p. 9-16, mai 2018, doi: 10.1016/j.eml.2018.02.004.
- [165] G. Gu, J. Zou, R. Zhao, X. Zhao, et X. Zhu, « Soft wall-climbing robots », *Sci. Robot.*, vol. 3, n° 25, p. eaat2874, déc. 2018, doi: 10.1126/scirobotics.aat2874.
- [166] J. Guo, T. Bamber, M. Chamberlain, L. Justham, et M. Jackson, « Optimization and experimental verification of coplanar interdigital electroadhesives », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 49, n° 41, p. 415304, sept. 2016, doi: 10.1088/0022-3727/49/41/415304.
- [167] C. Cao, X. Gao, J. Guo, et A. Conn, « De-electroadhesion of Flexible and Lightweight Materials: An Experimental Study », *Appl. Sci.*, vol. 9, n° 14, p. 2796, juill. 2019, doi: 10.3390/app9142796.
- [168] T. Bamber *et al.*, « Visualization methods for understanding the dynamic electroadhesion phenomenon », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 50, n° 20, p. 205304, avr. 2017, doi: 10.1088/1361-6463/aa6be4.
- [169] G. J. Monkman, P. M. Taylor, et G. J. Farnworth, « PRINCIPLES OF ELECTROADHESION IN CLOTHING ROBOTICS », *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 1, n° 3, p. 14-20, mars 1989, doi: 10.1108/eb002951.
- [170] G. J. Monkman, « An Analysis of Astrictive Prehension », *Int. J. Robot. Res.*, vol. 16, n° 1, p. 1-10, févr. 1997, doi: 10.1177/027836499701600101.
- [171] G. I. Shim et H. Sugai, « Dechuck Operation of Coulomb Type and Johnsen-Rahbek Type of Electrostatic Chuck Used in Plasma Processing », *Plasma Fusion Res.*, vol. 3, p. 051-051, 2008, doi: 10.1585/pfr.3.051.

- [172] X. Q. Chen et M. Sarhadi, « Investigation of electrostatic force for robotic lay-up of composite fabrics », *Mechatronics*, vol. 2, n° 4, p. 363-373, août 1992, doi: 10.1016/0957-4158(92)90003-7.
- [173] G. J. Monkman, « Compliant robotic devices, and electroadhesion », *Robotica*, vol. 10, n° 2, p. 183-185, mars 1992, doi: 10.1017/S0263574700007608.
- [174] M. A. Graule *et al.*, « Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion », *Science*, vol. 352, n° 6288, p. 978-982, mai 2016, doi: 10.1126/science.aaf1092.
- [175] A. Yamamoto, T. Nakashima, et T. Higuchi, « Wall Climbing Mechanisms Using Electrostatic Attraction Generated by Flexible Electrodes », in *2007 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*, Nagoya, Japan, nov. 2007, p. 389-394. doi: 10.1109/MHS.2007.4420886.
- [176] H. Prahlad, R. Pelrine, S. Stanford, J. Marlow, et R. Kornbluh, « Electroadhesive robots; wall climbing robots enabled by a novel, robust, and electrically controllable adhesion technology », in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, mai 2008, p. 3028-3033. doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543670.
- [177] H. Wang, A. Yamamoto, et T. Higuchi, « Electrostatic-motor-driven electroadhesive robot », in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vilamoura-Algarve, Portugal, oct. 2012, p. 914-919. doi: 10.1109/IROS.2012.6385758.
- [178] D. Ruffatto, J. Shah, et M. Spenko, « Optimization of Electrostatic Adhesives for Robotic Climbing and Manipulation », in *Volume 4: 36th Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B*, Chicago, Illinois, USA, août 2012, p. 1143-1152. doi: 10.1115/DETC2012-71384.
- [179] D. Ruffatto, J. Shah, et M. Spenko, « Optimization and experimental validation of electrostatic adhesive geometry », in *2013 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, mars 2013, p. 1-8. doi: 10.1109/AERO.2013.6496943.
- [180] J. Guo *et al.*, « Experimental study of a flexible and environmentally stable electroadhesive device », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, n° 25, p. 251603, déc. 2017, doi: 10.1063/1.4995458.
- [181] J. Guo, T. Bamber, Y. Zhao, M. Chamberlain, L. Justham, et M. Jackson, « Toward Adaptive and Intelligent Electroadhesives for Robotic Material Handling », *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, n° 2, p. 538-545, avr. 2017, doi: 10.1109/LRA.2016.2646258.
- [182] J. Singh, P. A. Bingham, J. Penders, et D. Manby, « Effects of Residual Charge on the Performance of Electro-Adhesive Grippers », in *Towards Autonomous Robotic Systems*, Cham, 2016, p. 327-338. doi: 10.1007/978-3-319-40379-3_34.
- [183] J. Guo, C. Xiang, et J. Rossiter, « A soft and shape-adaptive electroadhesive composite gripper with proprioceptive and exteroceptive capabilities », *Mater. Des.*, vol. 156, p. 586-587, oct. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.07.027.
- [184] M. A. Graule *et al.*, « Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion », *Science*, vol. 352, n° 6288, p. 978-982, mai 2016, doi: 10.1126/science.aaf1092.
- [185] L. Xu *et al.*, « Giant Voltage Enhancement via Triboelectric Charge Supplement Channel for Self-Powered Electroadhesion », *ACS Nano*, vol. 12, n° 10, p. 10262-10271, oct. 2018, doi: 10.1021/acsnano.8b05359.
- [186] J. Germann, B. Schubert, et D. Floreano, « Stretchable electroadhesion for soft robots », in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, IL, USA, sept. 2014, p. 3933-3938. doi: 10.1109/IROS.2014.6943115.
- [187] R. Liu, R. Chen, H. Shen, et R. Zhang, « Wall Climbing Robot Using Electrostatic Adhesion Force Generated by Flexible Interdigital Electrodes », *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 10, n° 1, p. 36, janv. 2013, doi: 10.5772/54634.

