

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THÈSE

Présentée au Département d'Electrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

**Option: Réseaux Electriques et
Haute Tension**

Par

M. Imed Eddine ACHOURI

THÈME

**Modélisation du fonctionnement optimal des filtres et
séparateurs électrostatiques des matériaux poudreux**

Soutenue le 23/02/2019 devant le Jury:

| | | | |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| M. BAYADI Abdelhafid | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Président |
| M. NOURI Hamou | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Directeur de thèse |
| M. ZEGHLOUL Thami | M.C.A. | Univ. Poitiers-France | Co-Directeur |
| M. SAYAH Samir | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Examineur |
| M. TEGUAR Madjid | Professeur | ENP- Alger | Examineur |
| M. MEDLES Karim | Professeur | Univ. D. L. Sidi Bel Abbes | Invité |

Dédicaces

Je commence par rendre grâce à dieu et à sa bonté, pour la patience, la compétence et le courage qu'il m'a donné pour arriver à cette thèse.

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien-être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder la santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mes chers frères « Abdelghani, Samir, Farid »

À mes adorables sœurs

À ma grande famille

Succès et que Dieu, le tout-puissant, vous protège et vous garde.

À mes chers petits neveux et nièces

- Midou, mouadh, Mouhamed, Nazim, Raïd, Awab, Mahdi, Amine, Abderrahmane, Anes.

- Tasnime, Ritage, Ranim, Asile, Alaâ.

À tous mes chers amis

Remerciements

Je tiens à remercier, en tout premier lieu, Pr. Hamou NOURI, Directeur de cette thèse.

Pour ses multiples conseils, suggestions et pour toutes les heures qu'il a consacrées à établir cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande générosité, disponibilité et ses qualités d'écoute et de compréhension.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

- Pr. Abdelhafid BAYADI.
- Pr. Samir SAYAH.
- Pr. Madjid TEGUAR.

Je tiens à remercier mon co-directeur de thèse Dr. Thami ZEGHLOUL d'avoir bien assuré la direction et l'encadrement de mes travaux de thèse. Merci pour votre gentillesse, votre patience et vos précieux conseils. J'ai beaucoup apprécié travailler à vos côtés tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Je garde toujours beaucoup de plaisir à discuter avec vous et à bénéficier de vos conseils.

Je suis redevable à la contribution du Pr. Lucian DASCALESCU qui m'a dirigé au cours des dernières années de cette thèse. Il a consacré beaucoup de temps et d'énergie pour son avancement. Qu'il trouve ici ma profonde reconnaissance et mes profonds respects.

Je tiens à remercier spécialement Pr. Karim MEDLES. Je vous remercie d'avoir cru en mes capacités, je garderai dans mon cœur votre générosité, votre compréhension et votre efficacité. Pour tout ce que vous m'avez donné, je vous remercie très sincèrement.

Je remercie très chaleureusement les membres de l'équipe Tribo Electrostatique de l'institut Pprime à IUT d'Angoulême, qui m'ont beaucoup aidé et encouragé : Gontran RICHARD, Bogdan NEAGOE, Yopa PRAWATYA.

Je voudrais aussi remercier les membres du laboratoire Sérïana de Batna.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres du laboratoire de génie électrique de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

Je remercie également tous les membres de laboratoires LAS et laboratoires de l'institut d'optique et de mécanique de précision de l'Université Ferhat Abbas de Sétif.

Sommaire

| | |
|---|----------|
| INTRODUCTION GENERALE | XIV |
| <i>Chapitre 01</i> | <i>1</i> |
| ETAT DE L'ART | 1 |
| 1.1. Décharges couronnes..... | 1 |
| 1.1.1. Mécanismes de formation et processus physiques des décharges électriques | 2 |
| 1.1.2. Polarité de la décharge couronne | 4 |
| 1.1.2.1 Couronne positive..... | 4 |
| 1.1.2.2 Couronne négative | 5 |
| 1.1.2.3 Couronne alternative | 6 |
| 1.1.3. Techniques de mesure du champ électrique | 7 |
| 1.1.3.1 Méthode de compensation | 8 |
| 1.1.3.2 Méthode à sonde capacitive..... | 9 |
| 1.1.3.3 Sonde à induction | 9 |
| 1.1.3.4 Moulin à champ | 12 |
| 1.1.3.5 Sonde à condensateur vibrant | 14 |
| 1.2. Filtres électrostatiques..... | 16 |
| 1.2.1. Principe de fonctionnement | 16 |
| 1.2.2. Forces à l'origine de la migration des particules chargées..... | 18 |
| 1.2.2.1 Force de Coulomb | 18 |
| 1.2.2.1 Force diélectrophorétique..... | 18 |
| 1.2.3. Description du phénomène électrostatique | 19 |
| 1.3. Séparateurs électrostatiques..... | 20 |
| 1.3.1. Séparateurs électrostatiques isolants-conducteurs | 20 |
| 1.3.2. Dispositifs de chargement triboélectrique..... | 21 |
| 1.3.2.1 Chargement par ventilateur | 21 |
| 1.3.2.2 Chargement par cyclone | 21 |
| 1.3.2.3 Chargement statique | 22 |
| 1.3.2.4 Chargement à lit fluidisé | 23 |
| 1.3.2.5. Chargement tribo-aéro-électrostatique: | 24 |
| 1.3.3. Séparateurs tribo-électrostatiques | 25 |
| 1.3.3.1 Séparateur triboélectrique à tapis roulant : | 25 |
| 1.3.3.2 Séparateur à chute libre..... | 25 |
| 1.3.3.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses : | 26 |
| 1.3.3.4 Séparateur à électrodes cylindriques tournantes: | 27 |
| 1.3.3.5 Séparateur tribo-aéro-électrostatique- à disques tournants: | 28 |
| 1.3.3.6 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales: | 28 |
| 1.4. Conclusion..... | 29 |

| | |
|--|---------------|
| <i>Chapitre 02</i> | 30 |
| ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA DECHARGE COURONNE | 30 |
| 2.1. Sonde polarisée | 30 |
| 2.1.1. Description de la sonde polarisée circulaire | 31 |
| 2.1.2. Principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire | 31 |
| 2.2. Description du dispositif expérimental..... | 33 |
| 2.3. Source de tension..... | 35 |
| 2.4. Mesure de la tension appliquée..... | 36 |
| 2.5. Tension de polarisation V_b | 37 |
| 2.6. Mesure des paramètres physiques de l'air..... | 37 |
| 2.7. Résultats et discussions..... | 37 |
| 2.7.1. Choix des matériaux utilisés..... | 37 |
| 2.7.1.1Analyse Chimique | 38 |
| 2.7.1.2Analyse Physique..... | 39 |
| 2.7.1.2Analyse électrique | 41 |
| 2.7.2. Etude des paramètres de la décharge couronne en présence de la polarisation..... | 45 |
| 2.7.2.1Courant de décharge en présence de la polarisation..... | 45 |
| 2.7.2.2Vérification du fonctionnement de la sonde..... | 46 |
| 2.7.2.3Champ électrique | 47 |
| 2.7.2.4 Densité de courant électrique..... | 48 |
| 2.7.2.5Densité de la charge d'espace..... | 49 |
| 2.8. Conclusion..... | 51 |
| <i>Chapitre 03</i> | 52 |
| MODELISATION ET SIMULATION DE LA DECHARGE COURONNE DANS LES ELECTROFILTRES FIL-CYLINDRE | 52 |
| 3.1. Modélisation mathématique de la décharge couronne..... | 52 |
| 3.2. Méthodes numériques utilisées..... | 54 |
| 3.2.1. Modèle géométrique..... | 55 |
| 3.2.2. Conditions aux limites | 55 |
| 3.3. Résultats et interprétation..... | 56 |
| 3.3.1. Modélisation dans le logiciel COMSOL Multiphysics | 56 |
| 3.3.2. Le maillage du domaine de calcul | 57 |
| 3.3.3. Potentiel électrique | 59 |
| 3.3.4. Champ électrique | 60 |
| 3.3.5. Densité d'énergie | 62 |
| 3.3.6. Densité de courant électrique | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.7. Densité de la charge d'espace | 65 |
| 3.3.8. Validation des résultats de la simulation | 65 |
| 3.4. Conclusion | 66 |
| <i>Chapitre 04</i> | <i>67</i> |
| SEPARATEUR TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE POUR | |
| MATERIAUX PULVERULENTS | |
| 67 | |
| 4.1. Matériels et méthode..... | 67 |
| 4.1.1. Matériaux..... | 67 |
| 4.1.1.1Caractéristiques de PP..... | 68 |
| 4.1.1.2Caractéristiques du PC | 69 |
| 4.1.2. Appareils de mesure..... | 69 |
| 4.1.2.1 Mesure de l'humidité relative..... | 70 |
| 4.1.2.2 Mesure de la charge..... | 70 |
| 4.1.2.3 Mesure de masse granulaire..... | 71 |
| 4.1.2.4 Instrumentation virtuelle | 71 |
| 4.1.2.5 Analyse de la pureté des produits séparés | 72 |
| 4.1.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes disques..... | 74 |
| 4.1.4. Méthodologie expérimentale..... | 78 |
| 4.2. Etude des effets des facteurs de la séparation | 80 |
| 4.2.1. Etude en régime cyclique..... | 80 |
| 4.2.1.1L'effet de la durée du processus de tribo-charge..... | 80 |
| 4.2.1.2L'effet de la haute tension | 82 |
| 4.2.1.3L'effet du débit d'air de fluidisation | 83 |
| 4.2.2. Etude en régime continu | 85 |
| 4.2.2.1 Effet du débit massique | 85 |
| 4.2.2.2Séparation continue des mélanges non équilibrés | 87 |
| 4.3. Modélisation du processus de séparation électrostatique..... | 89 |
| 4.3.1. Domaine expérimental..... | 90 |
| 4.3.1.1Intervalle d'étude de la tension positive | 90 |
| 4.3.1.1Intervalle d'étude de la vitesse de l'air de fluidisation débitée par la soufflante..... | 90 |
| 4.3.1.1Intervalle d'étude du temps de chargement des particules | 90 |
| 4.3.2. Application de la méthode des plan d'expérience composites..... | 91 |
| 4.3.3. Calcul des coefficients..... | 92 |
| 4.3.3.1 Pour la Récupération et la pureté du produit PC..... | 94 |
| 4.3.3.1Pour la Récupération et la pureté du produit PP | 94 |
| 4.3.4. Qualité descriptive du modèle..... | 94 |
| 4.4. Influence des facteurs choisis sur les réponses | 95 |
| 4.4.1. Produit PC | 95 |
| 4.4.2. Produit PP | 96 |
| 4.4.3. Détermination du point de fonctionnement optimal..... | 98 |

4.5. Conclusion.....99

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES101

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1.1. Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphériques. | 3 |
| Figure 1.2. Topographie de la décharge couronne volumique en configuration pointe-plaque.[29] | 4 |
| Figure 1.3. Description de la décharge couronne positive | 5 |
| Figure 1.4. Description de la décharge couronne négative..... | 6 |
| Figure 1.5. Principe de la méthode de compensation..... | 8 |
| Figure 1.6.Principe de la sonde capacitive | 9 |
| Figure 1.7. Sonde à induction..... | 10 |
| Figure 1.8. Mesure du champ électrique en absence de l'électrode de masse..... | 10 |
| Figure 1.9.Modèle capacitif de la sonde à induction..... | 11 |
| Figure 1.10. Schéma de principe d'un moulin à champ. | 13 |
| Figure 1.11. Principe du voltmètre sans contact..... | 14 |
| Figure 1.12. Principe de modulation par variation de capacité | 15 |
| Figure 1.13. Principe de mesure du potentiel de surface à l'aide de la sonde à condensateur vibrant..... | 16 |
| Figure 1.14. Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique | 17 |
| Figure 1.15. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour..... | 20 |
| Figure 1.16.Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur | 21 |
| Figure 1.17. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [51] | 22 |
| Figure 1.18.Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique..... | 22 |
| Figure 1.19. Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation..... | 23 |
| Figure 1.20. Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique..... | 24 |
| Figure 1.21. Séparateur à tapis roulant..... | 25 |
| Figure 1.22. Représentation schématique d'un séparateur à chute libre à cylindre tournant | 26 |
| Figure 1.23.Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses | 27 |
| Figure 1.24. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à cylindres tournant | 27 |
| Figure 1.25. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants | 28 |
| Figure 1.26. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales.. | 28 |
| Figure 2.1.Modèle et position de la sonde circulaire de Tassicker..... | 31 |
| Figure 2.2.Dispositif globale pour l'identification des paramètres de la décharge couronne | 33 |
| Figure 2.3.: Filtre électrostatique de configuration Fil – Cylindre..... | 34 |
| Figure 2.4. Les deux modèles de sondes utilisées : (a) cuivre, (b) aluminium..... | 35 |
| Figure 2.5. Schéma de l'installation haute tension..... | 36 |
| Figure 2.6.Appareil de test chimique spectromètre type SPECTRO MAXx. | 38 |
| Figure 2.7. Machine de traction MTS Exceed 40..... | 40 |
| Figure 2.8.Représentation de la force en fonction de l'allongement. | 40 |

| | |
|--|----|
| Figure 2.9. Variation du courant de décharge pour la polarité positive en fonction des matériaux de la sonde et de l'électrode active. | 42 |
| Figure 2.10. Variation du courant de décharge pour la polarité négative en fonction des matériaux de la sonde et de l'électrode active. | 42 |
| Figure 2.11. Variation du courant de décharge pour la polarité positive en fonction de la distance entre les électrodes à l'intérieur du cylindre collecteur ($S_{Al} - F_{Cu}$). | 43 |
| Figure 2.12. Variation du courant de décharge pour la polarité négative en fonction de la distance entre les électrodes à l'intérieur du cylindre collecteur ($S_{Al} - F_{Cu}$). | 44 |
| Figure 2.13. Variation du courant en fonction de la tension de polarisation pour différents niveaux de la tension appliquée (Polarité positive: $S_{Al} - F_{Cu}$). | 45 |
| Figure 2.14. Variation du rapport des courants en fonction de la tension de polarisation pour différents niveaux de la tension appliquée (Polarité positive: $S_{Al} - F_{Cu}$). | 46 |
| Figure 2.15. Variation du champ électrique au niveau du cylindre en fonction de la tension appliquée (Polarité positive: $S_{Al} - F_{Cu}$). | 47 |
| Figure 2.16. Variation de la densité de courant en fonction de la tension appliquée | 49 |
| Figure 2.17. Variation de la densité de la charge d'espace en fonction de la tension appliquée (Polarité positive: $S_{Al} - F_{Cu}$). | 50 |
| Figure 3.1. Configuration fil-cylindre utilisée en simulation numérique: | 55 |
| Figure 3.2. Conditions aux limites | 56 |
| Figure 3.3. Représentation de la configuration fil cylindre dans l'interface Comsol-Multiphysics..... | 57 |
| Figure 3.4. Le maillage triangulaire du domaine de calcul. | 58 |
| Figure 3.5. Distribution du potentiel. | 59 |
| Figure 3.6. Variation du potentiel électrique en fonction du rayon de l'électrode. | 60 |
| Figure 3.7. Distribution du champ électrique. | 61 |
| Figure 3.8. Variation du champ électrique en fonction du rayon fil. | 62 |
| Figure 3.9. Distribution la densité de l'énergie électrique. | 62 |
| Figure 3.10. Variation de la densité de l'énergie électrique en fonction du rayon. | 63 |
| Figure 3.11. Distribution de la densité de courant dans l'espace interélectrodes. | 64 |
| Figure 3.12. Variation de la densité de courant électrique en fonction du rayon. | 64 |
| Figure 3.13. Variation de la densité de la charge d'espace en fonction de la distance radiale pour différents rayon. | 65 |
| Figure 3.14. Comparaison entre le champ électrique calculé et mesuré expérimental. | 66 |
| Figure 4.1. Position de PP et PC dans la série expérimentale triboélectrique. | 67 |
| Figure 4.2. Particule de PP utilisées de taille $250\mu\text{m} \leq \text{PP} \leq 500\mu\text{m}$ (a), formules chimiques du PP (b). | 68 |
| Figure 4.3. Particule de PC utilisées de taille $250\mu\text{m} \leq \text{PC} \leq 500\mu\text{m}$ (a), formules chimiques du PC (b). | 69 |
| Figure 4.4. Cage de Faraday. | 70 |
| Figure 4.5. Electromètre numérique Keithley modèle 6514 | 71 |
| Figure 4.6. Balance numérique KERN 440-47N. | 71 |
| Figure 4.7. Interface graphique de l'instrumentation virtuelle. | 72 |
| Figure 4.8. Colorimètre NH310 potable (a), Table d'étalonnage (b) et Interface du logiciel CQCS3 pour la mesure et l'analyse de la pureté (c). | 73 |

| | |
|---|----|
| Figure 4.9. Schéma descriptif (a) et photographie (b) du séparateur tribo-aéro-électrostatiques à deux électrodes disques..... | 75 |
| Figure 4.10. Représentation schématique du système d'injection d'air..... | 76 |
| Figure 4.11. Représentation schématique des électrodes-disques tournantes alimentés en haute tension. | 76 |
| Figure 4.12. Représentation schématique des collecteurs | 77 |
| Figure 4.13. Panneau (a) et armoire de commande de l'installation (b); | 78 |
| Figure 4.14. Interface du logiciel LabView, pour les mesures des charges électriques et des masses des particules de PP et de PC collectées dans les deux collecteurs..... | 79 |
| Figure 4.15. Variation de la masse des granules séparés en fonction du temps pour différents moments du processus de tribo-charge (t = 0 s; 20 s; 40 s; 60 s; 80 s) : (a) PP ; (b) PC..... | 81 |
| Figure 4.16. Variation de la charge des granules séparés en fonction du temps pour différents moments du processus de tribo-charge (t = 0 s; 20 s; 40 s; 60 s; 80 s) : (a) PP ; (b) PC..... | 81 |
| Figure 4.17. Puretés à différents moments du processus de tribo-charge (t = 0 s; 20 s; 40 s; 60 s; 80 s). | 81 |
| Figure 4.18. Variation de la masse des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de la tension (U = ± 4 kV; ± 8 kV; ± 12 kV; ± 16 kV; ± 20 kV) : (a) PP ; (b) PC..... | 82 |
| Figure 4.19. Variation de la charge des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de la tension (U = ± 4 kV; ± 8 kV; ± 12 kV; ± 16 kV; ± 20 kV) : (a) PP ; (b) PC..... | 83 |
| Figure 4.20. Puretés à différentes valeurs de la tension (U = ± 4 kV; ± 8 kV; ± 12 kV; ± 16 kV; ± 20 kV)... | 83 |
| Figure 4.21. Variation de la masse des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de débit d'air de la soufflante (D = 500 rpm; 750 rpm; 1000 rpm; 1250 rpm; 1500 rpm): (a) PP ; (b) PC. | 84 |
| Figure 4.22. Variation de la charge des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de débit d'air de la soufflante (D = 500 rpm; 750 rpm; 1000 rpm; 1250 rpm; 1500 rpm): (a) PP ; (b) PC. | 84 |
| Figure 4.23. Puretés à différentes valeurs de débit d'air du soufflant (D = 500 rpm; 750 rpm; 1000 rpm; 1250 rpm; 1500 rpm)..... | 84 |
| Figure 4.24. Vibro-transporteur du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques | 86 |
| Figure 4.25. Variation de la masse des granules séparés en fonction du débit massique, à différentes valeurs de débit d'alimentation (Q = 1.5 g/s; 2.5 g/s; 6 g/s; 10 g/s) : (a) PP ; (b) PC..... | 86 |
| Figure 4.26. Variation de la charge des granules séparés en fonction du débit massique, à différentes valeurs de débit d'alimentation (Q = 1.5 g/s; 2.5 g/s; 6 g/s; 10 g/s) : (a) PP ; (b) PC..... | 86 |
| Figure 4.27. Puretés des deux produits à différentes valeurs de débit massique: d'alimentation (t = 20 s, D = 1000 tr / min et U = ± 4 kV, Q = 1.5 g/s; 2.5 g/s; 6 g/s; 10 g/s). | 87 |
| Figure 4.28. Variation de la masse de granules séparés en fonction du temps, pour différentes compositions de mélange (t = 20 s, D = 1000 rpm et U = ± 4 kV) : (a) PP ; (b) PC | 88 |
| Figure 4.29. Variation de la charge de granules séparés en fonction du temps, pour différentes compositions de mélange (t = 20 s, D = 1000 rpm et U = ± 4 kV) : (a) PP ; (b) PC | 88 |
| Figure 4.30. Pureté des produits séparés, pour différentes compositions de mélange (t = 20 s, D = 1000 rpm et U = ± 4 kV)..... | 88 |
| Figure 4.31. Représentation schématique d'un processus..... | 89 |
| Figure 4.32. Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite..... | 91 |
| Figure 4.33. Effets de chaque facteur sur la réponse pour le produit PP..... | 96 |
| Figure 4.34. Effets de chaque facteur sur la réponse pour le produit PP..... | 97 |
| Figure 4.35. Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0 en fonction des paramètres (tensions, temps de chargement)..... | 98 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 2.1. Différents éléments de composition du fil de l'électrode active..... | 39 |
| Tableau 2.2. Résultats de l'exécution des essais sur différents rayons des fils..... | 41 |
| Tableau 4.1. Table d'étalonnage pour les mélanges de produits allant de 0% à 100%. | 74 |
| Tableau 4.2. Récupération et pureté des produits PP e PC collectés dans les 17 expériences. | 92 |
| Tableau 4.3. Matrice d'expérience et résultats expérimentaux d'un plan composite centré..... | 93 |
| Tableau 4.4. Résultats des coefficients Q^2 et R^2 | 95 |
| Tableau 4.5. Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0..... | 99 |
| Tableau 4.6. Comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux..... | 99 |

Listes des Acronymes et Symboles

Symboles

| | |
|------------------------|--|
| a | Paramètre fourni par le colorimètre |
| A_0 | Constante |
| b | Paramètre fourni par le colorimètre |
| B | Coefficient de recombinaison des ions |
| B_0 | Constante |
| C | Paramètre fourni par le colorimètre |
| (C) | Plan de garde. |
| C_0 | Capacité entre les deux surfaces (E1) et (S0) |
| d | Distance interélectrodes |
| d_p | Diamètre de la particule |
| D | Débit d'air |
| D | Vecteur du déplacement électrique |
| D_i | coefficient de diffusion des porteurs de charge |
| e^- | Electron |
| E | Champ électrique |
| (E) | Electrode |
| E_b | Champ de polarisation |
| E_i | Champ électrique à la surface du fil |
| E_m | Champ électrique mesuré |
| E_0 | Amplitude du champ électrique |
| E_p | Champ électrique de Peek |
| E_s | Champ seuil |
| E_y | Module de Young |
| f | Fréquence |
| F_{DEP} | Force diélectrophorétique |
| F_e | Force de coulomb |
| g | Intervalle d'air entre la sonde et l'électrode (E1) |
| h | Paramètre fourni par le colorimètre |
| I | Courant moyen de la décharge |
| I_0 | Courant initial au plan ($V_b=0, x=0$) |
| I_s | Courant collecté par la sonde pour $V_b \neq 0$ |
| I_{S0} | Courant collecté par la sonde pour $V_b = 0$ |
| J | Densité de courant |
| \vec{J}_+, \vec{J}_- | Densités de courant positif et négatif |
| \vec{J}_{cond} | Courant de conduction |
| \vec{J}_{diff} | Courant de diffusion |
| K | Constante de la résistance équivalente |
| k_B | Constante de Boltzmann |
| K | Constante |
| K' | Constante qui dépend de la configuration des électrodes |
| m | Masse |
| m_d | Masse cage faraday droite |
| m_g | Masse cage faraday gauche |
| M_j | Position des charges dans le maillage |
| n | Vitesse de rotation des disques |
| N | Nombre total d'essais |
| P_e | Pente de la caractéristique $I/I_0=f(V_b)$ |
| P_{ij} | Coefficient liant la charge q_j au potentiel ϕ_{ij} |
| Q | Débit massique |
| r_e | Rayon intérieur de l'électrode |

| | |
|----------------------|--|
| r_m | Rayon effectif de la sonde |
| R_e | Rayon extérieur de l'électrode |
| R_0 | Résistance haute tension |
| R_S | Rayon réel de la sonde. |
| R_{tm} | Résistance à la traction |
| R_u | Résistance du voltmètre de crête |
| (S) | Sonde |
| S_E | Section de l'électrode |
| S_s | Section réelle de la sonde |
| t | Temps |
| T | Température |
| U | Haute tension |
| U_{mb} | Vitesse minimale de fluidisation |
| U_{mf} | Vitesse minimale de bullage |
| U_t | Vitesse limite de chute des particules |
| V | Différence de potentiel appliquée entre deux électrodes |
| V_{app} | Tension appliquée |
| V_b | Tension de polarisation de la sonde. |
| V_c | Tension de claquage |
| V_{plan} | Potentiel à la surface du plan |
| V_s | Tension seuil de l'effet couronne |
| δ | Densité relative de l'air |
| ϵ_m | Permittivité du milieu. |
| ϵ_0 | Permittivité électrique du vide |
| Φ_S | Flux à travers la sonde pour $V_b \neq 0$ |
| Φ_{S0} | Flux à travers la sonde pour $V_b = 0$ |
| Φ_{S1} | Flux dû à la polarisation |
| μ | Mobilité des ions |
| μ^+ et μ^- | Mobilités moyennes des ions positifs et des ions négatifs |
| ρ | Densité de la charge d'espace |
| ρ^+ et ρ^- | Densités de charge d'espace des ions positifs et des ions négatifs |
| σ | Conductivité électrique. |

Acronymes

| | |
|------|--|
| DC | Courant continue |
| DEEE | Déchets d'équipements électriques et électroniques |
| HT | Haute tension |
| MC | Méthode des caractéristiques |
| MDF | Méthode des différences finies |
| MEF | Méthode des éléments finis |
| MSC | Méthode des charges fictives |
| MTF | Méthode des tubes de flux |
| MVF | Méthode des volumes finis |
| PC | Polycarbonate |
| PE | Plan d'expérience |
| PES | Précipitateur électrostatique |
| PP | Polypropylène |

INTRODUCTION GENERALE



Charles-Augustin Coulomb

Né le 14 juin 1736 à Angoulême et mort le 23 août 1806 à Paris, Charles-Augustin Coulomb est un officier, ingénieur et physicien français. Il est passé à la postérité pour la formulation précise des lois du frottement solide, et pour l'invention du pendule de torsion, du dynamomètre de précision qui lui ont permis de formuler la loi d'attraction entre solides électrisés.

Les forces du champ électrique sont actuellement utilisées pour manipuler des particules ou des gouttelettes en suspension dans de nombreux domaines [1]: peinture [2, 3], poudrage électrostatique [4, 5], précipitation électrostatique (PES) [6], pulvérisation électrique de liquides, guidage électrostatique de poudres (par rideaux électriques), séparation électrostatique de granules [8, 7], ...etc.

Dans tous ces cas, les particules ou gouttelettes en suspension doivent être électriquement chargées. Ainsi, sous l'effet du champ électrique, elles sont dirigées ou entraînées vers une cible, une zone de capture ou de séparation, etc.

La précipitation électrostatique est un procédé industriel utilisé pour l'élimination efficace des cendres transportées par les fumées et des poussières présentes dans l'air, grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées. Les précipitateurs électrostatiques (PES)[9] appelés également électrofiltres ou dépoussiéreurs électrostatiques [10], sont des installations largement utilisées depuis le début du 20^{ème} siècle pour épurer les fumées. Ils prennent une part importante dans la filtration des rejets industriels dans l'atmosphère. Les dépoussiéreurs électrostatiques sont actuellement les séparateurs les plus utilisés par l'industrie, en particulier pour les grands débits gazeux. On les trouve, par exemple, dans les industries métallurgiques et chimiques ou celle du ciment, ainsi que pour traiter les fumées produites par les centrales électriques brûlant du charbon pulvérisé. Le succès de ce procédé s'explique par la grande efficacité de filtration (en général, supérieure à 99% en masse) [11] et la faible perte de charge dans ces installations de traitement. De nos jours, la qualité de l'air est devenue une préoccupation majeure qui a de nombreux impacts sur la santé, la vie et les activités de l'homme.

La séparation électrostatique [12, 13]est une nouvelle technologie caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien. Elle représente une technologie économiquement viable pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques [14] ainsi que pour la purification des minerais [15] et des produits agroalimentaires [16]. Son utilisation dans ces industries nécessite le développement de nouveaux procédés et de nouvelles installations afin d'améliorer les performances, tout en respectant une réglementation de plus en plus sévère respectueuse de l'environnement. Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage, de multiples recherches ont été réalisées par l'Institut PPRIME de Poitiers en partenariat avec les sociétés APR2 de Bonnières sur Seine et CITF de Saint Cybardeaux en Charente, France, pour la mise au point de procédés efficaces de séparation électrostatique de différents types de mélange de matériaux granulaires.

Des séparateurs électrostatiques à chute libre sont déjà largement utilisés dans l'industrie pour le tri des mélanges granulaires de plastiques [17, 18]. La société APR2 a notamment déposé conjointement avec le CNRS un brevet d'invention concernant un séparateur tribo-aéro-électrostatique pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, capable de séparer des mélanges de matériaux plastiques granulaires dont la taille peut varier de 1 mm à 6 mm [19]. La séparation électrostatique est de plus en plus utilisée pour le recyclage des métaux, pour des raisons liées aux difficultés croissantes d'extraction et d'épuisement des ressources, mais aussi à la préservation de l'environnement [20, 21]. Dans ce domaine, l'Institut PPRIME a conçu et la société CITF a fabriqué un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques pour le tri des matériaux pulvérulents dont les tailles peuvent être supérieures ou inférieures au millimètre. Le présent travail a été consacré d'une part aux mesures des paramètres de la décharge couronne à savoir ; courant de décharge, tension appliquée, tension seuil, densité du courant et champ électrique. Il s'agit de mettre en évidence l'influence des paramètres géométriques tels que l'espace interélectrodes et les paramètres physiques sur les caractéristiques de la décharge couronne. Ce travail a été réalisé dans le laboratoire de génie électrique de l'université A. M. de Béjaia au bloc haute tension.

Le volet expérimental a consisté à développer des dispositifs et à étudier leur efficacité pour le dépoussiérage électrostatique. L'importance d'une décharge couronne dans un PES en configuration fil-cylindre a été mise en évidence en tenant compte des nombreux facteurs géométriques et physiques en jeu.

D'autre part, l'objectif de la thèse était également de montrer la faisabilité de la à deux électrodes disques tournantes séparation tribo-électrostatique de mélanges de matériaux poudreux isolant. Les recherches se sont focalisées sur des techniques faisant appel à trois mécanismes physiques différents pour la charge des matériaux, la décharge couronne, l'induction électrostatique et l'effet triboélectrique.

Un nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique a été conçu par l'équipe Tribo-électrostatique de l'Institut PPRIME (IUT d'Angoulême, France) qui a piloté sa fabrication par la société CITF (Saint-Cybardeaux, France). Les particules se chargent par effet triboélectrique dans un lit fluidisé, en présence d'un champ électrique, créé entre les deux électrodes disques connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées et entraînées par un moteur à vitesse variable.

Ces recherches contribuent à la compréhension des phénomènes physiques rencontrés lors de la séparation électrostatique des particules poudreuses isolantes, dont les trajectoires sont difficiles à contrôler, en raison de l'influence importante des forces aérodynamiques en jeu et de leur faible poids.

Nous avons organisé ce travail de thèse de doctorat en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons l'état de l'art des décharges électriques et de leurs applications. Les principaux éléments constituant les précipitateurs électrostatiques d'aérosols, leur principe de fonctionnement, leurs propriétés électriques et leur filtration électrostatique sont décrits. Nous présentons aussi les différents types d'électrofiltres, les types de mécanismes de charge des particules et les forces à l'origine de la migration des particules chargées. Nous terminons cet état de l'art par les techniques de séparation des isolants basées sur l'électrostatique et par les principes de fonctionnement de certains dispositifs de triboélectrisation et de séparation électrostatique.

Le deuxième chapitre est consacré à la théorie et au principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire introduite pour la mesure du champ électrique. L'étude expérimentale réalisée au Laboratoire de Génie Electrique de l'Université de Béjaia (L.G.E.B) a consisté à déterminer les différents paramètres de la décharge couronne bipolaire à savoir ; courant de décharge, tension appliquée, tension seuil, densité du courant et le champ électrique. Nous mettons également en évidence l'influence des paramètres géométriques tels que l'espace entre le cylindre et l'électrode active (fil). Outre le relevé de la caractéristique courant-tension, nous avons tracé les distributions du champ électrique et de la densité de courant au plan mis à la terre.

Le troisième chapitre est réservé à la modélisation et à la simulation numérique de la décharge couronne en géométrie fil - cylindre des électrofiltres. Cette partie a consisté à exploiter les résultats expérimentaux du chapitre deux pour mettre au point un modèle numérique fiable par discrétisation des équations mathématiques sous le logiciel Comsol-Multiphysics 4.3b.

Le quatrième chapitre propose l'étude d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes disques basé sur une technologie récemment développée pour le traitement des déchets plastiques poudreux. L'étude de la séparation des particules poudreuses ainsi que l'influence de plusieurs paramètres, ont été réalisées en examinant les évolutions de la masse, de la charge et de la pureté dans chaque bac collecteur durant le processus de séparation à l'aide de l'instrumentation virtuelle. Les techniques de mesure utilisées ont permis une meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu.

L'étude du régime de fonctionnement continu s'est révélée nécessaire pour l'amélioration de ce séparateur en vue de son utilisation en milieu industriel, les résultats obtenus ont fait l'objet d'une modélisation et d'une optimisation du dispositif par la méthodologie des plans d'expériences pour la quantification des effets des variables de contrôle du séparateur. Pour confirmer la performance de ces plans, quatre expériences ont été réalisées pour la vérification du point optimal.

Enfin, dans la conclusion générale, nous dégageons les résultats essentiels de cette étude ainsi les perspectives de recherches qui en découlent.

Chapitre 01

ÉTAT DE L'ART

Des charges électriques libres sont omniprésentes dans l'atmosphère, elles sont dues à certains agents ionisants extérieurs permanents tels que les radiations cosmiques et la radioactivité naturelle. Ainsi en général, il n'existe pas des gaz qui soient isolants électriques parfaits. Dans l'air ambiant, ces charges dans leur mouvement, peuvent se multiplier par collisions ionisantes avec les atomes et les molécules du gaz. Ces phénomènes de conduction sont connus sous le nom de décharges électriques.

La première partie de ce chapitre, sera consacrée à l'étude du mécanisme de la décharge couronne utilisée pour la charge des poussières en vue de leur collecte dans des filtres électrostatiques. Dans la deuxième partie, nous allons présenter les différents types des précipitateurs électrostatiques et leur principe de fonctionnement. Enfin, l'étude bibliographique de différentes installations de séparation tribo-électrostatique fera l'objet de la dernière partie du chapitre.

1.1. Décharges couronnes

La décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz au voisinage d'un conducteur porté à une tension dont le champ électrique environnant est intense mais non disruptif. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation. Ce type de décharge ne nécessite aucune source externe d'ionisation pour se développer, on dit que c'est une décharge auto entretenue (autonome). Cependant, la présence d'un électron initial pour amorcer la décharge est nécessaire [22, 23].

La décharge couronne qui, habituellement, a lieu à pression atmosphérique est souvent associée à deux électrodes asymétriques [24]. L'électrode active de faible rayon de courbure (ex. une pointe ou un fil mince) est portée à un potentiel élevé. L'électrode passive de rayon de courbure important (ex. une plaque plate ou un cylindre) est mise à la terre [25, 26].

La décharge peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode active. Les premières expériences sur l'effet couronne qui datent du début du siècle dernier, étaient réalisées à l'aide de fils minces de dixièmes millimètres de diamètre. Portés à une tension suffisante, il se forme autour d'eux une gaine lumineuse de couleur bleu-violet dont l'épaisseur augmente avec la tension. Ce phénomène rappelle le halo lumineux qui apparaît lors des éclipses à

la périphérie du soleil ou de la lune. C'est la présence de cette lueur qui a donné naissance à l'expression, maintenant universellement employée d'effet couronne ou corona [27].

1.1.1. Mécanismes de formation et processus physiques des décharges électriques

Un électron placé dans un champ électrique uniforme ($E = V/d$, où V est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes de distances d) est accéléré et peut ioniser des atomes ou des molécules, tel que $A_t + e^- \rightarrow A_t + 2e^-$. L'ionisation d'une espèce conduit donc à la formation d'une particule chargée et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquérir une énergie suffisante pour ioniser une seconde particule. Ce mécanisme d'ionisation successive est connu sous le nom d'«avalanche électronique» ou de «décharge de Townsend».

Pour que la décharge soit auto-entretenu, il est nécessaire que tout électron qui quitte la zone d'ionisation soit remplacé. Chaque électron doit créer suffisamment d'ions positifs, de photons et d'espèces métastables pour qu'au moins l'un d'eux puisse produire un nouveau électron.

Sous l'influence du champ électrique appliqué, toutes les particules ainsi créées vont se déplacer dans l'espace interélectrodes et générer un courant électrique, le courant de décharge.

La figure (1.1) décrit le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée. La courbe permet de distinguer quatre régimes [28]:

- *Régime I* : le courant est très faible ($\leq 10^{-12}$ A), dû à la présence d'ions issus de la radioactivité naturelle ou du rayonnement cosmique. Dans ce cas, le champ électrique est trop faible pour assurer l'avalanche électronique.
- *Régime II* : lorsque la tension atteint une valeur seuil V_0 , le champ est assez intense pour qu'un électron puisse ioniser une particule environnante. Le processus d'avalanche se déclenche alors sans que le critère d'auto-entretien soit pour autant satisfait. La décharge a besoin d'une source externe complémentaire : on parle de régime de Townsend non entretenu. Le courant reste faible.
- *Régime III* : la décharge ne s'éteint plus car la condition d'auto-entretien est atteinte. La composante continue (représentative de la charge d'espace) augmente avec la tension.
- *Régime IV* : les courants de décharges deviennent très importants car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace interélectrodes. C'est le régime des décharges disruptives telles que les arcs électriques.

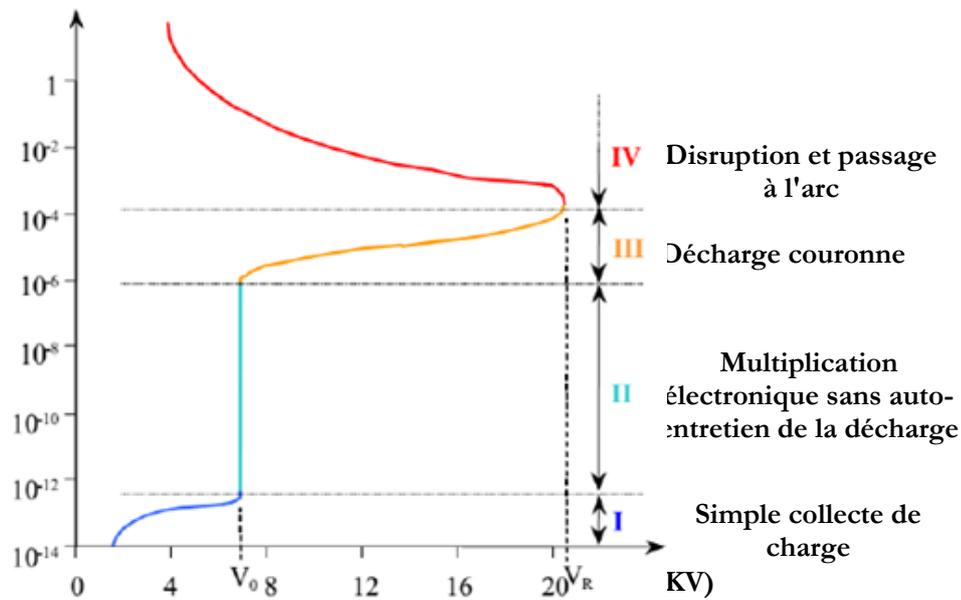


Figure 1.1. Caractéristique courant-tension des décharges à pression atmosphériques [28].

Les décharges couronnes se situent dans le régime III de la Figure (1.1). La décharge est classiquement établie entre une électrode active et une électrode passive (électrode reliée à la terre). L'électrode active est une pointe (ou un fil de petit diamètre) à laquelle on va appliquer un haut potentiel électrique tandis que l'électrode passive est une plaque ou une grille (Figure 1.2). On obtient alors une décharge couronne volumique. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace interélectrodes. En l'absence de charge d'espace, Hartmann [29] en 1977 a établi une expression du champ électrique E en fonction du potentiel appliqué à la pointe le long de l'axe de symétrie x :

$$E(x) = \frac{V}{(x+r/2) \ln\left[\frac{2d+r}{r}\right]} \quad (1.1)$$

Avec V : la différence de potentiel, d : la distance interélectrodes, r : le rayon de courbure de la pointe et x : l'abscisse du point considéré par rapport à l'extrémité de la pointe prise comme origine.

Dans une configuration fil-plaque, Lacoste *et al.* [30] ont utilisé :

$$E(x) = E_i \frac{r}{x} \quad (1.2)$$

Avec E_i : le champ électrique à la surface du fil.

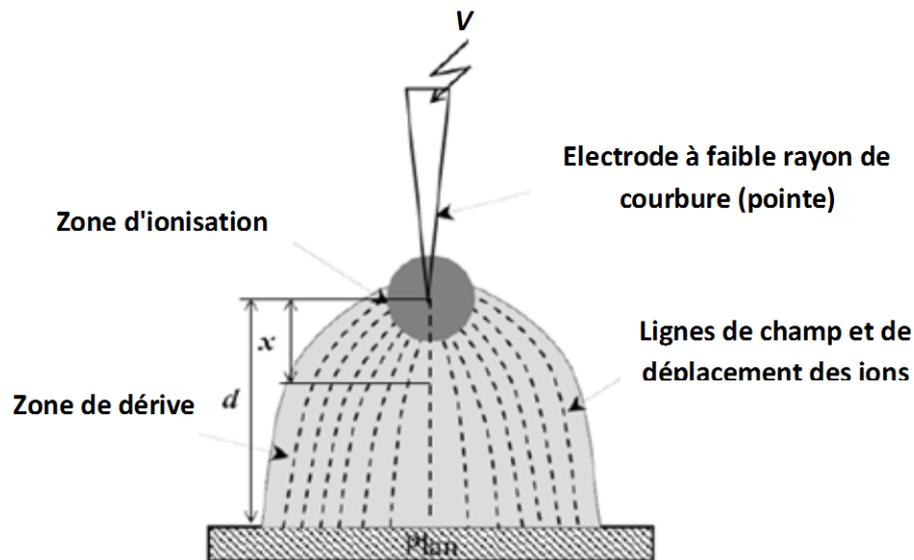


Figure 1.2. Topographie de la décharge couronne volumique en configuration pointe-plaque [29].

Dans cette configuration pointe-plaque, le champ électrique au voisinage de la pointe est intense ce qui permet l'ionisation. Cette région d'ionisation se caractérise par une zone « bleutée » au bout et tout autour de la pointe. La forme en couronne autour de la pointe a donc donné le nom à la décharge. Après cette zone d'ionisation se trouve une région de champ plus faible où les particules ionisées dérivent. L'électrode passive sert alors à collecter les charges. Par ailleurs, la décharge couronne est le siège d'une forte activité physicochimique. Enfin, selon la polarité du potentiel appliqué à la pointe on distingue la décharge couronne positive de la décharge couronne négative.

1.1.2. Polarité de la décharge couronne

1.1.2.1 Couronne positive

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé à la figure (1.3). Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieur au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ($< 30 \text{ kV/cm}$ dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque). Cette zone unipolaire (figure 1.2), puisqu'il n'y a que des ions positifs, est appelée région de dérive [30].