- [188] Rui Chen, Rong Liu, et Hua Shen, « Modeling and analysis of electric field and electrostatic adhesion force generated by interdigital electrodes for wall climbing robots », in *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, nov. 2013, p. 2327-2332. doi: 10.1109/IROS.2013.6696682.
- [189] C. Cao, X. Sun, Y. Fang, Q.-H. Qin, A. Yu, et X.-Q. Feng, « Theoretical model and design of electroadhesive pad with interdigitated electrodes », *Mater. Des.*, vol. 89, p. 485-491, janv. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.162.
- [190] J.-B. Mao, L. Qin, W.-X. Zhang, L. Xie, et Y. Wang, « Modeling and analysis of electrostatic adhesion force for climbing robot on dielectric wall materials », *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 69, n° 1, p. 11003, janv. 2015, doi: 10.1051/epjap/2014140419.
- [191] S. M. J. Mahmoudzadeh Akherat, M. A. Karimi, V. Alizadehyazdi, S. Asalzadeh, et M. Spenko, « A tunable dielectric to improve electrostatic adhesion in electrostatic/microstructured adhesives », *J. Electrostat.*, vol. 97, p. 58-70, janv. 2019, doi: 10.1016/j.elstat.2018.12.001.
- [192] M. Dadkhah, D. Ruffatto, Z. Zhao, et M. Spenko, « Increasing adhesion via a new electrode design and improved manufacturing in electrostatic/microstructured adhesives », *J. Electrostat.*, vol. 91, p. 48-55, févr. 2018, doi: 10.1016/j.elstat.2017.12.005.
- [193] J.-H. Kim, S.-H. Kang, et S. Cho, « Shape design optimization of interdigitated electrodes for maximal electro-adhesion forces », *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 61, n° 5, p. 1843-1855, mai 2020, doi: 10.1007/s00158-020-02576-6.
- [194] R. Chen, Y. Huang, et Q. Tang, « An analytical model for electrostatic adhesive dynamics on dielectric substrates », *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 31, n° 11, p. 1229-1250, juin 2017, doi: 10.1080/01694243.2016.1249689.
- [195] R. Chen, Y. Huang, Q. Tang, et L. Bai, « Modelling and analysis of the electrostatic adhesion performance considering a rotary disturbance between the electrode panel and the attachment substrate », *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 30, n° 21, p. 2301-2315, nov. 2016, doi: 10.1080/01694243.2016.1180949.
- [196] T. Nakamura et A. Yamamoto, « Modeling and control of electroadhesion force in DC voltage », *ROBOMECH J.*, vol. 4, n° 1, p. 18, déc. 2017, doi: 10.1186/s40648-017-0085-3.
- [197] K. H. Koh, R. M. Kuppan Chetty, et S. G. Ponnambalam, « Modeling and simulation of Electrostatic Adhesion for Wall Climbing Robot », in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Karon Beach, Thailand, déc. 2011, p. 2031-2036. doi: 10.1109/ROBIO.2011.6181590.
- [198] J. Guo, T. Bamber, J. Petzing, L. Justham, et M. Jackson, « Experimental study of relationship between interfacial electroadhesive force and applied voltage for different substrate materials », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, n° 5, p. 051602, janv. 2017, doi: 10.1063/1.4975602.
- [199] A. S. Chen et S. Bergbreiter, « A comparison of critical shear force in low-voltage, all-polymer electroadhesives to a basic friction model », *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, n° 2, p. 025028, févr. 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa5484.
- [200] K. Choi *et al.*, « Quantitative Electrode Design Modeling of an Electroadhesive Lifting Device Based on the Localized Charge Distribution and Interfacial Polarization of Different Objects », *ACS Omega*, vol. 4, n° 5, p. 7994-8000, mai 2019, doi: 10.1021/acsomega.9b00071.
- [201] J. Guo, M. Tailor, T. Bamber, M. Chamberlain, L. Justham, et M. Jackson, « Investigation of relationship between interfacial electroadhesive force and surface texture », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 49, n° 3, p. 035303, janv. 2016, doi: 10.1088/0022-3727/49/3/035303.
- [202] S. Zelmat, « Etude des propriétés électriques d'un matériau polyimide à haute température : application à la passivation des composants de puissance en carbure de silicium », thesis, Toulouse 3, 2006. Consulté le: mars 23, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2006TOU30017>

- [203] C. Liu, S. Wang, S. Xu, H. Wang, et X. Luo, « Modeling and Analysis of a Climbing Platform Based on Inter-digital Electrode Adhesion Film », in *2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Changchun, août 2018, p. 1269-1274. doi: 10.1109/ICMA.2018.8484358.
- [204] D. Ruffatto, A. Parness, et M. Spenko, « Improving controllable adhesion on both rough and smooth surfaces with a hybrid electrostatic/gecko-like adhesive », *J. R. Soc. Interface*, vol. 11, n° 93, p. 20131089, avr. 2014, doi: 10.1098/rsif.2013.1089.
- [205] J. Guo, T. Bamber, T. Hovell, M. Chamberlain, L. Justham, et M. Jackson, « Geometric Optimisation of Electro-adhesive Actuators Based on 3D Electrostatic Simulation and its Experimental Verification », *IFAC-Pap.*, vol. 49, n° 21, p. 309-315, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.574.
- [206] M. Ciavarella et A. Papangelo, « A Simplified Theory of Electro-adhesion for Rough Interfaces », *Front. Mech. Eng.*, vol. 6, p. 27, juin 2020, doi: 10.3389/fmech.2020.00027.
- [207] J. Mao, L. Qin, Y. Wang, J. Liu, et L. Xue, « Modeling and simulation of electrostatic attraction force for climbing robots on the conductive wall material », in *2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Tianjin, China, août 2014, p. 987-992. doi: 10.1109/ICMA.2014.6885832.
- [208] G. Brandstetter et S. Govindjee, *Chucking Pressures for Idealized Coulomb-type Electrostatic Chucks*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 2011.
- [209] J. U. Jeon, K.-Y. Park, et T. Higuchi, « Contactless suspension and transportation of glass panels by electrostatic forces », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 134, n° 2, p. 565-574, mars 2007, doi: 10.1016/j.sna.2006.05.016.
- [210] S. J. Woo et T. Higuchi, « Electric field and force modeling for electrostatic levitation of lossy dielectric plates », *J. Appl. Phys.*, vol. 108, n° 10, p. 104906, nov. 2010, doi: 10.1063/1.3487938.
- [211] H. Louati, R. Ouiddir, N. Zouzou, et A. Tilmatine, « Study of the electrostatic separation of a metal/polymer mixture based on electro-adhesive force », in *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, oct. 2020, p. 1-12. doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334808.
- [212] H. Louati, R. Ouiddir, N. Zouzou, et A. Tilmatine, « Numerical and experimental analysis of the electrostatic separation of a metal/polymer mixture based on electro-adhesive force », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, p. 1-1, 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3123265.
- [213] A. Alibida *et al.*, « Experimental analysis of a new attraction force applied on metal particles », *Part. Sci. Technol.*, vol. 38, n° 4, p. 505-510, mai 2020, doi: 10.1080/02726351.2019.1600084.
- [214] U. Lesprit, « Étude expérimentale du chargement triboélectrique d'une bille de verre en interaction avec des matériaux polymères », thesis, Poitiers, 2020. Consulté le: janv. 10, 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2020POIT2261>
- [215] A. Ema, D. Yasuda, K. Tanoue, et H. Masuda, « Tribo-charge and rebound characteristics of particles impact on inclined or rotating metal target », *Powder Technol.*, vol. 135-136, p. 2-13, oct. 2003, doi: 10.1016/S0032-5910(03)00153-0.
- [216] T. Matsuyama et H. Yamamoto, « Charge transfer between a polymer particle and a metal plate due to impact », *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, n° 3, p. 602-607, mai 1994, doi: 10.1109/28.293706.
- [217] M. C. Bouzidi, « Étude d'une Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) homogène dans l'azote à pression atmosphérique: Effet mémoire et Optimisation du transfert de Puissance », thesis, Toulouse 3, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2013TOU30186>