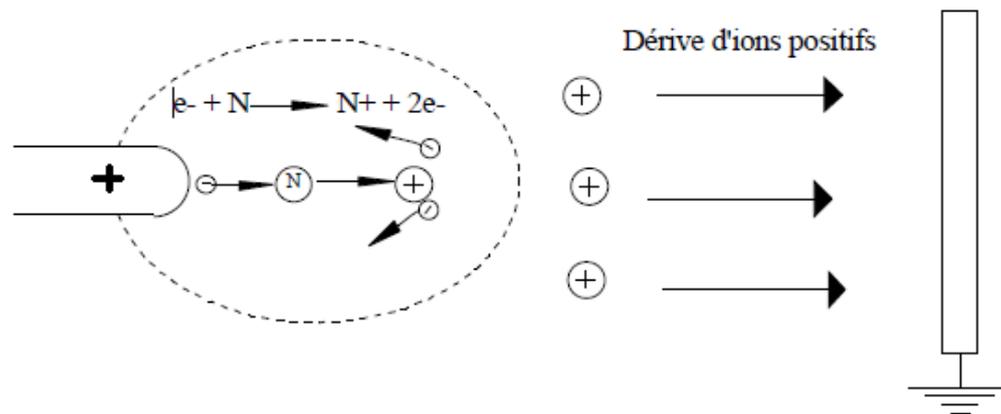


Figure 1.3. Description de la décharge couronne positive [30]

Pour cette décharge, il y'a avancement de streamers, qui se propage en quelque sorte comme une extension de l'anode. D'après les modélisations de Loiseau *et al.* en 2002 [31], la décharge est composée d'une phase de propagation du streamer (durée de la propagation de 50 ns à la vitesse de 2×10^5 m/s) et d'une phase de restauration pendant laquelle les ions dérivent. Ces deux phases forment un cycle de fréquence de 10 kHz. Le courant de décharge n'est donc pas continu, mais correspond à une succession de phénomènes transitoires. Goldman *et al.* en 1985 [32] indiquent qu'un courant positif de $50 \mu\text{A}$ se décomposerait en un courant unipolaire continu de $20 \mu\text{A}$, distribué uniformément à la surface de la cathode, et de streamers contribuant à $30 \mu\text{A}$ percutant la cathode à une fréquence de 10 kHz.

1.1.2.2 Couronne négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photoionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Goldman et Sigmond [33] expliquent que les ions positifs créés reviennent rapidement à la cathode (Figure 1.4). Seuls les ions négatifs créés par attachement dans une zone où le champ est plus faible peuvent migrer vers la plaque. De plus, lorsque la haute tension dépasse un seuil, il y a passage à l'arc.

Le courant de cette décharge est dû à des impulsions de Trichel à une fréquence qui dépend de la tension appliquée [34]. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant (impulsions de Trichel) dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode.

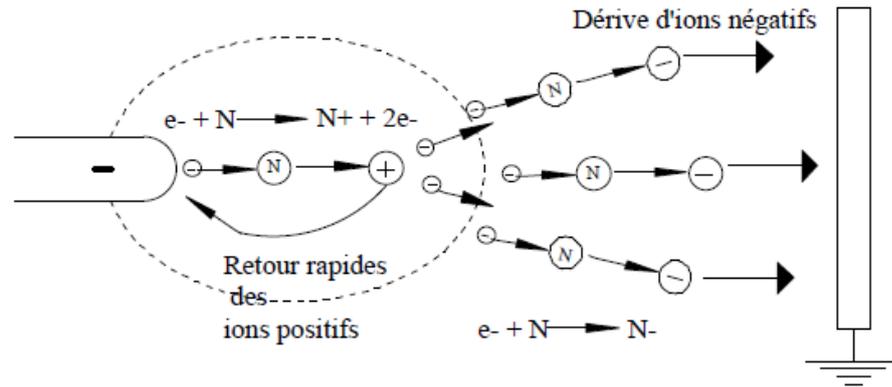


Figure 1.4. Description de la décharge couronne négative [30].

Les mécanismes physico-chimiques au sein des décharges couronnes sont assez complexes et pas totalement connus ; ils sont encore amplement étudiés par les physiciens des plasmas. On peut par exemple citer les travaux de Loeb [26] et de Dascalescu [34].

1.1.2.3 Couronne alternative

A la place d'un potentiel continu appliqué à la pointe, on peut également y appliquer un signal sinusoïdal à valeur moyenne nulle. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées [35]. Ceci implique l'existence d'une fréquence f et d'une distance interélectrodes d , limites reliées par l'expression suivante [28]:

$$d_{max} = \frac{\mu E_0}{\pi f} \Leftrightarrow f_{max} = \frac{\mu E_0}{\pi d} \quad (1.3)$$

Avec: μ : la mobilité des ions et E_0 : l'amplitude du champ électrique.

Si l'excitation est supérieure à cette fréquence f_{max} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu.

Goldman *et al* [1985] a identifié trois composantes du courant dans le cas d'une tension alternative:

- ✓ le courant capacitif dû à l'intervalle gazeuse entre les électrodes qui jouent le rôle d'un condensateur,
- ✓ le courant synchrone, continu et en phase avec la tension appliquée,
- ✓ le courant impulsionnel, somme des impulsions « streamers » pour les alternances positives et des impulsions de « Trichel » lors des alternances négatives.

On peut aussi utiliser des décharges couronnes pulsées. Elles consistent à appliquer des pics de forte

tension mais pendant un très court instant ($< 1\mu\text{s}$) pour limiter le passage à l'arc. Dans ce cas, la valeur moyenne de la tension n'est pas nulle.

1.1.3. Techniques de mesure du champ électrique

Bien que les techniques électrostatiques ne permettent pas l'obtention de la distribution spatiale des charges d'espace avec la précision des autres techniques qui nécessitent souvent de déconvolutions lourdes en calculs mathématiques pour extraire les résultats, elles sont simples et faciles à mettre en œuvre, tout en conduisant à une extraction directe des résultats [36, 37].

Toute méthode électrostatique de caractérisation des électrets doit permettre la détection des charges électriques sans qu'il y ait ni circulation de courant électrique ni redistribution et neutralisation partielle de ces charges. Ces techniques reposent sur le principe que les charges réelles induisent leurs images en surface conductrice. Le cylindre/cage Faraday est un dispositif basique dans le domaine des mesures électrostatiques, malgré la précision de l'estimation de la charge globale nette, son utilisation n'est pas souhaitable lorsque la distribution de charges est plus recherchée que la charge elle-même, ou encore pour suivre l'évolution de la charge dans le temps à un endroit bien défini. En plus, dans certains cas, l'utilisation du cylindre de Faraday est limitée, tels que la mesure de la charge du tapis d'un convoyeur [37 – 39].

Les seules mesures qui restent pratiques et fiables sont des mesures sans contact basées sur le phénomène d'influence. Elles permettent de mesurer soit le champ électrique, soit le potentiel électrique, ces mesures pouvant servir alors à étudier la réponse d'un électret. Le principe porte sur l'utilisation d'une électrode détectrice reliée à un instrument de mesure, le plus souvent un électromètre. Cependant il faut garder à l'esprit que ce sont des mesures très sensibles, il ne faut pas que la mesure elle-même affecte les résultats. C'est pourquoi il est important que l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure soit très élevée ($>10^{11}\Omega$) et que la capacité d'entrée soit faible ($<5\text{pF}$) [40,41].

Il est également important de réunir des conditions optimales car tout couplage capacitif de l'électrode détectrice peut introduire une erreur de mesure substantielle. Des dérives de mesure peuvent être attribuées au circuit électronique et aux accumulations de charges indésirables sur ou à proximité de l'électrode sonde. La qualité des mesures dépend aussi de l'environnement et de l'état de surface de l'électrode détectrice qui est souvent plaquée par un métal noble tel que l'or. La résolution des mesures dépend de la configuration géométrique formée par la sonde et l'échantillon ainsi que leurs dimensions respectives [37, 42,43]. Cette section est focalisée sur la présentation des différents principes de mesure sans contact en électrostatique.

1.1.3.1 Méthode de compensation

Considérons le dispositif de la figure (1.5), d'où l'expression des tensions V_S et V_0 respectivement aux bornes de l'électret et aux bornes de l'intervalle d'air est obtenue. Si l'intervalle d'air entre l'électrode supérieure et la surface libre de l'électret tend vers l'infini et en introduisant la densité surfacique totale de charges, telle qu'elle est définie par la relation (1.5), alors nous pouvons réécrire l'expression de ces tensions :

$$V_S = V_0 = \frac{\sigma_T}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1.4)$$

La densité surfacique totale de charges en fonction de la tension aux bornes est :

$$\sigma_T = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d} V_S \quad (1.5)$$

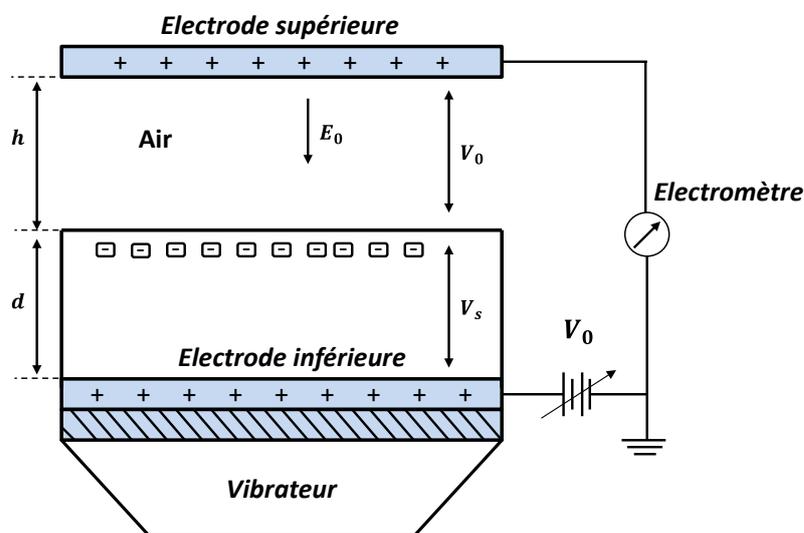


Figure 1.5. Principe de la méthode de compensation [36]

En pratique, il suffit d'éloigner l'électrode supérieure de la surface libre de l'électret suffisamment pour que l'épaisseur de l'échantillon soit négligeable devant l'intervalle d'air ($h \gg d$) et d'insérer un électromètre entre l'électrode supérieure et la masse. Puis nous ajustons la tension d'une source de tension continue variable, insérée entre l'électrode inférieure et la masse, pour qu'elle soit égale à celle indiquée par l'électromètre. Cette tension est la tension V_S aux bornes de l'électret et on dit que la tension V_0 est compensée par la source de tension, d'où le nom de cette méthode. Cette méthode est simple et ne nécessite pas la mesure de l'intervalle d'air.

Pour améliorer la sensibilité du dispositif, illustré à figure (1.5), on provoque des vibrations de l'électret à l'aide d'un vibrateur. Les vibrations provoqueront une variation de l'intervalle d'air et l'électromètre indiquera une composante alternative. Si la compensation de la tension V_0 est effectuée avec précision, par un ajustement adéquat de la source continue, alors la composante alternative sera éliminée [36].

1.1.3.2 Méthode à sonde capacitive

Cette méthode est utilisée pour caractériser un électret dont une face est libre et l'autre est métallisée ou en contact avec une électrode reliée à la masse. Dans ce cas, une sonde métallique est placée parallèlement à la surface libre du diélectrique dont l'intervalle d'air est assez large. La sonde est reliée à l'électrode à travers un condensateur électrique de capacité très élevée par rapport à celle formée par la sonde et l'électrode. La figure (1.6) illustre le principe de la sonde capacitive dont un obturateur couvre la sonde métallique du champ de l'électret.

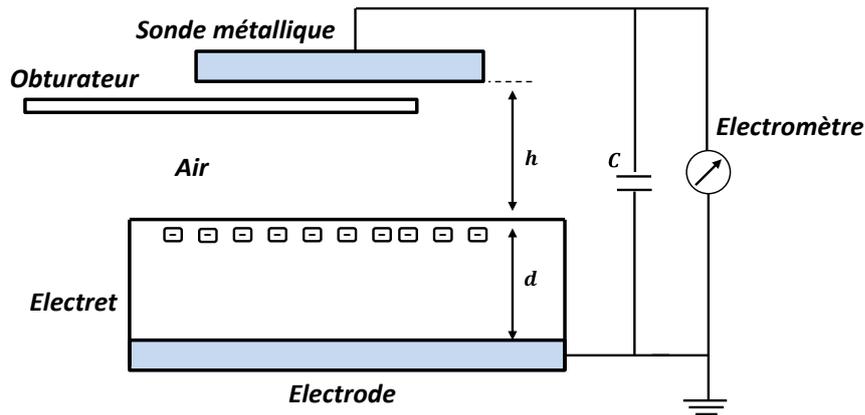


Figure 1.6. Principe de la sonde capacitive [36]

Lorsque l'obturateur est retiré, la sonde est exposée au champ créé par l'électret et des charges électriques s'écoulent vers la capacité en créant à ses bornes une tension, dont la valeur est indiquée par l'électromètre. Cette tension V est exprimée en fonction de la densité des charges induite au niveau de la sonde métallique σ_{sup} , l'aire de sa surface A et la capacité C du condensateur:

$$V = -\frac{A\sigma_{sup}}{C} \quad (1.6)$$

Si la sonde peut être rendue assez petite, la distribution latérale de charge peut être déterminée par cette méthode de la sonde capacitive[36]. L'évaluation de la densité surfacique totale de charges σ_T peut être obtenue en introduisant la relation (1.6) :

$$\sigma_T = -\frac{(\epsilon_r h + d)}{d} \sigma_{sup} \quad (1.7)$$

Cette densité surfacique totale de charges σ_T peut être exprimée en fonction de la tension indiquée par l'électromètre.

$$\sigma_T = -\frac{(\epsilon_r h + d) CV}{d A} \quad (1.8)$$

1.1.3.3 Sonde à induction

Lorsque la plaque sensible de la sonde à induction, présentée sur la figure (1.7), est exposée au champ électrique \vec{E} créé par des charges proches, une charge image apparaît et est recueillie au

niveau du condensateur ayant une capacité C . La tension aux bornes de cette capacité est amplifiée et le signal est exploité à afin de déterminer soit le champ électrique, soit la charge d'un isolant.

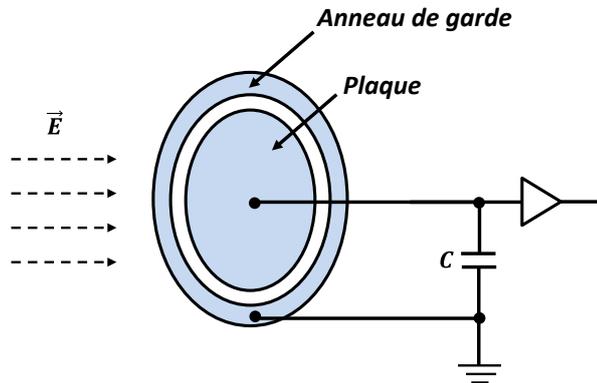


Figure 1.7. Sonde à induction [36].

La mesure du champ électrique peut servir à déterminer la charge d'une surface isolante. Cette mesure est aussi réalisable pour une plaque isolante n'ayant aucune face métallisée ou en absence d'une électrode de masse. La sonde à induction est aussi utilisée pour mesurer le champ électrique incident d'une seule face chargée, définie par la densité surfacique σ_s , ou dans le cas où les deux faces supérieure et inférieure de l'échantillon sont chargées et leurs densités surfaciques sont respectivement désignées par σ_{sup} et σ_{inf} .

La figure (1.8) montre le lien entre le champ incident et sa source, dont la charge des surfaces est uniforme, ϵ_0 désigne la permittivité du vide et ϵ_r est la permittivité relative de l'isolant. L'orientation du champ électrique suppose que $\sigma_s > 0$ et $\sigma_{sup} + \sigma_{inf} > 0$, et que la face de l'échantillon est assez large par rapport à son épaisseur [37].

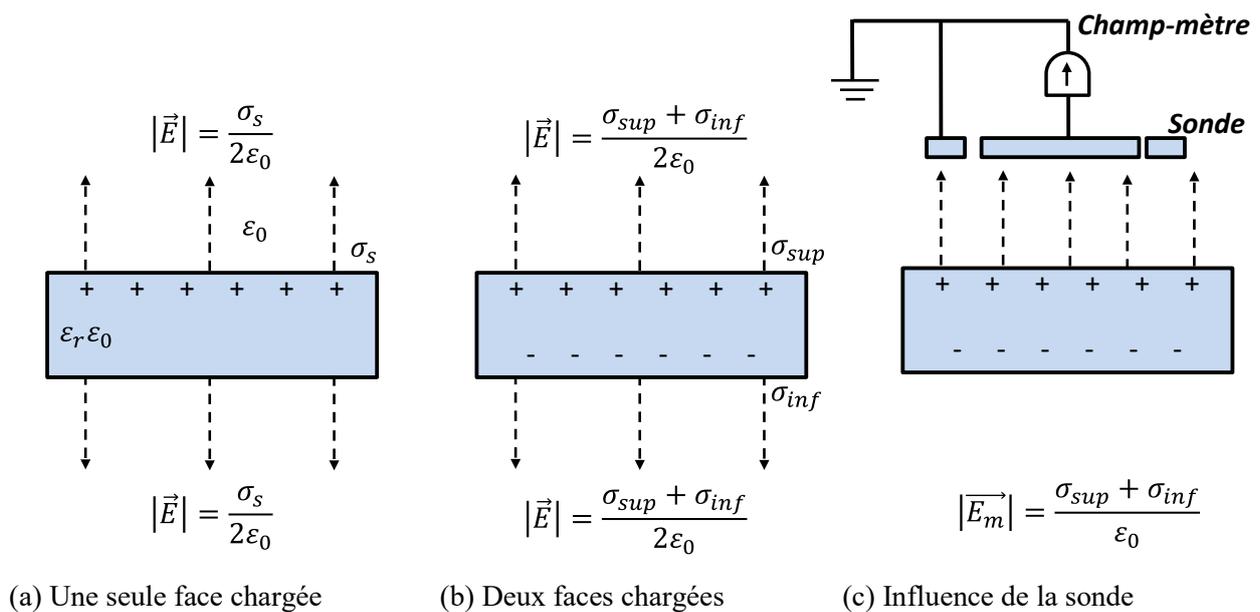
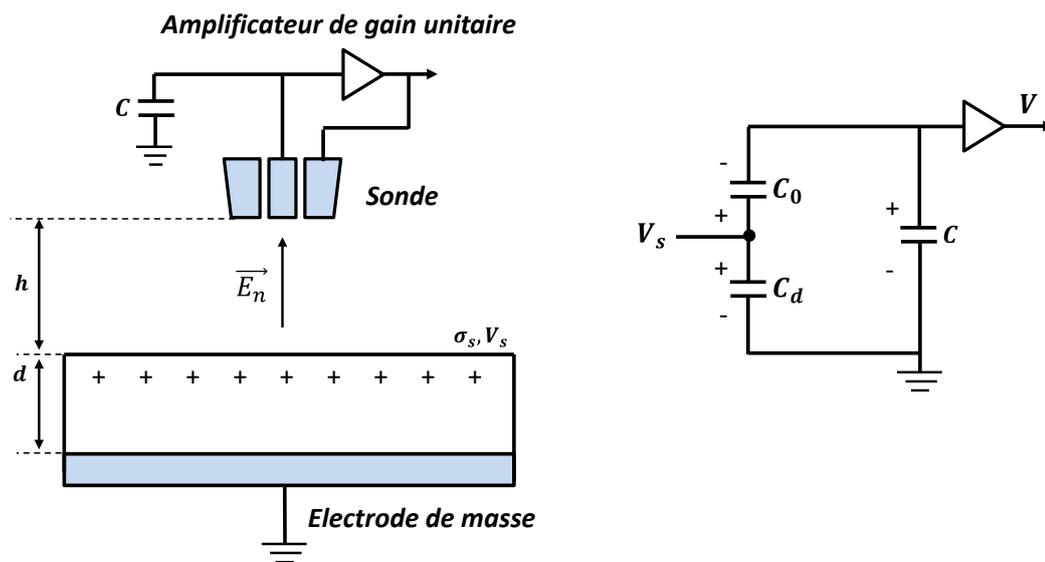


Figure 1.8. Mesure du champ électrique en absence de l'électrode de masse [36].

Si un champ-mètre est introduit de telle façon que la surface sensible de la sonde soit perpendiculaire au champ électrique, alors la valeur du champ mesuré E_m est le double de celle du champ E défini en absence de la sonde, à cause de la charge induite au niveau de la sonde [36]. Une fois que le champ électrique est mesuré, la charge de l'échantillon peut être immédiatement déterminée. En général, il faut veiller à ce que la surface de l'échantillon soit très grande par rapport à la surface de la sonde et aussi à sa planéité en réduisant suffisamment la distance entre la sonde et l'échantillon de telle sorte que cette distance soit très faible devant le rayon de courbure de l'échantillon [37].

L'anneau de garde est utile pour que la surface sensible reçoive un champ uniforme et au lieu qu'il soit relié à la masse, il peut être au même potentiel que la plaque détectrice en les reliant à l'aide d'un amplificateur de gain unitaire. Le champ-mètre peut aussi être un électromètre [44]. Nous intéressons particulièrement à la situation où une face du diélectrique est en contact avec une électrode reliée à la masse alors que l'autre surface est libre. La figure ci-dessous, illustre cette situation et son modèle capacitif en présence de la sonde à induction.



(a) Dispositif expérimental (b) Circuit équivalent

Figure 1.9.Modèle capacitif de la sonde à induction [36].

C : Capacité du circuit extérieur (champ-mètre ou électromètre + câblage).

C_0 : Capacité définie entre la face libre du diélectrique et la sonde.

C_d : Capacité définie entre la face libre du diélectrique et l'électrode de masse.

La relation entre le potentiel de surface V_S et la tension V mesurée à l'aide de la sonde à induction est:

$$V_S = \frac{C_0 + C}{C_0} V \quad (1.9)$$

Sous la sonde, le champ électrique est supposé perpendiculaire à la surface de l'électrode détectrice et uniforme, soit :

$$E_n = \frac{|V_S - V|}{h} = \frac{C}{C_0} \frac{V}{h} \quad (1.10)$$

En introduisant l'expression de la capacité C_0 , définie entre la sonde et la face libre de l'isolant dont h est la distance les séparant, le champ électrique vu par la sonde sera fonction de la tension mesurée, de la capacité C et de l'aire de la surface de l'électrode détectrice A . Par contre, ce champ dépend de l'épaisseur d du diélectrique et de la présence de l'électrode de masse à travers la tension mesurée V . L'expression du champ est explicitée par la relation suivante :

$$E_n = \frac{C}{\varepsilon_0 A} V \quad (1.11)$$

Le numérateur de cette expression " CV " représente la charge totale Q vue par la sonde, et la densité de charge surfacique σ_S le long de la surface A de l'électrode détectrice est égale à cette charge divisée par la surface A . La condition standard à la limite, s'applique au niveau de la surface conductrice de la sonde, soit :

$$D_n = \varepsilon_0 E_n = \sigma_S \quad (1.12)$$

Ceci est complètement en accord avec l'expression (1.11) du champ E_n et elle peut être retrouvée ;

$$E_n = \frac{\sigma_S}{\varepsilon_0} = \frac{\frac{Q}{A}}{\varepsilon_0} = \frac{CV}{\varepsilon_0 A} \quad (1.13)$$

Ces résultats supposent que la distribution de la charge surfacique le long de la surface vue par la sonde est uniforme. La taille de la sonde est un facteur d'intensification du champ au niveau de sa surface, ceci peut affecter la distribution surfacique de la charge. Aussi, nous réitérons l'importance de la géométrie de la sonde et la surface chargée du diélectrique. Cette méthode est simple et n'est pas couteuse, mais elle est sensible à la présence des particules chargées et la mesure est affectée par la dérive de l'instrument à cause de l'amplificateur, même pour des électromètres de qualité. La sonde doit être étalonnée dans une région libre de tout champ électrique et utilisée dans un environnement propre.

Cette technique est limitée pour faire des mesures pendant un temps prolongé de manière continue et surtout elle nécessite de refaire le zéro avant chaque mesure [42, 45].

1.1.3.4 Moulin à champ

Le moulin à champ fonctionne sur le même principe que la sonde à induction, seulement un obturateur tournant, sous forme d'une ailette, permet de moduler le champ incident en obstruant par intermittence la plaque sensible. Cet instrument est plus performant, le problème de dérive inhérent

aux sondes d'induction est contourné. Il permet une meilleure sensibilité et il n'est pas nécessaire de refaire le zéro à chaque mesure. La figure (1.10) présente les éléments principaux d'un moulin à champ, où l'ailette tournante est placée devant l'ailette sensible. Ainsi la modulation de la charge induite, obtenue par la modulation de la surface exposée au champ incident, génère un signal alternatif proportionnel au champ qui peut être amplifié à l'aide d'un système de détection synchrone. Cela évite les perturbations dues aux champs alternatifs non harmoniques de la fréquence de l'obturateur et les dérives lentes inhérentes aux amplificateurs pour tensions continues[42, 45]. L'abréviation PSD (phase-sensitive détection) désigne le détecteur synchrone en anglais.

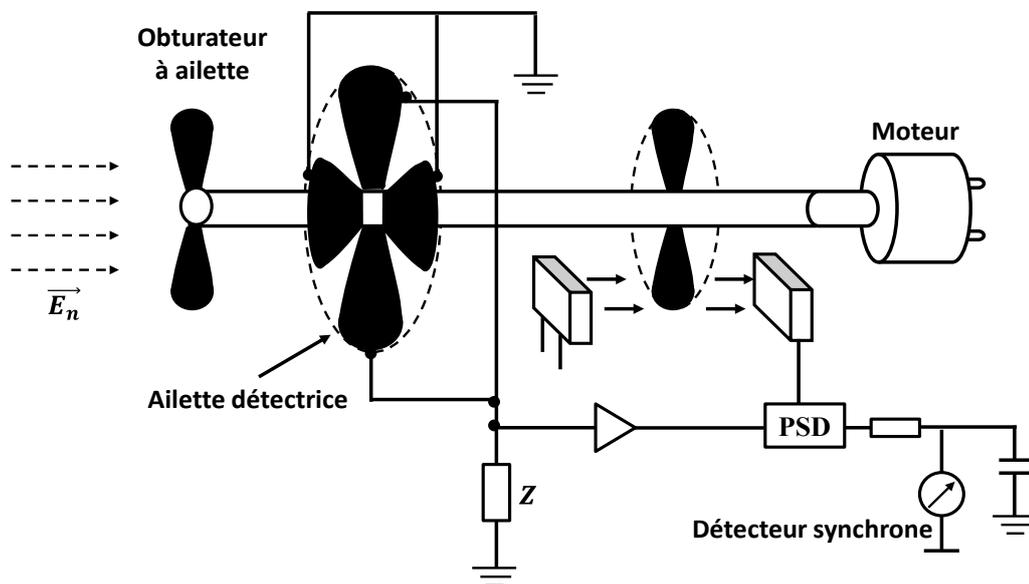


Figure 1.10. Schéma de principe d'un moulin à champ [42, 45].

En introduisant la condition limite à la surface de l'ailette détectrice, le courant engendré par la variation de la charge induite Q à cause de la modulation de la surface A exposée au champ s'écrit :

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(\sigma_s A(t))}{dt} = \epsilon_0 E \frac{dA(t)}{dt} \quad (1.14)$$

Supposant que la modulation de la surface A est définie par l'harmonique suivante :

$$A(t) = A_0 \frac{1 + \sin(\omega t)}{2} \quad (1.15)$$

Alors le pic de courant dépendra de l'intensité du champ incident et la fréquence de la modulation :

$$i_{pic} = \omega \epsilon_0 E \frac{A_0}{2} \quad (1.16)$$

Le moulin à champ est exploité pour concevoir un voltmètre sans contact, il existe des versions commerciales. Le principe est présenté à la figure (1.11). Il est celui d'un moulin à champ qui utilise une sonde dont l'armature n'est pas reliée à la masse. Le signal délivré par le détecteur

synchrone est amplifié à l'aide d'un amplificateur haute tension. Ce dernier est connecté à l'armature de la sonde, ainsi une contre-réaction est réalisée et elle permet d'asservir le potentiel de la sonde jusqu'à ce que le champ incident approche du zéro.

Lorsque l'annulation du champ est obtenue, alors le potentiel de l'armature de la sonde est égal au potentiel de surface du diélectrique chargé. Cette technique introduit moins de perturbations et elle permet de suivre l'évolution du potentiel de surface [41, 46].

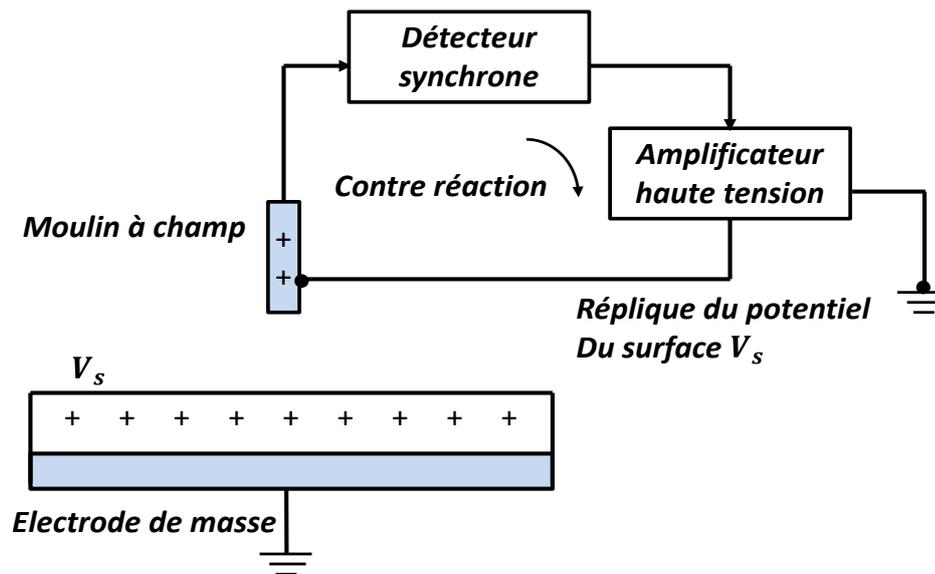


Figure 1.11. Principe du voltmètre sans contact [46].

1.1.3.5 Sonde à condensateur vibrant

La sonde à condensateur vibrant est aussi connue sous le nom de la sonde capacitive de Kelvin. Elle est très utilisée pour la caractérisation non destructive des électrets par la mesure sans contact du potentiel de surface à long terme. Cette sonde à courant porteur alternatif permet de contourner les dérives de la sonde à induction. En effet, il est possible de transformer au préalable les tensions ou courants continus que l'on veut mesurer en tensions alternatives de façon à pouvoir utiliser des amplificateurs ordinaires à couplage par capacité ou par induction qui sont exempts de dérive. Le condensateur de conversion peut être du type tournant ou du type vibrant. La sonde à condensateur vibrant offre une alternative attractive, malgré le rendement de conversion obtenu est faible, en raison de l'absence d'usure et d'entretien. Dans le condensateur vibrant, il n'y a plus besoin de contact glissant avec l'armature mobile [42, 47, 48].

Pour effectuer cette conversion, un procédé utilisable est celui d'une modulation par variation de capacité, procédé purement électrostatique. Une sonde métallique vibre à l'aide d'un oscillateur mécanique au-dessus de la surface chargée d'un échantillon, où les déplacements de la plaque

métallique sont perpendiculaires au champ électrique incident de la surface chargée.

La figure (1.12) illustre ce principe de modulation :

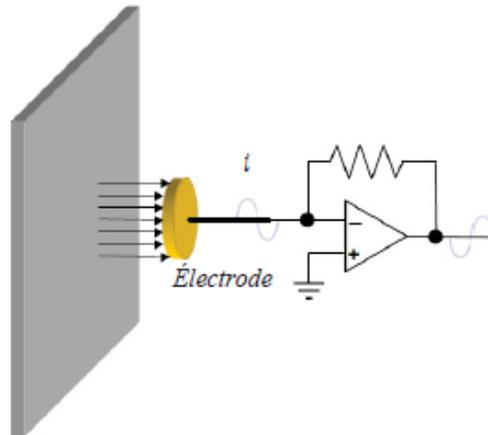


Figure 1.12. Principe de modulation par variation de capacité [47].

Le signal détecté est l'intensité de courant électrique i induit par la vibration de la sonde dans le champ électrique créé par la différence du potentiel de surface V_S entre la sonde et l'échantillon.

$$i = C \frac{dV_S}{dt} + V_S \frac{dC}{dt} \quad (1.17)$$

Où C est la capacité du condensateur formé par la sonde et l'échantillon. Pour une modulation sinusoïdale, cette capacité est exprimée par la relation (1.18), où C_0 est la capacité moyenne et C_1 est l'amplitude des variations.

$$C = C_0 + C_1 \sin(\omega t) \quad (1.18)$$

Pour une différence du potentiel de surface V_S entre la sonde et l'échantillon constant, l'expression (1.17) du courant se réduit à :

$$i = V_S \frac{dC}{dt} \quad (1.19)$$

La mesure automatique de la différence du potentiel de surface V_S , est obtenue par ajustement du courant i à zéro, à l'aide d'un servomécanisme électronique pour l'annulation du champ électrostatique. Ceci nécessite que le potentiel de la sonde V_m soit au même potentiel de surface de l'échantillon. Car le courant n'est pas seulement fonction de l'amplitude et de la fréquence des vibrations, mais il dépend de la différence de potentiel ($V_S - V_m$).

$$i = (V_S - V_m) \frac{dC}{dt} = 0 \quad (1.20)$$

Considérons les deux situations de la figure (1.13), où une sonde à condensateur vibrant est utilisée. Dans la situation (a) l'électrode cible est reliée à un potentiel, ainsi le signal généré par vibration de la sonde est désigné par V_i dont le sens est choisie arbitrairement. Par contre, dans la situation (b) où la sonde qui est sous un potentiel V_m , le signal généré est de sens opposé que celui de la situation (a). Lorsque la mesure du potentiel de surface d'une cible est effectuée à l'aide de cette sonde, la

contre réaction du servomécanisme électronique asservi le potentiel de la sonde V_m au potentiel de surface de la cible V_s , ainsi le signal de sortie est proche de zéro du fait que le champ électrique \vec{E} résultant est nul.

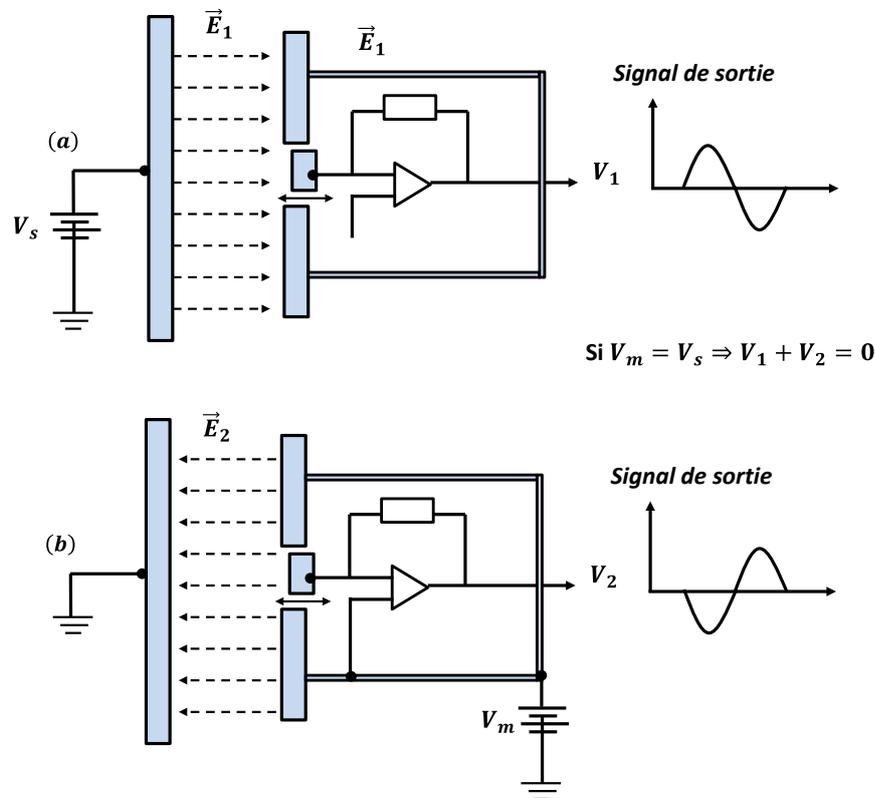


Figure 1.13. Principe de mesure du potentiel de surface à l'aide de la sonde à condensateur vibrant [47, 48].

1.2. Filtres électrostatiques

Les premiers filtres électrostatiques ont été réalisés par le Docteur Frédéric Gardner Cottrel en 1907 pour piéger les rejets de vapeurs d'acide sulfurique issues des usines chimiques. Très rapidement, aux Etats-Unis et au Canada, de nombreuses installations de l'industrie lourde ont été équipées d'électrofiltres. Le phénomène s'amplifia autour des années 1920 avec l'arrivée des chaudières à charbon industriel. Ces dernières produisent de grosses quantités de fumées contenant de très fines particules impossibles à piéger par des procédés mécaniques.

1.2.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un électrofiltre peut être décomposé en trois phases qui sont :

- ✓ L'ionisation de l'air par effet couronne ;
- ✓ La charge des particules par interaction avec les ions créés ;
- ✓ La précipitation des espèces chargées par action d'un champ électrique et le nettoyage des surfaces de collecte.

Le filtre électrostatique est un dispositif dans lequel les forces électrostatiques piègent les particules contenues dans un gaz. Il est constitué d'un ensemble d'électrodes actives et d'électrodes de collecte et peut être de géométrie plane ou cylindrique. La décharge générée au sein de ce dispositif, souvent maintenue à un fort potentiel négatif, produit des ions, par attachement des électrons libres aux molécules du gaz. Lors de collisions de ces ions avec des particules, ces dernières se chargent. Afin d'expliquer le principe de fonctionnement d'un électrofiltre, prenons l'exemple d'un précipitateur électrostatique industriel de géométrie cylindrique (figure 1.14). Il est constitué d'un cylindre métallique disposé verticalement (l'électrode de collecte) et d'un fil suspendu le long de l'axe central du cylindre (l'électrode active). L'électrode active est reliée à la haute tension continue tandis que l'électrode de collecte est reliée à la masse.

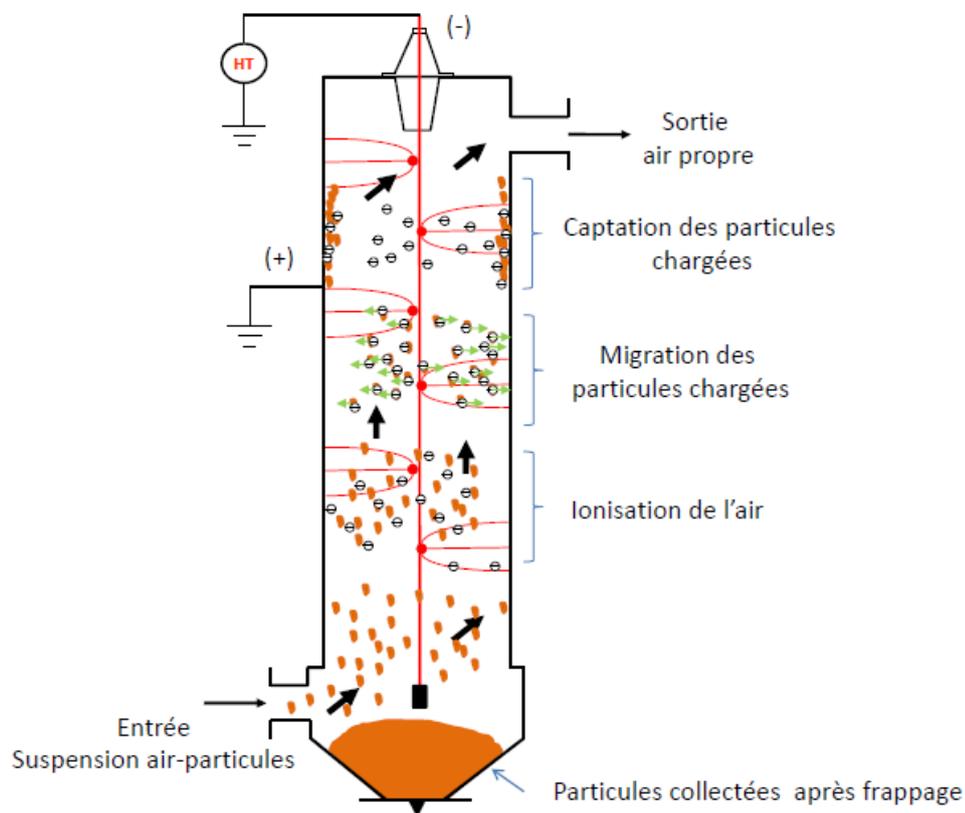


Figure 1.14. Principales étapes intervenant dans le fonctionnement d'un filtre électrostatique [49].

Lorsqu'on applique une tension au-delà d'un seuil (tension d'allumage de la décharge), une décharge couronne apparaît autour du fil. Elle apparaît soit sous la forme de points lumineux (tension négative) répartis le long du fil et appelés « spots », ou sous la forme d'une « gaine lumineuse » (tension positive). Les phénomènes lumineux représentent localement les régions ionisées du gaz à partir desquelles des ions de même polarité que l'électrode active sont émis vers l'électrode de collecte. Ces ions traversent l'espace interélectrodes sous l'action d'un champ électrique continu, en direction de l'électrode de collecte. Lorsqu'on introduit des gaz pollués par la

partie basse de l'électrofiltre, ils traversent l'espace interélectrodes en montant. Les particules qu'ils contiennent captent au passage des ions et se chargent fortement ; elles sont alors soumises à la force de Coulomb qui les dirigent vers la surface interne de l'électrofiltre où elles se déposent.

Les gaz sortent donc dépollués par la partie haute de l'électrofiltre tandis que les particules piégées s'accumulent sur sa surface interne en formant une couche de poussières. Par un procédé mécanique qui consiste à frapper les parois de l'électrofiltre à l'aide d'un marteau, on fait tomber les poussières dans le fond de l'électrofiltre où un dispositif prévu à cet effet permet de les évacuer.

Du point de vue de la conception mécanique, il existe deux principaux types d'électrofiltres en haute tension :

- ✚ l'électrofiltre à collecteur cylindrique, type cheminée : une électrode rigide soumise à un potentiel négatif placée suivant l'axe du cylindre. Les parois du cylindre sont généralement référencées à la terre.
- ✚ l'électrofiltre à collecteur plat : cette configuration est la plus répandue dans l'industrie. Le collecteur est constitué de plaques parallèles entre lesquelles sont situées des électrodes portées à la haute tension négative.

1.2.2. Forces à l'origine de la migration des particules chargées

Dans la nature, les particules peuvent être soumises à diverses forces : les forces de volume (Force de flottabilité, force électrique, force magnétique, par exemple) et les forces de surface (force diélectrophorétique, force de traînée, par exemple). Dans cette rubrique, nous n'évoquerons que les deux forces électriques mises en jeu, à savoir, la force de Coulomb et la force diélectrophorétique.

1.2.2.1 Force de Coulomb

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique E , les particules ayant acquis une charge électrique q_p subissent la force de Coulomb F_e proportionnelle à la charge et s'exprimant :

$$\vec{F}_e = q_p \cdot \vec{E} \quad (1.21)$$

1.2.2.2 Force diélectrophorétique

De nombreux travaux ont été effectués sur la force diélectrophorétique (DEP) agissant sur des particules allant des poussières aux cellules biologiques. Cette force s'exerce sur une particule non chargée dans un gradient de champ électrique. Elle est proportionnelle au volume de la

particule ($\propto d_p^3$) et au gradient du champ électrique qui lui est appliqué $(\nabla \vec{E})^2$. Pour une sphère diélectrique de diamètre dp , l'expression est :

$$\vec{F}_{DEP} = \frac{\pi}{4} \varepsilon_m d_p^3 K (\nabla \vec{E})^2 \quad (1.22)$$

La constante K est définie par :

$$\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_m}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_m} \quad (1.23)$$

Où ε_s et ε_m sont les permittivités respectives de la sphère et du milieu.

1.2.3. Description du phénomène électrostatique

Comme nous l'avons dit précédemment, la phénoménologie de la précipitation électrostatique comporte plusieurs phases :

- le développement des impulsions de Trichel,
- la migration des ions vers les parois de l'enceinte,
- les collisions de ces ions avec les poussières qu'ils chargent,
- la collection de ces poussières sur l'électrode prévue à cet effet.

Les mécanismes de transport dans l'électrofiltre qui résultent de deux phénomènes distincts :

- ✓ le « transport par le champ », qui est le phénomène principal : il collecte les poussières dont le diamètre est supérieur à $0,5\mu\text{m}$;
- ✓ le « transport par diffusion », qui permet la capture des poussières d'un diamètre inférieur à $0,2\mu\text{m}$. Entre ces deux dimensions, les deux principes contribuent à la récupération des particules.

1.2.3.1 Le transport par le champ

La présence de particules de poussières de tailles suffisantes ($> 0,5\mu\text{m}$) distord des lignes de champ de telle sorte que ces dernières passent à travers les particules. Les ions qui migrent le long de ces lignes de champ viennent donc en contact de ces particules et y restent collés par la force électrostatique.

Lorsque les particules se chargent, les lignes de champ sont déviées en sens inverse de ce qui se produisait initialement et finissent par ne plus passer à travers les particules. On atteint donc une charge limite dont la valeur est fonction de l'amplitude du champ électrique et du diamètre de la particule. Ce mécanisme, qualifié de « dépendant du champ », est d'autant plus marqué que les particules sont grosses.