Titre : Utilisation de la technique des ondes voyageuses pour la séparation des mélanges de particules métal/plastique

Résumé : Différents domaines scientifiques et industriels exploitent l'application d'un champ électrique non uniforme dans la manipulation et le déplacement des particules. Le convoyeur électrostatique fait partie des procédés électrostatiques employés dans cette application. Constitué d'une série d'électrodes parallèles et alimentées par des tensions polyphasées, le convoyeur électrostatique a été largement étudié dans le domaine des ondes voyageuses pour le transport des particules fines telles que les particules de tonner. Cette configuration d'électrodes est aussi utilisée dans les systèmes électro-adhésifs des surfaces conductrices et isolantes. Des recherches récentes ont permis l'application de ce dispositif dans le domaine du dépoussiérage des panneaux photovoltaïques afin d'augmenter la perméabilité lumineuse, et dans le monde industriel et les systèmes de fabrication automatisée pour la manipulation et le déplacement d'objets. L'objectif de ce travail est d'optimiser l'action de l'électro-adhésion dans un dispositif de tri électrostatique des mélanges de particules métal/plastique, en contrôlant les principaux paramètres électriques et géométriques du système d'électrodes intercalées. L'idée est d'aboutir à nouveau séparateur basé sur l'utilisation d'un convoyeur électrostatique sous forme de cylindre tournant. Pour atteindre cet objectif, une première étude théorique et numérique a été effectuée afin d'interpréter l'effet des grandeurs physiques agissant sur le comportement des matériaux au-dessus de la surface des convoyeurs. Cette étude a été suivie par une modélisation expérimentale des différents paramètres électriques et géométriques contribuant au processus de séparation. Les résultats de ces deux études ont permis de comprendre le mode d'action des forces électrostatiques dans le processus de manipulation des particules conductrices et diélectriques d'une part, et de démontrer le potentiel des convoyeurs électrostatiques dans le domaine de la séparation électrostatique. L'étude a été complétée par la caractérisation des décharges électriques qui apparaissent lors de l'action de l'électro-adhésion sur des particules conductrices.

Mots-clés : Séparation électrostatique, force d'électro-adhésion, champ électrique, convoyeur électrostatique, simulation numérique, décharges électriques, optimisation expérimentale.

Title : Using the travelling waves technique for the separation of metal/plastic particles mixtures

Abstract : Different scientific and industrial fields exploit the application of a non-uniform electric field in the manipulation and movement of particles. The electrostatic conveyor is one of the electrostatic processes used in this application. Consisting of a series of parallel electrodes and powered by polyphase voltages, the electrostatic conveyor has been widely studied in the field of traveling waves for the transport of fine particles such as toner particles. This electrode configuration is also used in electro-adhesive systems with conductive and insulating surfaces. Recent research has led to the application of this device in the field of photovoltaic panel cleaning to increase light permeability, and in the industrial world and automated manufacturing systems for the manipulation and movement of objects. The objective of this work is to optimize the electro-adhesion actions in an electrostatic sorting device for metal/plastic particle mixtures, by controlling the main electrical and geometrical parameters of the interdigitated electrode system. The idea is to achieve a new separator based on the use of an electrostatic conveyor in the form of a rotating cylinder. To achieve this objective, a first theoretical and numerical study was carried out to interpret the effect of the physical quantities acting on the behavior of materials above the surface of the conveyors. This study was followed by experimental modeling of the different electrical and geometrical parameters contributing to the separation process. The results of these two studies have permitted us to understand the action mode of electrostatic forces in the handling process of conductive and dielectric particles on the one hand, and to demonstrate the potential of electrostatic conveyors in the field of electrostatic separation on the other hand. The study was completed by the characterization of an electric discharge that appears during the action of electro-adhesion on conductive particles.

Keywords: Electrostatic separation, electro-adhesive force, electric field, electrostatic conveyor, numerical simulation, electric discharges, experimental optimization.