1.2.3.1 Le transport par diffusion

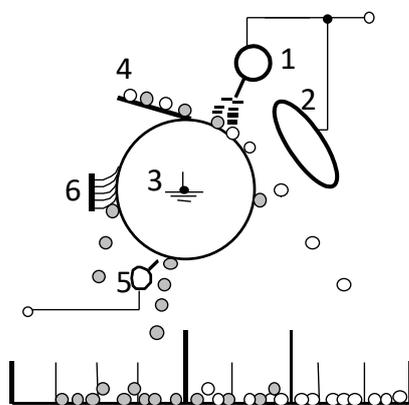
Les petites particules ($< 0,2\mu\text{m}$) n'ont pas la taille suffisante pour dévier les lignes de champ et attirer « électriquement » les ions. Ce sont des collisions avec ces derniers qui sont à l'origine de leur charge. Ce phénomène de collision semble être contrôlé par les mouvements thermiques des ions. Une fois les particules chargées, le processus de dérive est le même que précédemment.

1.3. Séparateurs électrostatiques

Il existe plusieurs types de séparateurs électrostatiques, traitants différentes catégories de mélanges. les plus utilisés sont :

1.3.1. Séparateurs électrostatiques isolants-conducteurs

Il existe une multitude de séparateurs avec différentes techniques, nous citerons le séparateur électrostatique à tambour, comme celui montré sur la figure (1.15), est le modèle le plus utilisé dans l'industrie. Son principe de fonctionnement consiste à la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode (1) et ainsi les granules déposées par le vibro-transporteur (2) sur le cylindre tournant (3) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel HT.



- 1) Electrode couronne reliée à une source de haute tension (HT) ;
- 2) Electrode statique reliée à la même source de HT ;
- 3) Goulotte oscillante
- 4) Electrode cylindrique reliée à la terre ;
- 5) Electrode de neutralisation reliée à une source HT alternative ;
- 6) Brosse ;

● : Particules isolantes
○ : Particules conductrices.

Figure 1.15. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour [50].

Les granules isolants adhérents à la surface du tambour grâce à une force d'image électrique et finissent par tomber dans la partie gauche du collecteur, tandis que les granules conductrices perdent rapidement leurs charges à travers le tambour relié à la terre. En arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (5), ils acquièrent par influence électrique une charge de signe opposée au potentiel HT [50]. Ils sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et déposés dans la partie droite du collecteur (6).

1.3.2. Dispositifs de chargement triboélectrique

Il existe actuellement plusieurs procédés d'acquisition de charge triboélectrique pour permettre aux granules d'acquérir la charge électrique. On citera quelques dispositifs réalisés au sein de laboratoire de l'institut technologique d'Angoulême (Université de Poitiers, France).

1.3.2.1 Chargement par ventilateur

La rotation de l'hélice crée un courant d'air descendant donnant naissance à des turbulences aérodynamiques multipliant les collisions des particules granulaires à l'intérieur du cylindre. Les particules granulaires isolantes sont placées dans le dispositif de chargement triboélectrique, puis le moteur à courant continu est mis en marche pendant une durée déterminée et à une vitesse désirée (figure 1.16). Les particules isolantes se mettent en mouvement et deux types de collisions se produisent : particules contre les parois du cylindre et particules entre elles. Néanmoins ce dernier type reste négligeable par rapport au premier type de collision [50].

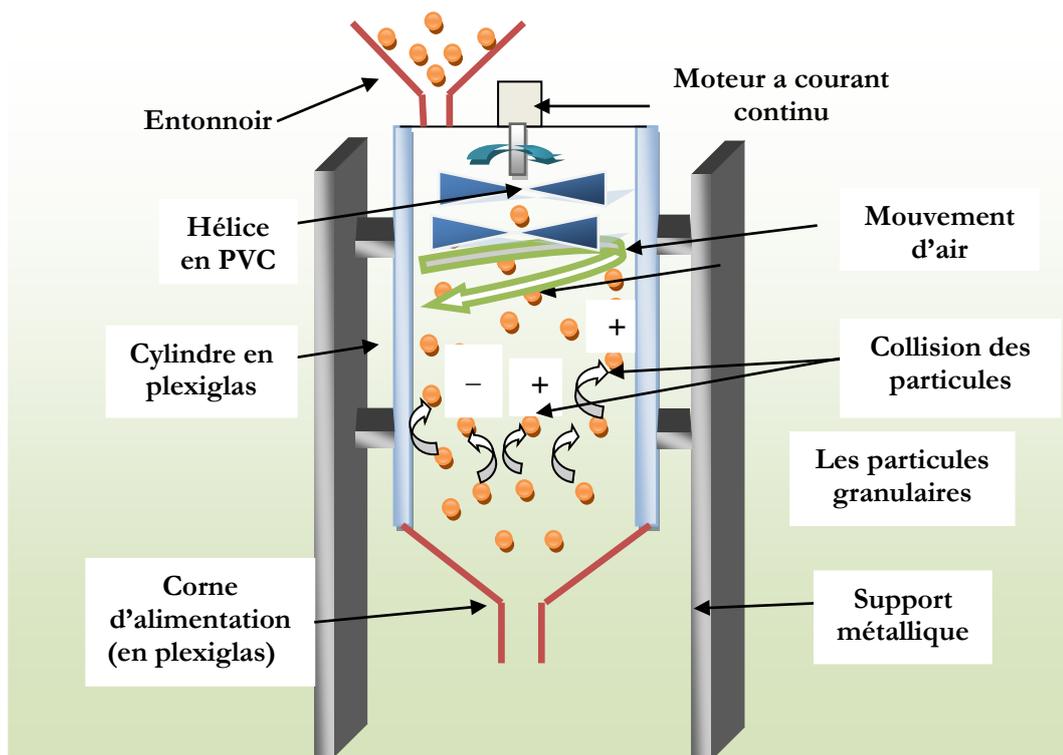


Figure 1.16. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [50]

1.3.2.2 Chargement par cyclone :

Le dispositif est un cylindre isolant (figure 1.17), y compris un ventilateur dont le rôle est de souffler les particules à charger à l'intérieur du cylindre, où elles subissent un frottement continu

contre la paroi interne. La majorité de la charge acquise s'effectue lors du contact des particules avec cette paroi.

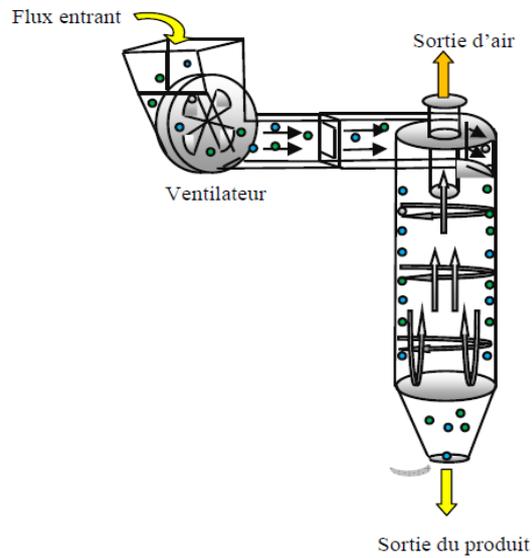


Figure 1.17. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [51].

1.3.2.3 Chargement statique :

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (figure 1.18), contenant des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement avec les parois [51].

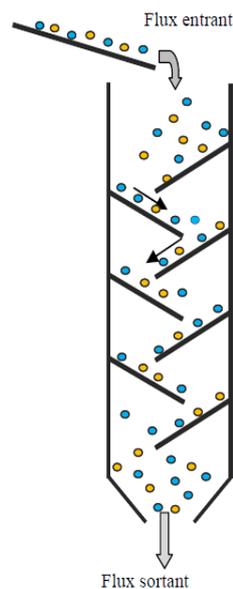


Figure 1.18. Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [51].

1.3.2.3 Chargement à lit fluidisé :

Le dispositif est un tube cylindrique isolant, le mélange de particule est déposé sur le support (un disperseur en tamis isolant), on souffle de l'air à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles [52].

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Les six régimes de fonctionnement du lit fluidisé sont représentés sur la figure (1.19). On considère une couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant [53].

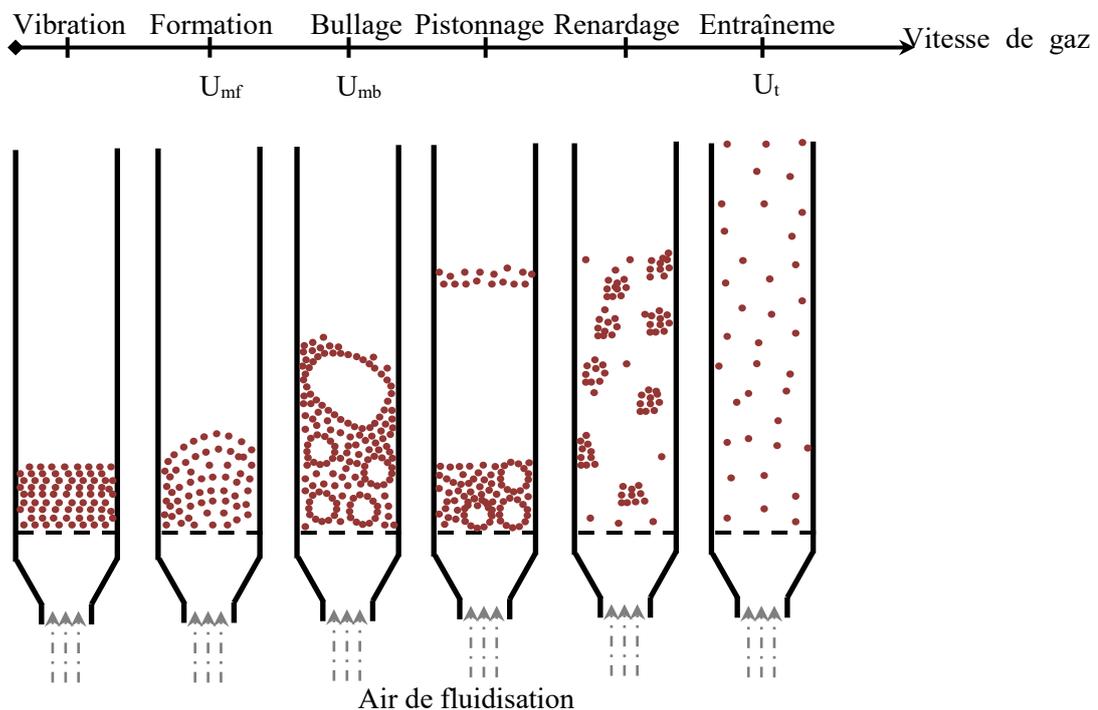


Figure 1.19. Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [53].

- La vibration: pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperser sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- La formation: le lit commence à être fluidisé (avoir les caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} . Le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.
- Le bullage: à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du

cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide en ébullition.

- Le pistonage: en excès au-delà de (U_{mb}), le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- Le renardage: les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- L'entraînement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement.

1.3.2.4 Chargement aéro-triboélectrique

C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade. Le procédé est une chambre parallélépipédique isolante comprenant deux parties (figure 1.20): la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mis les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [54].

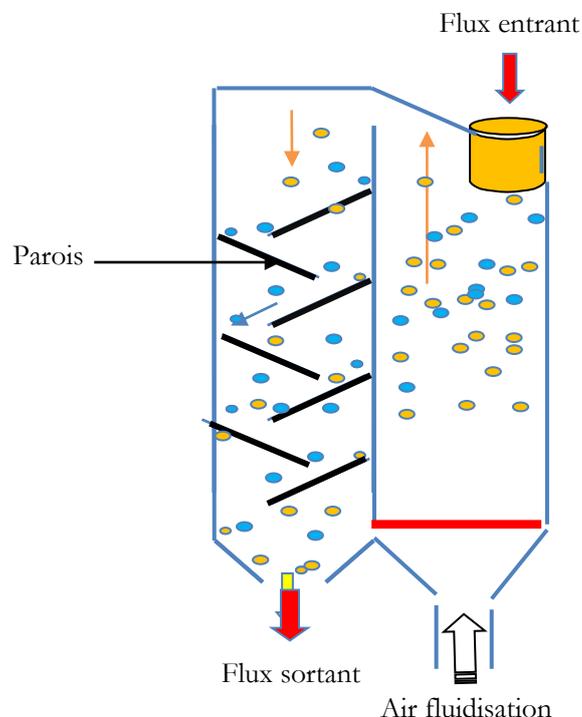


Figure 1.20. Représentation schématique d'un dispositif de chargement triboélectrostatique [54].

1.3.3. Séparateurs tribo-électrostatiques

Les séparateurs triboélectriques qui reposent sur le principe du tri électrostatique permettent un tri entièrement automatisé d'un grand nombre de mélanges de matériaux dont les plastiques en particulier. Plusieurs dispositifs ont été réalisés en vue de la séparation électrostatique des matériaux granulaires plastiques. Toutes ces installations comportent une partie de chargement triboélectrique et une zone de séparation dans un champ électrique intense [55].

1.3.3.1 Séparateur triboélectrique à tapis roulant

Il est constitué de deux parties : la première partie est pour le chargement triboélectrique où l'introduction du mélange granulaire s'effectue par un vibro-transporteur; les particules sont soumises à la pesanteur et entrent en collision avec les différentes parois entraînant leur chargement triboélectrique, c'est le chargeur statique. La seconde partie est formée d'un tapis roulant à bande isolante en néoprène reliée à la terre, d'une électrode de forme elliptique reliée à une source d'alimentation haute tension continue (+) et un collecteur de particules [56].

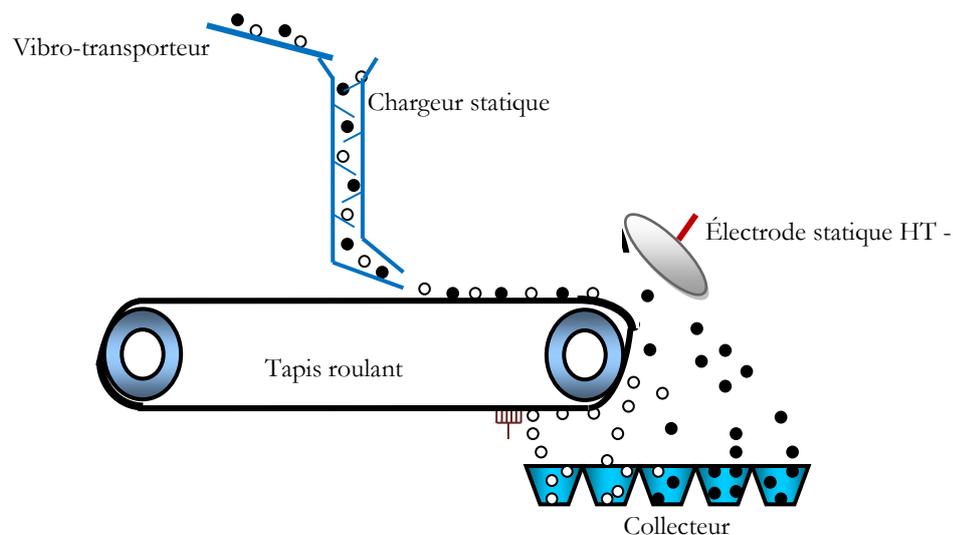


Figure 1.21. Séparateur à tapis roulant [56].

L'électrode statique attire les particules d'une même polarité et repousse les particules de polarité opposée grâce aux forces électriques d'attraction et de répulsion, permettant ainsi la séparation.

1.3.3.2 Séparateur à chute libre

Le mélange granulaire est chargé par un des différents dispositifs de chargement triboélectrique, il tombe ensuite dans une zone inter électrodes où un champ électrique intense est créé par les

électrodes reliées à des sources de haute tension de polarités opposées.. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge acquise. La figure (1.22) représente un séparateur à chute libre associé à un dispositif de chargement à cylindre tournant [57,58].

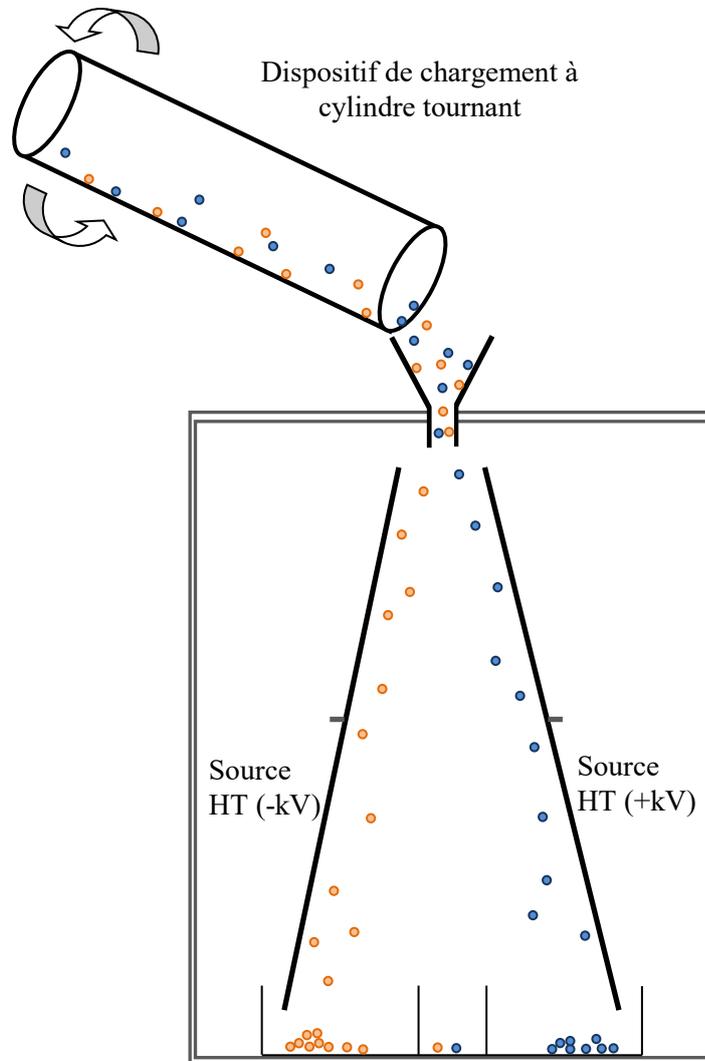


Figure 1.22. Représentation schématique d'un séparateur à chute libre alimenté par un chargeur à cylindre tournant [57].

1.3.3.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses :

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, elles sont à base d'une matière conductrice (figure 1.23) et s'appuient sur des tambours isolants. Leurs entrainements sont assurés par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes transporteuses contrairement polarisées, pour être transportées vers la zone de récupération [59, 60].

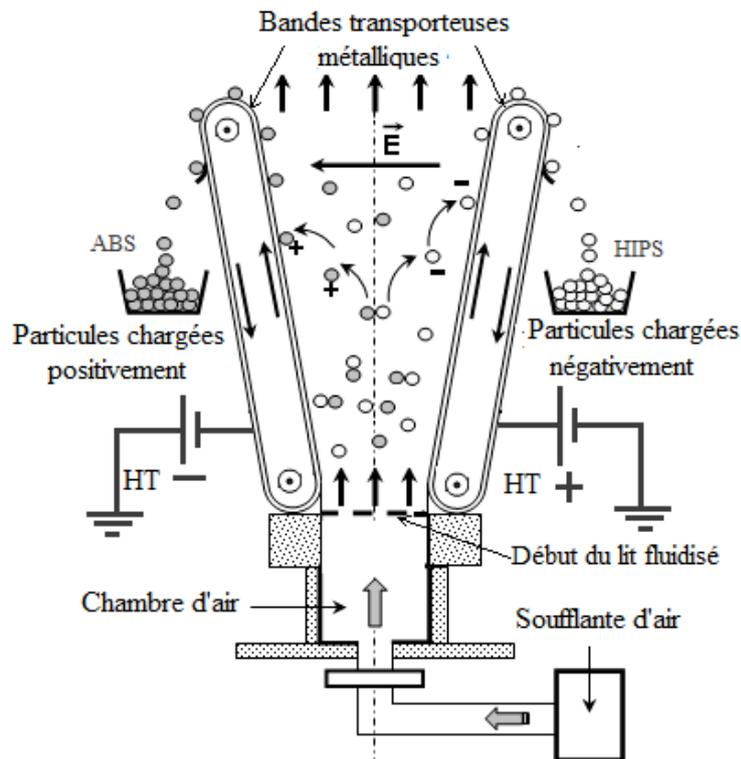


Figure 1.23. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses [59].

1.3.3.4 Séparateur à électrodes cylindriques tournantes:

Ce dispositif a le même principe de fonctionnement que celui précédemment cité, la différence entre les deux procédés réside dans la forme des électrodes utilisées. Cette installation utilise des tambours conducteurs reliés à des arbres entrainés par des moteurs (figure 1.24) dont le but est de diminuer la traversée des particules, de réduire le coût du séparateur et d'augmenter sa robustesse [61, 62].

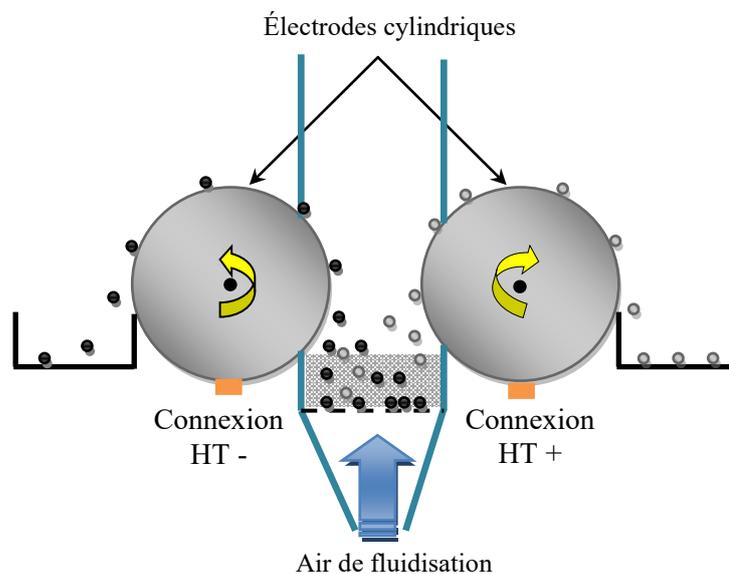


Figure 1.24. Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à cylindres tournant [61].

1.3.3.5 Séparateur tribo-aéro-électrostatique- à disques tournants:

C'est une installation particulièrement adaptée à la séparation des particules de plastique fines. Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre (figure 1.25), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques [63].

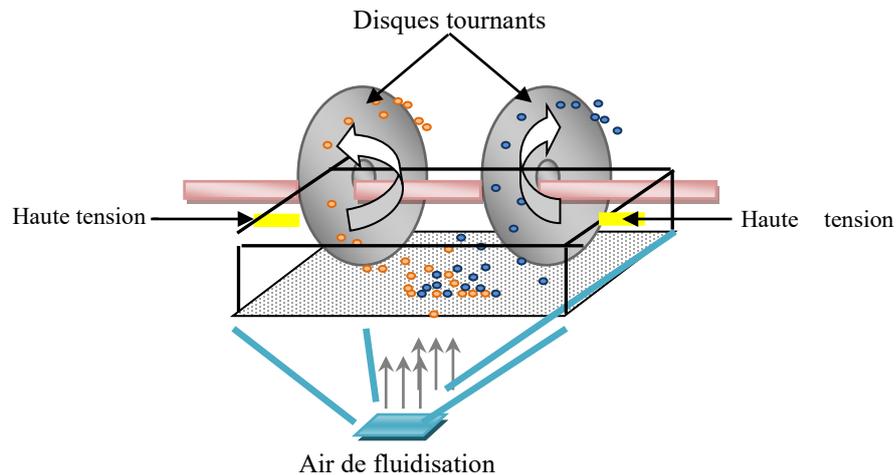


Figure 1.25. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants [63].

1.3.3.6 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales:

Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante (figure 1.26), attirent les particules de signe opposé et repoussent celles de même signe après chargement dans un lit fluidisé, pour les dévier vers les collecteurs [64].

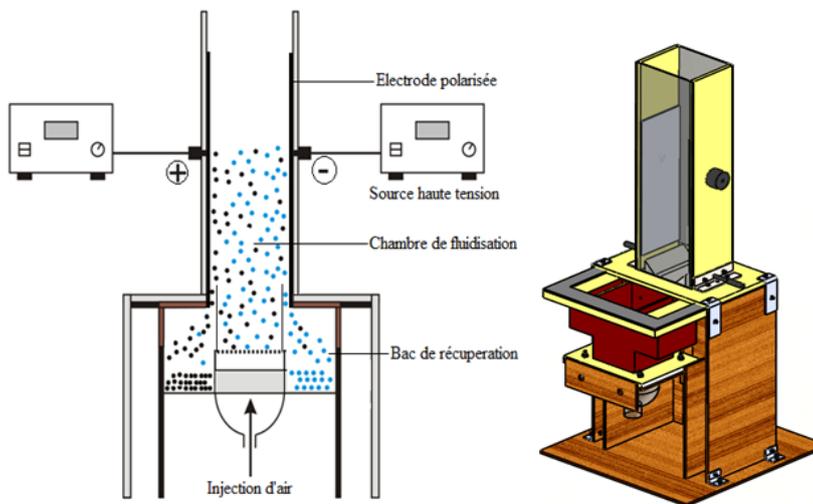


Figure 1.26. Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales [64].

1.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les phénomènes liés aux décharges électriques. L'étude de ces décharges dans des intervalles d'air présente un intérêt d'un point de vue technologique. Cette étude des mécanismes de la décharge électrique a montré que le phénomène était d'une très grande complexité. Malgré les grandes avancées effectuées dans les applications, beaucoup de processus physiques fondamentaux sont toujours sujets à des investigations. Les mécanismes de développement de l'avalanche électronique et de propagation des décharges ont été décrits. Les électrons accélérés par le champ électrique entrent en collision avec les molécules neutres présentes dans l'espace interélectrodes et conduisent à l'excitation et à l'ionisation du gaz.

Nous avons rappelé dans ce chapitre, les différents types de filtres électrostatiques et leur fonctionnement. Ainsi il existe une multitude d'installations électrostatiques qui traitent différents types de mélange de matériaux pulvérulents dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.

Peu de recherches ont visé la séparation triboélectrique des matériaux de taille plus fine à cause de la difficulté du contrôle des trajectoires de ses particules, La séparation tribo-aéro-électrostatique représente une technique récente qui peut minimiser les durées de traitement et les coûts à échelle industrielle.

Les points mis en évidence dans le présent chapitre seront utiles pour la compréhension des étapes suivante des travaux de cette thèse.

Chapitre 02

ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA DECHARGE COURONNE

La décharge électrique peut être examinée sous son aspect électrique ou optique, sa description fait donc appel à des mesures. Les mesures électriques concernent le champ, la charge d'espace, le courant et la tension. Les mesures optiques permettent la détermination du spectre de lumière, du canal de décharge. Les phénomènes lumineux se produisant peuvent être enregistrés par des appareils photographiques, des caméras à balayage ultra rapide dites convertisseurs d'images, des photomultiplicateurs, ...[65].

Parmi les techniques de mesure du champ, on peut citer celle faisant appel au fluxmètre électrostatique ou moulin à champ [66, 67] appliquée à l'étude de la lente dissipation des charges d'espace restant dans l'intervalle après l'extinction de la décharge. Celle utilisant de simples sondes est estimée plus précise et moins encombrante.

Pour cette première partie du travail expérimental, nous avons commencé par relever la caractéristique courant-tension à l'aide d'un enregistreur afin de déterminer la tension seuil d'apparition de l'effet couronne. La sonde circulaire, nous permet dans un second temps de mesurer le champ à la surface du cylindre mis à la terre. Le principe des essais consiste à mesurer les courants collectés par la sonde pour différentes tensions de polarisation en gardant la tension appliquée aux conducteurs constante. Pour effectuer des mesures sur d'autres points du cylindre collecteur, il suffit de déplacer les électrodes actives par rapport au centre de la sonde. Les mesures ainsi relevées nous permettent par la suite de déterminer la distribution du champ électrique E ainsi que la densité de courant J à la surface du cylindre.

Dans ce chapitre, nous présentons l'utilité de la sonde pour mesurer le champ électrique en géométrie fil - cylindre dont les électrodes actives sont soumises à une haute tension continue en polarités négative et positive. Le choix des matériaux des parties essentielles du dispositif expérimental est basé sur une analyse électrique, mécanique et chimique.

2.1. Sonde polarisée

Les sondes polarisées sont des simples capteurs, de forme circulaire ou linéaire, incorporées dans un

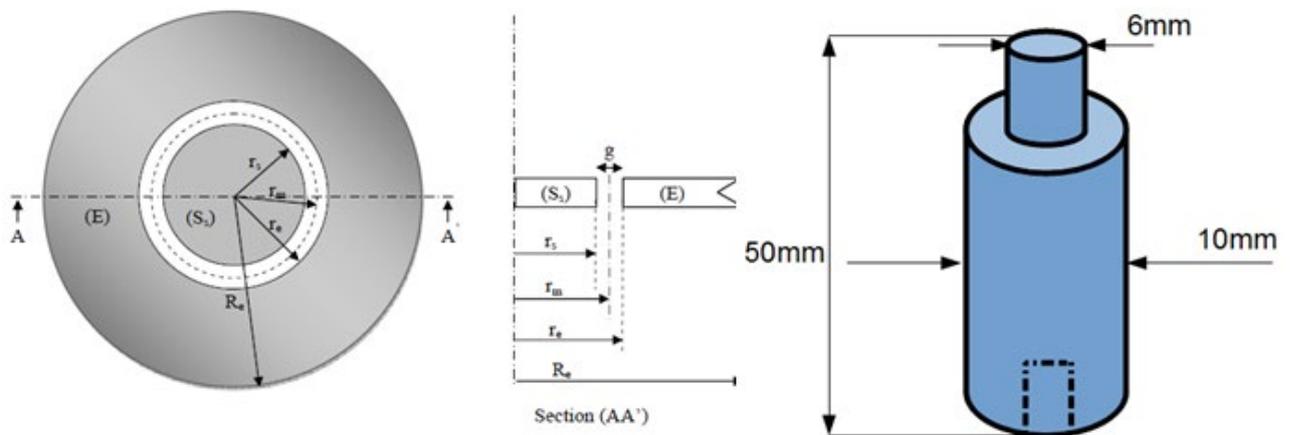
même niveau de surface dans une électrode mise à la terre sur laquelle on veut mesurer le champ électrique. Le signal de la sonde polarisée dérive du courant de conduction qui la traverse. La connaissance du courant et du champ local permet de déduire l'intensité du champ extérieur.

La première sonde apparue est la sonde capacitive mise au point par Collins et Meek en 1965 [68, 69]. La mesure du champ électrique est déduite de la charge d'espace induite à la surface du capteur. Puis, en 1974, Tassicker a introduit une nouvelle sonde circulaire portant actuellement son nom [70]. La mesure du champ électrique est déduite du courant de conduction la traversant et qui est contrôlé par polarisation de la sonde [71].

En 1980, Selim et Waters [72] ont fait recours au calcul numérique par éléments finis pour déterminer le champ de polarisation, apportant ainsi une analyse plus précise des performances de la sonde.

2.1.1. Description de la sonde polarisée circulaire

La sonde circulaire est un disque de rayon r_s et de surface S_s centré au milieu d'une électrode (E) en forme d'un disque de rayon intérieur et extérieur respectivement r_e et R_e . Les surfaces S_s et S_E des deux parties de la sonde sont au même niveau et forment un intervalle d'air de largeur $g = r_e - r_s$, (figure 2.10).



$$r_s=3 \text{ mm}, r_m=3.25 \text{ mm}, r_e=3.5 \text{ mm}, R_e=5 \text{ mm}, g=1\text{mm}.$$

Figure 2.1. Modèle et position de la sonde circulaire de Tassicker.

2.1.2. Principe de fonctionnement de la sonde polarisée circulaire

Le calcul du champ électrique E est basé sur la mesure du courant I collecté par la surface S_s de la sonde. Ce courant peut s'écrire:

$$I = J \cdot S_s = \frac{\mu \cdot \rho}{\epsilon_0} \cdot D \cdot S_s = \frac{\mu \cdot \rho}{\epsilon_0} \cdot \phi_s \quad (2.1)$$

Avec μ : Mobilité moyenne des ions;

- ρ : Densité de la charge d'espace ;
- D : Vecteur du déplacement électrique ;
- Φ_s : Flux du vecteur D à travers la sonde ;
- S_s : Surface réelle de la sonde ;
- J : Densité de courant électrique ;
- ϵ_0 : Permittivité électrique du vide.

Lorsque la sonde est polarisée positivement, nous avons deux contributions du flux Φ_s , l'une provenant du champ E à mesurer et l'autre provenant de la tension de polarisation V_b . Le flux total Φ_s à travers la sonde est donné par :

$$\phi_s = \phi_{s0} + \phi_{s1} = S_m \cdot E \cdot \epsilon_0 + \epsilon_0 V_b \quad (2.2)$$

Où Φ_{s0} est le flux du champ E à mesurer et Φ_{s1} la contribution du champ de polarisation E_b . Ces flux sont donnés par:

$$\phi_{s0} = S_m \cdot E \cdot \epsilon_0 \quad (2.3)$$

$$\phi_{s1} = \epsilon_0 V_b \quad (2.4)$$

$S_m = \pi \cdot r_m^2$ est la surface effective de rayon r_m .

La détermination de l'intensité du champ extérieur E à la surface de la sonde est obtenue en mesurant le courant résultant de la décharge couronne en absence et en présence de la tension de polarisation. En absence de celle-ci ($V_b=0$), le courant récolté par le collecteur (S) est I_{s0} .

Quand la plaque (E) est polarisée ($V_b \neq 0$), un champ local E_b est créé, il se superpose au champ extérieur E , et le courant mesuré est alors augmenté ou réduit à I_s selon la polarité de la tension V_b .

On a alors :

$$\frac{I}{I_{s0}} = \frac{\phi_s}{\phi_{s0}} = 1 + V_b \frac{C_0}{E \cdot \pi \cdot r_m^2 \cdot \epsilon_0} \quad (2.5)$$

Où Φ_s et Φ_{s0} les flux à travers la sonde, associés respectivement à $V_b \neq 0$ et $V_b=0$, r_m est le rayon effectif de la sonde, C_0 la capacité formée par les surfaces des deux parties (S) et (E).

Le champ E peut être déduit si l'on calcule la capacité C_0 .

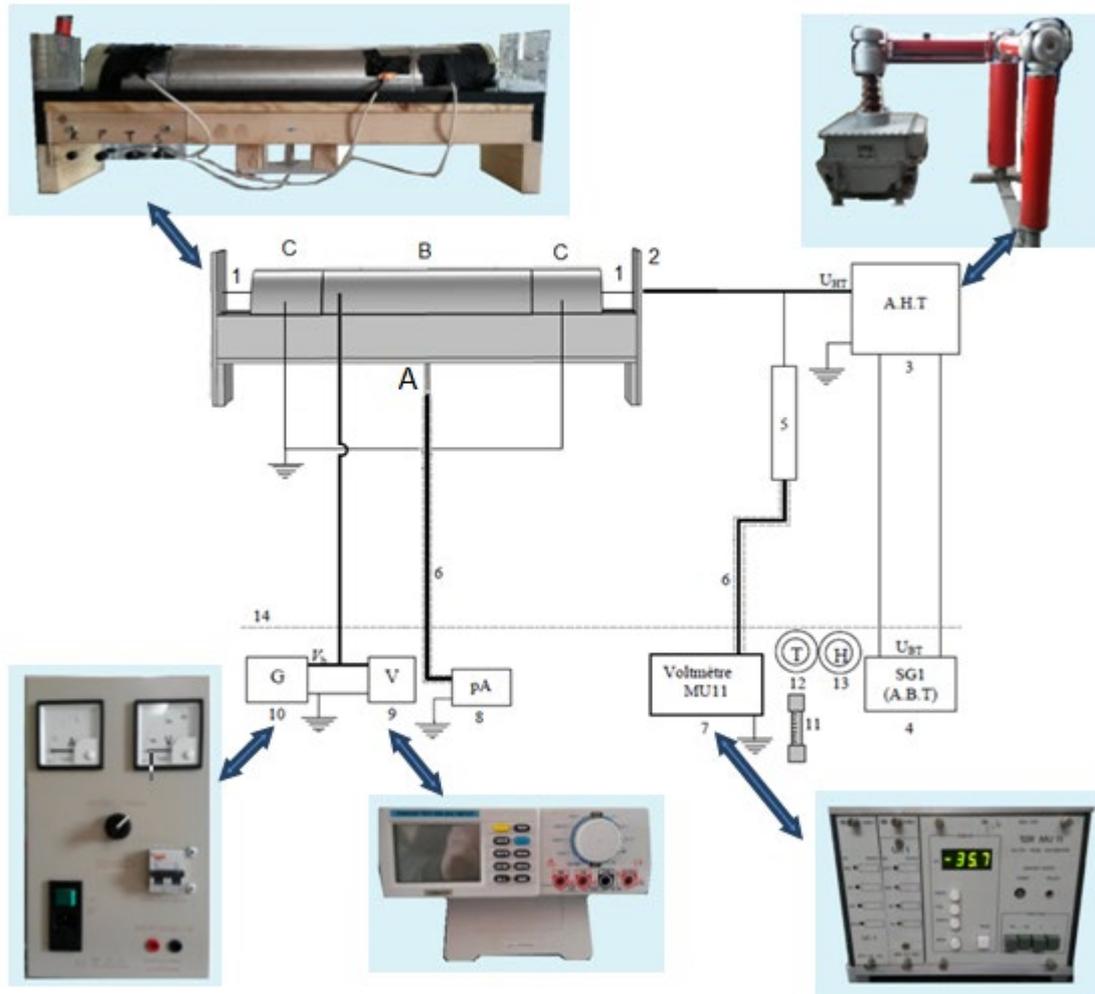
Tassiker a utilisé une expression analytique donné par Spence [73] :

$$C_0 = 4 \cdot r_m \cdot \epsilon_0 \cdot [1.07944 + 0.5 \cdot \ln(1 + \frac{r_m}{2 \cdot g})] \quad (2.6)$$

La relation (2.5) donne une caractéristique I_s/I_{s0} linéaire avec la tension V_b . Cependant, aux fortes valeurs de V_b , quand le champ à la surface de l'électrode s'inverse dû au champ de polarisation $E_b > E$, il se produit une déviation de la caractéristique par rapport à la linéarité.

2.2. Description du dispositif expérimental

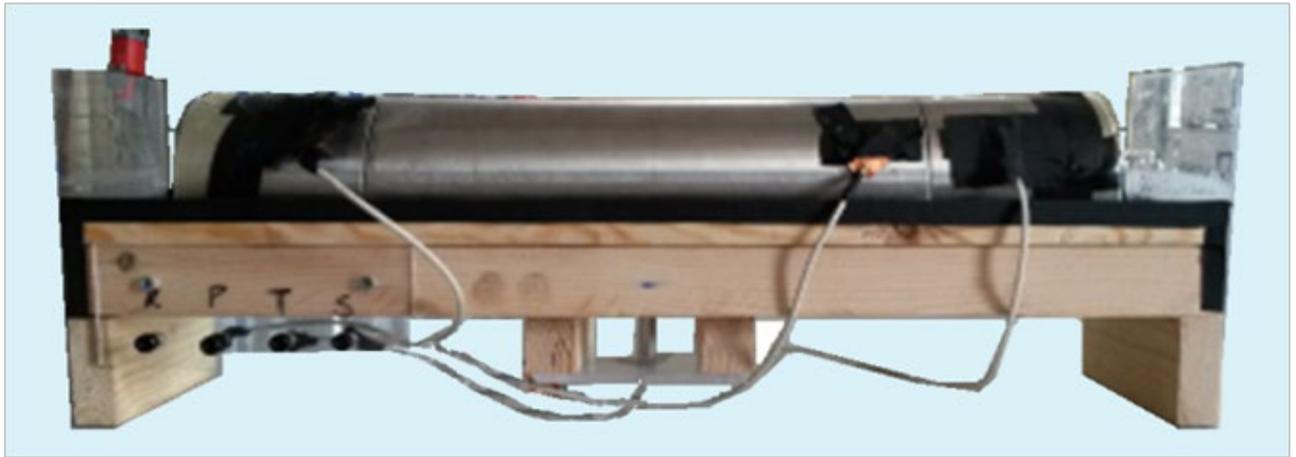
Le dispositif global utilisé pour la mesure des caractéristiques essentielles de la décharge couronne dans le filtre électrostatique est représenté par la figure (2.2).



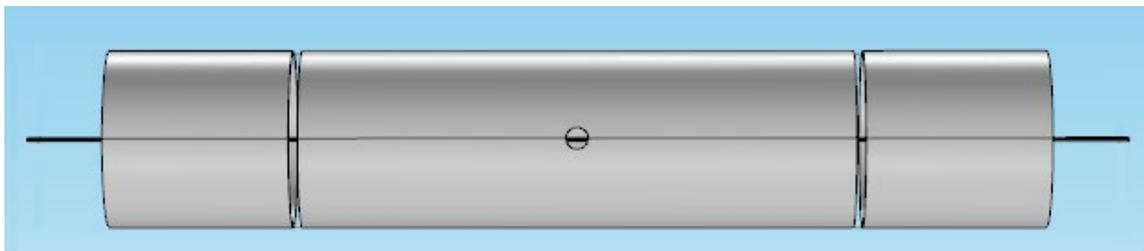
- | | | |
|--------------------------------|---|-------------------------------|
| (S) Collecteur de courant. | 4- SG1: Source de tension alternative BT. | 9- Voltmètre numérique. |
| (B) Plaques de polarisation. | 5- Résistance haute tension. | 10- Alimentation continue BT. |
| (C) Plans de garde. | 6- Câbles coaxiaux. | 11- Baromètre à mercure. |
| 1- Electrodes actives. | 7- Voltmètre de crête (MU11). | 12- Thermomètre à mercure. |
| 2- Supports des électrodes. | 8- Pico ampèremètre. | 13- Hygromètre à cheveux. |
| 3- Alimentation haute tension. | | 14- Grille d'isolation. |

Figure 2.2. Dispositif global pour l'identification des paramètres de la décharge couronne.

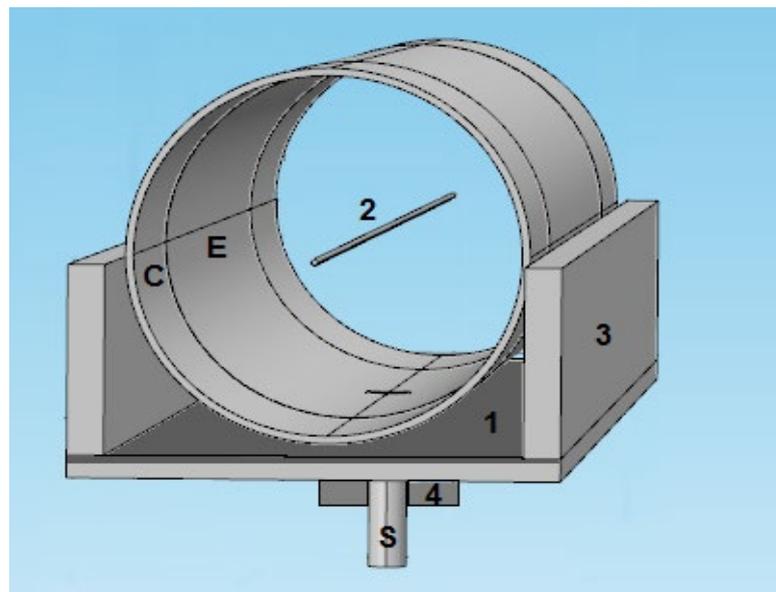
Le filtre électrostatique de type cylindre (figure 2.3) et la sonde circulaire (figure 2.4) sont réalisés au laboratoire de la halle de technologie de l'institut d'optique et de mécanique de précision de l'université Ferhat Abbas Sétif 1.



(a)



(b)



- (a) photographie, (b) Schéma de vue longitudinale ; (c) Schéma de vue transversale
 (S) Collecteur de courant. (2) fil (électrode).
 (E) Plan de polarisation. (3) Support en bois.
 (1) Plaque isolante. (4) Support en bakélite.

Figure 2.3. Filtre électrostatique de configuration Fil – Cylindre.



Figure 2.4. Les deux modèles de sondes utilisées : (a) cuivre, (b) aluminium.

Le dispositif global (figure 2.2) est constitué principalement d'un collecteur (S), de forme circulaire, logé dans une des plaques de polarisation (E) et laissant entre elles un intervalle d'air de largeur g . Cet ensemble est alors incorporé dans un même niveau de surface avec les cylindres de garde (C). Tous ces éléments (S, E et C) sont en acier inoxydable et reposent sur une plaque isolante placée sur des plaques en cuivre mises à la terre. L'ensemble repose sur un support en bois.

Le système d'électrodes et les éléments mis sous haute tension sont séparés par une grille de protection du manipulateur et des autres appareils de mesure basse tension.

Les électrodes actives sont tendues par des supports isolants en plexiglas et sont reliées à l'installation haute tension continue. Cette dernière résulte de l'élévation et du redressement d'une tension alternative variable. Pour mesurer le courant de décharge, un pico ampèremètre est connecté au collecteur (S) de la sonde. Les plaques de polarisation (B) sont reliées à une alimentation continue basse tension aux bornes de laquelle est connecté un voltmètre numérique pour mesurer la tension de polarisation V_b délivrée.

Nous disposons d'un baromètre à mercure, d'un thermomètre à mercure et d'un hygromètre à cheveux pour mesurer les paramètres physiques de l'air ambiant.

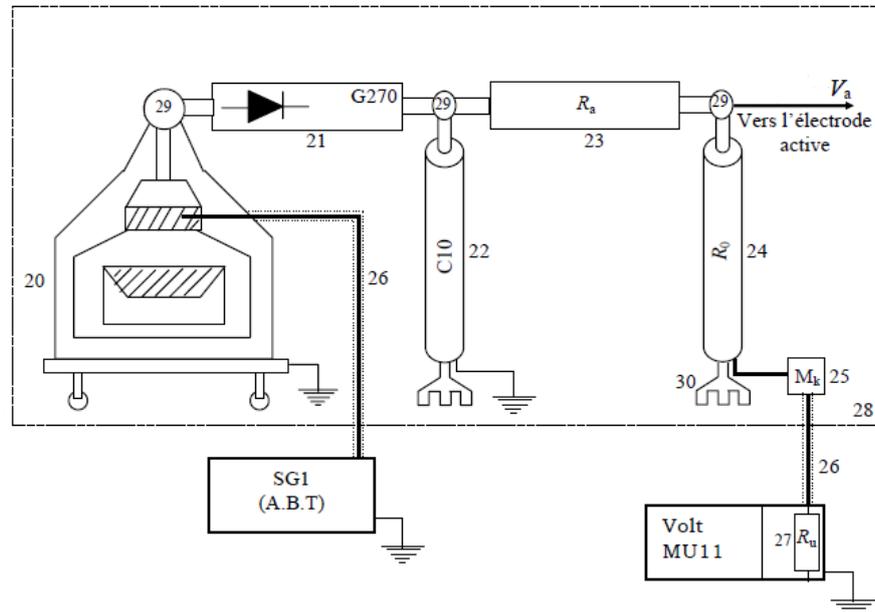
2.3. Source de tension

Pour réaliser le travail expérimental, nous avons utilisé l'installation haute tension du laboratoire de génie électrique de Béjaia (figure 2.5).

La source délivre une tension variable, continue ou alternative, de polarités positive ou négative. Pour la mesure des paramètres de la décharge couronne continue bipolaire, des tensions continues élevées des deux polarités sont nécessaires. L'installation haute tension pouvant délivrer des tensions variant de 0 à ± 140 kV est composée de:

- ✓ Une source basse tension SG1,
- ✓ Un transformateur haute tension T100, alimenté par la source SG1,

- ✓ Deux diodes de haute tension G270,
- ✓ Deux condensateurs de lissage C10.
- ✓ Deux résistance R_a et R_0



SG1- Alimentation basse tension.

20- Transformateur haute tension (T100).

21- Diode haute tension (G270).

22- Condensateur de lissage (C10).

23- Résistance d'amortissement (R_a).

24- Résistance haute tension (R_0).

25- Boîte de connexion.

26- Câbles coaxiaux.

27- Résistance basse tension (R_u)

MU11- Voltmètre de crête.

28- Grille de protection.

29- Nœuds de liaison.

30- Support d'élément.

Figure 2.5. Schéma de l'installation haute tension

Le transformateur élévateur T100 (20) est spécialement conçu pour la génération des hautes tensions avec un faible pas de variation de 100 V environ. Son enroulement primaire est alimenté par une source basse tension variable (SG1). La tension continue est obtenue par redressement de la tension alternative délivrée par le transformateur. Chacun des deux redresseuses mono alternance utilisés est composé d'une diode haute tension (21) au silicium et d'un condensateur de lissage C10 (22) de capacité de 10 nF. Une résistance R_a (23) de 106 k Ω relie le condensateur au système d'électrodes. Son rôle est d'amortir le courant, protégeant ainsi la diode des surintensités.

2.4. Mesure de la tension appliquée

La mesure de la tension continue V , est effectuée à l'aide d'un voltmètre de crête (MU11) et d'un diviseur résistif. Le diviseur est composé de la résistance haute tension R_0 de 250 M Ω et de la résistance basse tension R_u de valeur 501 k Ω à laquelle il faut associer en parallèle la résistance du voltmètre de crête MU11 de valeur $R_e = 4.24$ M Ω .

Les résistances R_e et R_u sont reliées par un câble coaxial blindé. Le voltmètre de crête (MU11) mesure la tension u aux bornes de la résistance basse tension et affiche numériquement la valeur de la tension appliquée $V_{app} = k.u$ ou k est le rapport du diviseur :

$$k = \left(\frac{R_0 + (R_e // R_u)}{R_e // R_u} \right) = \frac{R_0 R_e + R_0 R_u + R_u R_e}{R_u R_e} = 555.62 \quad (2.7)$$

2.5. Tension de polarisation V_b

Les cylindres de polarisation (B) sont reliés à l'alimentation continue basse tension stabilisée. Elle délivre une tension V_b négative ou positive et pouvant varier de 0 à 250 V. Cette tension est mesurée à l'aide d'un voltmètre numérique ayant une grande impédance d'entrée.

2.6. Mesure des paramètres physiques de l'air

Comme la décharge couronne est très influencée par les paramètres physiques de l'air [74, 75], il est alors nécessaire de connaître les conditions dans lesquelles cette décharge a lieu, la valeur du champ seuil E_S constitue une condition aux limites vers laquelle doit converger le champ calculé sur le conducteur.

Le calcul de E_S doit donc tenir compte des conditions atmosphériques dont lesquelles les mesures expérimentales ont été prises afin de faire une meilleure comparaison entre les résultats de laboratoire et ceux de la simulation.

Durant l'étude expérimentale, nous avons effectué les mesures de la pression à l'aide d'un baromètre à mercure, de la température à l'aide d'un thermomètre à mercure et de l'humidité à l'aide d'un hygromètre à cheveux.

2.7. Résultats et discussions

2.7.1. Choix des matériaux utilisés

Pour notre étude, les meilleures conditions de fonctionnement de notre système. Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé des analyses électrique, physique et chimique des matériaux constituant les parties essentielles du dispositif expérimental.

Nous avons étudié les cas suivants:

- Rayon du fil de nickel = 0.4mm;
- Rayon du fil de cuivre = 0.2 mm;
- Rayon de la sonde en aluminium = 3.25 mm;
- Rayon de la sonde en cuivre = 3.03 mm.

2.7.1.1 Analyse Chimique

Les essais chimiques ont été effectués au laboratoire de ERIS - Etablissement des Réalisations Industrielles de Sériana à Batna. Nous avons utilisé un appareil d'analyse chimique, un spectromètre, pour déterminer les compositions des matériaux (figure.2.6).

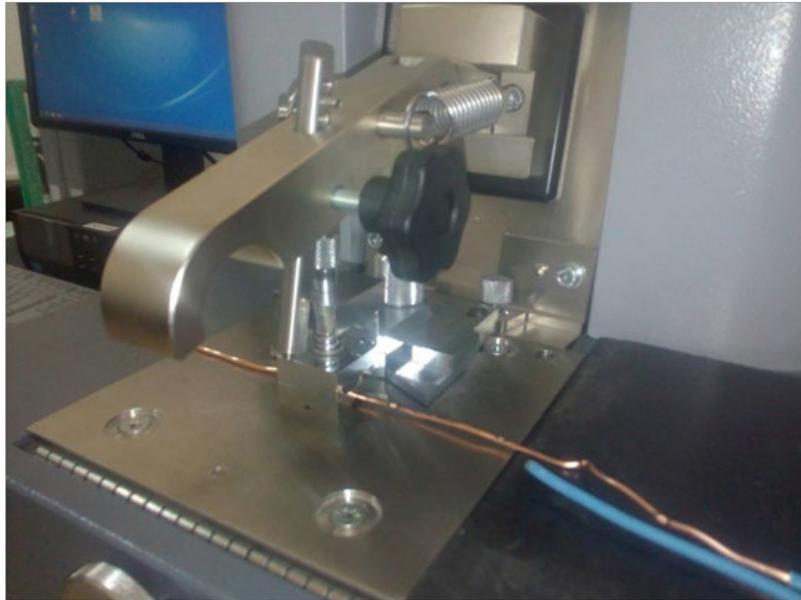


Figure 2.6. Appareil de test chimique spectromètre type SPECTRO MAXx.

L'analyseur stationnaire de métal SPECTRO MAXx est principalement utilisé pour les tests de matériaux dans les fonderies et pour les inspections en entrantes et sortantes dans l'industrie des métaux du monde entier. Il détermine tous les éléments utilisés dans l'industrie des métaux, y compris l'analyse du carbone, du phosphore, du soufre et de l'azote.

La septième génération de l'analyseur de métal OES à arc ou étincelle SPECTROMAXx offre des coûts d'exploitation considérablement réduits, des durées de mesure courtes et un nombre réduit d'exigences de maintenance, tout en offrant une précision et une stabilité exceptionnelles.

Le principe des analyseurs stationnaires de métaux SPECTRO est la spectrométrie d'émission optique. L'échantillon est vaporisé avec la sonde de mesure par une décharge arc ou étincelle. Les atomes et les ions contenus dans la vapeur atomique génèrent l'émission d'un rayonnement. Le rayonnement émis traverse le système optique du spectromètre via une fibre optique, où il est dispersé dans ses composantes spectrales. A partir de la gamme de longueur d'ondes émise par chaque élément, la ligne analytique la plus adaptée pour l'application est mesurée au moyen d'un photomultiplicateur. Le tableau (2.1) donne les pourcentages des différents éléments de chaque fil.

L'intensité du rayonnement, qui est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon, est recalculée à partir de courbes de calibration et peut être déterminée directement en

concentration.

D'après cette analyse, nous constatons que les fils utilisés comme électrode active sont constitués en majorité totale en cuivre de plus de 99,94 % quel que soit le rayon.

| Rayon / Élément | R= 0.2mm | R=0.4 mm | R=0.7 mm | R=0.9 mm |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| (Cu) Cuivre | 99.94 | 99.94 | 99.94 | 99.94 |
| (Zn) Zinc | <0.004 | <0.0044 | <0.0069 | <0.004 |
| (Pb) Plomb | <0.005 | <0.005 | <0.005 | <0.005 |
| (Sn) Etain | <0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 |
| (P) Phosphore | <0.0025 | <0.0025 | <0.0025 | <0.0025 |
| (Mn) Manganèse | <0.0015 | <0.0015 | <0.0015 | <0.0015 |
| (Fe) Fer | <0.0025 | <0.0025 | <0.0025 | <0.0025 |
| (Ni) Nickel | <0.0015 | <0.0015 | <0.0015 | <0.0015 |
| (Cr) Chrome | <0.0035 | <0.0035 | <0.0035 | <0.0035 |
| (As) Arsenic | <0.0020 | <0.0020 | <0.0020 | <0.0020 |
| (Sb) Antimoine | <0.007 | <0.007 | <0.007 | <0.007 |
| (Bi) Bismuth | <0.0045 | <0.0045 | <0.0045 | <0.0045 |
| (Ag) Argent | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| (S) Soufre | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |

Tableau 2.1. Pourcentages des différents éléments de composition du fil de l'électrode active

2.7.1.2 Analyse Physique

L'étude physique est réalisée au laboratoire de l'institut d'optique et de mécanique de précision de l'université Sétif 1. Nous avons réalisé l'essai de traction à l'aide de la machine de traction MTS Exceed40 (figure 2.7).

L'essai de traction permet déterminer quelques caractéristiques mécanique des matériaux, indépendamment de la forme de l'objet sollicité, ou de la performance d'un assemblage mécanique. Comme tout essai mécanique, l'essai de traction reproduit une sollicitation simple, donc éloignée des sollicitations réelles, mais facilement maîtrisables et reproductibles.



Figure 2.7. Machine de traction MTS Exceed 40.

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée (figure 2.8), que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte.

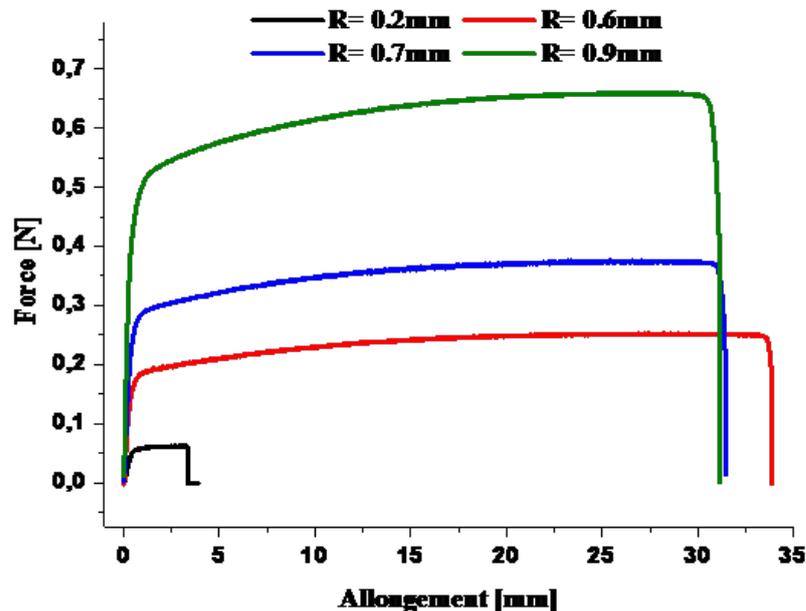


Figure 2.8. Représentation de la force en fonction de l'allongement.

Une variante moderne des essais de traction consiste à utiliser la force centrifuge sur un assemblage pour générer une contrainte de traction. Lorsque la valeur limite de résistance à la traction (exprimée en MPa ou N) d'un assemblage ou d'un collage est égale à la force centrifuge appliquée, on génère la rupture de ceux-ci et enregistre la limite de rupture. L'avantage consiste à réaliser des

tests en batterie sur plusieurs éprouvettes soumises à une contrainte strictement identique lors de l'essai.

L'essai de traction donne plusieurs caractéristiques importantes comme montré dans le tableau 2.2:

- le module de Young E_y , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou en giga pascals (GPa) ;
- la limite d'élasticité R_e , σ_e , σ_y ou f_y (*yield stress*), qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité et de comportement linéaire ;
- la résistance à la traction R_{tm} , σ_m ou f_u (limite ultime), qui définit la limite à la rupture ;
- l'allongement à la rupture A_r , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications.

D'après cette étude, il est clair que le cuivre supporte une grande force avant l'apparition de la rupture.

| Rayon de fil [mm] | R= 0.2 mm | R=0.6mm | R=0.7mm | R=0.9mm |
|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Motif de fin d'exécution de l'essai | Rupture détectée | Rupture détectée | Rupture détectée | Rupture détectée |
| Pic de contrainte [MPa] | 222,3 | 239,0 | 227,6 | 274,3 |
| Force maximale [kN] | 0,063 | 0,253 | 0,376 | 0,660 |
| Déformation à la rupture [%] | 31,134 | 31,286 | 28,869 | 28,575 |
| Module de Young [MPa] | 47720,992 | 59652,268 | 61633,133 | 62419,554 |

Tableau 2.2. Résultats de l'exécution des essais sur différents rayons des fils.

2.7.1.3 Analyse électrique

L'étude électrique est réalisée au bloc haute tension du laboratoire de génie électrique de l'université A. M. de Béjaia. Pour cette partie, nous n'avons pas utilisé la polarisation. Les effets des différents matériaux utilisés pour la sonde et le fil sont représentés sur les figures (2.9 et 2.10).

En polarité positive, nous constatons que la caractéristique de la sonde en aluminium avec fil en cuivre et la caractéristique de la sonde en cuivre avec fil en cuivre ont la même dynamique. Pour la polarité négative, nous constatons que les caractéristiques et sonde en cuivre avec fil en nickel sont pratiquement les mêmes. Donc, nous pouvons utiliser soit une sonde aluminium –fil cuivre ou bien sonde cuivre –fil cuivre. Comme l'allure de la courbe pour le cas de sonde aluminium –fil cuivre est meilleure, alors nous avons choisi ce dernier cas pour le reste du travail.

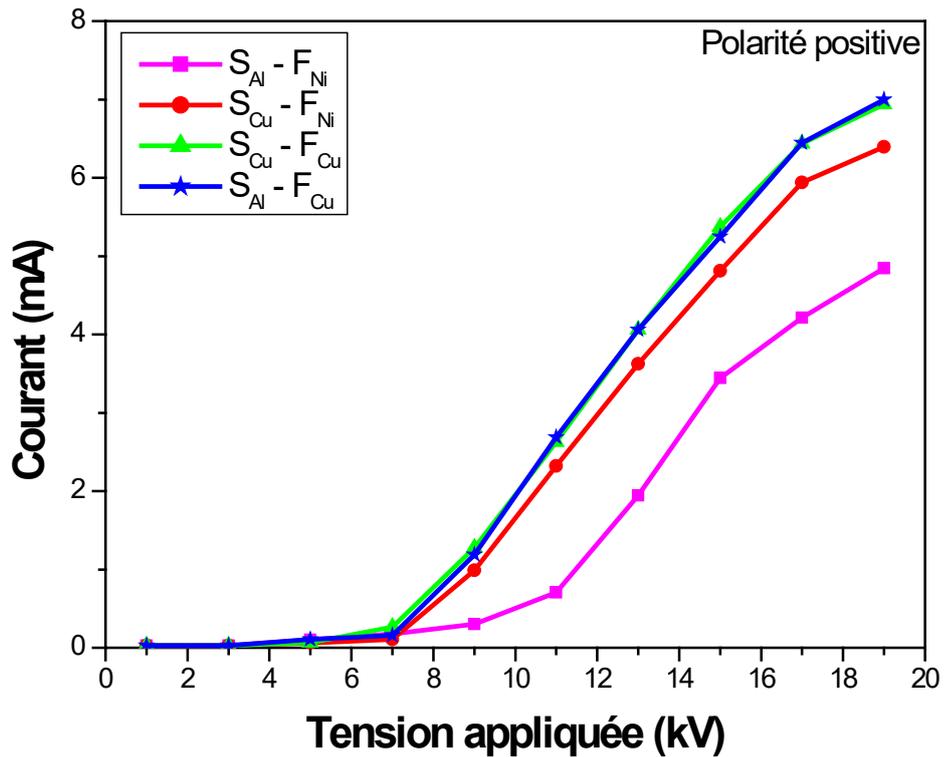


Figure 2.9. Variation du courant de décharge pour la polarité positive en fonction des matériaux de la sonde et de l'électrode active.

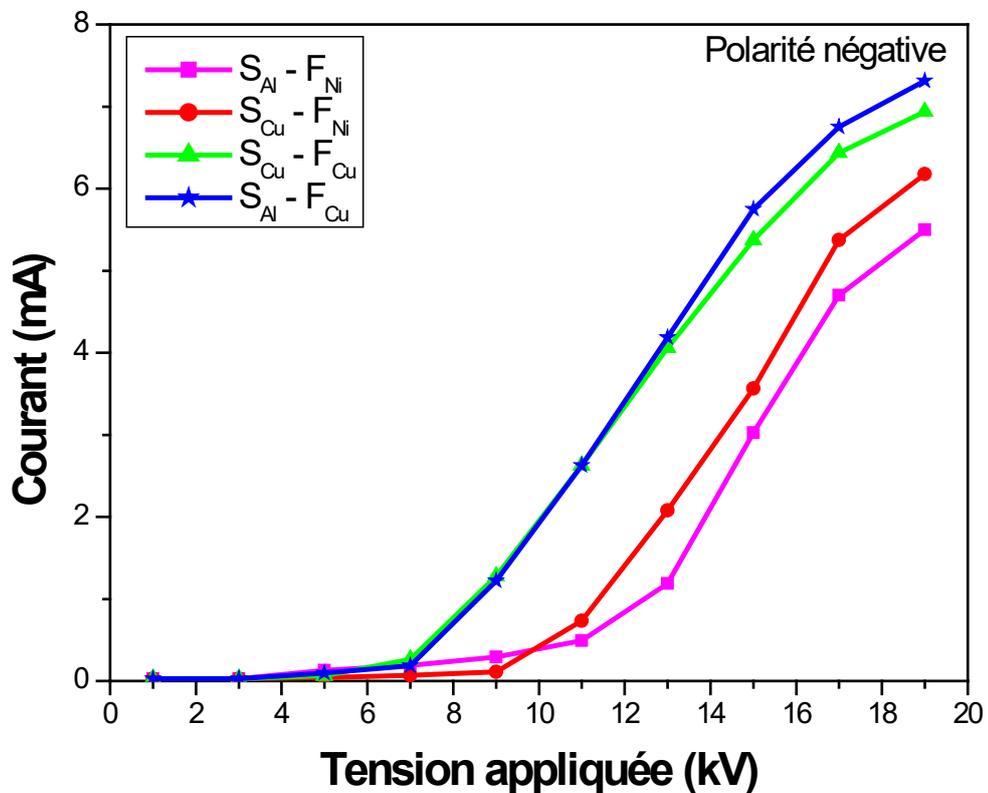


Figure 2.10. Variation du courant de décharge pour la polarité négative en fonction des matériaux de la sonde et de l'électrode active

Nous avons effectué des essais pour différentes sondes pour voir les effets des matériaux sur la décharge couronne. La précision des mesures dépend, d'une part, de la position du collecteur (S) par rapport au cylindre de polarisation (B). D'autre part, du courant de fuite causé par l'accumulation de poussière environnante entre les deux parties (S) et (B). Il est alors recommandé de nettoyer régulièrement la sonde et les cylindres de garde avant chaque essai et de vérifier que le collecteur est au même niveau de surface que le cylindre de polarisation (B).

Les figures (2.11 et 2.12) montrent l'effet de la distance qui sépare la sonde de l'électrode active (le fil) pour les deux polarités.

La spécificité de la décharge DC positive ou négative est l'existence d'une zone de dérive des ions qui agit comme une impédance en série avec la zone d'ionisation et donne aux décharges couronne leur stabilité [76, 77]. Dans le cas d'une décharge négative, les ions positifs créés par ionisation peuvent revenir à la cathode assez rapidement, alors que les ions négatifs créés par attachement d'électrons migrent dans la zone de dérive où le champ est plus faible. Avec une décharge positive, les ions positifs sont directement créés dans la région d'ionisation et migrent ensuite dans tout l'espace inter-électrodes.

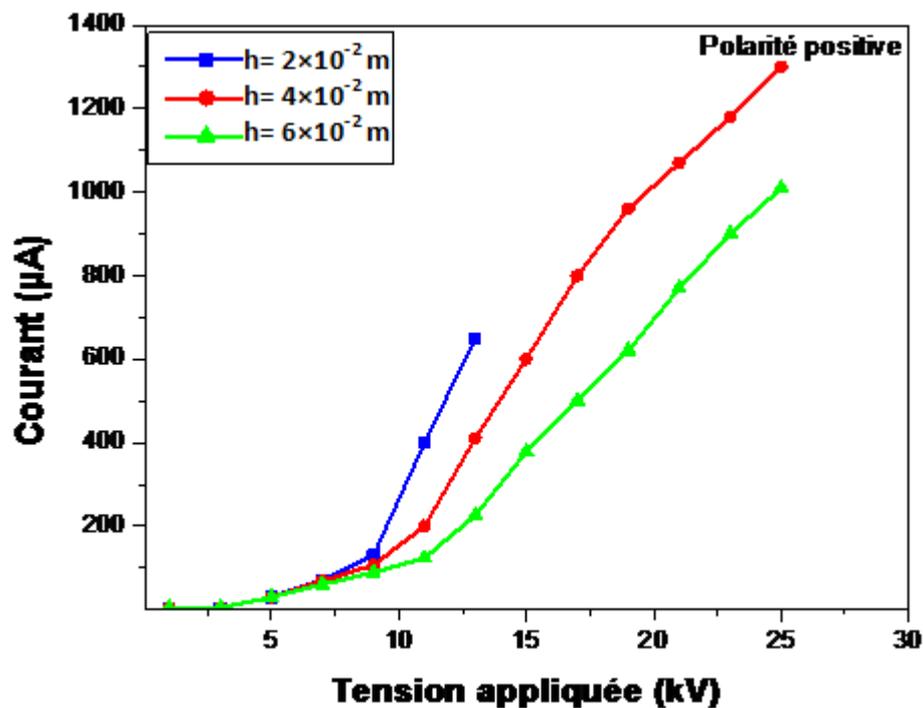


Figure 2.11. Variation du courant de décharge pour la polarité positive en fonction de la distance entre les électrodes à l'intérieur du cylindre collecteur ($S_{Al} - F_{Cu}$).

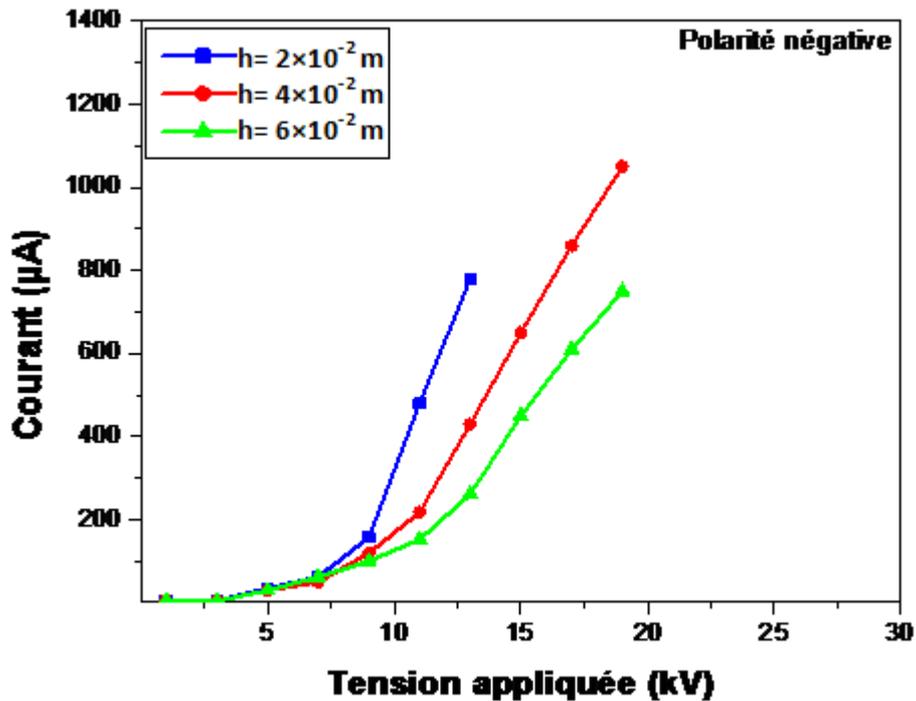


Figure 2.12. Variation du courant de décharge pour la polarité négative en fonction de la distance entre les électrodes à l'intérieur du cylindre collecteur ($S_{Al} - F_{Cu}$).

Pour une électrode active négative, comme les électrons s'attachent très rapidement aux atomes ou molécules neutres, des ions négatifs sont formés et tout se passe comme si des ions de même polarité que l'émetteur étaient émis au plan de collecte sous l'effet de l'ionisation, c'est pour ça dans la majorité des cas, on utilise la décharge couronne négative ce qui nous emmène à faire une comparaison entre la décharge couronne négative et la décharge couronne positive. Sur les figures (2.11 et 2.12), on peut identifier aussi l'effet de la polarité sur la courbe $I = f(V)$.

La tension nécessaire pour maintenir le même courant de décharge est plus élevée avec une polarité positive et la tension seuil en polarité négative est supérieure à celle de la polarité positive.

Il apparaît clairement que le courant de décharge est plus important lors de la polarité négative sur le cylindre, exemple pour une tension appliquée constante $V = 13 \text{ kV}$ avec une hauteur de $H = 2 \text{ cm}$, le courant de décharge $I = 780 \text{ µA}$ pour la polarité négative, et $I = 650 \text{ µA}$ pour la polarité positive. Pour obtenir une efficacité de dépolluage optimale, il faut que la concentration d'ions dans le gaz soit maximale, c'est-à-dire que le courant est maximal, sans arc électrique. Par conséquent, la tension de fonctionnement est prise légèrement inférieure de quelques kV à la tension d'arc. Ceci est la source des problèmes de pertes d'efficacité de PES dans la majorité des applications utilisant des décharges couronnes, on cherche à éviter le passage de l'arc pour ne pas détériorer les électrodes et les appareils de mesures.

2.7.2. Etude des paramètres de la décharge couronne en présence de la polarisation

2.7.2.1 Courant de décharge en présence de la polarisation

Pour la suite de ce travail, la distance interélectrodes est fixée à 5 cm. La figure (2.13) montre les allures des caractéristiques courant-tension pour la décharge couronne positive. Nous constatons que l'effet de la tension de polarisation est significatif malgré qu'il soit faible par rapport à l'effet de la tension appliquée. Le courant augmente graduellement avec la tension appliquée lorsqu'elle dépasse la tension seuil de l'effet couronne V_0 et ce jusqu'au claquage du milieu gazeux V_c . Le courant continu qui traverse l'espace interélectrodes est une fonction non linéaire de la tension appliquée. Bien que les décharges recouvrent des phénomènes complexes, une relation empirique classique simple dite loi courant-tension de Townsend est généralement utilisée.

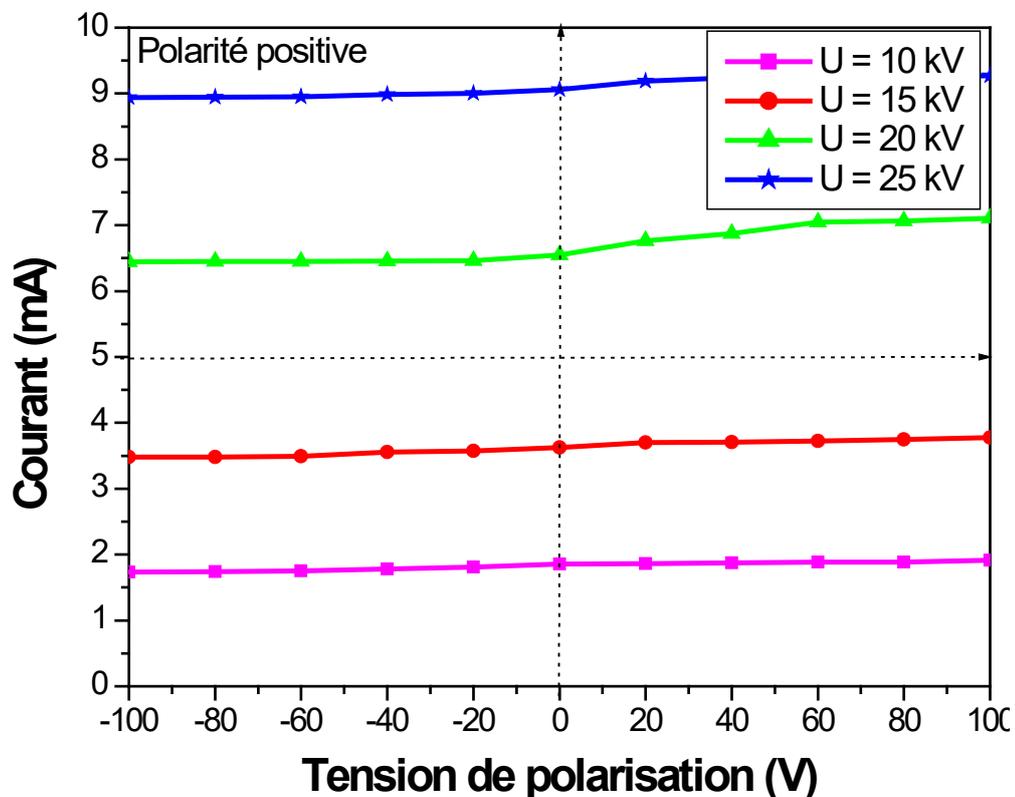


Figure 2.13. Variation du courant en fonction de la tension de polarisation pour différents niveaux de la tension appliquée (Polarité positive: S_{Al} – F_{Cu}).

En 1914, Townsend [78, 79] a déterminé une formule pour la caractérisation courant-tension et la stabilité de phénomène dans un système fil-cylindre, plus tard il a été constaté que la relation Townsend pourrait également être utilisée pour les géométries fil-plan et fil-cylindre, selon les travaux de Henson [77, 80]. Cette formule est donnée par :

$$I = K' \cdot V \cdot (V - V_0) \quad (2.8)$$

Où K' est une constante qui dépend de la configuration des électrodes, de la mobilité des porteurs de

charges, de la température, de la pression et de l'humidité.

Il apparait clairement que le courant est plus important et croît rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances interélectrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour des valeurs de tension inférieures dans le cas de faible distance interélectrodes.

2.7.2.2 Vérification du fonctionnement de la sonde

L'effet de la polarisation sur les variations du courant de décharge pour différents niveaux de la haute tension est représenté par la figure (2.14) suivante:

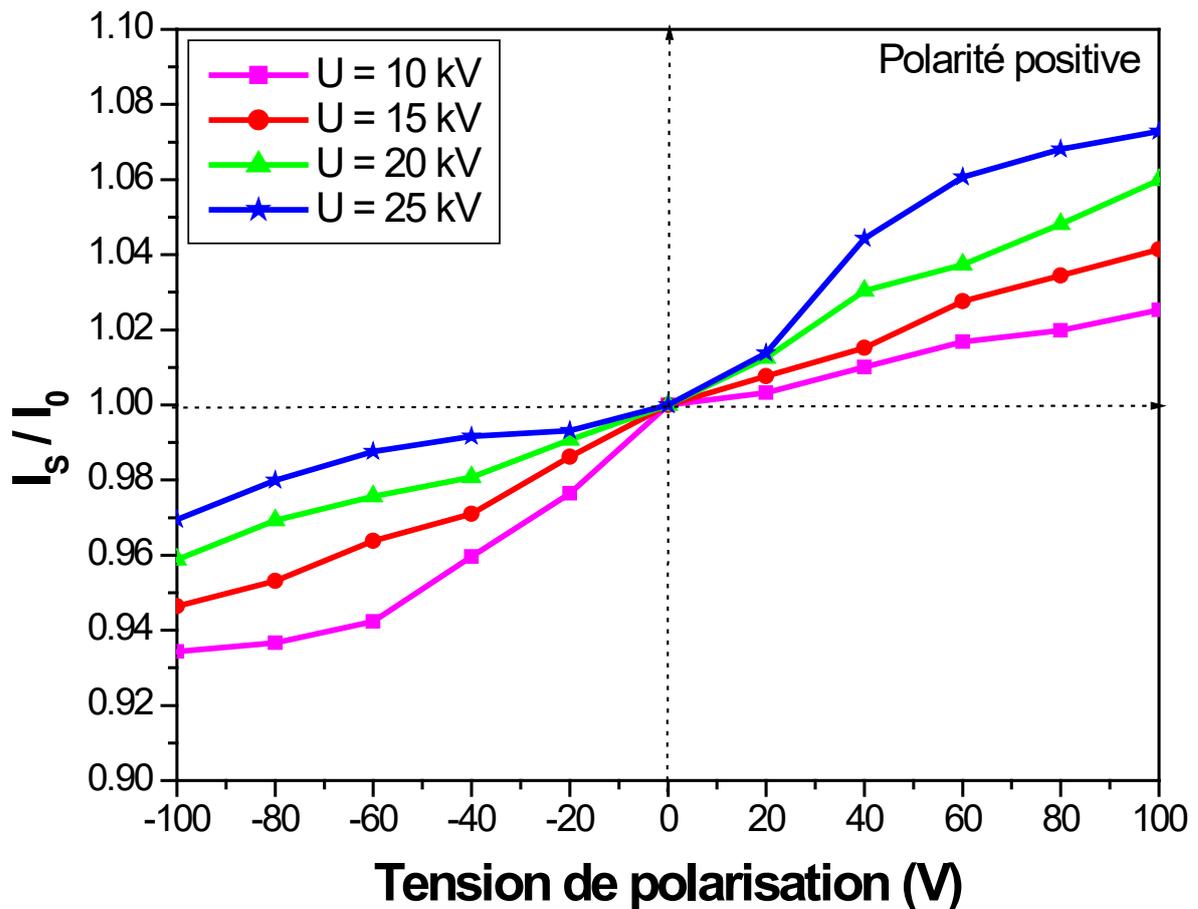


Figure 2.14. Variation du rapport des courants en fonction de la tension de polarisation pour différents niveaux de la tension appliquée (Polarité positive: $S_{Al} - F_{Cu}$).

Pour mettre en évidence les fonctions de la sonde, nous disposons comme électrode active un fil de 0.2 mm de diamètre. Nous avons effectué les mesures du courant I_s collecté par le collecteur (S) en fonction de la tension de polarisation V_b , allant de -100 V à +100 V pour une tension appliquée à l'électrode active constante pour chaque série de mesure.

A partir des résultats obtenus, nous avons déterminé le rapport des courants I_s/I_{s0} , correspondant respectivement à $V_b \neq 0$ et à $V_b = 0$, pour différentes tensions de polarisation. Nous constatons que la caractéristique est pratiquement linéaire aux faibles valeurs de V_b , par contre, elle dévie de la

linéarité aux fortes valeurs de V_b . Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs avec la sonde linéaire [78, 79].

La mesure du rapport (I_s/I_{s0}) nous permet d'évaluer le champ électrique E à la surface du cylindre par la détermination de la pente P_e de la caractéristique $I_s/I_{s0} = f(V_b)$.

2.7.2.3 Champ électrique

Les variations du champ électrique mesuré au voisinage immédiat du cylindre mis à la terre en fonction de la tension appliquée à l'électrode active sont représentées sur la figure 2.15. Nous nous sommes limités à une tension de 26 kV pour éviter la tension de claquage.

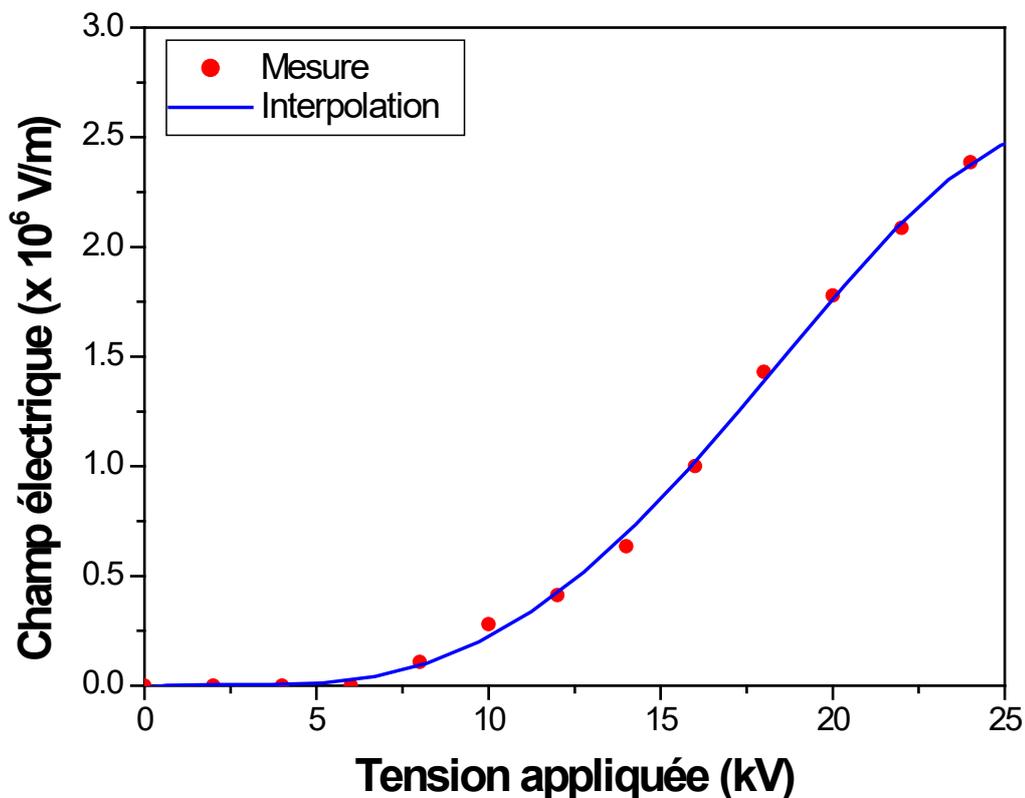


Figure 2.15. Variation du champ électrique au niveau du cylindre en fonction de la tension appliquée (Polarité positive: $S_{Al} - F_{Cu}$).

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude du champ électrique lors de la décharge couronne. La mesure du champ n'est pas aisée due à la présence de la charge d'espace. Cependant, le champ peut être mesuré avec une précision acceptable à l'aide de la sonde polarisée de Tassicker incorporée dans un même niveau de surface des électrodes mises à la terre. La sonde polarisée est un simple capteur circulaire (sonde circulaire) ou rectangulaire (sonde linéaire). Le courant de décharge collecté par la sonde est contrôlé par un champ électrique créé localement par la polarisation de celle-ci.

Le champ électrique est mesuré en newtons par coulombs ($N.C^{-1}$), mais l'unité couramment

employée est le volt par mètre, notée $V.m^{-1}$ [81].

Une particule immobile de charge électrique q subit une force Fe produite par l'ensemble des autres charges électriques. Cette force est proportionnelle à la charge q , et par conséquent le quotient Fe/q ne dépend pas de la particule considérée, mais dénote une propriété locale de l'espace que l'on appelle champ électrique $E_{(t,r)}$. De même que la force dont il découle qui est une grandeur vectorielle définie par une amplitude et une direction, qui varie généralement avec le temps t et la position r [82]:

$$F_{e(t,r)}/q = E_{(t,r)} \quad (2.9)$$

Le champ électrostatique créé au point r_1 par une charge q fixe, située au point r_2 , a pour expression[83] :

$$\vec{E}(r_{12}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q\vec{u}_r}{|r_1-r_2|^2} \quad (2.10)$$

2.7.2.4 Densité de courant électrique

Dans certains milieux, les charges électriques (électrons ou ions) peuvent se déplacer librement. L'application d'une force électrique fait alors bouger les charges et crée un courant électrique, dont on définit la densité $J_{(t,r)}$ [A/m²] par la relation :

$$J_{(t,r)} = \sum_i \rho v_i \quad (2.11)$$

La sommation porte sur tous les types de particules chargées qui se déplacent dans le milieu considéré, les charges du type i étant caractérisées par une densité moyenne de charge ρ_i et une vitesse moyenne v_i . On constate dans beaucoup de situations que, à cause des collisions entre particules, c'est la vitesse moyenne v_i . (Et non l'accélération) qui est proportionnelle au champ électrique et on définit alors une conductivité σ [S/m][82]:

$$J_{(t,r)} = \sigma E_{(t,r)} \quad (2.12)$$

Cette relation est connue sous le nom de loi d'Ohm.

La densité du courant est obtenue à partir du courant mesuré en absence de la polarisation ($V_b=0$) que l'on divise par la surface effective de la sonde S_m :

J se définit comme le courant électrique par unité d'aire de section en n'importe quel point de l'espace [84] :

$$J = \frac{I_0}{S_m} \quad (2.13)$$

Avec $S_m = r_m^2 \cdot \pi$: Surface effective de la sonde.

Les variations de la densité de courant sont représentées sur la figure (2.16). Nous constatons que

l'augmentation de la tension appliquée affecte fortement la caractéristique de la densité de courant.

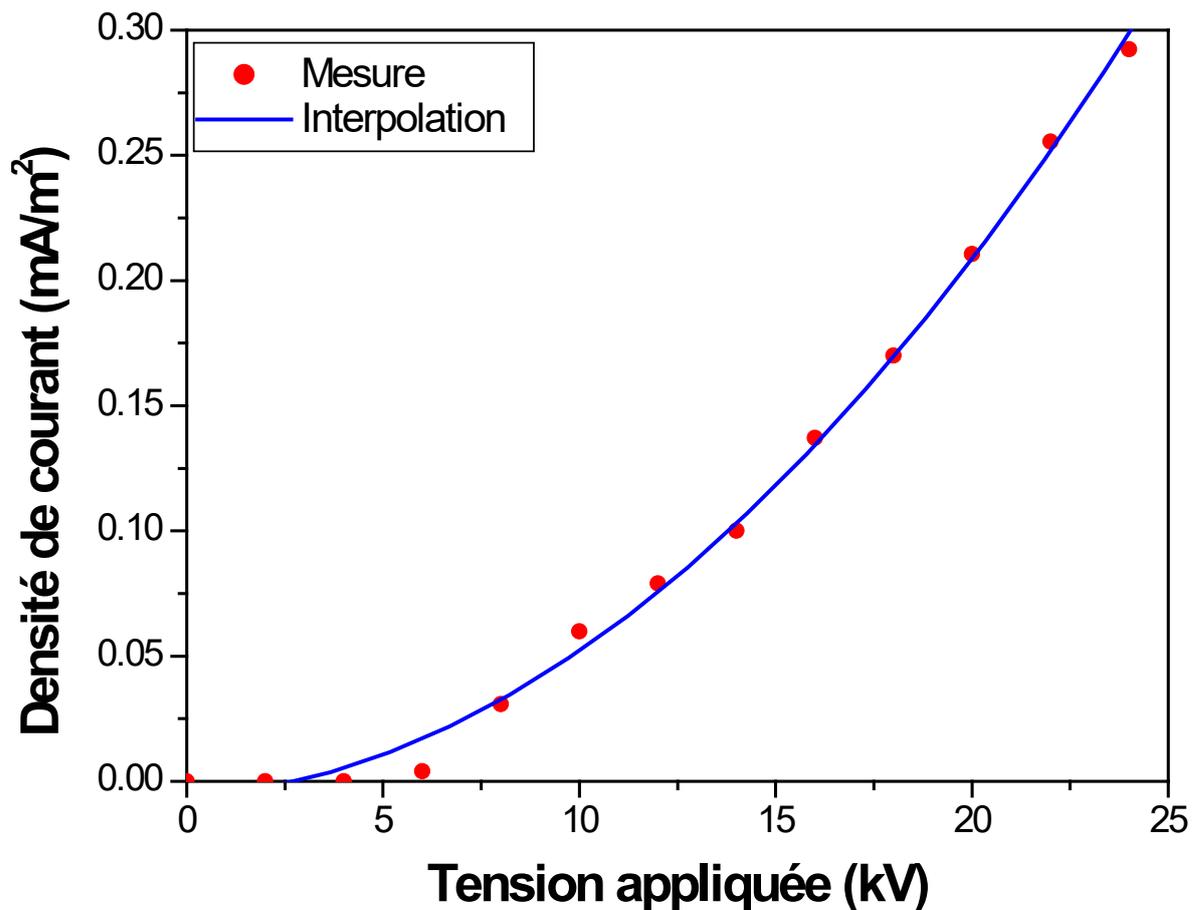


Figure 2.16. Variation de la densité de courant en fonction de la tension appliquée (Polarité positive: S_{Al} – F_{Cu}).

2.7.2.5 Densité de la charge d'espace

Les variations de la densité de la charge d'espace en fonction de la tension appliquée dans l'espace interélectrodes sont représentées dans la figure (2.17).

La densité de la charge d'espace ρ est déterminée à partir des mesures de la densité du courant J et du champ électrique E au voisinage immédiat du cylindre. Elle est reliée à ces paramètres par la relation suivante :

$$\rho = \frac{J}{\mu \cdot E} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2.14)$$

Où μ représente la mobilité ionique moyenne.

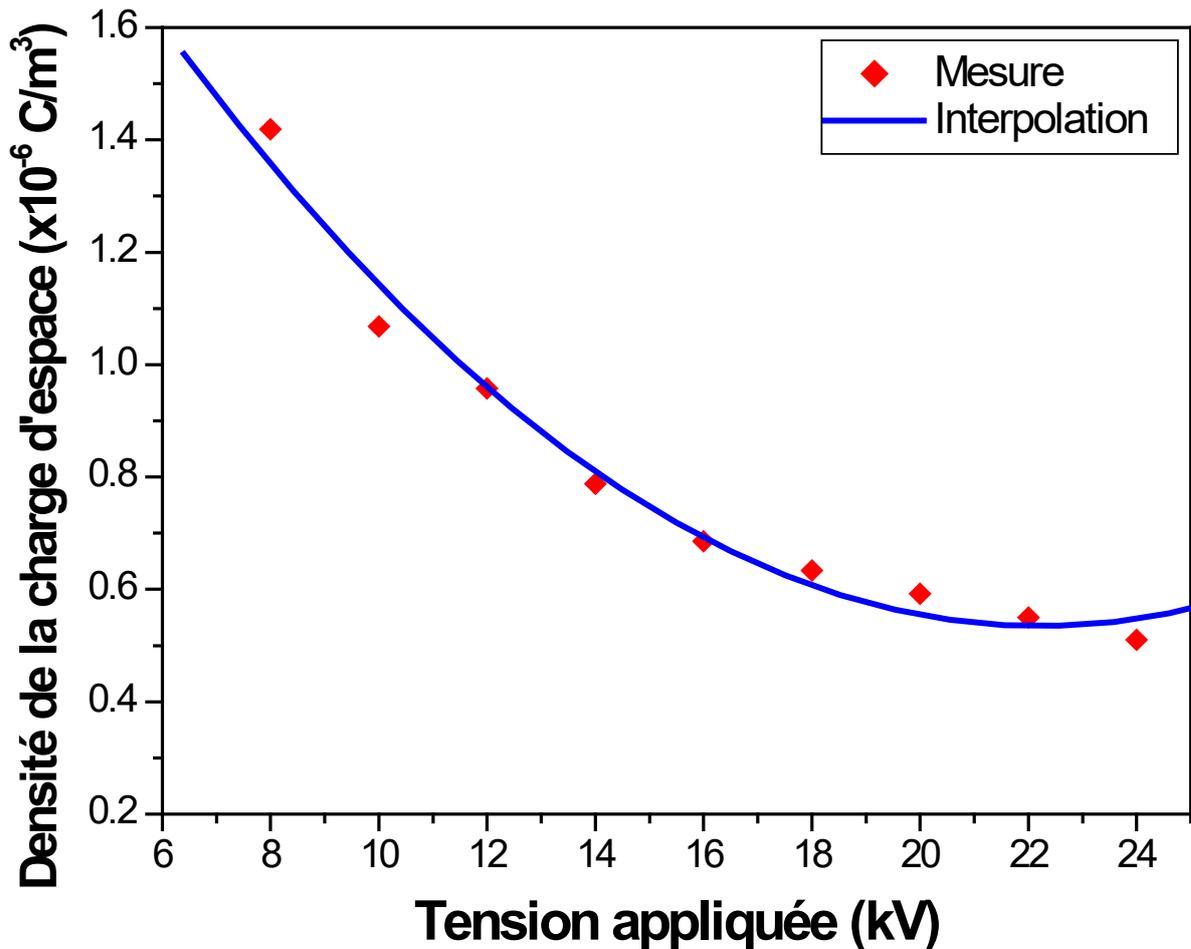


Figure 2.17. Variation de la densité de la charge d'espace en fonction de la tension appliquée (Polarité positive: $S_{Al} - F_{Cu}$).

Lors de la décharge couronne, le milieu interélectrodes se répartit en deux zones. Une zone active, près de l'électrode portée à la haute tension, caractérisée par une charge d'espace nulle et une zone de dérive, caractérisée par une charge d'espace ρ positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée. Cette charge dérive vers le plan sous faible champ.

La charge électrique peut être ponctuelle (particule infiniment petite) ou distribuée le long d'une ligne, sur une surface ou dans un volume, de sorte qu'on rencontre les quatre grandeurs suivantes:

- ✓ q [C]: charge ponctuelle
- ✓ ρ_l [C/m]: densité de charge linéique
- ✓ ρ_s [C/m²]: densité de charge surfacique
- ✓ ρ [C/m³]: densité de charge volumique

Une densité de charge est définie par la limite du quotient de la charge contenue dans un volume

(ou sur une surface, ou le long d'une ligne, ou un point) par ce volume (surface, longueur de ligne) lorsque les éléments deviennent très petits, ils doivent toutefois garder une dimension suffisante par rapport aux dimensions atomiques pour qu'on puisse considérer l'effet moyen d'un certain nombre de particules [81].

2.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude expérimentale ayant pour objet la mesure des différents paramètres essentiels qui caractérisent la décharge couronne à la surface des plans mis à la terre. Cette étude permet de mesurer la caractéristique courant-tension, le champ électrique, la densité de courant et la densité de la charge d'espace au voisinage immédiat du cylindre collecteur.

Le choix des matériaux utilisés pour la sonde capacitive, l'électrode active et le cylindre collecteur est basé sur des analyses électrique, physique et chimique.

La précision des mesures dépend, d'une part, de l'état des électrodes et de la poussière environnante, et d'autre part de la position de la sonde par rapport à l'électrode.

L'étude expérimentale que nous avons développée, a permis de mettre en évidence l'effet de plusieurs paramètres sur la décharge couronne en géométrie fil-cylindre.

De plus, les résultats obtenus serviront de point de comparaison avec les autres études expérimentales réalisées à ce jour. Ces résultats ont permis d'établir des relations pour réaliser une simulation numérique représentative des conditions réelles de la décharge couronne bipolaire en géométrie fil-cylindre.

Chapitre 03

MODELISATION ET SIMULATION DE LA DECHARGE COURONNE DANS LES ELECTROFILTRES FIL-CYLINDRE

La simulation numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur ou réseau en vue de simuler un phénomène physique réel. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques qui sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé pour prédire son évolution. On parle également de calcul numérique. La simulation est rapidement devenue incontournable pour la modélisation des systèmes. Elle permet de prédire des résultats et d'éviter le coût d'une série d'épreuves réelles.

La mise en œuvre et le développement de la modélisation et de la simulation numériques nécessitent tout d'abord une bonne connaissance des équations et des phénomènes dont elles rendent compte, soit en fait des compétences en mathématiques et en physique. L'étude des propriétés des algorithmes et de la précision des résultats qui en découlent est le domaine de l'analyse numérique, branche des mathématiques appliquées. L'implémentation efficace de ces algorithmes ne peut se concevoir sans des connaissances approfondies en informatique. Enfin, l'interprétation des résultats du calcul relève de nouveau d'une bonne connaissance de la physique.

Pour ce chapitre, nous présentons les différentes étapes la résolution numérique des équations qui gouvernent la décharge couronne basées sur la résolution de l'équation de Poisson en imposant les conditions aux limites de types Dirichlet et de Neumann adaptées à notre problème.

Pour la détermination de la distribution du champ électrique, le potentiel électrique, les distributions des densités de courant, d'énergie et de la charge d'espace, nous avons utilisé le logiciel Comsol-Multiphysics qui est un outil très efficace pour la résolution des problèmes de l'électromagnétisme. La résolution des équations de Poisson est basée sur la technique de la méthode des éléments finis.

3.1. Modélisation mathématique de la décharge couronne

L'élaboration du modèle mathématique de la décharge couronne, selon le mode de fonctionnement

du point de vue électrique, nous a conduits à décrire le problème considéré par un système d'équations non linéaires. La difficulté de résoudre analytiquement ces équations aux dérivées partielles, nous impose à concevoir une stratégie de résolution du problème couplé, charge d'espace - champ électrique, en se basant sur des techniques numériques. La stratégie de résolution doit être fondée sur un schéma discret qui prend en charge la complexité de la géométrie et les conditions aux limites. La consistance et le coût de cette stratégie dépendent du choix du système d'équations à résoudre. L'idée est de chercher la solution d'une équation aux dérivées partielles du deuxième ordre associée à une équation différentielle ordinaire.

Les équations de base gouvernant le phénomène de la décharge couronne se ramènent aux équations de Maxwell de l'électrostatique auxquelles s'ajoutent les équations du milieu considéré [85] :

$$\nabla \cdot \vec{E} = \pm \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

$$\vec{E} = -\nabla\varphi \quad (3.2)$$

Où E est le vecteur champ électrique, ϵ_0 est la permittivité du milieu (l'air), ρ est la densité volumique de charges (constituée d'ions positifs si la polarité de la tension appliquée est positive et d'ions négatifs si la tension appliquée est négative) et φ le potentiel qui satisfait l'équation de Poisson:

$$\nabla^2\varphi = -\rho/\epsilon_0 \quad (3.3)$$

L'équation de conservation de la charge pour une espèce unique d'ions de densité volumique de charge ρ est :

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (3.4)$$

Où J est la densité de courant :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} + \mu \cdot \rho \cdot \vec{E} - D_i \cdot \nabla\rho \quad (3.5)$$

où σ est la conductivité électrique du milieu et D_i est le coefficient de diffusion des porteurs de charges.

Dans l'équation (3.5), le terme $D_i \cdot \nabla\rho$ représente le courant de diffusion (\vec{J}_{diff}) et le terme $\mu \cdot \rho \cdot \vec{E}$ le courant de conduction (\vec{J}_{cond}).

Pour une décharge dans l'air à température ambiante et à pression atmosphérique, (\vec{J}_{diff}) peut être négligé devant (\vec{J}_{cond}). En effet[86] :

$$\frac{|\vec{J}_{diff}|}{|\vec{J}_{cond}|} = \frac{D_i |\nabla\rho|}{\mu \rho E} \approx \frac{D_i \rho / d}{\mu \rho V_a / d} \approx \frac{D_i}{\mu V_a} \quad (3.6)$$

En utilisant la relation d'Einstein :

$$\frac{D_i}{\mu} = \frac{k_B \cdot T}{e} \quad (3.7)$$

où k_B est la constante de Boltzmann, e la charge de l'électron et T la température absolue, on

obtient :

$$\frac{\vec{J}_{diff}}{\vec{J}_{cond}} \approx \frac{k_B T}{eV_a} \approx \frac{1}{40V_a} \quad (3.8)$$

Donc nous pouvons négliger le courant de diffusion dans les conditions de notre travail.

Si on néglige la conductivité électrique dans l'air, l'expression de la densité de courant se simplifie alors sous la forme de l'équation (3.9) suivante :

$$\vec{J} = \mu \cdot \rho \cdot \vec{E} \quad (3.9)$$

En introduisant les équations (3.2) - (3.4) dans l'équation (3.9), nous obtenons l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$-\nabla(\Pi \cdot \nabla\Phi) = 0 \quad (3.10)$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$-\nabla(\Pi \cdot \nabla\Phi) = -(\nabla\Pi \cdot \nabla\Phi + \Pi \nabla^2\Phi) = 0 \quad (3.11)$$

En remplaçant (3.3) dans (3.11), nous obtenons l'expression suivante:

$$\nabla\Pi \cdot \nabla\Phi = \rho^2/\varepsilon_0 \quad (3.12)$$

Les équations aux dérivées partielles couplées doivent être résolues par rapport au potentiel électrique et à la densité de la charge d'espace ρ , qui sont fonctions de la position dans l'espace interélectrodes. La substitution de ρ dans l'équation (3.11) nous conduit à décrire le problème par l'équation générale des champs ionisés suivante:

$$-\nabla \cdot (\nabla^2\Phi \cdot \nabla\Phi) = 0 \quad (3.13)$$

Ce qui montre que le problème doit être décrit par une équation différentielle non linéaire d'ordre trois du potentiel, dont la solution exacte est extrêmement difficile à trouver, excepté pour des géométries très simples [87-88]. Pour cela, on fait appel à des techniques d'analyse numériques qui remplacent le problème à étudier par un problème approché par discrétisation des équations. Toutefois, toutes les études menées à nos jours se basent sur des approximations et des hypothèses simplificatrices.

3.2. Méthodes numériques utilisées

L'analyse numérique fournit plusieurs méthodes de résolution des systèmes d'équations différentielles avec des conditions aux limites. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer les plus rencontrées[89 -99] :

- La méthode des différences finies **MDF**;
- La méthode des caractéristiques **MC**;
- La méthode des volumes finis **MVF**;
- La méthode des tubes de flux **MTF**;

- La méthode des éléments finis **MEF**;
- La méthode des charges fictives **MSC**

Ces méthodes ont été utilisées pour la résolution de l'équation de Poisson et l'équation de conservation de la charge. En général les deux équations couplées sont résolues par approximations successives : ρ étant connue, V est déterminé par la résolution de l'équation de Poisson ; avec les nouvelles distributions de V et E , une nouvelle approximation de ρ est déterminée par la résolution de l'équation de conservation de la charge. Les plus souvent deux méthodes numériques différentes sont utilisées pour résoudre les deux équations couplées. L'équation de Poisson est résolue par : la méthode de différences finies MDF ou la méthode d'éléments finis MEF ou par la méthode de volumes finis MVF; mais la méthode la plus utilisée, c'est la méthode d'éléments finis.

3.2.1. Modèle géométrique

Le modèle représenté sur la figure (3.1) est déduit du dispositif réel utilisé pour les mesures expérimentales. Nous avons gardé les mêmes dimensions dans le calcul numérique.

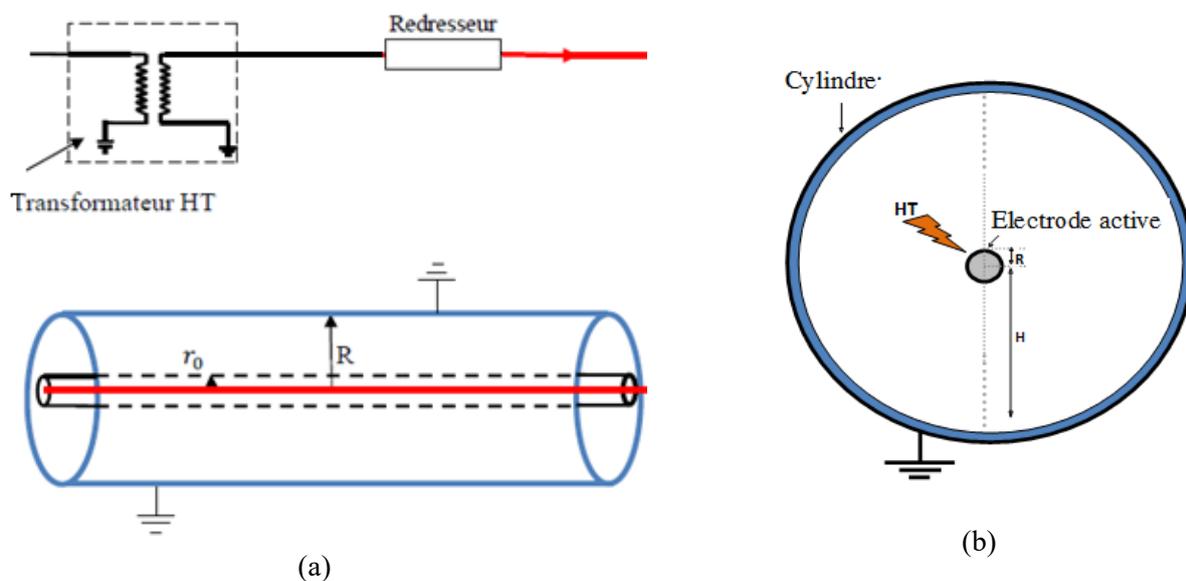


Figure 3.1. Configuration fil-cylindre utilisée en simulation numérique:

(a) Modèle global, (b) Coupe transversale

3.2.2. Conditions aux limites

La résolution des équations gouvernant la décharge couronne dans le domaine d'étude peut donner plusieurs solutions ; cependant, seulement une d'elles est la solution réelle du problème. Pour trouver cette solution, nous devons connaître les conditions aux limites associées au domaine pour

le potentiel électrique et la densité de la charge d'espace (figure 3.2). Ces conditions sont les suivantes :

- ✚ La valeur du potentiel sur l'électrode active est égale à la tension appliquée V_{app} ;
- ✚ Le potentiel sur la surface du cylindre est égal à zéro;
- ✚ Les valeurs du potentiel aux points qui se situent sur les frontières artificielles sont relevées et utilisées par la suite dans la formulation par élément finis;
- ✚ Le champ électrique sur le conducteur est égal au champ seuil E_s (critère de Peek [25] et l'approximation de Kaptzov [100]):

$$E_{peek} = A_0 \cdot \delta + B_0 \sqrt{\frac{\delta}{R}} \quad (3.14)$$

Avec R : Le rayon du fil; δ : La densité relative de l'air ;
 $A_0 = 32,3 \cdot 10^5 [V \cdot m^{-1}]$, $B_0 = 0,846 \cdot 10^5 [V \cdot m^{-1/2}]$

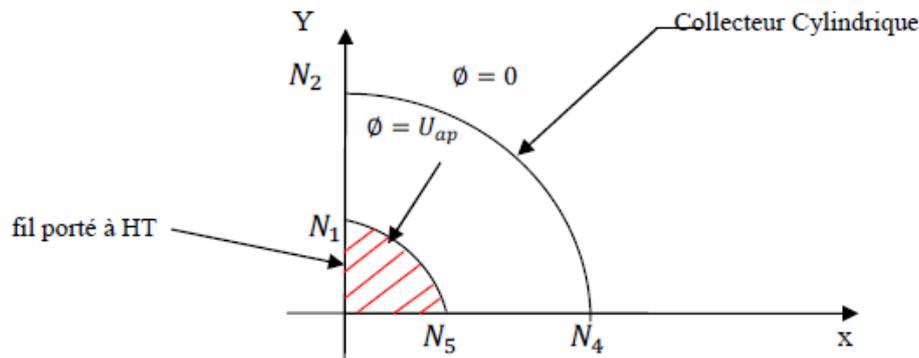


Figure 3.2. Conditions aux limites

3.3. Résultats et interprétation

3.3.1. Modélisation dans le logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique très utile en génie électrique. Ce logiciel permet de simuler de nombreux phénomènes physiques et applications en ingénierie.

Le code COMSOL est une bibliothèque de procédures pour la résolution de problèmes aux limites, gouvernés par des équations aux dérivées partielles. Le principe est basé sur la méthode des éléments finis en dimension 2 ou 3. C'est essentiellement un code de recherche qui fournit un ensemble d'outils aisément manipulables pour le traitement numérique de nouveaux problèmes en physique appliquée.

Le traitement numérique d'une application repose principalement sur la description de sa formulation variationnelle. Les données et le programme principal sont en général, une transcription

simple de la formulation variationnelle du problème et de l'algorithme conduisant à sa résolution. La résolution d'un nouveau problème aux limites ou la mise en œuvre d'un nouvel algorithme de résolution peut être implémentée à l'aide d'un seul programme principal et de quelques procédures spécifiques.

Pour notre cas, ce logiciel est utilisé pour déterminer les différents paramètres de la décharge couronne.

De plus, ce logiciel permet de générer des maillages pour la méthode des éléments finis en définissant la géométrie, la discrétisation des contours, les sous domaines et les numéros de références pour les conditions aux limites. Ces maillages formés de triangles ou de quadrangles, sont de type grille ou de type Delaunay-Vorno (les seuls sommets du maillage contenus dans le cercle circonscrit à un triangle sont les sommets du triangle).

COMSOL Multiphysics contient la plupart des équations, peu de programmation directe, il utilise des interfaces graphiques spécialisées grâce aux modules d'applications optionnels (**figure 3.3**), il est également possible de coupler avec MATLAB [101].

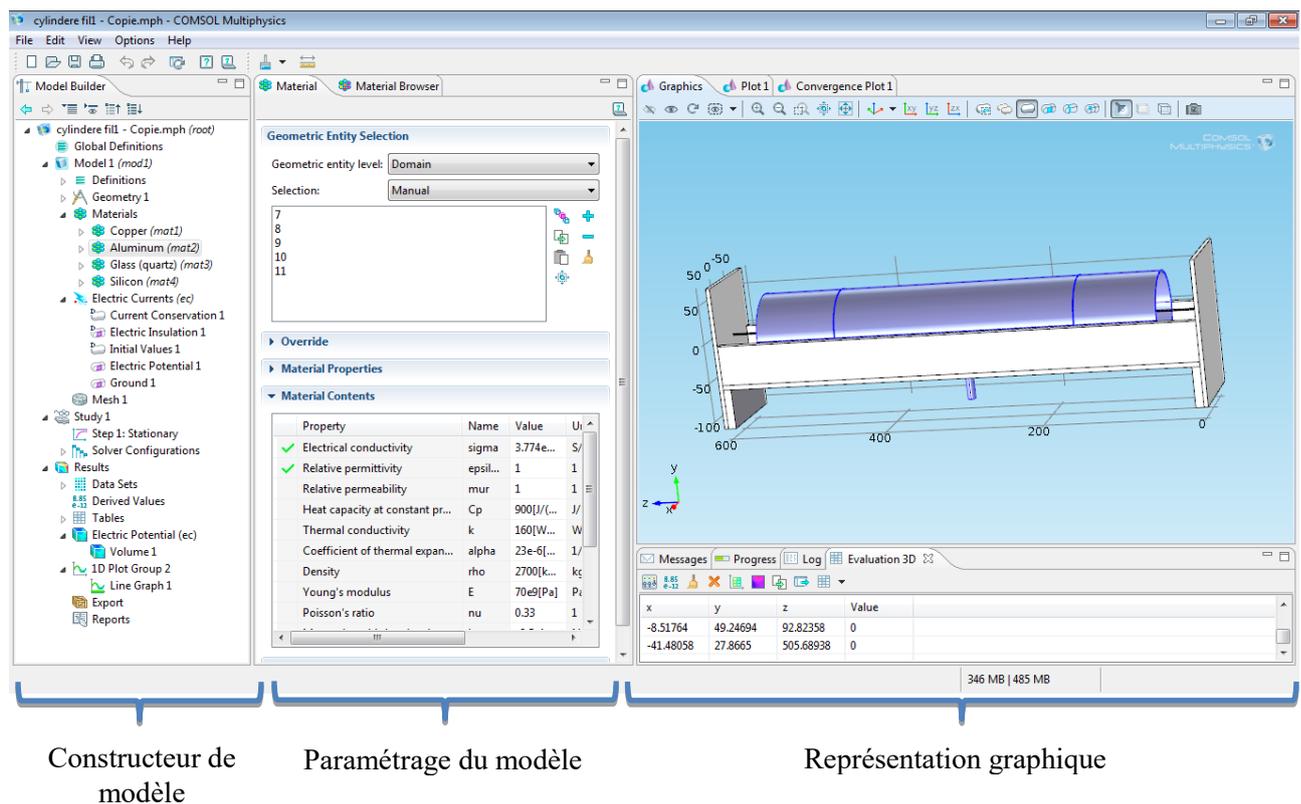


Figure 3.3. Représentation de la configuration fil cylindre dans l'interface Comsol-Multiphysics

3.3.2. Le maillage du domaine de calcul

Après avoir créé un nouveau fichier au COMSOL, nous avons défini les paramètres du modèle:

- ✓ Choix de la dimension : la dimension a été prise en 2D;

- ✓ Choix des modules physiques : on a choisi l'électrostatique comme domaine;
- ✓ Choix du type d'étude : l'étude a été faite en régime stationnaire;
- ✓ Construction de la géométrie : la géométrie a été construite directement dans logiciel;
- ✓ Choix des matériaux : on définit les matériaux comme suit : l'électrode en cuivre, le cylindre en aluminium, et l'environnement en air;
- ✓ Paramétrage du module physique: on a introduit la valeur de la haute tension appliquée.

Pour effectuer le maillage (figure 3.4), il est obligatoire de déterminer les charges électriques par lesquelles la configuration est simulée.

Pour résoudre l'équation de Poisson par la méthode des éléments finis, nous construisons un maillage structuré. Les nœuds de ce maillage représentent les points d'intersection des lignes de champ et des équipotentiels. La discrétisation utilise des éléments triangulaires.

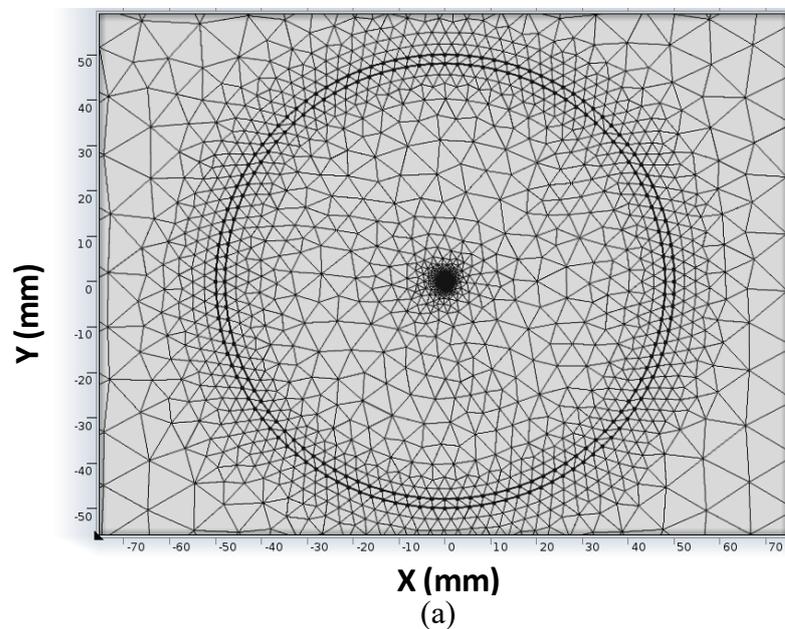


Figure 3.4. Le maillage triangulaire du domaine de calcul.

Les caractéristiques statistiques résultantes de cette discrétisation sont les suivants :

- ✚ Nombre de degrés de liberté résolus: 7545;
- ✚ Nombre d'éléments triangulaires: 3742;
- ✚ Nombre d'éléments de frontière: 296;
- ✚ Nombre de vertex: 16;
- ✚ Qualité minimale des éléments: 0.7111.

Nous remarquons que l'utilisation des éléments triangulaires à trois nœuds donne une bonne précision par rapport aux autres formes d'éléments. Le nœud (i, j) est obtenu par l'intersection de la $i^{\text{ième}}$ ligne avec le $j^{\text{ième}}$ contour. Le maillage est plus fin au fur et à mesure qu'on s'approche du fil.

Dans la zone de dérive, les aires des éléments triangulaires augmentent en fonction des déplacements selon X et Y.

Nous constatons aussi, qu'une ligne de champ est une courbe tangente en chacun de ses points au vecteur champ en ce point. On oriente la ligne de champ dans le sens du vecteur champ. Nous constatons que les lignes de champ prennent naissance à la surface de l'électrode active et se terminent sur la frontière artificielle. Les contours équipotentiels sont les lieux des points de potentiel. Deux surfaces équipotentiels ne se coupent jamais. Une surface équipotentielle est en chacun de ses points, orthogonale à la ligne de champ passant par ce point. On constate que les contours sont centrés sur le conducteur où la tension est maximale. L'algorithme du tracé des lignes équipotentiels est assez proche de celui des lignes du champ.

3.3.3. Potentiel électrique

La distribution du potentiel dans l'espace inter électrodes est représentée dans la figure (3.5) avec une tension d'alimentation de 25 kV, déduite du dispositif réel utilisé dans essais expérimentales.

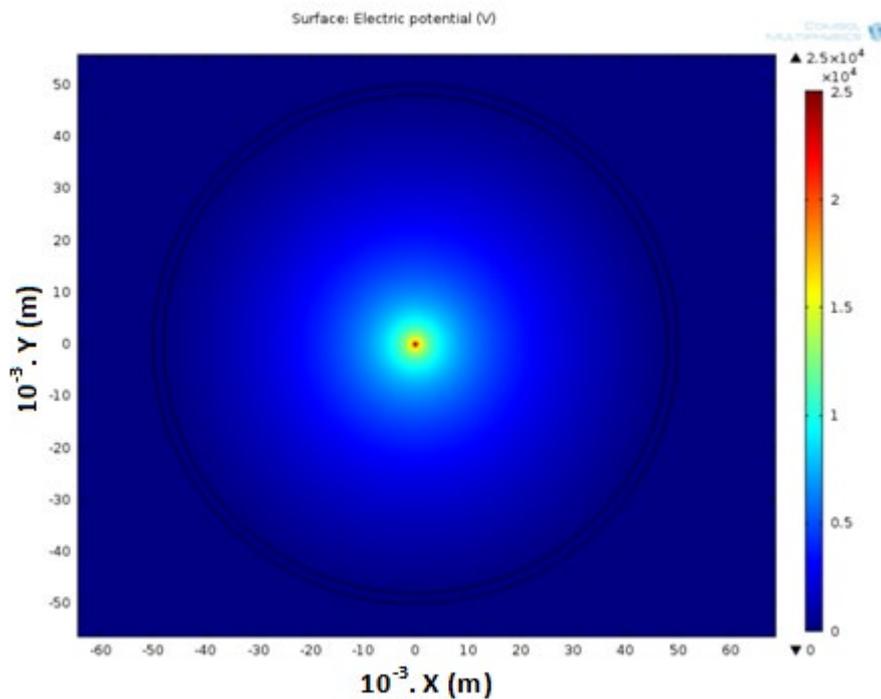


Figure 3.5. Distribution du potentiel.

Pour une distribution de charges ponctuelles Q_j de positions M_j , le potentiel électrique φ_i en un point N_i dans l'espace interélectrodes est égal à la somme des potentiels φ_{ij} engendrés séparément par chaque charge Q_j , nous écrivons :

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} = \sum_{j=1}^n P_{ij} \varphi_j \quad (3.15)$$

Où P_{ij} est un coefficient liant la charge φ_j au potentiel φ_{ij} .

La distribution de potentiel a une valeur maximale autour du fil et diminue inversement à la distance (figure 3.5).

La figure (3.6) montre la répartition du potentiel électrique en fonction de la distance radiale par rapport au cylindre collecteur et en fonction du rayon de courbure de l'électrode active. Le potentiel électrique est inversement proportionnel à la distance interélectrodes.

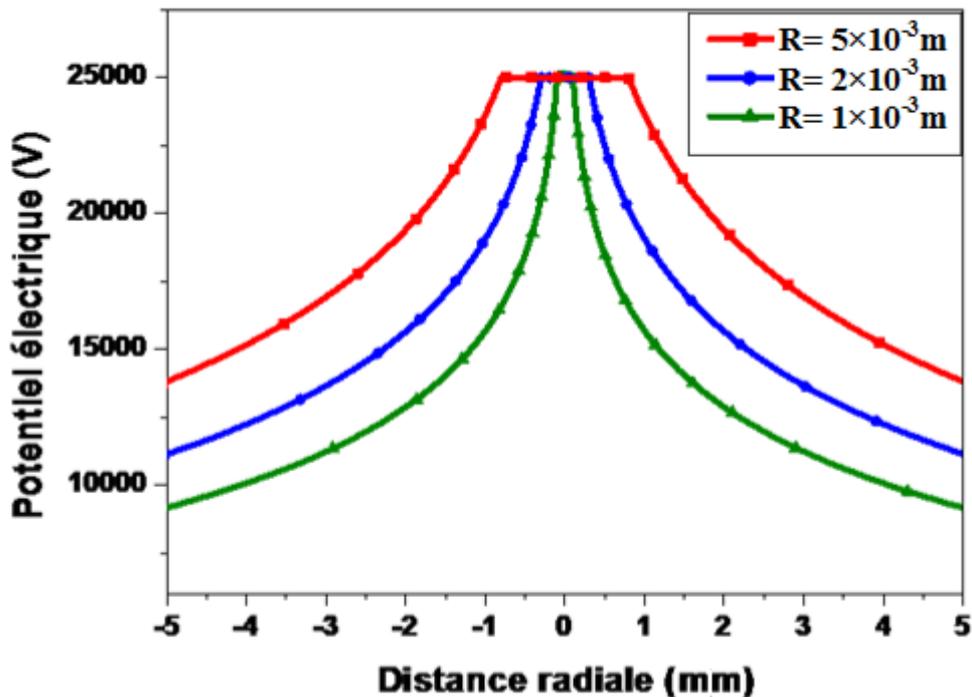


Figure 3.6. Variation du potentiel électrique en fonction du rayon de l'électrode.

3.3.4. Champ électrique

Un champ est un ensemble de données qu'on associe à chacun des points de l'espace. Le champ électrique à un point est la force agissant sur une charge d'essai q à ce point, divisé par la charge q .

Une charge électrique q placée au voisinage de corps électrisés est soumise à une force proportionnelle à q . En effet, chacune des charges élémentaires des corps électrisés exercent sur la charge q une force proportionnelle et toutes ces forces se composent pour donner une résultante proportionnelle à q . Nous pouvons écrire:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (3.16)$$

Le vecteur \vec{E} qui en chaque point de l'espace caractérise l'action des divers corps électrisés sur une charge placée en ce point est appelé champ électrique. La distribution du champ électrique dans

l'espace inter-électrode est représentée dans la figure (3.7).

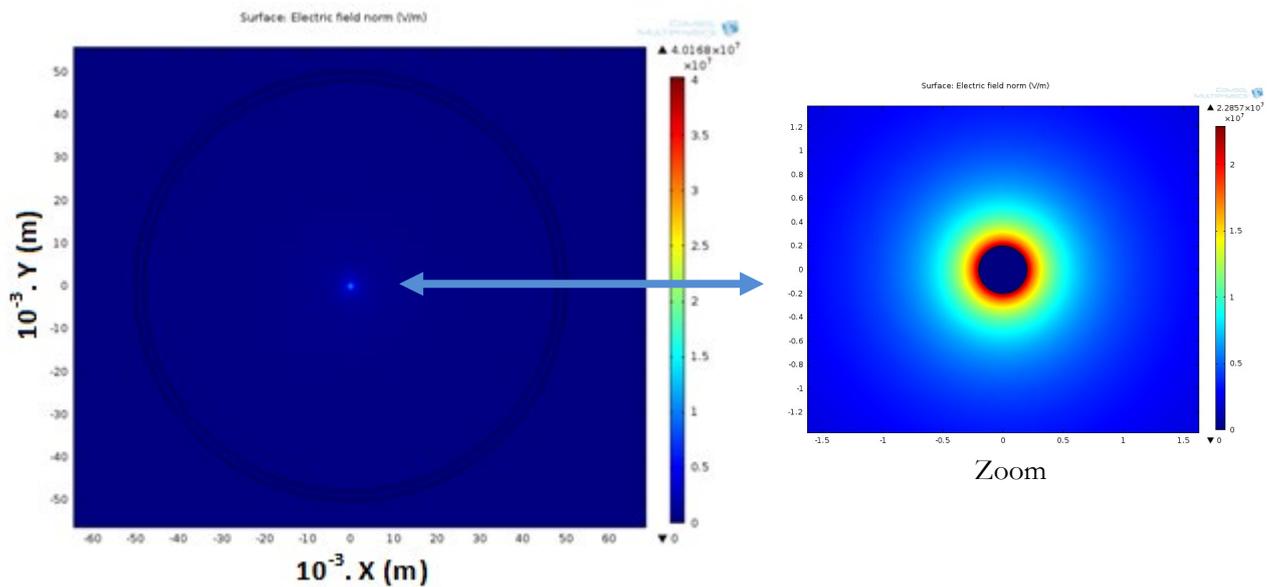


Figure 3.7. Distribution du champ électrique.

L'interprétation de la loi de Coulomb soulève un problème d'ordre métaphysique. On est en présence de deux particules qui ne se touchent pas, mais qui exercent néanmoins une force l'une sur l'autre. D'ailleurs, ce même problème se rencontre aussi en gravitation. Pour rendre compte de ce genre d'action à distance, on introduit en physique la notion de champ. Cela n'explique pas la nature profonde du phénomène, mais, en attendant une théorie meilleure, cela s'avère d'une grande utilité en pratique.

Pour ce travail, nous avons considéré un cylindre de rayon R et de longueur infinie pour éliminer les effets de bord et dont l'axe de symétrie coïncide avec l'axe de l'électrode active (fil porté à une haute tension). Nous constatons que le champ électrique est purement radial, c'est-à-dire être perpendiculaire en tout point de l'espace à l'axe du fil. Son module ne dépend que de la distance r à l'axe du fil.

Nous constatons que le champ électrique autour du fil est maximal et diminue rapidement en approchant du cylindre comme le montre la figure (3.8).

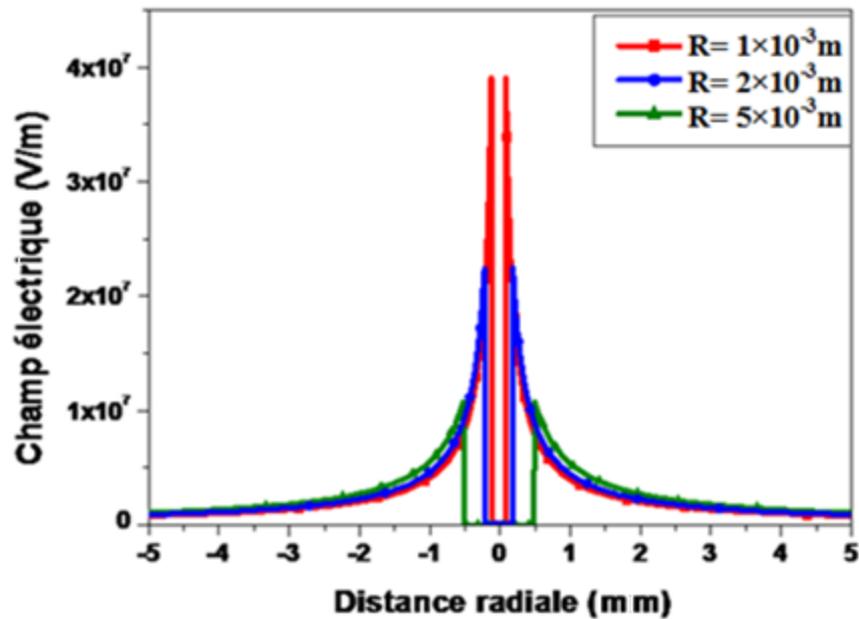


Figure 3.8. Variation du champ électrique en fonction du rayon fil.

On peut conclure que le diamètre du fil est inversement proportionnel à la décharge électrique. Ceci est tout à fait normal parce que le champ électrique sur le fil est inversement proportionnel au fil de rayon R .

3.3.5. Densité d'énergie

Les représentations de la densité d'énergie électrique sont données par les figures (3.9 et 3.10).

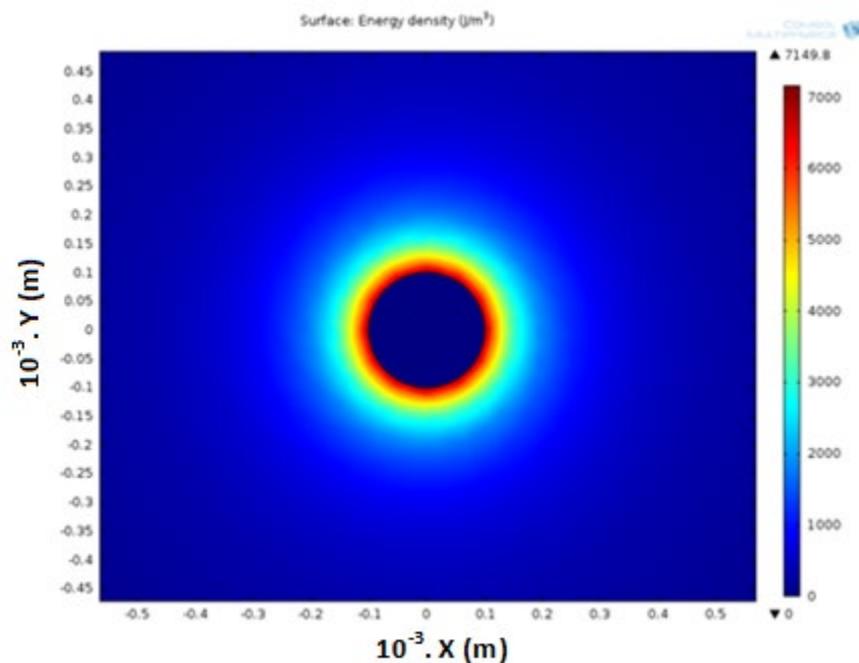


Figure 3.9. Distribution la densité de l'énergie électrique.

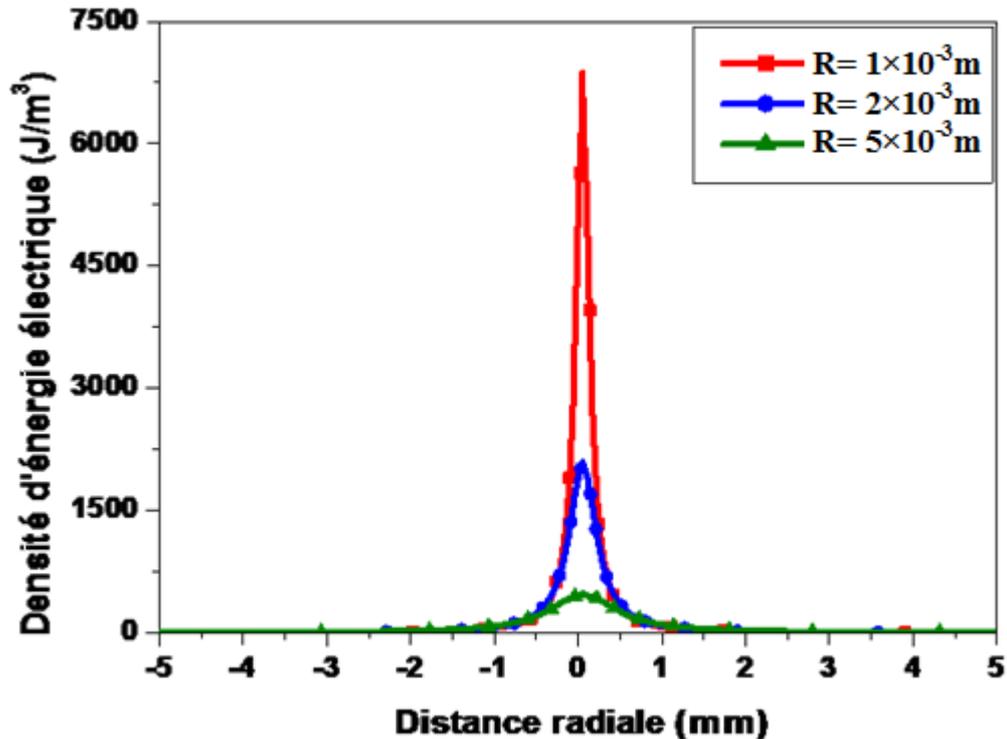


Figure 3.10. Variation de la densité de l'énergie électrique en fonction du rayon.

On remarque que la densité d'énergie électrique est maximale sur la surface de fil et décroît rapidement en se dirigeant vers le collecteur cylindrique.

Nous constatons que la distribution de la densité d'énergie électrique sur l'électrode circulaire présente la même allure et elle est largement affectée par la tension appliquée, le rayon de l'électrode active et la distance interélectrodes.

3.3.6. Densité de courant électrique

La variation de la densité de courant électrique dans la configuration fil - cylindre est représentée sur la figure (3.11).

Tout d'abord, nous pouvons voir que la grandeur de la densité de courant distribuée augmente avec l'augmentation de la hauteur du fil. De plus, l'amplitude est inversement proportionnelle au rayon du fil comme montré sur la figure (3.12).

Nous constatons que les variations de la densité de courant électrique sont très influencées par la tension appliquée à l'électrode active et qu'elles sont inversement proportionnelles à la distance. La densité de courant est très importante dans le domaine de l'électrotechnique.

La densité du courant est maximale dans le fil et diminue ensuite graduellement. Pour la configuration fil-cylindre étudiée, le profil de la densité de courant le long de la plaque collectrice présente une forme d'onde comme représenté sur la figure (3.12).

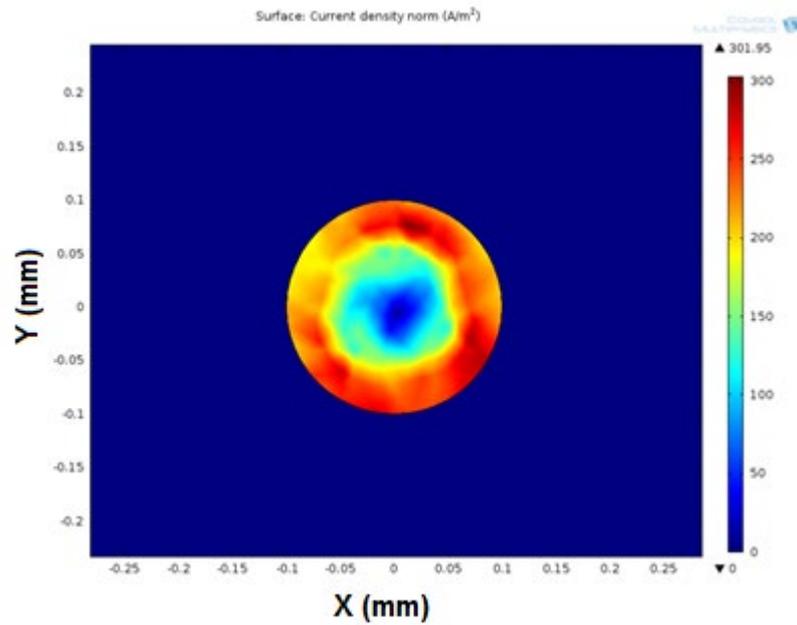


Figure 3.11. Distribution de la densité de courant dans l'espace inter-électrodes.

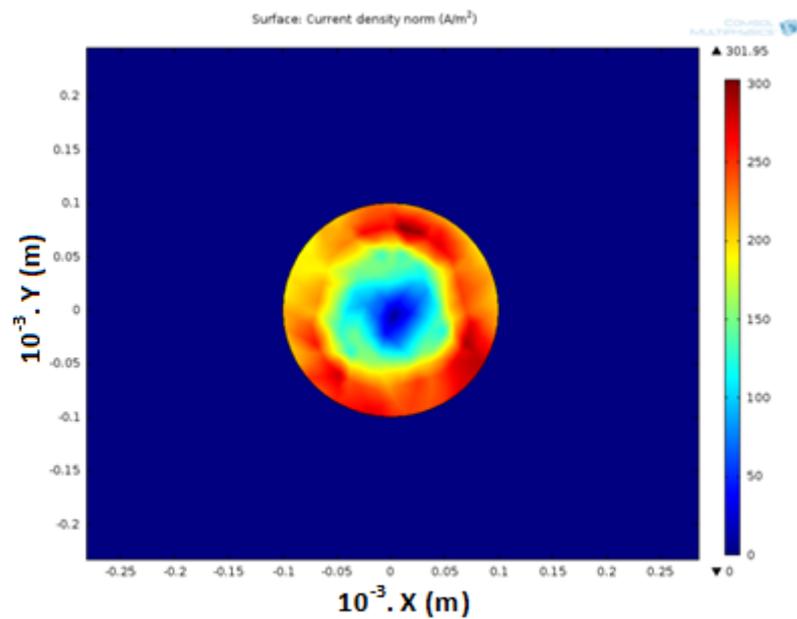


Figure 3.12. Variation de la densité de courant électrique en fonction du rayon.

3.3.7. Densité de la charge d'espace

La charge d'espace caractérise la non-neutralité électrique dans une région d'un milieu dense (liquide, solide ou gazeux). L'accumulation de charges dans un solide peut conduire à une conductivité électrique non uniforme.

Les variations de la densité de la charge d'espace en fonction de la distance radiale pour différents rayons sont représentées sur la figure (3.13) suivante.

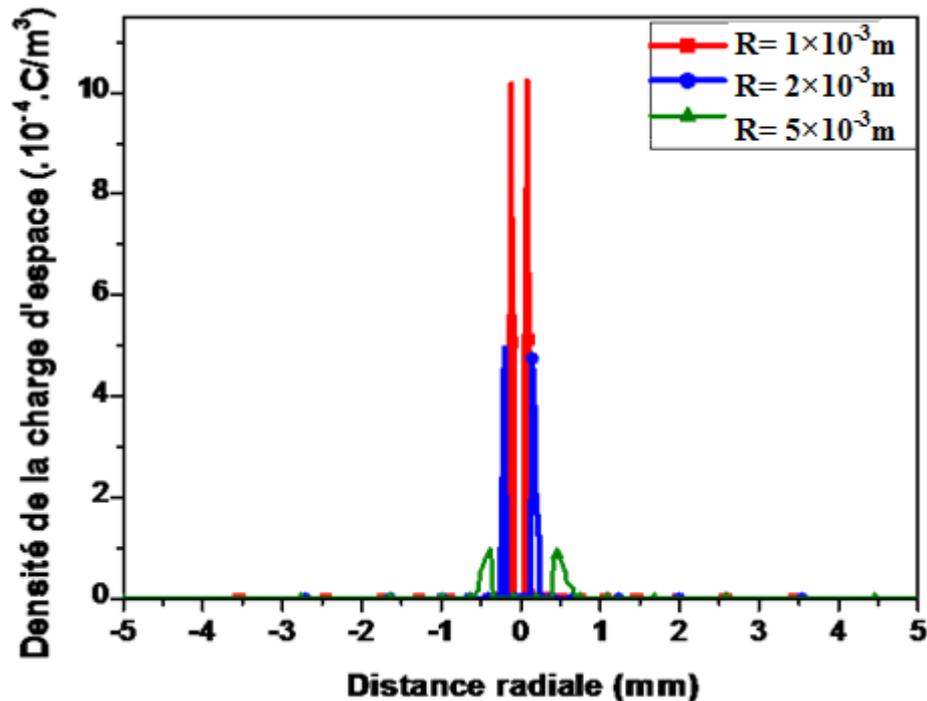


Figure 3.13. Variation de la densité de la charge d'espace en fonction de la distance radiale pour différents rayon.

Nous constatons que le rayon de courbure de l'électrode affecte fortement la distribution de la densité de la charge d'espace.

3.3.8. Validation des résultats de la simulation

Nous constatons, que les distributions du champ électrique calculées par le logiciel COMSOL Multiphysics et mesurées présentent presque la même allure (figure 3.14).

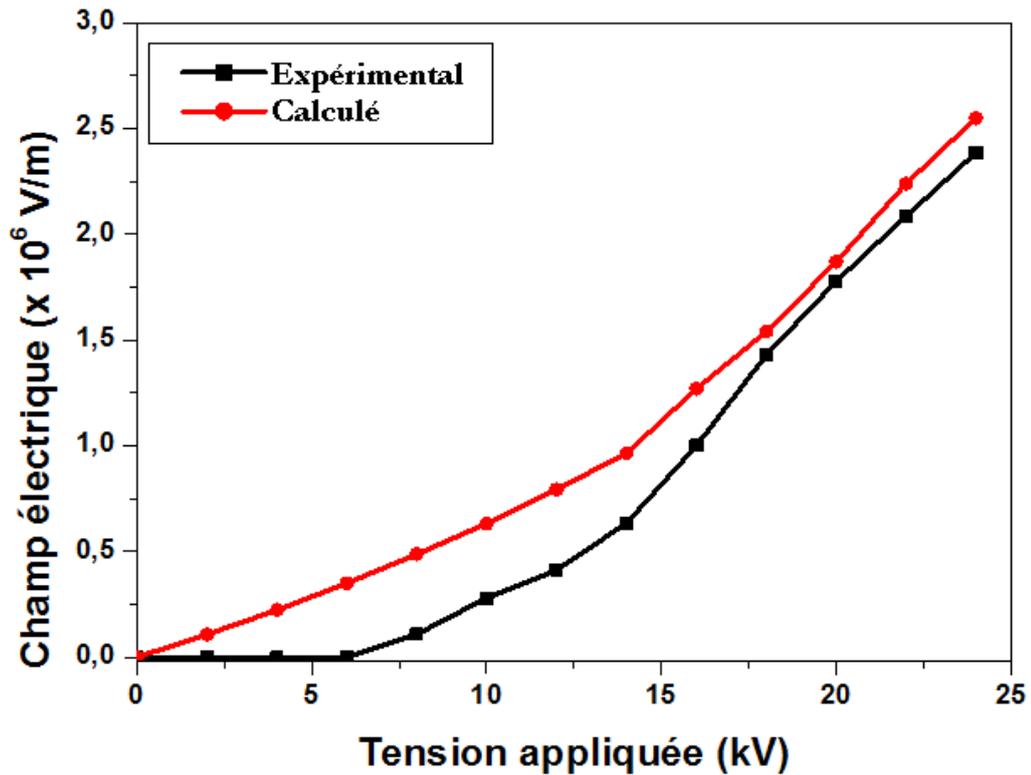


Figure 3.14. Comparaison des champs électriques calculé et mesuré (distance inter-électrodes 5 cm).

3.4. Conclusion

La modélisation consiste à créer l'image la plus fidèle du comportement réel. Cette image est limitée, parce qu'elle est basée sur la connaissance inachevée du système et ne peut donc représenter totalement le comportement réel du phénomène. Cependant, même à partir des connaissances inachevées, le modèle obtenu peut être exploité dans diverses applications dès lors qu'il donne une description suffisamment précise du système.

Le modèle numérique que nous avons développé dans ce chapitre a été élaboré dans le but de calculer les différents paramètres électriques dans l'espace interélectrodes lors de la décharge couronne en géométrie fil-cylindre. Le principe de calcul est la résolution itérative et simultanée des équations de Poisson et de continuité du courant.

Nous avons aussi étudié dans ce chapitre l'influence du rayon de l'électrode active sur les différents paramètres électriques de la décharge couronne.

Chapitre 04

SEPARATEUR TRIBO-AERO-ELECTROSTATIQUE POUR MATERIAUX PULVERULENTS

Le but de cette partie est d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui influent sur le tri sélectif des particules fines dans un séparateur à deux électrodes-disques tournantes de type tribo-aéro-électrostatique. Les expériences sont effectuées sur un mélange synthétique composé de 50 % Polypropylène (PP) et 50 % de Polycarbonate (PC) avec une taille de particule comprise entre 250 μm et 500 μm . Les cinq facteurs à l'étude sont la haute tension, la vitesse de rotation des disques, la durée pré charge du mélange, le débit d'air de fluidisation et la masse initiale du mélange granulaire à traiter. La performance du séparateur est évaluée par la mise en place d'un système de mesure permettant l'enregistrement en continu et simultané des charges et des masses des produits séparés. Les conclusions de cette étude serviront à la conception optimale d'un séparateur électrostatique industriel pour le recyclage des plastiques poudreux à partir des déchets d'équipements électriques et électroniques.

4.1. Matériels et méthode

4.1.1. Matériaux

Les différences dans les propriétés des deux matériaux, feront l'acquisition des charges de signes opposés en entrant en collision les uns avec les autres dans le lit fluidisé.

Notons que, conformément à leur positionnement dans la série triboélectrique, le PP se charge positivement et le PC négativement et ils seront donc collectés respectivement par les électrodes négative et positive du séparateur (figure 4.1) [102].

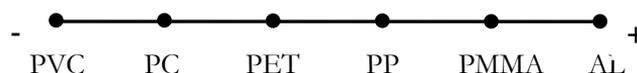


Figure 4.1. Position du PP et du PC dans la série expérimentale triboélectrique.

Le mélange de matériaux pulvérulents utilisé dans la présente étude comprend deux types de polymères, le Polypropylène (PP) de couleur mauve et le Polycarbonate (PC) de couleur blanche, fournis par la société APR2, France, spécialisée dans le recyclage des déchets d'équipements

électriques et électroniques (DEEE). La taille de ses particules est typiquement comprise entre 250 μm et 500 μm . Les expériences ont toutes été dupliquées et réalisées par les mêmes opérateurs, en utilisant des échantillons similaires et dans des conditions climatiques quasi constantes: température ambiante (23,2 ° C à 25 ° C) et air humidité relative (58,5% à 65%). (figures 4.2 et 4.3).

4.1.1.1 Caractéristiques du PP

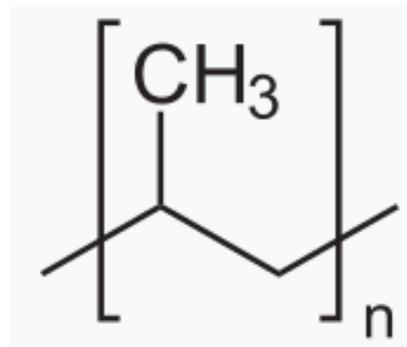
Le Polypropylène (souvent dénommé «polypro» - PP) [103] est la deuxième matière plastique la plus utilisée sur terre avec plus de 45 millions de tonnes en 2007. Elle est essentiellement utilisée dans l'emballage, mais également dans des pièces automobiles et des accessoires de la vie de tous les jours. Il existe différents types de PP, homopolymère (plus rigide) ou copolymère (plus résistant au choc).

Les caractéristiques techniques du PP sont:

- Est un thermoplastique cristallin.
- Présente une caractéristique tout à fait particulière : il est capable d'être utilisé pour faire des charnières : couvercle et boîtier sont injectés en même temps et reliés par la charnière d'épaisseur plus fine.
- Aspect et toucher légèrement cireux.
- Translucide : mais nouveaux grades pouvant être transparents en applications bouteille.
- Rigidité: plutôt semi-souple: Module de Young 0.9 GPa à 1.55 GPa.
- Résistance au choc : de -10 à +80°C.
- Densité : 0.9 kg/dm³.
- Perméabilité aux gaz : médiocre ; à l'humidité : très bonne.
- Température d'utilisation : de -100 °C à +100°C.
- Température de mise en œuvre : 190 °C à 280°C.
- Soudabilité : soudure à chaud. Se colle très mal.



(a)



(b)

Figure 4.2. Particules de PP utilisées de taille $250 \mu\text{m} \leq \text{PP} \leq 500 \mu\text{m}$ (a), formules chimiques du PP(b) [103].

4.1.1.2 Caractéristiques du PC

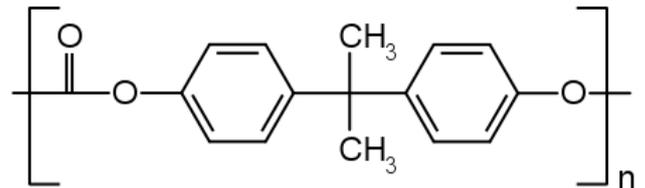
Le Polycarbonate (PC) [104] est une matière plastique technique aux propriétés choc exceptionnelles. Elle est essentiellement utilisée dans le domaine de l'éclairage et dans certains éléments des bâtiments, comme la toiture. Elle est depuis plusieurs années largement utilisée pour la fabrication de sièges transparents aux couleurs vives.

Les caractéristiques techniques du PC sont:

- Est un thermoplastique amorphe.
- Présente une caractéristique tout à fait particulière : il est très résistant au choc.
- Aspect et toucher légèrement sec.
- Transparent : l'un des plastiques les plus transparents.
- Rigidité : plutôt rigide : Module de Young de 2 GPa à 2.44 GPa.
- Résistance au choc excellente : de -20 à +130°C.
- Densité : 1.2 kg/dm³.
- Perméabilité aux gaz : médiocre ; à l'humidité : moyenne.
- Température d'utilisation : de -100 °C à +100 °C.
- Température de mise en œuvre : 210 °C à 250 °C.



(a)



(b)

Figure 4.3. Particule de PC utilisées de taille $250 \mu\text{m} \leq \text{PC} \leq 500 \mu\text{m}$ (a), formules chimiques du PC (b) [104].

4.1.2. Appareils de mesure

La charge acquise par la voie triboélectrique suite aux collisions «particules-particules» ou bien «particules-parois» dépend de plusieurs facteurs tels que l'humidité, le temps de chargement, l'état surfacique des particules... [105, 106]. Nous allons présenter les instruments de mesure utilisés pour mesurer l'humidité relative, la charge électrique, la masse et la pureté des produits collectés. L'instrumentation virtuelle a été mise en œuvre pour des mesures continues et simultanées des charges et des masses.

4.1.2.1 Mesure de l'humidité relative

La mesure de la charge électrique est un processus influencé par les conditions ambiantes d'humidité et de température.... Il est primordial de débiter notre étude expérimentale par la mesure de l'humidité relative car les résultats obtenus dépendent énormément de ce paramètre. Lorsque l'air est sec, la charge est plus importante, par contre quand le taux d'humidité relative est élevé, certains matériaux peuvent l'absorber. Dans ce cas, la surface peut devenir semi-conductrice. La charge statique reste donc faible et peut même disparaître à cause de cet état de surface[107]. Alors, la justesse des résultats se rattache à un taux d'humidité adéquat, donc toute mesure faite dans des taux inconvenables doit être écartée. Pour la mesure, on a utilisé un thermo hygromètre numérique (Testo 608-H1).

4.1.2.2 Mesure de la charge

La méthode utilisée au sein de laboratoire pour déterminer la polarité ainsi que la valeur de la charge électrique que porte les granules chargées, est établie sur le principe de base :un capteur «cage de Faraday » relié à un appareil de mesure « électromètre ».

Dans notre installation, la mesure de la charge des granules récupérés après la séparation est directe. On a remplacé les deux collecteurs par des cages de faraday de dimensions égales et de même forme (figure 4.4) puis on a relié chacune d'elles à un électromètre. Cette méthode nous a permis d'obtenir des valeurs instantanées et précises.

La cage de Faraday se présente comme deux récipients métallique l'un à l'intérieur de l'autre isolés électriquement entre eux. Le récipient extérieur, relié à la terre, fait office de blindage contre les parasites extérieurs [108].

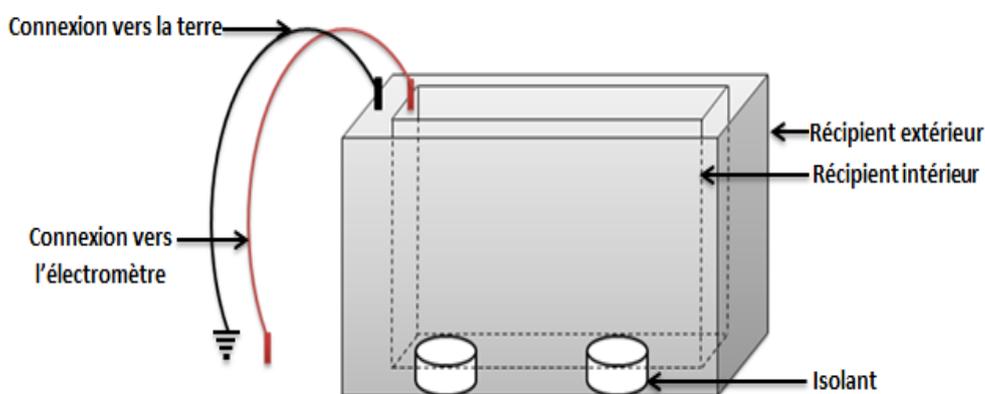


Figure 4.4.Cage de Faraday

Pour mesurer la charge électrique des granules chargés, il suffit de les introduire dans le récipient

L'instrumentation virtuelle est une solution fiable et efficace pour surveiller les variables d'entrée et de réponses des procédés électrostatiques complexes, où la charge électrique est le paramètre de base dans ces procédés. L'équipe de l'électrostatique appliquée du laboratoire Pprime basée à l'IUT d'Angoulême, possède tout l'équipement nécessaire pour mettre en œuvre cette instrumentation virtuelle. Nous avons utilisé une carte d'acquisition de données GPIB, une carte d'acquisition externe MEILHAUS REDLAB 108, et les logiciels Trace rDAQ et LabVIEW 6.

Mihalcioiu [109] a mis au point un instrument virtuel capable d'acquérir des données à une fréquence d'échantillonnage variable à partir d'une cage de Faraday reliée à un électromètre. Le processus a été mis au point par Bilici [110] qui a développé un programme sous LabVIEW [111] (figure 4.7). Il permet d'acquérir des mesures de charge et de masse instantanément à partir d'une balance connectée avec RS232 et d'un électromètre connecté par GPIB.

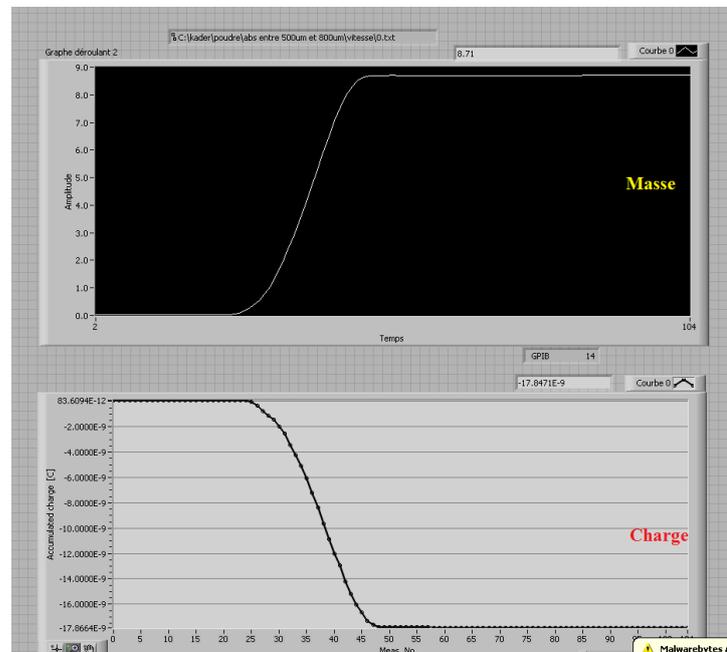


Figure 4.7. Interface graphique de l'instrumentation virtuelle

L'interface graphique présente deux graphes déroulants qui décrivent les acquisitions des évolutions de la masse et de la charge électrique. Les acquisitions continues sont aussi enregistrées dans un fichier (*.txt) en vue d'un post traitement pour le calcul de la charge massique par exemple.

4.1.2.5 Analyse de la pureté des produits séparés

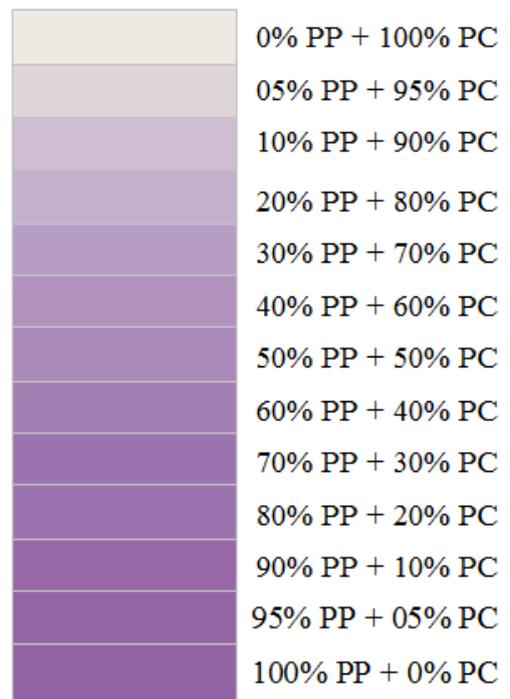
La mesure de la pureté est réalisée à l'aide d'un colorimètre portable (3nh Focus on Color, modèle NH310) présenté sur la figure (4.8.a) [112]. Une table d'étalonnage est mise en place pour des mélanges de produits allant de 0% à 100 % par pas de 10% pour le produit A et de 100% à 0% par

de -10% pour le produit B (Figure 4.8.b).

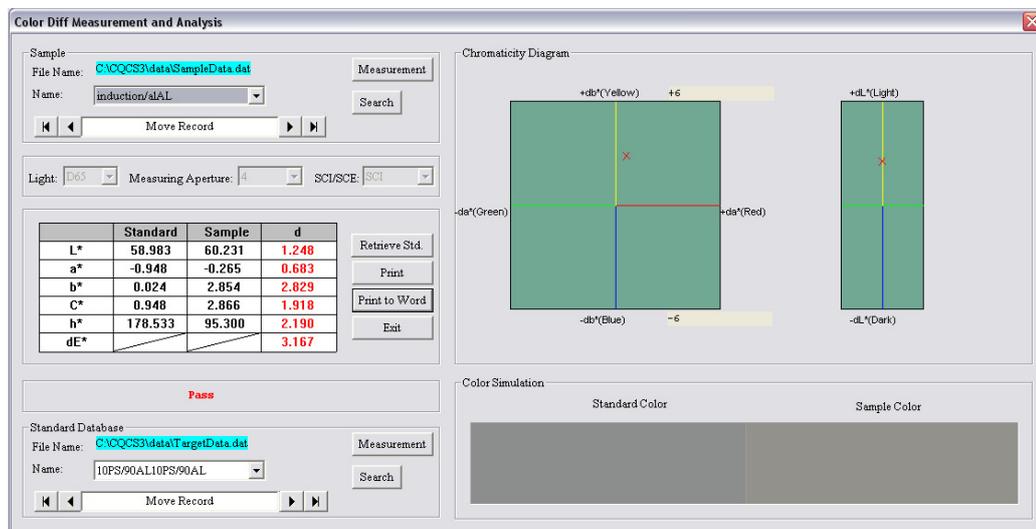
Le colorimètre fournit des mesures en plusieurs modes : Cie L*a*b ; CIE XYZ ; CIERVB ; CIEL*u*v et CIE*C*H. Une procédure est mise en place pour déterminer la constitution et donc la pureté des produits séparés dans les boites de récupération. Après chaque séparation, des échantillons sont prélevés dans chaque boite de récupération et font l'objet de plusieurs mesures par le colorimètre. L'ensemble des informations du colorimètre est ensuite comparé avec les données de la table d'étalonnage pour déduire la pureté de chaque produit.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.8. Colorimètre NH310 portable (a), Table d'étalonnage (b) et Interface du logiciel CQCS3 pour la mesure et l'analyse de la pureté (c).

Les résultats de la procédure d'étalonnage du colorimètre (tableau 4.1) ont permis de formuler des modèles mathématiques de la pureté des produits, en fonction des cinq paramètres L, a, b, C et h. Ceci est fait en utilisant le logiciel statistique MINITAB 13, la pureté du produit PP a été exprimée comme suit:

$$PP (\%) = 477 - 5.83 L + 1.1 a + 13.4 b + 5.8 C + 0.092 h \quad (4.1)$$

| PP (%) | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | |
|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------|
| Paramètre | L | 51.1 | 52.9 | 55.0 | 56.4 | 60.0 | 62.7 | 65.6 | 69.6 | 73.9 | 81.3 | 95.3 |
| | a | 29.2 | 27.6 | 25.2 | 24.6 | 19.8 | 19.3 | 17.8 | 14.4 | 12.0 | 8.9 | 0.2 |
| | b | -28.0 | -26.8 | -25.2 | -25.1 | -21.1 | -20.5 | -18.9 | -15.3 | -12.5 | -7.5 | 3.7 |
| | C | 40.4 | 38.5 | 35.6 | 35.1 | 28.9 | 28.2 | 26.0 | 21.0 | 17.4 | 11.7 | 3.7 |
| | h | 316.2 | 315.8 | 314.9 | 314.4 | 313.1 | 313.2 | 313.4 | 313.1 | 313.9 | 320.0 | 87.5 |
| PP (%) à partir de (4.1) | 99.85 | 91.8 | 81.4 | 72.2 | 62.6 | 49.7 | 40.7 | 32.2 | 21.1 | 9.3 | 0.8 | |

Tableau 4.1. Table d'étalonnage pour les mélanges de produits allant de 0% à 100%.

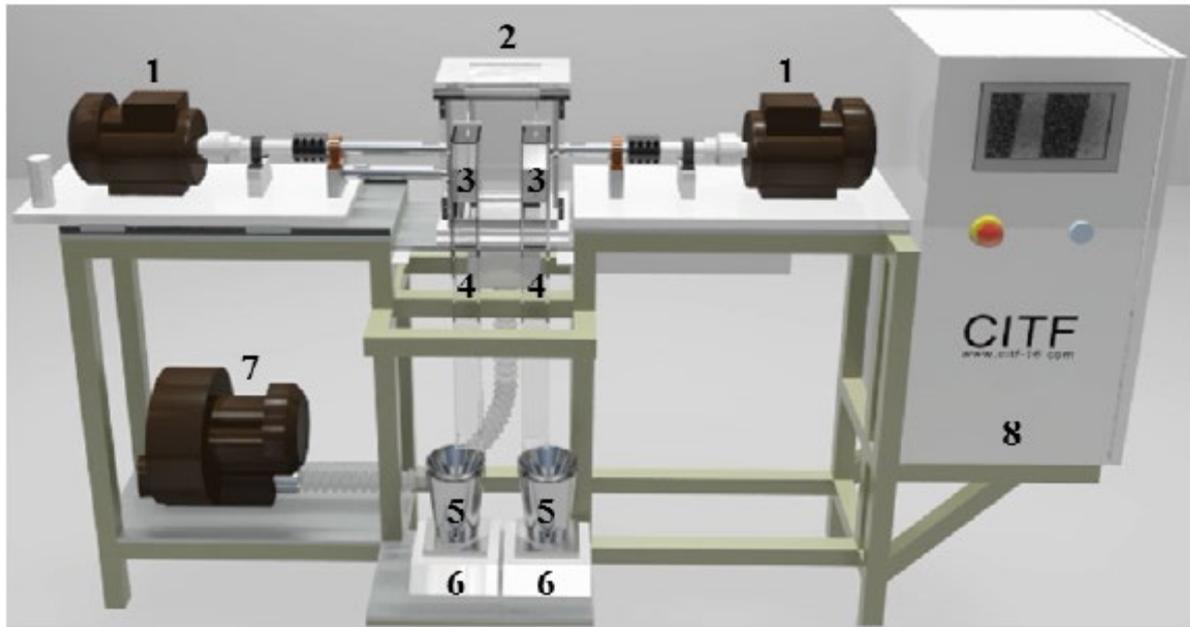
4.1.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes disques

L'installation de séparation électrostatique conçue, réalisée et puis utilisée pour ce travail est présentée sur la figure (4.9). Cette installation est destinée premièrement au traitement des mélanges de matériaux isolants de tailles millimétriques et sous millimétriques.

Une quantité de 800 g de matériaux pulvérulent est introduit dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation de dimensions 160 x 160 x 240 mm³, dont les parois sont en PMMA transparent. L'injection de l'air est assurée par une soufflante de 1,5 kW / 4000 tr.min/ 166 m³.h contrôlée par un variateur de vitesse imposant une rotation comprise entre 1000 tr/min et 4000 tr/min.

Le lit fluidisé a une hauteur de 10 cm à partir de la plaque poreuse ou une grille qui distribue uniformément l'air via une structure en nid d'abeilles (figure 4.10).

Les effets triboélectriques dans le lit fluidisé sont dus à des 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 pulvérulents [113].



(a)

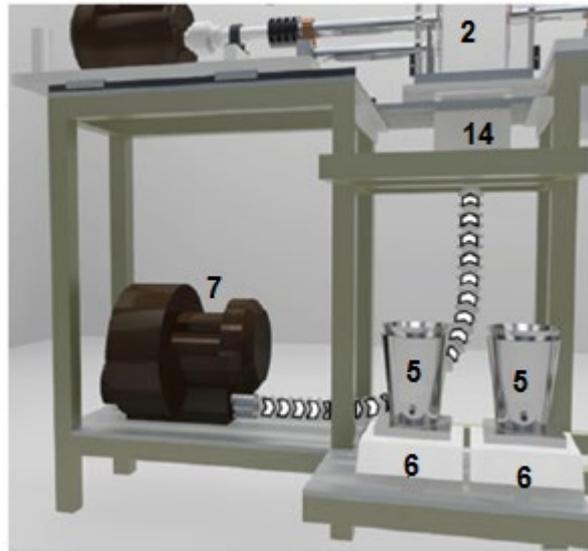


(b)

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.
 9 :Vibreur d'alimentation ;
 10 :Cylindre d'alimentation
 11 : Electromètres (Keithley 6514);
 12 : Colorimètre portable NH310;
 13 :Ordinateur.

Figure 4.9. Schéma descriptif (a) et photographie(b) du séparateur tribo-aéro-électrostatiques à deux électrodes disques.



2 : Chambre de séparation ;
5 : Cages Faraday ;
6 : Balances électronique

7 : Soufflante ;
14 : Lit fluidisé;

Figure 4.10. Représentation schématique du système d'injection d'air.

Le champ électrique est généré entre deux disques tournants en acier inoxydable de diamètre 220 mm et épaisseur 2 mm, plongés dans le lit fluidisé situés l'un et l'autre à une distance variable comprise entre 40 mm et 120 mm (figure 4.11). Ces électrodes-disques sont entraînées en rotation par deux moteurs électriques dont la vitesse est contrôlée par un variateur de vitesse électronique. Cette vitesse peut varier continument de 25 tr/min à 70 tr/min. La rigidité des arbres porteurs des disques a été calculée pour ne pas engendrer une flexion en bout d'arbre susceptible de modifier le parallélisme entre les plans des disques pendant le fonctionnement.

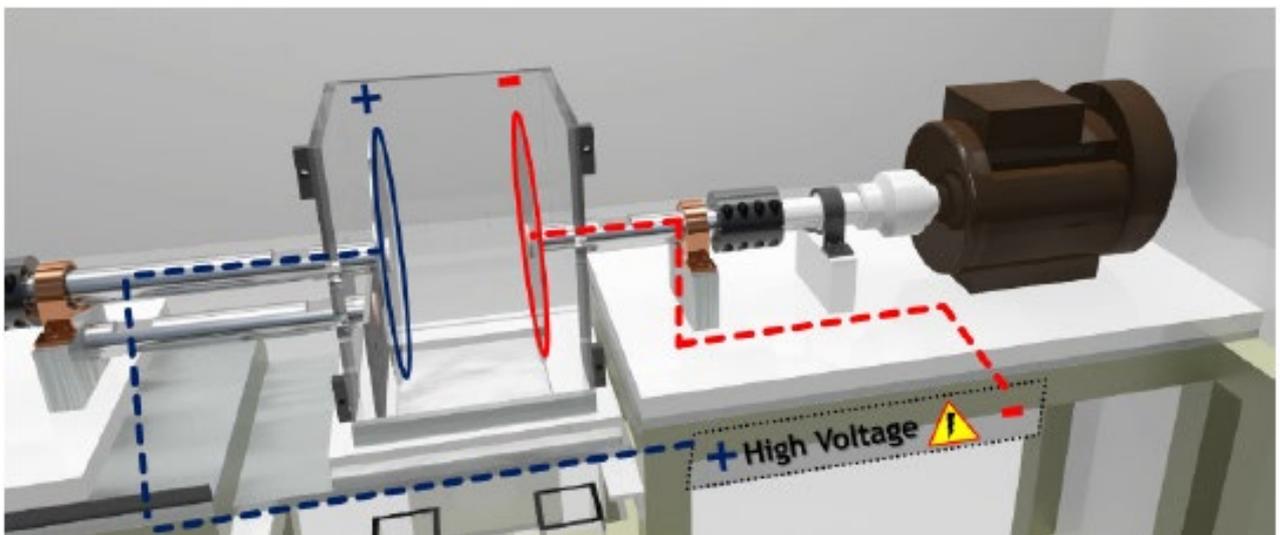
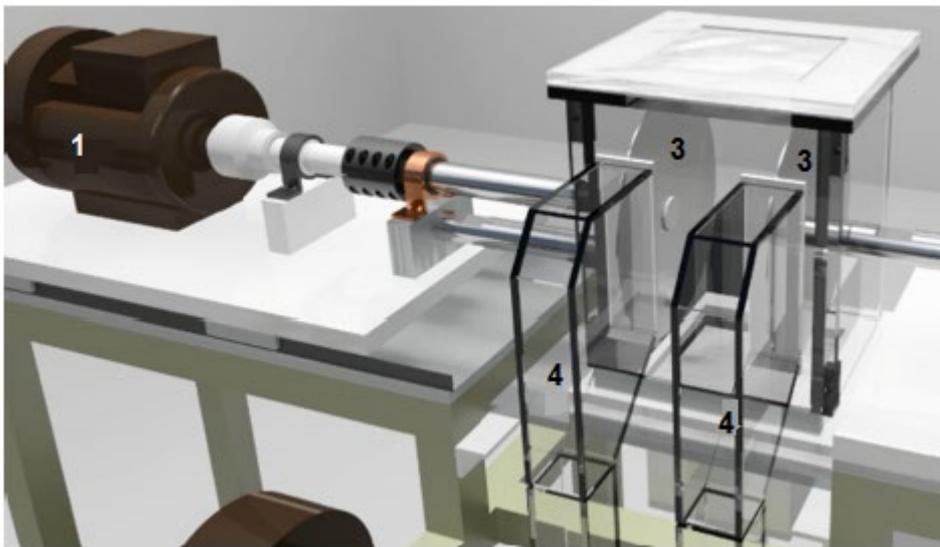


Figure 4.11. Représentation schématique des électrodes-disques tournantes alimentées en haute tension.

L'alimentation en haute tension des disques se fait à partir de deux générateurs de polarités opposées de la marque SPELLMAN de 30 kV / 15 W / 0.5 mA. Les tensions appliquées peuvent varier de 0 V à ± 30 kV. Les paliers de guidage des arbres sont utilisés pour alimenter les disques en haute tension. Notons qu'une des originalités de ce dispositif est la simultanéité de la charge tribo-électrique et de la séparation.

Les produits séparés sont récupérés dans deux boîtes collectrices placées à l'extérieur de la chambre de séparation (figure 4.12). La récupération des particules sur les électrodes est assurée par des racleurs qui viennent lécher les particules collées sur les surfaces des disques. Les particules séparées sont ainsi collectées dans des cages de Faraday posées sur des balances de précision. Ainsi, les charges électriques acquises et les masses des particules sont mesurées au fur et à mesure de la séparation par des électromètres KEITHLEY, modèle 6514 connectés aux cages de Faraday et des balances électroniques d'une résolution de 0.1 g.



4 : Collecteurs; 3 : Electrodes- disques métalliques; 1 : Moteur électrique.

Figure 4.12. Représentation schématique des collecteurs

Ce séparateur est équipé d'une IHM (Interface Homme-Machine) tactile (figure 4.13.a) permettant la saisie et la lecture directe ou en acquisition instantanée de l'ensemble des données de fonctionnement :

- Hautes tensions appliquées aux deux disques électrodes.
- Vitesses de rotations des deux disques électrodes.
- Vitesse de rotation de la soufflante
- Débit d'air arrivant à la chambre de séparation.

Cette IHM est connectée à une armoire de commande (figure 4.13.b) réalisée selon les normes de sécurité en vigueur.

- ✓ Dépôt du mélange poudreux de particules de PP et de PC dans la chambre de séparation.
- ✓ Mise sous tension des appareils de mesure : balances électroniques et électromètres connectés à des cages de Faraday.
- ✓ Mise en marche des moteurs électriques et alimentations haute tension.
- ✓ Mise en marche de la soufflante et démarrage de l'acquisition des données, par le programme écrit sous LabView 6.
- ✓ Mise à l'arrêt des équipements électrique, mécanique, et d'acquisition des données.
- ✓ Nettoyage du séparateur tribo-aéro-électrostatique, et remise à zéro des balances électroniques et des multimètres.
- ✓ Mesure de la pureté à l'aide d'un colorimètre portable NH-310, qui a été spécifiquement calibré pour évaluer le pourcentage de PP et de PC dans un mélange binaire. Le colorimètre fournit des mesures dans plusieurs modes: L, a, b, C et h.

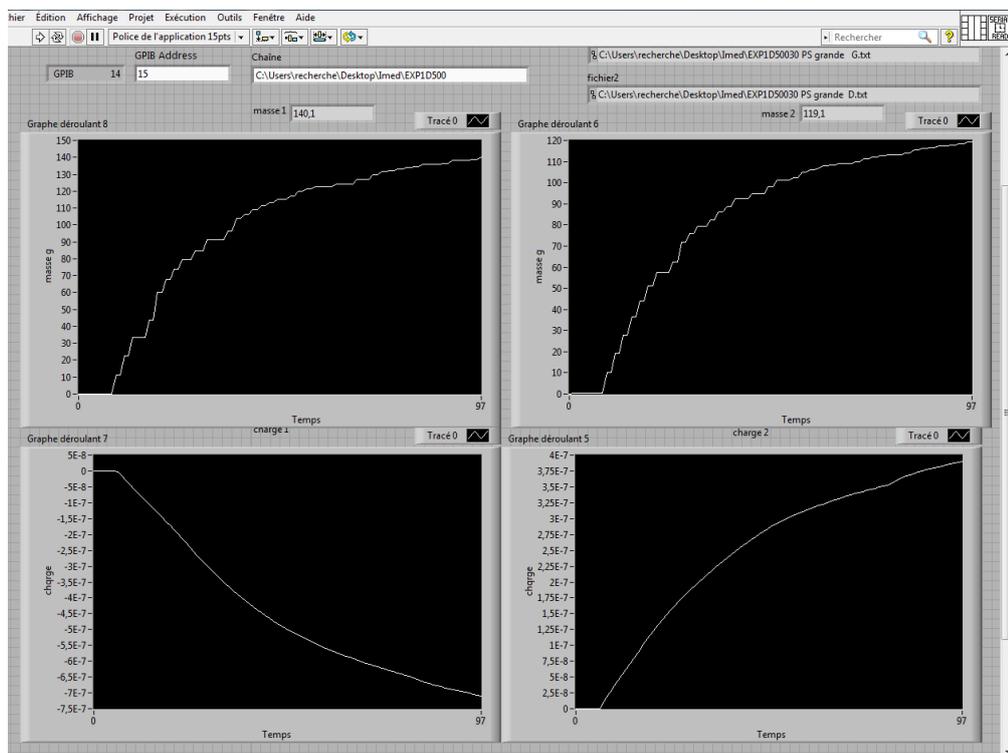


Figure 4.14. Interface du logiciel LabView, pour les mesures des charges électriques et des masses des particules de PP et de PC collectées dans les deux collecteurs.

L'étude expérimentale a été réalisée en plusieurs étapes:

- Dans une première série d'expériences, un mélange de particules poudreux contenant 200 g de PP et 200 g de PC de tailles comprises entre 250 μm et 500 μm a été traité comme suit: la vitesse de rotation du disque a été fixée à $n = 50$ tr/min, une distance constante entre les électrodes des disques, pour l'étude de l'influence de chaque facteur sur la séparation électrostatique.

1. Effet de la durée du processus de tribocharge ajusté successivement de $t = 0$ s à 80 s par pas de 20 s.
2. Effet de la haute tension sur plusieurs valeurs de la haute tension appliquée par les deux alimentations de $U = \pm 4$ kV à ± 16 kV par pas de ± 4 .
3. Effet du débit d'air de fluidisation a été réalisée de $D = 500$ tr/min à 1500 tr/min par pas de 250 tr/min.

- La deuxième série d'expériences a été réalisée avec le même mélange de PP / PC lors des premières expériences et un mélange contenant 650 g de PP et 650 g de PC qui a été traité comme suit: 1000 g ont été initialement stockés dans la trémie de l'alimentateur vibratoire et 300 g dans le lit fluidisé. Les conditions opératoires "standards" étaient les valeurs optimales obtenues par une série d'expériences préliminaires réalisées sur la même machine, avec la même classe de matériaux. Le débit massique a été ajusté successivement à $Q = 2$ g/s, 5 g/s, 6 g/s et 10 g/s.

- Une dernière série d'expériences a été réalisée avec des mélanges non équilibrés:

80% PP + 20% PC; 20% PP + 80% PC, 60% PP + 40% PC, 40% PP + 60% PC et 50% PP + 50% PC, pour $m = 1300$ g, $n = 50$ tr/min.

4.2. Etude des effets des facteurs de la séparation

4.2.1. Etude en régime cyclique

4.2.1.1. L'effet de la durée du processus de tribocharge

L'effet de la durée (t) du processus de charge triboélectrique du mélange pulvérulent sur la séparation électrostatique des granules collectés est illustré par les résultats représentés sur les figures (4.16 et 4.17). [117-119]

L'aspect non lisse de ces courbes est dû au fait qu'une petite proportion de particules chargées détachées des électrodes peut être attirée par certaines parties des canaux qui les transfèrent aux cages de Faraday.

Les particules de PP qui sont pré-chargées plus longtemps à $t = 20$ s, sont collectées légèrement plus vite que ceux non-pré-chargées à $t = 0$ s (figure 4.15.a), car leur charge est aussi un peu plus élevée (figure 4.16.a). Les particules de PC ont un comportement similaire (figures 4.15.b et 4.16.b). En effet, les masses des particules qui peuvent être évacuées par les disques sont limitées.

Même très bien chargées après 20 s, une partie des particules ne peuvent pas adhérer aux électrodes, car empêchées par les couches formées par celles arrivées avant.

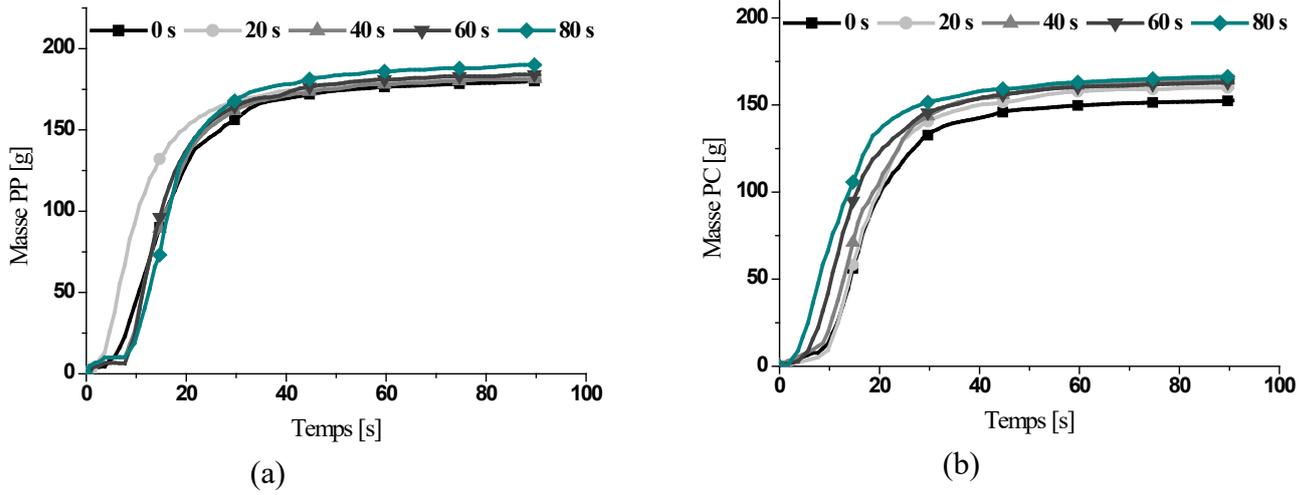


Figure 4.15. Variation de la masse des granules séparés en fonction du temps pour différents moments du processus de tribocharge (t = 0 s ; 20 s ; 40 s ; 60 s ; 80 s) : (a) PP ; (b) PC

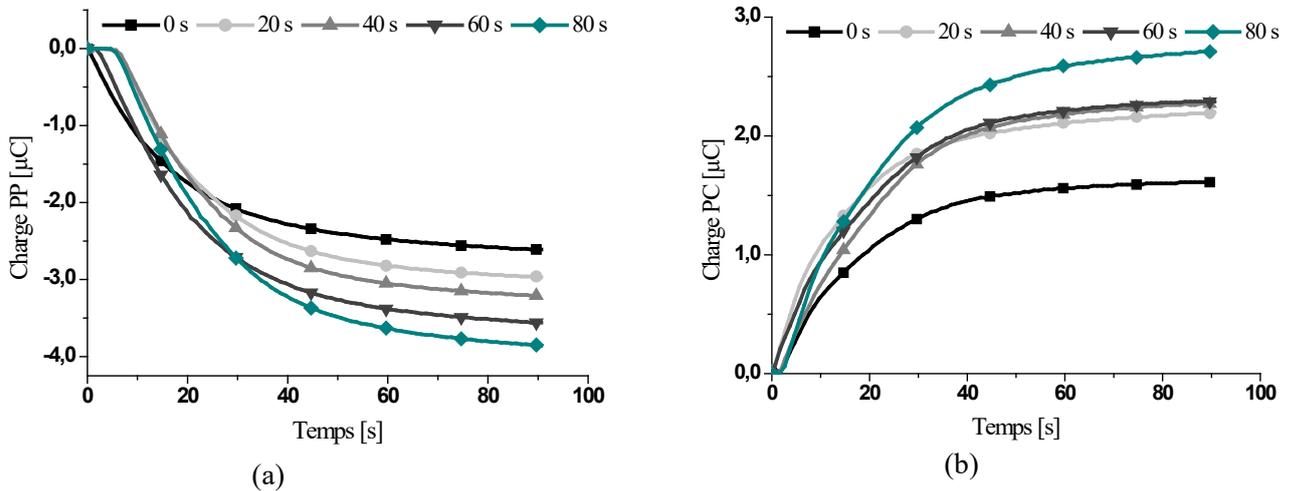


Figure 4.16. Variation de la charge des granules séparés en fonction du temps pour différents moments du processus de tribo-charge (t = 0 s ; 20 s ; 40 s ; 60 s ; 80 s) : (a) PP ; (b) PC

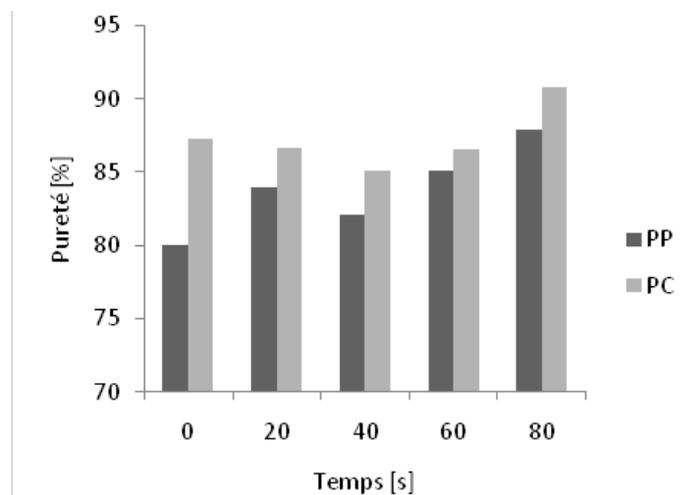


Figure 4.17. Puretés à différents moments du processus de tribo-charge (t = 0 s ; 20 s ; 40 s ; 60 s ; 80 s).

A partir de ces résultats, la valeur optimale du temps de chargement a été obtenue. On a trouvé qu'à $t = 20$ s la pureté dans la cage de Faraday gauche est de 80% PP et l'autre droite est de 86,7% PC comme le montre la figure (4.17), avec des valeurs de masses et de charges électriques successivement $m_g = 180,2$ g, $q_g = 2,72 \times 10^{-6}$ C et $m_d = 163,3$ g, $q_d = 2,72 \times 10^{-6}$ C.

Ces matériaux, PP et PC, sont connus pour être des très bons isolants ; ils se chargent assez facilement par l'effet triboélectrique. D'autres couples de matériaux isolants pourraient nécessiter un pré-chargement préalable avant le début de la séparation tribo-aéro-électrostatique.

4.2.1.2 L'effet de la haute tension

L'effet de la haute tension U sur la séparation des granules est illustré sur (figures 4.18 et 4.19). L'augmentation de U intensifie le champ électrique dans la zone de séparation et facilite la séparation. La tension U a un effet sur la masse des granules collectés. Des valeurs plus élevées de U favorisent la séparation rapide des deux produits mais avec une pureté médiocre comme le montre la figure (4.20).

En revanche, les résultats de la charge sont assez surprenants, La charge diminue avec l'augmentation de la haute tension appliquée (± 20 kV).

La valeur optimale de la tension appliquée aux électrodes est de ± 4 KV, ce qui signifie que la séparation est bonne pour la petite valeur de tension avec un pourcentage de pureté de 90,7 % PP et 92,1% PC, avec des masses et des charges électriques successivement $m_g = 161,7$ g, $q_g = 5,73 \times 10^{-6}$ C et $m_d = 139,6$ g, $q_d = -7,32 \times 10^{-6}$ C.

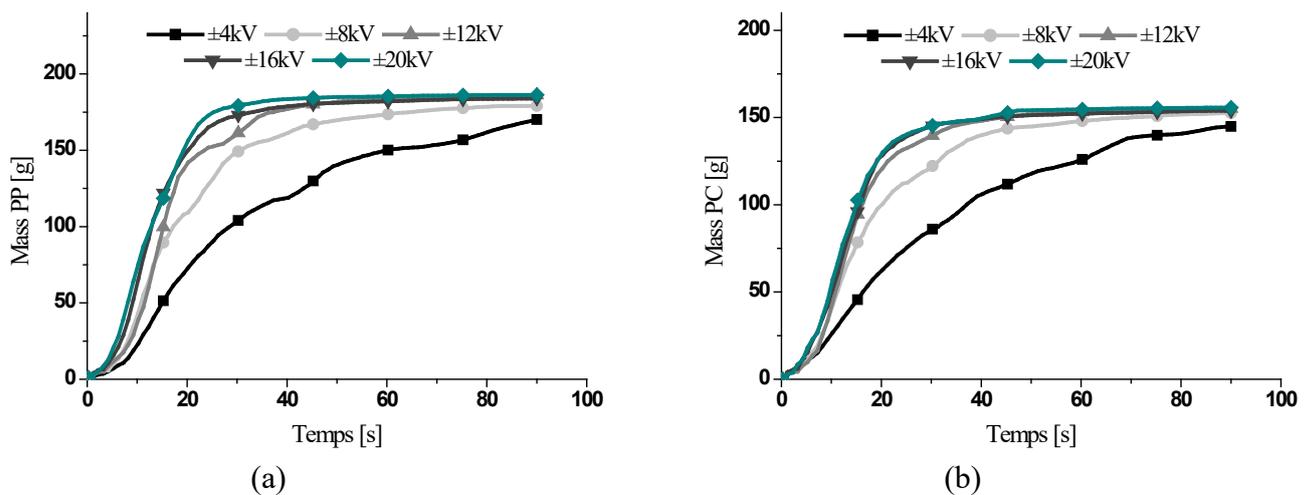


Figure 4.18. Variation de la masse des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de la tension ($U = \pm 4$ kV à ± 20 kV par pas de ± 4 kV) : (a) PP ; (b) PC.

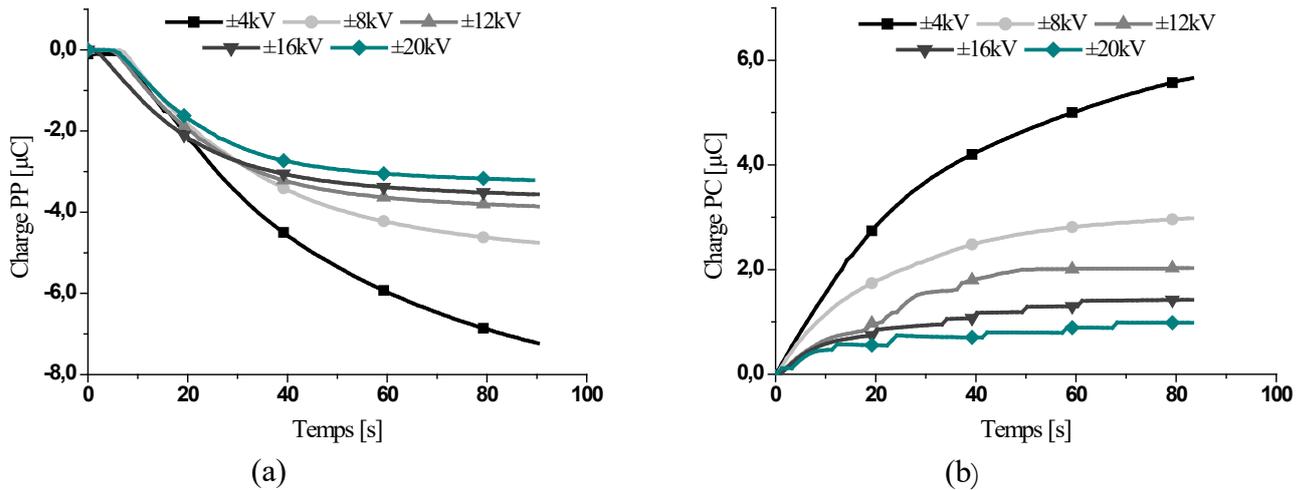


Figure 4.19. Variation de la charge des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de la tension ($U = \pm 4\text{ kV}$ à $\pm 20\text{ kV}$ par pas de $\pm 4\text{ kV}$) : (a) PP ; (b) PC.

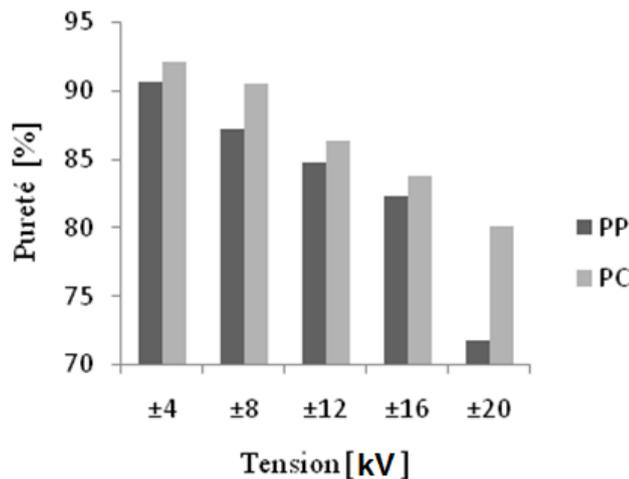


Figure 4.20. Puretés à différentes valeurs de la tension ($U = \pm 4\text{ kV}$ à $\pm 20\text{ kV}$ par pas de $\pm 4\text{ kV}$).

4.2.1.3L'effet du débit d'air de fluidisation

Le débit d'air a une grande influence sur le taux de séparation des produits, comme indiqué sur les figures(4.21 et 4.22). Les débits plus élevés s'accompagnent de collisions particules-particules plus nombreuses et plus intenses, si la vitesse de rotation de la soufflante est inférieure à 1000 rpm, une grande quantité de produit reste dans la chambre de séparation.

Ainsi, la charge atteint sa valeur élevée à des débits d'air élevés (figures 4.21.b et 4.22.b) qui favorisent une séparation rapide des particules. Cette augmentation de la charge peut s'expliquer aussi par le fait que la turbulence générée par un débit d'air plus fort rend plus difficile le maintien des particules à la surface des électrodes. Elles doivent avoir une charge plus importante pour que la force d'image électrique les attache aux électrodes-disques tournantes.

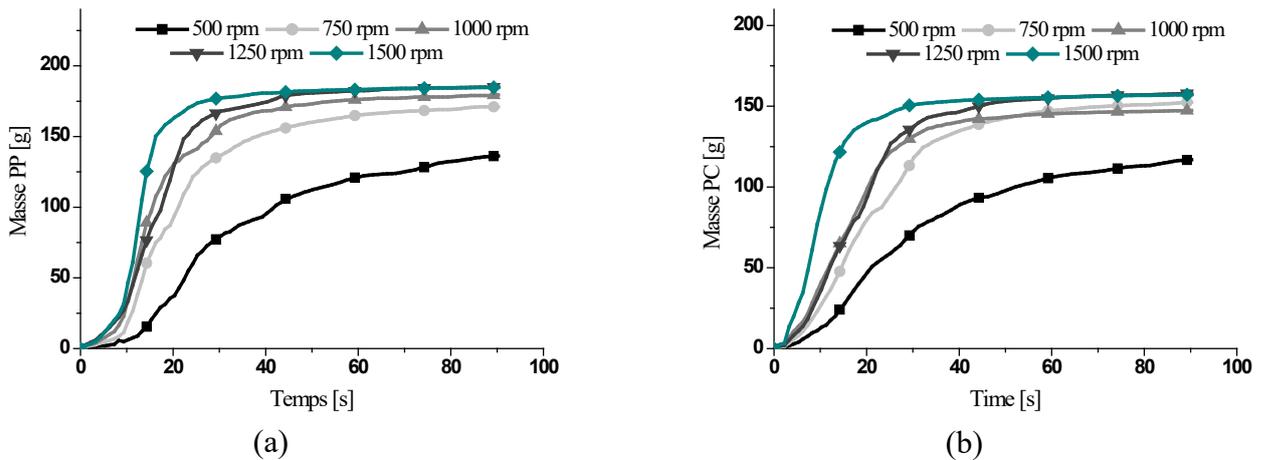


Figure 4.21. Variation de la masse des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de débit d'air de la soufflante (D = 500 rpm à 1500 rpm par pas de 250 rpm) : (a) PP ; (b) PC.

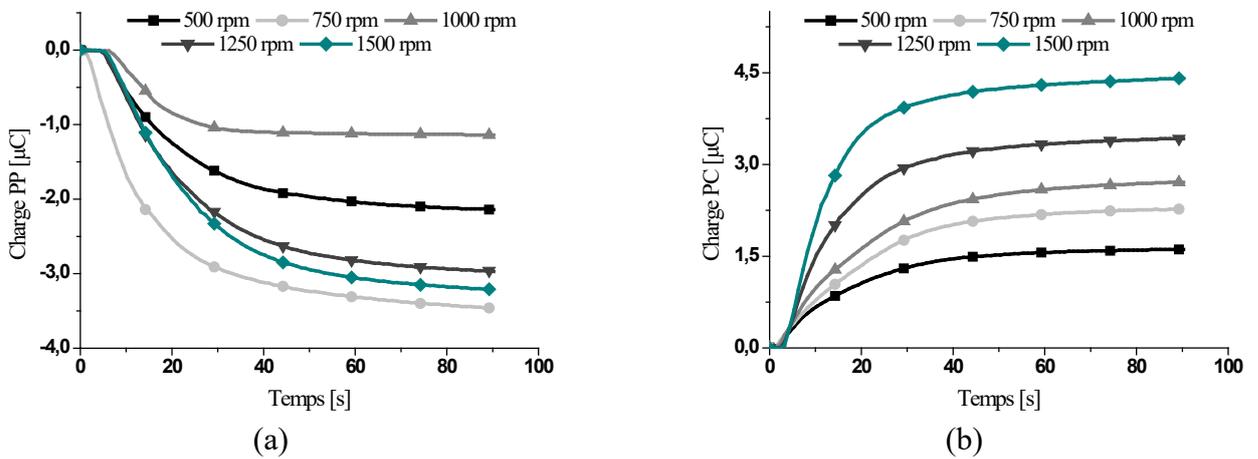


Figure 4.22. Variation de la charge des granules séparés en fonction du temps pour différentes valeurs de débit d'air de la soufflante (D = 500 rpm à 1500 rpm par pas de 250 rpm) : (a) PP ; (b) PC.

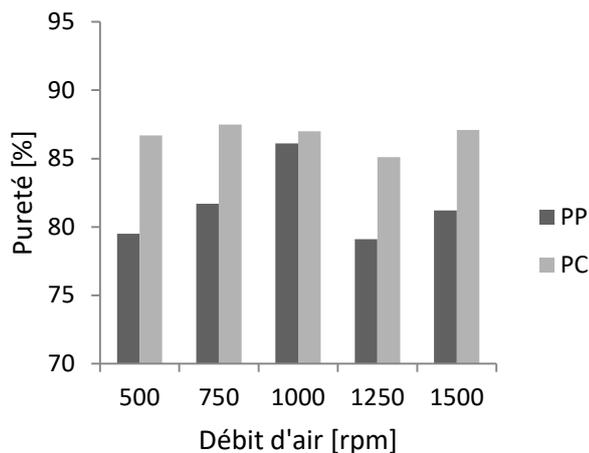


Figure 4.23. Puretés à différentes valeurs de débit d'air du soufflant (D = 500 rpm à 1500 rpm par pas de 250 rpm)

Par conséquent, la valeur optimale pour la meilleure séparation est dérivée de ces résultats D = 1000

rpm la pureté dans la boîte collectrice gauche est de 81,7% PP et l'autre droite est 87,5% PC comme montré dans la figure (4.23), avec des valeurs de masses et de charges électriques successivement $m_g = 171,8 \text{ g}$, $q_g = 8,48 \times 10^{-7} \text{ C}$ et $m_d = 152,9 \text{ g}$, $q_d = -4,51 \times 10^{-7} \text{ C}$.

Les expériences étant faites sans pré-charge des particules, la vitesse de rotation des électrodes-disques tournantes n'influence pas de manière significative sur le processus de séparation.

La quantité du produit récupérée reste quasiment la même, car elle dépend de la masse des particules qui atteignent le niveau de charge suffisant pour être attirées par les disques. Même en tournant plus vite, les disques ne peuvent évacuer que les particules satisfaisant cette condition.

4.2.2. Etude en régime continu

4.2.2.1 Effet du débit massique

Dans la présente étude, le nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques est utilisé en régime de fonctionnement continu, ajoutant un vibro-transporteur qui permet l'alimentation continue de la chambre de séparation en produit pulvérulent avec un débit contrôlable (figure 4.24).



1 : Moteurs électriques,
2 : Chambre de séparation ;
3 : Electrodes-disques métalliques tournantes;

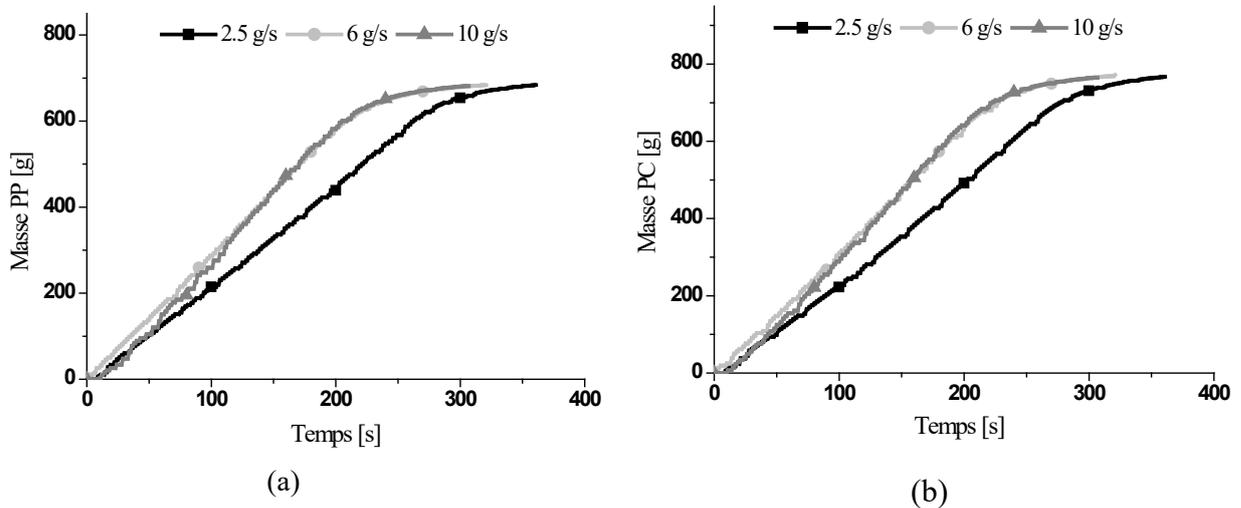
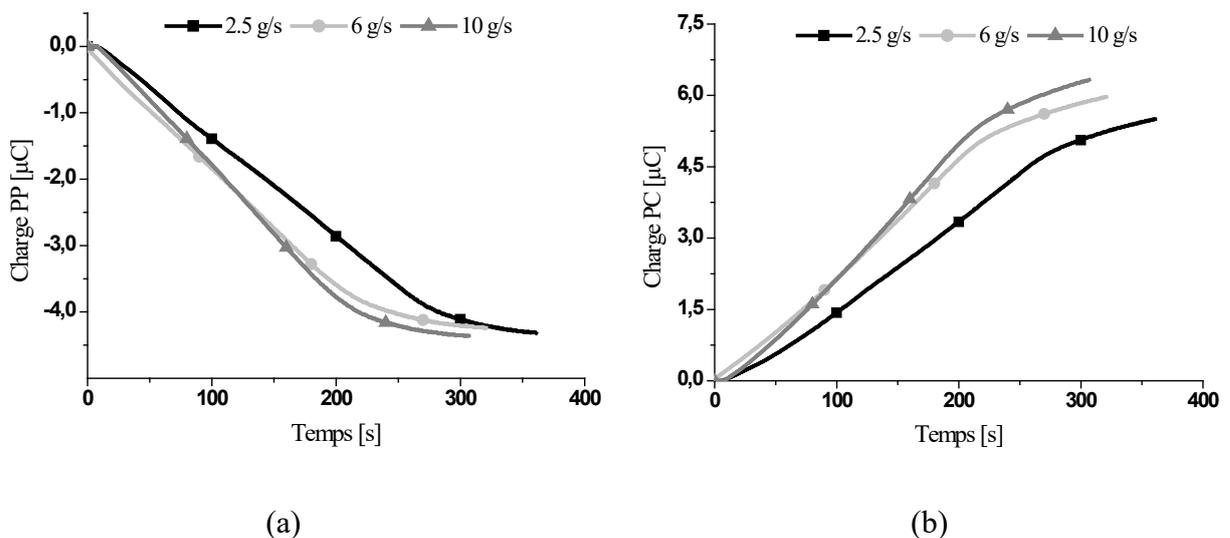
4 : Collecteurs ;
5 : Cages de Faraday

Figure 4.24. Vibro-transporteur du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques

Les expériences ont été effectuées pour un mélange contenant 650 g de PP et 650 g de PC d'une masse totale de 1300 g composée de 50% PP et 50% PC a été traité comme suit:

1000 g ont été initialement stockés dans la trémie de l'alimentateur vibratoire et 300 g dans le lit fluidisé. Les conditions opératoires sont les valeurs optimales obtenues par une série d'expériences préalables réalisées qui sont $t = 20\text{s}$, $U = \pm 4\text{ kV}$, $D = 1000\text{ rpm}$ et la vitesse de rotation du disque a été fixée à $n = 50\text{ tr/min}$

L'effet de débit massique Q étudié dans ces expériences a été varié successivement : $Q = 2.5\text{ g/s}$, 6 g/s et 10 g/s .

**Figure 4.25.** Variation de la masse des granules séparés en fonction du débit massique, à différentes valeurs de débit d'alimentation ($Q = 2.5\text{ g/s}$; 6 g/s ; 10 g/s) : (a) PP ; (b) PC.**Figure 4.26.** Variation de la charge des granules séparés en fonction du débit massique, à différentes valeurs de débit d'alimentation ($Q = 2.5\text{ g/s}$; 6 g/s ; 10 g/s) : (a) PP ; (b) PC.

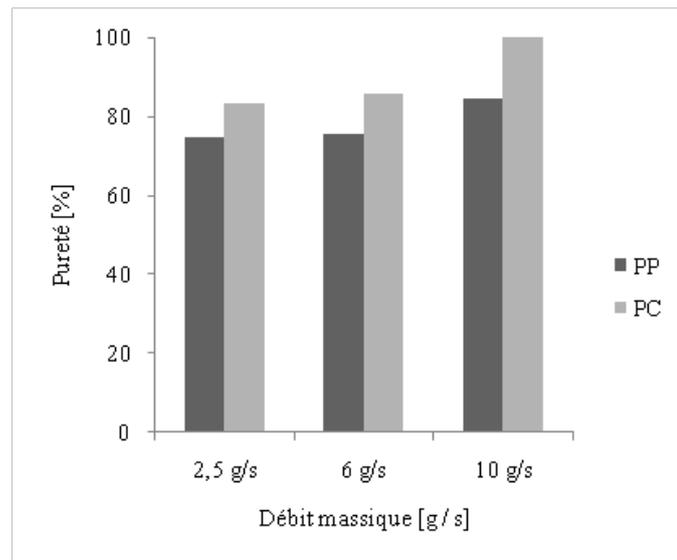


Figure 4.27. Puretés des deux produits à différentes valeurs de débit massique: d'alimentation ($t = 20$ s, $D = 1000$ tr / min et $U = \pm 4$ kV, $Q = 2.5$ g/s; 6 g/s; 10 g/s).

Pour chaque expérience, les puretés des matériaux dans les deux boîtes de collecte ont été calculées comme la valeur moyenne de cinq mesures.

Le débit massique a une grande influence sur la vitesse de séparation des produits comme indiqué sur les figures (4.25 et 4.26). L'augmentation du débit d'alimentation s'accompagne d'une augmentation de la vitesse de récupération des produits de la séparation.

Avec une masse initiale plus grande, le niveau supérieur du lit fluidisé est plus élevé. Par conséquent, les particules sont plus proches des disques collecteurs, qui peuvent être partiellement immergés dans le lit fluidisé. Dans ces conditions, les particules seront attirées par les électrodes même en étant moins bien chargées et seront évacuées plus rapidement.

La valeur optimale pour la meilleure séparation est dérivée de ces résultats. $Q = 10$ g/s la pureté dans la boîte collectrice gauche est de 85,5% PP et l'autre est proche de 100% PC comme indiqué dans (figure 4.27).

4.2.2.2 Séparation continue des mélanges non équilibrés

Une dernière série d'expériences a été réalisée avec des mélanges non équilibrés: 80% PP + 20% PC; 20% PP + 80% PC, 60% PP + 40% PC, 40% PP + 60% PC et 50% PP + 50% PC, pour $m = 1300$ g, $n = 50$ tr / min, $D = 6.3$ m³.h⁻¹, $U = \pm 8$ kV, $Q = 6$ g / s.

Les résultats des dernières expérimentations réalisées avec un mélange non équilibré sont représentés sur les figure (4.28 – 4.30).

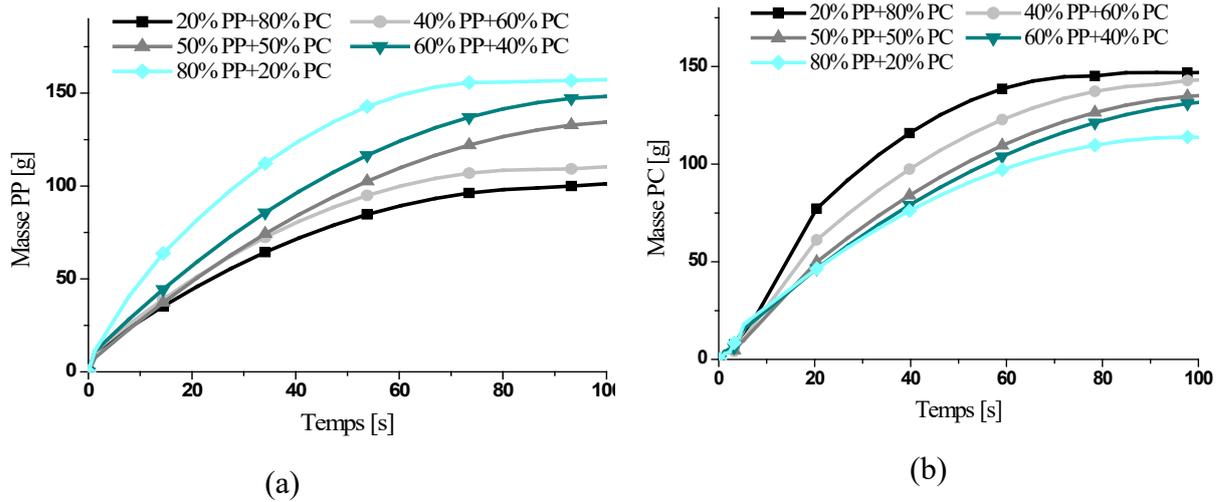


Figure 4.28. Variation de la masse des granules séparés en fonction du temps, pour différentes compositions de mélange ($t = 20$ s, $D = 1000$ rpm et $U = \pm 4$ kV): (a) PP ; (b) PC.

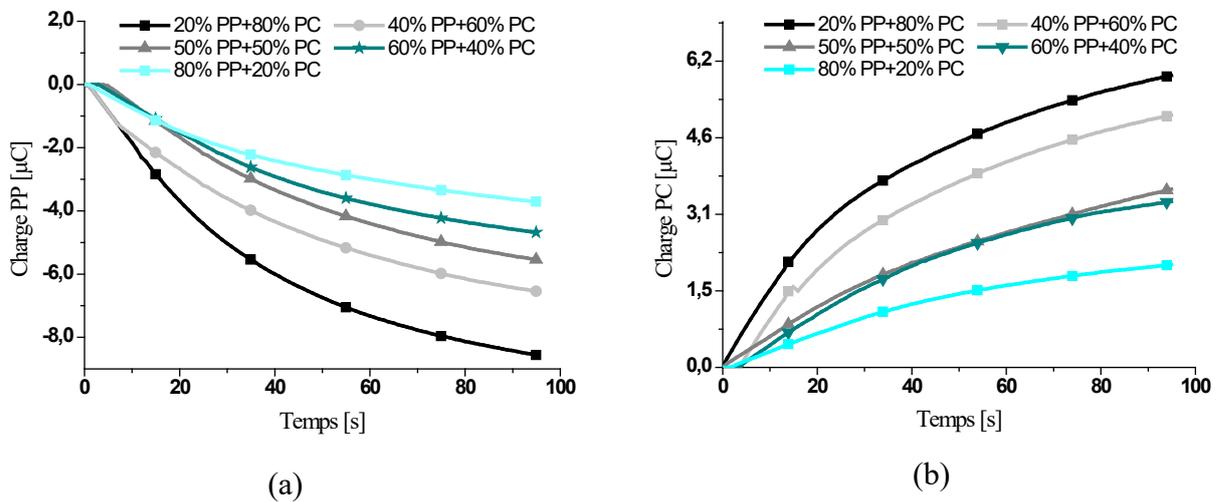


Figure 4.29. Variation de la charge des granules séparés en fonction du temps, pour différentes compositions de mélange ($t = 20$ s, $D = 1000$ rpm et $U = \pm 4$ kV): (a) PP ; (b) PC.

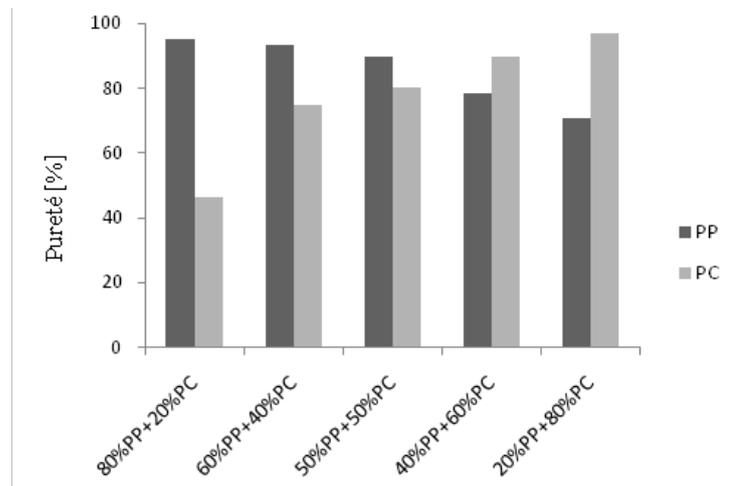


Figure 4.30. Pureté des produits séparés, pour différentes compositions de mélange ($t = 20$ s, $D = 1000$ rpm et $U = \pm 4$ kV)

Dans le cas où le mélange est équilibré (50% de PP + 50% de PC), la pureté du produit est de 89,9% de PP et de 71,6% de PC. Cependant, si le mélange n'est pas équilibré, plus de 90% de pureté peuvent être obtenus pour le polymère principal. Par exemple, dans le cas d'un mélange de 20% de PP + 80% de PC, la pureté du PC est supérieure à 97%. Cela pourrait également être observé dans 80% de PP + 20% de PC, 60% de PP + 40% de mélanges de PC.

4.3. Modélisation du processus de séparation électrostatique

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables : les réponses et les facteurs. Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux. Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle mathématique, exprimant la réponse en fonction des facteurs. Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes. Il s'agit ici de la notion de plan d'expériences (PE), correspondant à la réalisation d'une série de N expériences, qui sont toutes déterminées, obligatoirement réalisables et indépendantes entre elles. La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces N configurations. C'est une méthode qui permet la modélisation ainsi que l'optimisation d'un processus. Le procédé d'un système peut être défini en exprimant les n variables de sortie y_i , $i = 1, \dots, n$, comme fonctions des variables d'entrée u_i , $i = 1, \dots, m$, qui peuvent être contrôlées (figure 4.31).

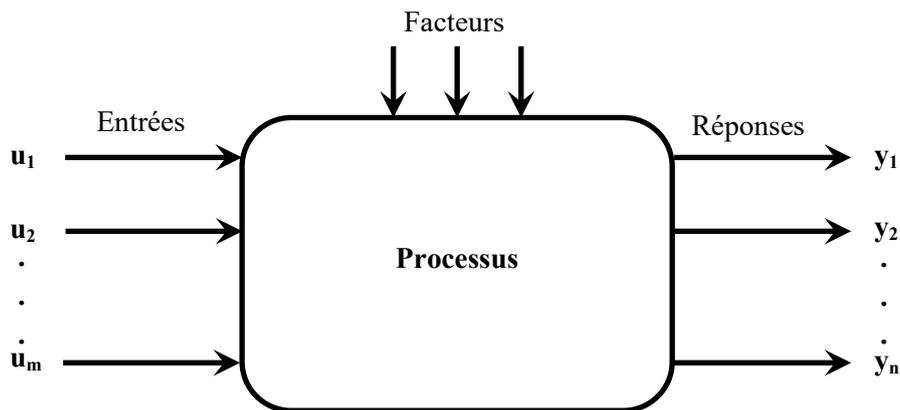


Figure 4.31. Représentation schématique d'un processus

La fonction de réponse y_i peut s'exprimer comme suit :

$$y_i = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{i,j} x_i x_j + \sum a_{i,i} x_i^2, i, j = 1, 2, \dots, m \quad (4.2)$$

Où x_i a la valeur -1 pour le niveau inférieur u_{imin} du facteur et la valeur +1 pour le niveau supérieur du même facteur u_{imax} . Les plans d'expériences mis en œuvre dans cette thèse permettent

d'exprimer la réponse par un modèle polynomial de second degré.

Les expériences ont été réalisées sur un mélange de PP et de PC. Les autres caractéristiques variables du système ont été maintenues constantes, l'humidité relative de l'air $HR = 45 \pm 1 \%$, la température ambiante $T = 23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, la masse du produit granulaire $m = 200 \text{ g (PP)} + 200 \text{ g (PC)}$, la vitesse de rotation des disques $n = 50 \text{ tr/min}$.

Les intervalles d'étude des différents facteurs ont été choisis suivant les réponses obtenues à partir des travaux précédents. Nous avons fixé une certaine consigne valable pour toutes les réponses des trois facteurs étudiés (tension appliquée, la vitesse de l'air de fluidisation débitée par la soufflante et le temps de chargement).

4.3.1. Domaine expérimental

4.3.1.1 Intervalle d'étude de la tension positive

D'après les résultats des expériences, nous avons choisi l'intervalle d'étude de la haute tension comme suit : $4\text{kV} \leq U \leq 16 \text{ kV}$.

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par :

$$U_c = (U_{\max} + U_{\min})/2 \quad (4.3)$$

D'où : $U_c = 10 \text{ kV}$.

4.3.1.2 Intervalle d'étude de la vitesse de l'air de fluidisation débitée par la soufflante

Les dimensions de la chambre de séparation où nous créons le lit fluidisé et la quantité et la taille du mélange à séparer nous conduisent à un intervalle d'étude de la vitesse de l'air de la soufflante comme suit : $800 \text{ tr/min} \leq n \leq 1200 \text{ tr/min}$

La valeur centrale de l'intervalle de la vitesse de l'air est donnée par :

$$n_c = (n_{\max} + n_{\min})/2 \quad (4.4)$$

D'où : $n_c = 1000 \text{ tr/min}$.

4.3.1.2 Intervalle d'étude du temps de chargement des particules

En prenant en considération les contraintes d'application industrielles, nous avons limité l'intervalle d'étude du temps à : $1 \text{ min} \leq t \leq 5 \text{ min}$.

La valeur centrale de l'intervalle du temps est donnée par :

$$t_c = (t_{\max} + t_{\min})/2 \quad (4.5)$$

D'où $t_c = 3$ min.

4.3.2. Application de la méthode des plans d'expérience composites

Le plan composite centré fait partie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses (figure 4.32). Leur usage est particulièrement destiné à la modélisation de la surface de réponse expérimentale, c'est-à-dire à l'évolution du critère de performance sur un univers de discours des variables bornées. Ce sont les plans les plus utilisés car ils présentent l'avantage de la facilité de construction. Ces plans sont construits en ajoutant des points de mesures à un plan factoriel complet.

Les plans pour l'étude d'une surface de réponse étant souvent utilisés après une étude des effets des facteurs ; il suffit alors de réaliser seulement quelques expériences supplémentaires pour estimer la surface de réponse du critère étudié.

Un plan composite centré est défini par :

- ✚ Un plan factoriel complet de 2^k expériences ;
- ✚ n_0 répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique ;
- ✚ $2k$ points en étoile positionnés sur les axes de chaque paramètre. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse.

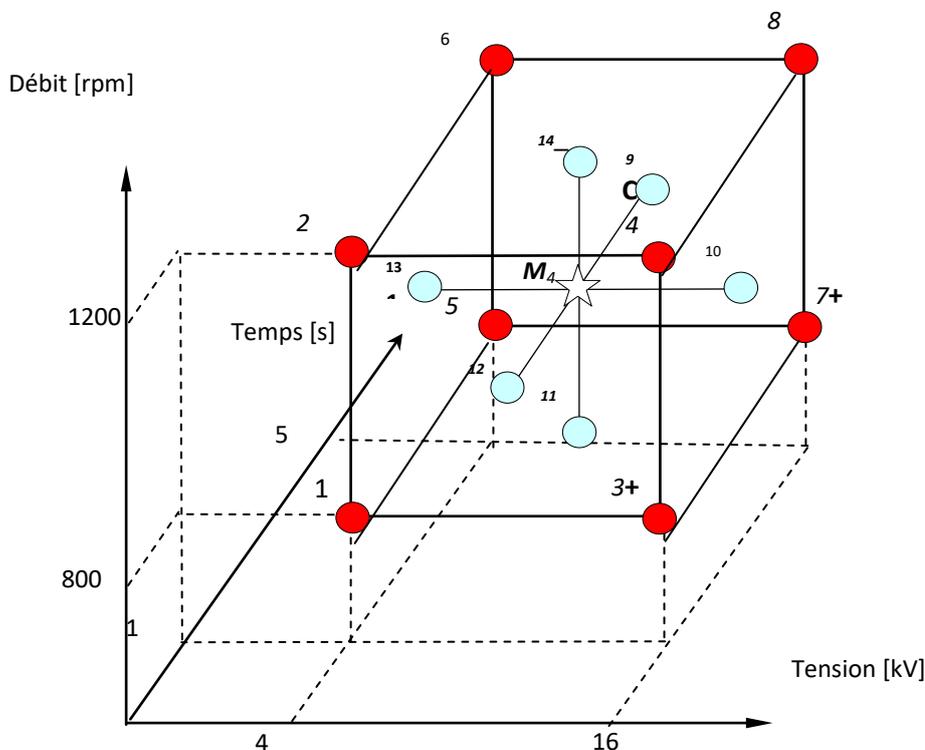


Figure 4.32. Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite

Donc le nombre total d'essais devront être menés est : $N = 2^k + 2.k + n_0$ (4.6)

Soit 17 expériences pour nos 3 facteurs tension, vitesse de rotation de la soufflante et temps de chargement.

Les résultats des dix-sept expériences réalisées selon le plan factoriel composite recommandé par la méthodologie de plan d'expérience sont présentés dans le tableau (4.2).

| Tension | débit | Temps | M _{PC} | M _{PP} | PU _{PC} | PU _{PP} |
|---------|-------|-------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 4 | 800 | 1 | 102.9 | 86.1 | 82.14 | 88.14 |
| 16 | 800 | 1 | 170.2 | 126.4 | 90.24 | 87.24 |
| 4 | 1200 | 1 | 137.9 | 121 | 80.24 | 81.24 |
| 16 | 1200 | 1 | 170.5 | 118.9 | 89.77 | 88.77 |
| 4 | 800 | 5 | 89 | 81.7 | 78.76 | 75.76 |
| 16 | 800 | 5 | 136.5 | 122.6 | 90.37 | 95.37 |
| 4 | 1200 | 5 | 108.6 | 90 | 74.38 | 68.38 |
| 16 | 1200 | 5 | 125.2 | 93.7 | 88.62 | 93.62 |
| 4 | 1000 | 3 | 117.1 | 118.4 | 80.7 | 82.7 |
| 16 | 1000 | 3 | 149.6 | 135.6 | 89.96 | 92.96 |
| 10 | 800 | 3 | 111.2 | 120.1 | 95.87 | 95.87 |
| 10 | 1200 | 3 | 114.7 | 116 | 92.22 | 95.22 |
| 10 | 1000 | 1 | 155.2 | 148.1 | 88.2 | 95.2 |
| 10 | 1000 | 5 | 132.7 | 136.9 | 87.17 | 95.17 |
| 10 | 1000 | 3 | 133 | 141.1 | 90.45 | 96.45 |
| 10 | 1000 | 3 | 131.2 | 137.7 | 90.81 | 97.81 |
| 10 | 1000 | 3 | 128 | 132.4 | 90.23 | 97.23 |

Tableau 4.2. Récupération et pureté des produits PP e PC collectés dans les 17 expériences.

La représentation matricielle d'un plan composite centré à trois facteurs et trois mesures au centre est donnée par le tableau (4.2). Cette matrice définit les niveaux de chacun des paramètres à chaque expérience.

4.3.3. Calcul des coefficients

A partir de cette matrice d'expériences, il est possible de définir la matrice X permettant de calculer les coefficients du modèle (Eq.4.7). Cette matrice est une extension de la matrice d'expérience. Elle regroupe dans chaque colonne les niveaux de chacun des coefficients de l'équation du modèle pour chaque essai.

Ces nouvelles colonnes sont calculées par multiplication des colonnes de la matrice d'expérience.

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j \right) \quad (4.7)$$

Il est commode d'écrire ce système sous forme matricielle sans tenir compte des erreurs expérimentales :

$$Y = X \cdot \hat{a} \quad (4.8)$$

Avec : $\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t Y$

Les éléments du vecteur \hat{a} vont être estimés en utilisant la méthode du moindre carré. Les résultats de calcul sont récapitulés dans le Tableau (4.3).

| N°Essais | U _G [kV] | U _D [kV] | t [s] | M _{PC} | M _{PP} | PU _{PC} | PU _{PP} | |
|-------------------------------------|---------------------|---------------------|-------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-------|
| Plan factoriel «2 ³ » | 1 | -1 | -1 | -1 | 102.9 | 86.1 | 82.14 | 88.14 |
| | 2 | 1 | -1 | -1 | 170.2 | 126.4 | 90.24 | 87.24 |
| | 3 | -1 | 1 | -1 | 137.9 | 121 | 80.24 | 81.24 |
| | 4 | 1 | 1 | -1 | 170.5 | 118.9 | 89.77 | 88.77 |
| | 5 | -1 | -1 | 1 | 89 | 81.7 | 78.76 | 75.76 |
| | 6 | 1 | -1 | 1 | 136.5 | 122.6 | 90.37 | 95.37 |
| | 7 | -1 | 1 | 1 | 108.6 | 90 | 74.38 | 68.38 |
| | 8 | 1 | 1 | 1 | 125.2 | 93.7 | 88.62 | 93.62 |
| Points en étoiles «2×3» | 9 | -1 | 0 | 0 | 117.1 | 118.4 | 80.7 | 82.7 |
| | 10 | 1 | 0 | 0 | 149.6 | 135.6 | 89.96 | 92.96 |
| | 11 | 0 | -1 | 0 | 111.2 | 120.1 | 95.87 | 95.87 |
| | 12 | 0 | 1 | 0 | 114.7 | 116 | 92.22 | 95.22 |
| | 13 | 0 | 0 | -1 | 155.2 | 148.1 | 88.2 | 95.2 |
| | 14 | 0 | 0 | 1 | 132.7 | 136.9 | 87.17 | 95.17 |
| Points au centre | 15 | 0 | 0 | 0 | 133 | 141.1 | 90.45 | 96.45 |
| | 16 | 0 | 0 | 0 | 131.2 | 137.7 | 90.81 | 97.81 |
| | 17 | 0 | 0 | 0 | 128 | 132.4 | 90.23 | 97.23 |

Tableau 4.3. Matrice d'expérience et résultats expérimentaux d'un plan composite centré

✚ Pour la Récupération et la pureté du produit PC

le plans d'expériences permettant d'exprimer la réponse par un modèle polynomial de second degré.

Les modèles mathématiques des réponses de la pureté et la récupération de PC et de PP sont donné par les équations suivantes:

$$M_{PC} = 130.4 + 19.6U + 4.7D - 14.5t + 3.1U^2 - 17.3D^2 + 13.7t^2 - 8.2U * D - 4.5U * t - 3.4D * t \quad (4.9)$$

$$PU_{PC} = 90.9 + 5.3U - 1.2D - 1.1t - 5.9U^2 + 2.8D^2 - 3.5t^2 + 0.5U * D - 1.1U * t - 0.4D * t \quad (4.10)$$

✚ Pour la Récupération et la pureté du produit PP

$$M_{PP} = 138.9 + 10U + 0.3D - 7.6t - 13.4U^2 - 22.3D^2 + 2.2t^2 - 9.9U * D + 0.8U * t - 6.1D * t \quad (4.11)$$

$$PU_{PP} = 97.1 + 6.2U - 1.5D - 1.2t - 9.1U^2 - 1.4D^2 - 1.8t^2 + 1.8U * D + 4.7U * t - 0.4D * t \quad (4.12)$$

4.3.4. Qualité descriptive du modèle

Le tableau de l'analyse de régression permet d'établir immédiatement les coefficients de détermination à partir des relations (4.13 et 4.14) suivantes :

$$R^2 = \frac{SCEL}{STCE} = 1 - \frac{SCER}{STCE} \quad (4.13)$$

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{STCE} \quad (4.14)$$

SCEL: somme des carrés des écarts dues au lien

SCER: somme des carrés des écarts des résidus

STCE: somme totale des carrés des écarts

Ces coefficients traduisent la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, les coefficients de détermination appartiennent aux l'intervalles suivants :

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (4.15)$$

$$-\infty \leq Q^2 \leq 1 \quad (4.16)$$

Les coefficients trouvés sont mentionnés dans le tableau (4.4). On constate que tous ces facteurs sont proches de 100%, ce qui indique une bonne qualité des modèles obtenus.

| | Masse PP | Pu PP% | Masse PP | Pu PP% |
|--------------------|----------|--------|----------|--------|
| Q ² [%] | 91,1 | 93,1 | 93.8 | 90.6 |
| R ² [%] | 98,3 | 98,6 | 99.2 | 98.9 |

Tableau 4.4. Résultats des coefficients Q² et R²

4.4. Influence des facteurs choisis sur les réponses

A partir des modèles mathématiques obtenus, on peut déterminer à l'aide du logiciel MODDE 5.0 l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses en traçant la variation des réponses en fonction des facteurs choisis. Si on veut par exemple déterminer l'influence d'un facteur (x_i) sur la masse du produit mixte, on représente sa variation pour les trois niveaux du facteur choisi [114].

En procédant de la même manière, on peut démontrer facilement que les facteurs les plus influents sur les réponses sont respectivement les tensions appliquées et le temps de chargement.

4.4.1. Produit PC

En analysant la figure(4.33), on constate que :

- ✓ Le taux de récupération augmente avec l'augmentation de la tension appliquée ;
- ✓ Le taux de pureté croît avec l'augmentation de la tension jusqu'à atteindre la valeur centrale de l'intervalle puis elle diminue ;
- ✓ La pureté est inversement proportionnelle que la récupération ;
- ✓ En augmentant le débit d'air le taux de récupération augmente jusqu'à la valeur centrale de l'intervalle puis diminue ;
- ✓ Le temps de chargement influe sur les taux de récupération et de pureté.

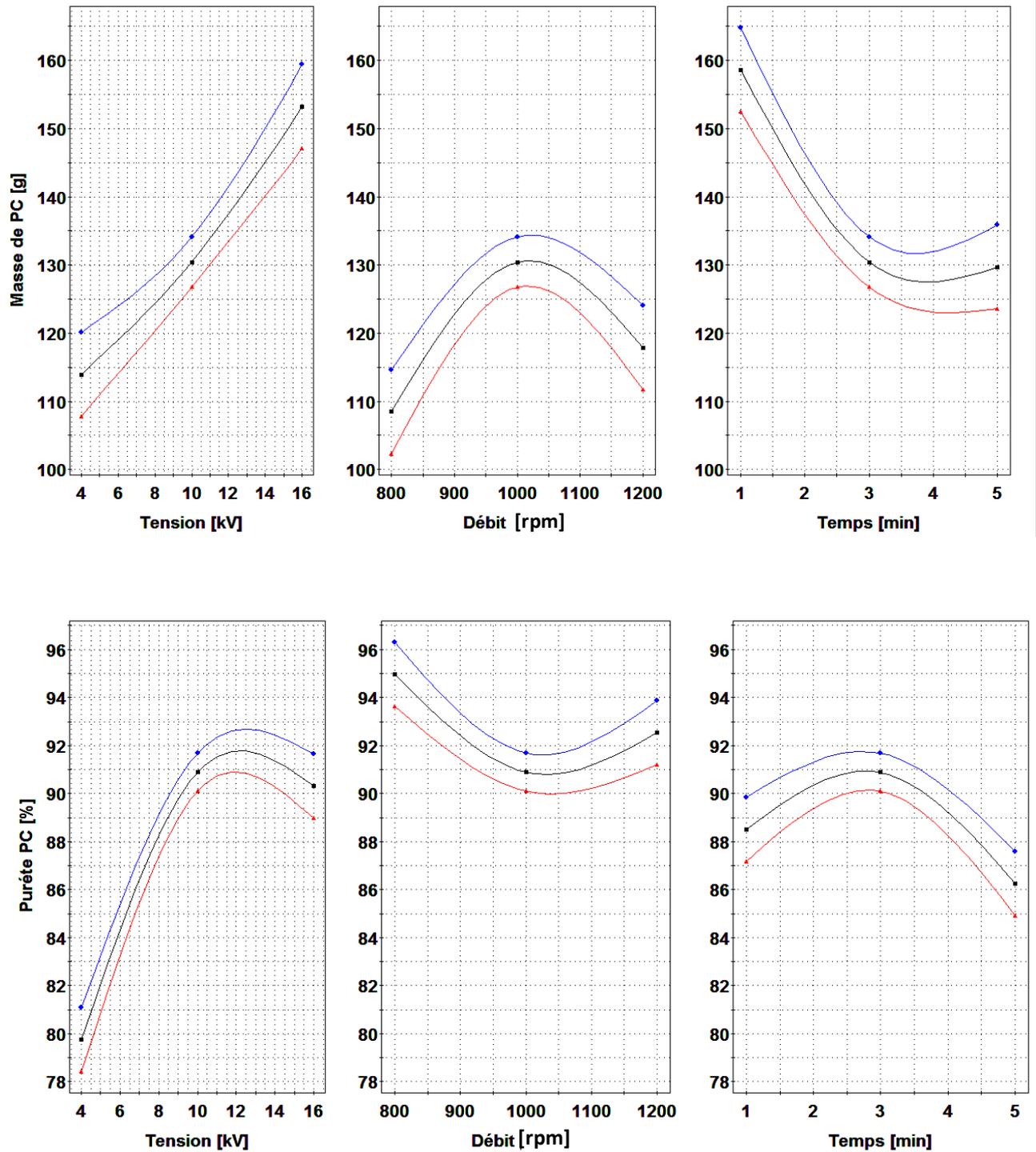


Figure 4.33. Effets de chaque facteur sur la réponse pour le produit PC

4.4.2. Produit PP

Les résultats de l'analyse pour le produit PP sont représentés sur la figure (4.34) suivante :

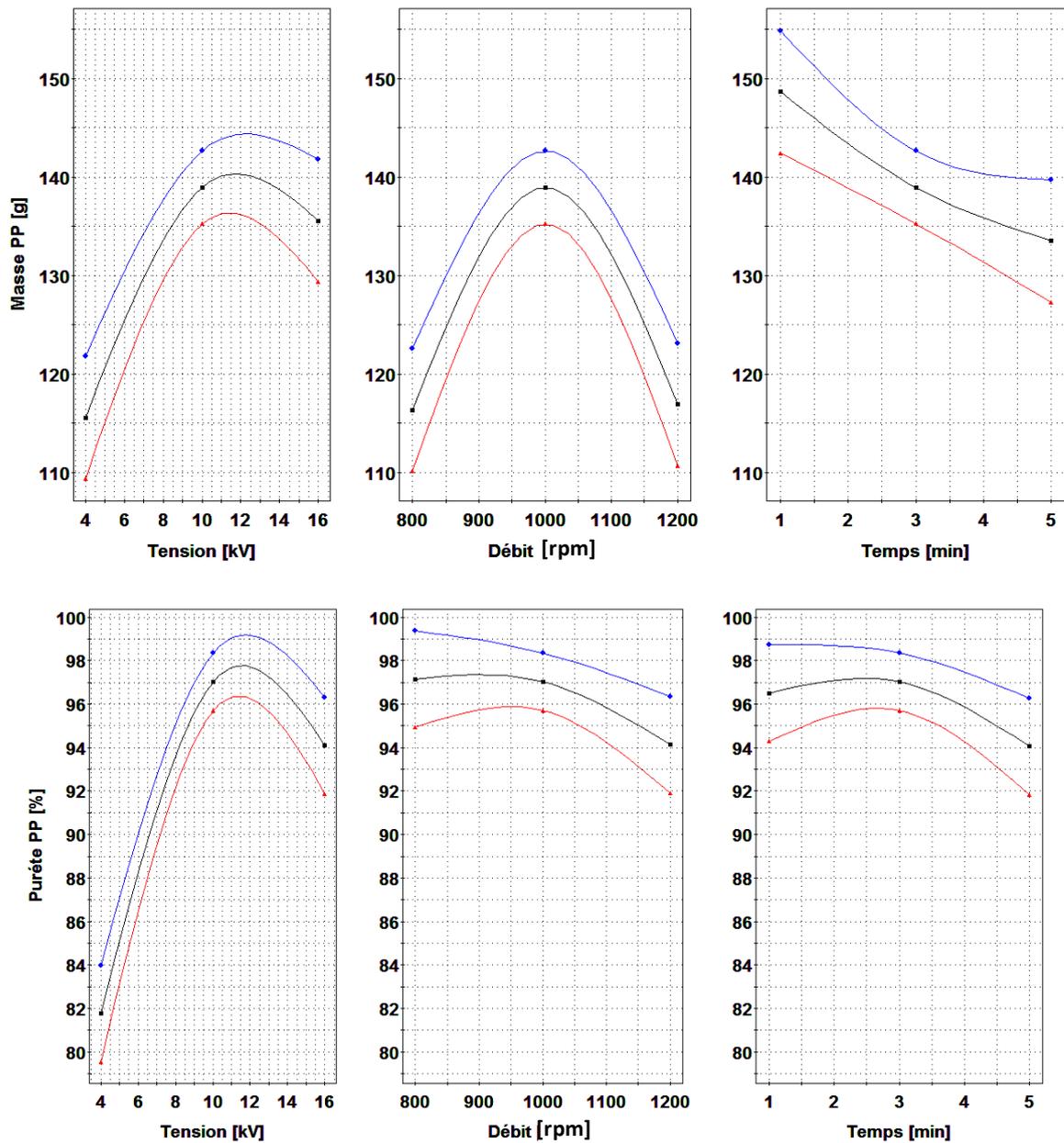


Figure 4.34. Effets de chaque facteur sur la réponse pour le produit PP

D'après ces résultats, nous concluons que : Les taux de récupération et la pureté s'améliorent avec l'augmentation de la tension appliquée jusqu'à la valeur centrale puis ils diminuent.

- ✓ En augmentant le débit d'air, le taux de récupération augmente jusqu'à la valeur centrale de l'intervalle puis elle diminue ;
- ✓ La pureté n'est pas sensible à l'augmentation du débit d'air ;
- ✓ Le temps de chargement a une influence significative sur les taux de récupération et de pureté.

4.4.3. Détermination du point de fonctionnement optimal

On utilise la fonction de réponse, (le logiciel MODDE 5.0 (*MODELing and DEsign*) [115], qui est un programme exécutable sous Windows (réalisé par *Umetrics AB, Suède*) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences [116]. Il propose des réponses prédites en fonction des paramètres : tensions appliquées et débit d'air (figure 4.35).

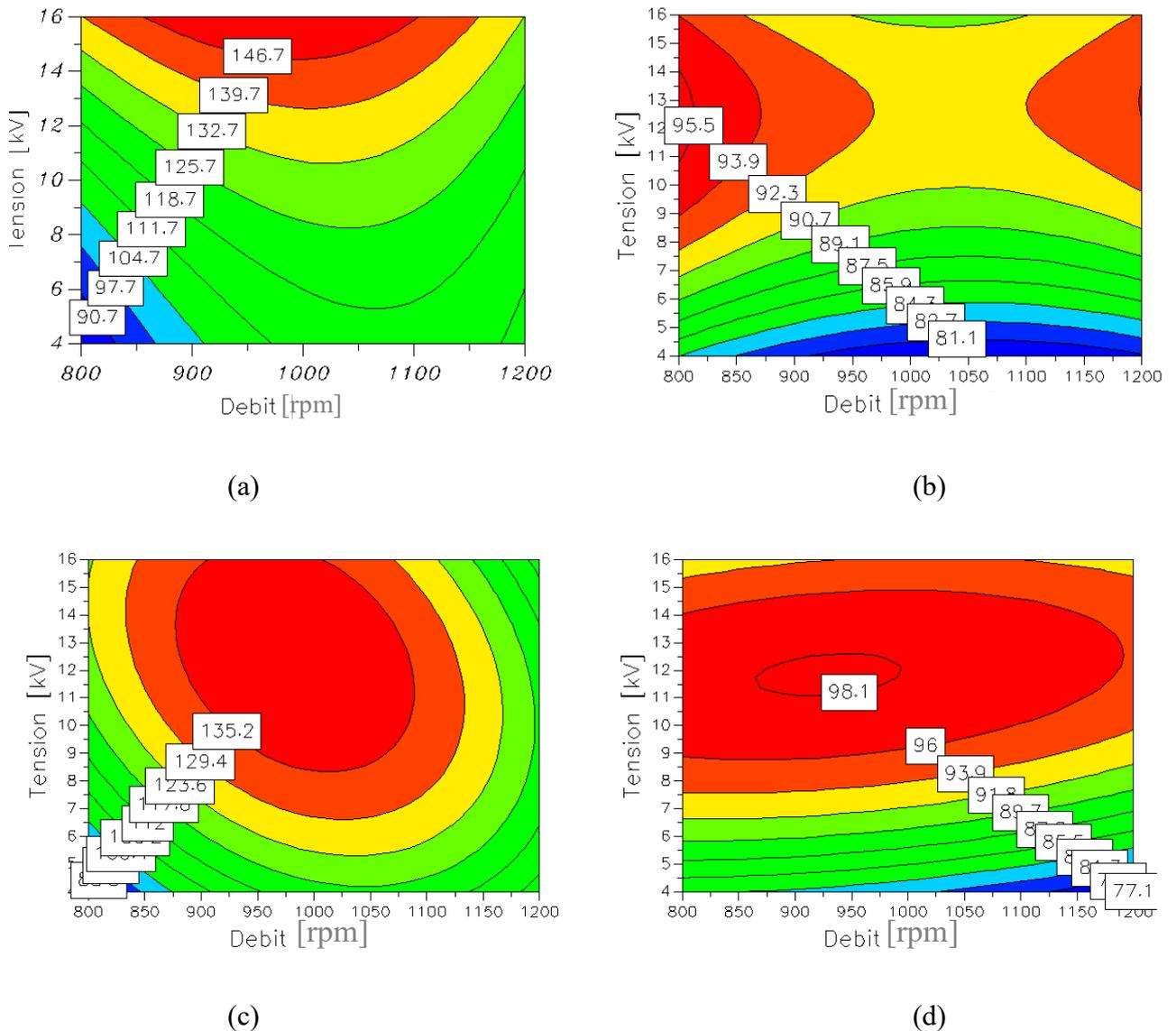


Figure 4.35.Quantités des réponses prédites par le logiciel MODDE 5.0 en fonction de la tension et de débit.

(a) récupération PC; (b) pureté PC; (c) récupération PP; (d) pureté PP

Selon le logiciel MODDE 5.0, la meilleure séparation électrostatique (Tableau 4.5) avec des puretés de PC= 90.2 %, PP= 95.4 % et de récupérations de PC= 164.7 g, PP= 174.4 g correspond aux valeurs optimales suivantes:

- ✓ Une tension appliquée de 13.3 kV

- ✓ Un débit de 1009 tr/min
- ✓ Le temps de chargement de 1.4 min.

| Factor | Role | Value | Low Limit | High Limit | Response | Criteria | Weight | Min | Target | Max | |
|--------|---------|-------|-----------|------------|----------|----------|--------|----------|--------|---------|---------|
| 1 | Tension | Free | | 4 | 16 | 1 | RECPC | Maximize | 1 | 164.86 | 172.649 |
| 2 | debit | Free | | 800 | 1200 | 2 | RECPP | Maximize | 1 | 145.355 | 151.937 |
| 3 | Temps | Free | | 1 | 5 | 3 | PUPC1 | Maximize | 1 | 93.9541 | 95.9739 |
| | | | | | | 4 | PUPP | Maximize | 1 | 95.7438 | 98.5729 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|------|--------|
| | Tension | debit | Temps | RECPC | RECPC | PUPC1 | PUPP | iter | log(D) |
| 1 | 12.5573 | 1002.67 | 1.1997 | 165.308 | 149.029 | 89.852 | 95.8613 | 3526 | 0.4467 |
| 2 | 12.5656 | 1000.94 | 1.2001 | 165.302 | 149.014 | 89.8568 | 95.857 | 3938 | 0.4464 |
| 3 | 13.3109 | 1009.4 | 1.4 | 164.675 | 147.391 | 90.2061 | 95.4108 | 2721 | 0.4365 |
| 4 | 12.5595 | 1003.02 | 1.2002 | 165.313 | 149.026 | 89.8524 | 95.8594 | 3529 | 0.4467 |
| 5 | 12.5574 | 1002.52 | 1.2001 | 165.296 | 149.025 | 89.8537 | 95.8624 | 2907 | 0.4466 |
| 6 | 13.3801 | 854.821 | 2.4353 | 138.54 | 133.405 | 93.9635 | 96.6216 | 3485 | 0.8539 |
| 7 | 12.5629 | 1002.96 | 1.2012 | 165.307 | 149.019 | 89.8549 | 95.8582 | 2839 | 0.4465 |
| 8 | 12.5574 | 1002.52 | 1.2001 | 165.296 | 149.025 | 89.8537 | 95.8624 | 2907 | 0.4466 |

Tableau4.5. Recherche des valeurs optimales en utilisant le logiciel MODDE 5.0

Les résultats expérimentaux obtenus en utilisant les valeurs données par le logiciel sont regroupés dans le tableau (4.6) suivant :

| | Tension [kV] | Débit [tr/min] | Temps [min] | Rec PC (g) | Rec PP (g) | Pu PC (%) | Pu PP (%) |
|------------------------------------|--------------|----------------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Résultats du logiciel | 13.32 | 1009 | 1.4 | 164.7 | 147.4 | 90.2 | 95.4 |
| Résultats expérimentaux n°1 | 13,3 | 1000 | 1,4 | 173,4 | 149,7 | 88,07 | 90,18 |
| Résultats du logiciel | 13.38 | 854.8 | 2.4 | 138.54 | 133.4 | 93.96 | 96.62 |
| Résultats expérimentaux n°2 | 13,4 | 850 | 2,4 | 124.2 | 136 | 91.23 | 93.25 |

Tableau 4.6.Comparaison des résultats du logiciel et expérimentaux

Cette petite différence entre les masses prédites et les masses mesurées des produits récupérés et la puretés prédites et les puretés mesurées confirme l'excellente qualité du modèle mathématique établi par la méthode des plans d'expériences pour le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux disques.

4.5. Conclusion

Pour ce chapitre consacré à la séparation électrostatique, nous pouvons conclure que :

- Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes-disques tournantes a prouvé son efficacité pour le traitement des mélanges des plastiques pulvérulents obtenus de DEEE.

- Les essais réalisés ont confirmé la séparabilité d'un mélange pulvérulent de PP et de PC, qui se chargent différemment par effet tribo-électrique dans un dispositif à lit fluidisé.
- Le système de mesures simultanées et continues de la masse et de la charge électrique des produits collectés facilite l'analyse des effets de la multitude des facteurs qui influent sur l'efficacité de la séparation.
- La vitesse de rotation des électrodes disques tournantes n'affectent pas le résultat de la séparation dans ce type d'installation. Les facteurs qui ont un effet important sur le processus de séparation tribo-aéro électrostatique sont: la haute tension appliquée, le débit d'air du lit fluidisé, la masse initiale du produit à séparer et la durée du processus de charge tribo-électrique.
- Un débit de matière élevée augmente les conditions de charge des particules, ce qui influe positivement sur la vitesse de séparation des particules et favorise le fonctionnement en continu par rapport au fonctionnement discontinu du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes disques. Ceci est très prometteur et encourageant en vue d'un fonctionnement dans un milieu industriel.
- La non-homogénéité du mélange binaire à séparer diminue la pureté du produit minoritaire, tandis que le produit majoritaire est collecté avec de moindres taux de récupération mais avec des puretés très élevées (~ 98%).
- La méthode des plans d'expériences, permet de délimiter les intervalles de variation des facteurs variables et ensuite de modéliser le rendement du séparateur électrostatique en proposant un modèle mathématique qui est validé en vérifiant des critères bien définis.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les applications technologiques de l'électrostatique exploitent les forces pour déplacer des particules chargées par l'effet d'un champ électrique très intense créée par l'application des hautes tensions aux électrodes des systèmes.

Ce travail de thèse est une contribution pour l'amélioration des fonctionnements des filtres et des séparateurs électrostatiques.

Nous nous sommes intéressés dans la première partie de cette thèse, à l'analyse de l'effet des paramètres essentiels de la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique de configuration fil – cylindre par des travaux expérimentaux, théoriques et numériques. Nous avons mesuré les caractéristiques courant – tension dans les conditions d'humidité, de température et de pression de l'air atmosphérique connus. Le champ électrique et la densité de courant à la surface de l'électrode cylindrique mise à la terre lors de la décharge couronne continue sont déterminés à l'aide d'une sonde polarisée circulaire dans l'air ambiant. Les distributions du champ électrique et de la densité de courant sur l'électrode circulaire présentent la même allure et sont largement affectés par la tension appliquée, le rayon de l'électrode active et la distance inter électrode.

Le travail expérimental effectué avec la sonde circulaire polarisée de Tassiker a donné de nouveaux résultats en fonction des paramètres géométriques et physiques. Les valeurs obtenues par la sonde confirment l'importance de cet appareil.

La démarche de simulation permet la réalisation directe de l'équipement sans passer par de nombreux prototypages et essais. Les gains de temps et coût sont importants et directs.

Parallèlement, nous avons utilisé un logiciel spécialisé dans la résolution des équations aux dérivées partielles, basé sur la méthode des éléments finis, Comsol- Multiphysics. Ce logiciel, dispose d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, tel que l'électrostatique.

La deuxième partie de la thèse présente une étude et installation de séparation électrostatique conçue et mise au point à l'institut Pprime, CNRS-Université de Poitiers, à IUT d'Angoulême (), afin de répondre aux besoins de la recherche scientifique sur le tri des mélanges des matériaux pulvérulents et aux exigences des partenaires industriels. Les études expérimentales ont porté sur les différents procédés de séparation électrostatique, pour des mélanges de matières pulvérulentes ayant des conductivités différentes.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique peut également traiter, en régime de fonctionnement continu, des mélanges de matières plastiques caractérisés par une distribution granulométrique peu hétérogène avec des efficacités supérieures à celles obtenues en régime discontinu. Le nombre des collisions élevées assuré dans ce régime de fonctionnement favorise un meilleur chargement des particules de grosse taille.

Les modèles obtenus par le plan d'expérience ont été utilisés pour déterminer les valeurs optimales des différents facteurs et pour prédire le rendement du séparateur qui serait obtenu pour n'importe quelles valeurs de ces facteurs.

Comme perspectives, nous pensons que d'autres travaux expérimentaux et numériques sont nécessaires pour analyser avec précision les parties suivantes :

- ✓ Etude de la séparation tribo-aéro-électrostatique des mélanges de matériaux poudreux isolants sur une nouvelle installation expérimentale ;
- ✓ Confirmation de la faisabilité de la séparation électrostatique des matériaux pulvérulents de taille sous-millimétrique, provenant des industries de recyclage de déchets des équipements électriques et électroniques ;
- ✓ Evaluation des facteurs influents sur un processus tribo-aéro-électrostatique pour le tri d'un mélange pulvérulent de PP et de PC ;
- ✓ Mise au point d'un système d'acquisition et de traitement des données provenant des mesures simultanées et continues de charge électrique et de masse des produits de la séparation ;
- ✓ Analyse de la pureté du produit conducteur obtenu par séparation électrostatique ;
- ✓ Etude préliminaire du séparateur TAE à deux électrodes disques rotatives en régime continu, en tenant compte de plusieurs paramètres, afin de développer ce type de séparateur pour l'industrie de recyclage des plastiques ;
- ✓ Modélisation mathématique du processus de séparation tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques pour un mélange binaire de matériaux poudreux isolants PP / PC.
- ✓ Optimisation du procédé de séparation en utilisant des nouveaux logiciels de simulation en temps réel.

Annexe

Travaux de l'Auteur

PUBLICATIONS DANS LES REVUES:

1. **I.E. Achouri**, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, H. Nouri and L. Dascalescu, "Factors that Influence the Performance of a Two-rotating-disks-type Tribo-aero-electrostatic Separator for Micronized WEEE, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 1, pp. 802-811, Jan.-Feb. 2019.
2. H. Nouri, **I. E. Achouri**, A. Grimes, H. Ait Said, M. Aissou, Y. Zebboudj "Least Squares Method Identification of Corona Current-Voltage Characteristics and Electromagnetic Field in Electrostatic Precipitator" ,International Science Index, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:9 No: 12, 2015.

COMMUNICATION INTERNATIONALE:

1. H. Nouri, **I. E. Achouri**, H. Ait Said, M. Aissou, Y. Zebboudj, Analysis of Temperature Effect in laboratory scale electrostatic precipitator. Second Algerian Large Electrical Network Conference, CAGRE'19, 26-28 February 2019, Algiers, Algeria.
2. **I. E. Achouri**, T. Zeghloul, K. Medles, H. Nouri, L. Dascalescu, Recherche du point de fonctionnement optimal d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes disques. 11ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, 29-31 août 2018, Grenoble, France.
3. H. Nouri, **I. E. Achouri**, H. Ait Said, M. Aissou, Y. Zebboudj, Modeling and Identification of Collection Efficiency Process of the Electrostatic Precipitator. 11ème Conférence de la Société Française d'Electrostatique (SFE2018), 29-31 août 2018, Grenoble, France.
4. H. Nouri, **I. E. Achouri**, H. Ait Said, M. Aissou, Y. Zebboudj, Experimental investigation of positive corona discharge in ESP using a biased probe. 11ème Conférence de la Société Française d'Electrostatique (SFE2018), 29-31 août 2018 Grenoble, France.
5. **I.E. Achouri**, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, H. Nouri and L. Dscalescu, "Premises for industrial application of a two-rotating-disks-type tribo-aero-electrostatic separator for micronized WEEE," 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH, doi: 10.1109/IAS.2017.8101697, pp. 1-4, 2017.
6. **I.E. Achouri**, B. Louzani, H. Nouri, M. Kaci, H. Ait Said, Y. Zebboudj, Modeling a Corona Discharge in Wire-Duct Electrostatic Precipitators. 10ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, Poitiers, France, 29-31 Aout 2016.
7. **I. E. Achouri**, A. Lekdim, H. Nouri, M. Kaci, H. Ait Said, Y. Zebboudj, Modeling a Corona Discharge in Wire- Duct Electrostatic Precipitators, 10ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, Poitiers, France, 2016.
8. **I.E. Achouri**, H. Nouri, M. Kaci, H. Ait Said, Y. Zebboudj, Effect of Electrodes configuration on the corona discharge in a Electrostatic Precipitator. 10^{ème} conférence de la Société Française d'Electrostatique, Poitiers, France, 29-31 Aout 2016.
9. H. Nouri, **I. E. Achouri**, M. Aissou, Y. Zebboudj, N. Zouzou, Investigation of pressure effect of corona proprieties in wire-to-plate electrostatic precipitator. 10^{ème} conférence de la Société Française d'Electrostatique, Poitiers, France, 29-31 Aout 2016.
10. Farid Achouri, **Imed eddine Achouri**, Khamliche Mabrouk " Protection of 25 Kv Electrified railway system", the 4th International Conference on Electrical Engineering ICEE'15, december 13th to 15th, 2016 Boumerdes, Algeria.

COMMUNICATION NATIONALE :

1. H. Nouri, **I. E. Achouri**, M. Kaci, M. Aissou, H. Ait Said, Y. Zebboudj, Modeling and simulation of corona discharge characteristics on the electrostatic precipitators. CNHT10, University of USTHB, Algiers, May 24 – 26, 2016.

Factors that Influence the Performance of a Two-Rotating Disks-Type Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Micronized WEEE

Imed Eddine Achouri, Thami Zeghloul, Gontran Richard , Karim Medles, *Member, IEEE*, Hamou Nouri, and Lucian Dascalescu , *Fellow, IEEE*

Abstract—Electrostatic separation of granular plastics mixtures has become a well-established technology, with industrial applications in the area of waste electric and electronic equipment recycling. The aim of this study was to pave the way to industrial application of a new two-rotating disks-type tribo-aero-electrostatic separator for finely grinded matter (i.e., granule diameter <1 mm), by clarifying three major issues: 1) continuous operation of the equipment; 2) efficient processing of particulate mixtures composed of various proportions of two plastics; and 3) rapid evaluation of the purity of the recovered products. The experiments were carried out on a binary mixture composed of different proportions of polypropylene and polycarbonate, particles of size 250 to 500 μm . A measurement system was set up to enable the continuous and simultaneous recording of the charges and masses of the separated products. The purity of the products was evaluated using a colorimetric system. It was, thus, possible to quantify the performances of the separator under various conditions that simulated industrial operation situations.

Index Terms—Electric charge, electrostatic separation, plastics, triboelectricity, waste electric and electronic equipment (WEEE) recycling.

I. INTRODUCTION

EVERY year larger quantities of plastics wastes are generated [1]–[4]. As of 2015, approximately 6300 Mt of plastic waste had been generated, around 9% of which had been recycled, 12% was incinerated, and 79% was accumulated in landfills or the natural environment [1]. Before recycling,

plastics must be sorted according to their type, and this can be conveniently done by shredding the wastes to obtain a granular mixture and then employing electrostatic techniques to separate the various constituents [5], [6]. As a general rule, the granules are first charged by the triboelectric effect in such devices as a rotating drum, a vibratory feeder, or a fluidized bed [7]–[11]. Then, the differently charged granules are separated in the electric field generated by various electrode configurations, connected to dc high-voltage supplies [12], [13].

During the last two decades, industry demand for the development of new electrostatic separation applications, especially in mineral processing [14, 15], in waste recycling [16]–[18], and in food industry [19]–[22], has grown at a rapid pace, mainly because these technologies have a less negative impact on the environment than the others (less energy consumption and no need of chemical additives, for instance).

Waste electric and electronic equipment (WEEE) recycling technologies often include electrostatic separation as a major operation [13], [18]. Several research groups have developed specific electrostatic separators for processing different granular plastics mixtures [23]–[25]. In many cases, the goal has been to remove PVC from complex mixed plastic wastes [26]–[28]. However, all the above-cited publications deal with the separation of millimeter-size granules.

In spite of noticeable research efforts aimed at the performance optimization of the various types of electrostatic separators [29], [30], the industry application of such technology still faces major difficulties, related to the specific behavior of fine (submillimeter-size) particles. Such particles can agglomerate or adhere to the walls of the tribochargers and of the electrostatic separators, while their trajectories can be hardly controlled as they are strongly affected by the aerodynamic forces [31].

However, in two recently described tribo-aero-electrostatic separators, charging occurs in a fluidized bed, containing the mixture of materials to be separated and in which a pair of electrodes is immersed, to generate an intense electric field. In one solution, the electrodes are two rotating stainless steel disks entrained by a variable-speed motor and connected to high-voltage supplies of opposite polarities [32], [33]. In the other, the electrodes are two vertical metal plates that alternatively move in and out of the fluidized bed [34], [35]. As soon as a granule has enough charge, it adheres to the moving electrode of opposite polarity, which promptly removes it from the fluidized bed zone.

Manuscript received December 12, 2017; revised May 9, 2018 and July 14, 2018; accepted August 14, 2018. Date of publication August 26, 2018; date of current version December 12, 2018. Paper 2017-EPC-1568.R2, presented at the 2017 Industry Applications Society Annual Meeting, Cincinnati, OH, USA, Oct. 1–5, and approved for publication in the IEEE Transactions on Industry Applications by the Electrostatic Processes Committee of the IEEE Industry Applications Society. (*Corresponding author: Lucian Dascalescu.*)

I. E. Achouri is with the PPRIME Institute, CNRS-University of Poitiers-ENSMA 16021, Angoulême, France, and also with the Ferhat Abbas University of Setif-1, Setif 19000, Algeria (e-mail: achou.imed@yahoo.fr).

T. Zeghloul, K. Medles, and L. Dascalescu are with the PPRIME Institute, CNRS-University of Poitiers-ENSMA 16021, Angoulême, France (e-mail: thami.zeghloul@univ-poitiers.fr; kmedles@gmail.com; lucian.dascalescu@univ-poitiers.fr).

G. Richard is with the PPRIME Institute, CNRS-University of Poitiers-ENSMA 16021, Angoulême, France, and also with CITF Company, 16170 St Cybardeaux, France (e-mail: gontran.richard@univ-poitiers.fr).

H. Nouri is with the Ferhat Abbas University of Setif-1, Setif 19000, Algeria (e-mail: hm_nouri@yahoo.fr).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TIA.2018.2866546



Fig. 1. Two-rotating disk-type tribo-aero-electrostatic separator. 1: Control panel. 2: Variable-speed dc motors. 3: Vibratory feeder. 4: Cylindrical feeder. 5: Separation chamber with two rotating disk electrodes. 6: Faraday cages. 7: Scales. 8: Air blower. 9: Electrometers (Keithley 6514). 10: Portable colorimeter NH310. 11: Computer [33].

Previous researches carried out on the two-rotating disks-type tribo-aero-electrostatic separator have demonstrated the efficiency of the device in the selective sorting of various fine granular mixtures. They pointed out that the outcome of the separation process in terms of electric charge and mass of the recovered products depends on a multitude of factors: fluidization air flow rate, high voltage applied to the electrode system, and size of the particles [33], [36]–[38]. However, these studies were done with balanced binary mixtures of plastics, in a “one-shot” regime (i.e., introducing a well-defined mass of materials in the fluidized bed), and without evaluating the purity of the products.

Therefore, in an attempt to assess the perspectives of industry application of this new technology, this paper was aimed at clarifying three main issues: 1) What solution for the rapid evaluation of the recovered products? 2) Is it possible to efficiently process particulate mixtures composed of various proportions of two plastics? 3) At what flow rate the separator could be operated in a continuous regime?

In order to find the answers to these questions, the experiments were carried out on samples of a typical granular waste composed of polypropylene (PP; specific mass $\approx 0.9 \text{ g/cm}^3$)/ polycarbonate (PC; specific mass $\approx 1.2 \text{ g/cm}^3$) and characterized by particle sizes ranging between 250 and 500 μm . By continuous measurement of the masses and charges of the

particles collected at the outlet of the separator and the evaluation of the purity of the separated particles, it was possible to analyze the effects of the following factors: duration of the tribo-charging process; high-voltage applied to the electrode system; and fluidization air flow rate and mass flow rate.

The study was performed on balanced (50% PP/50% PC) and unbalanced (80% PP/20% PC, 60% PP/40% PC, 40% PP/60% PC, 20% PP/80% PC) granular mixtures, to simulate the diversity of situations encountered in the recycling industry.

II. EXPERIMENTAL SETUP

The new two-rotating disks-type tribo-aero-electrostatic separator (see Fig. 1), designed by the authors and built by the CITF Company, Saint Cybardeaux, France, is able to sort granular or micronized materials through the use of triboelectric effect as a physical mechanism of electrical charging [38].

The granular material is introduced in the fluidized bed generated inside the separation chamber of dimensions 160 mm \times 160 mm \times 240 mm, made of transparent PMMA walls, enclosing two-rotating disk-type electrodes (see Fig. 2), entrained at adjustable speed by two dc electric motors. The two disks, which have a diameter of 220 mm and a thickness of 2 mm, are energized from two high-voltage generators of opposing polarities (SPELLMAN, 30 kV/0.5 mA). By rotating, the disk electrodes

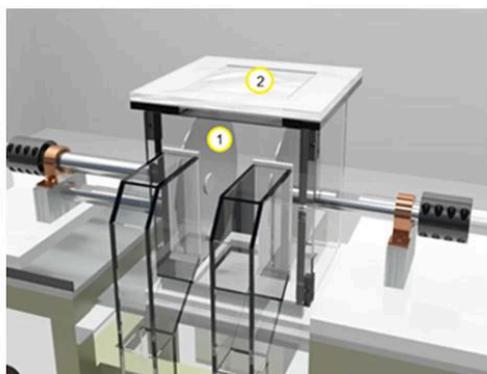


Fig. 2. Schematic representation of the separation chamber with two rotating disk electrodes; 1: Disk electrodes. 2: Separation chamber.

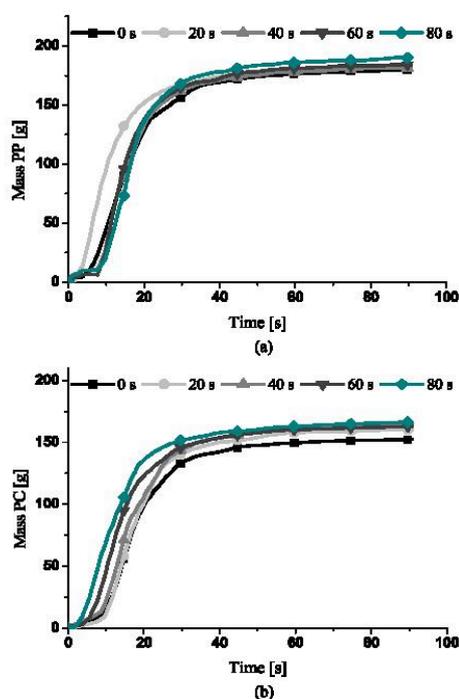


Fig. 3. Variation of the mass of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different durations of the tribocharging process $T = 0$ s; 20 s; 40 s; 60 s; 80 s, at $U = \pm 8$ kV, and $n_b = 750$ r/min.

carry the separated particles to the product collector. Indeed, the front face of the chamber has slots through which the disks come out, so that two brushes may remove the particles which stick to them (see Fig. 1).

Injection of air in the separation chamber is done at adjustable speed by a blower (1.5 kW/ 4000 r/min/ 166 m³·h⁻¹). In this fluidized bed, the particles collide with each other and with

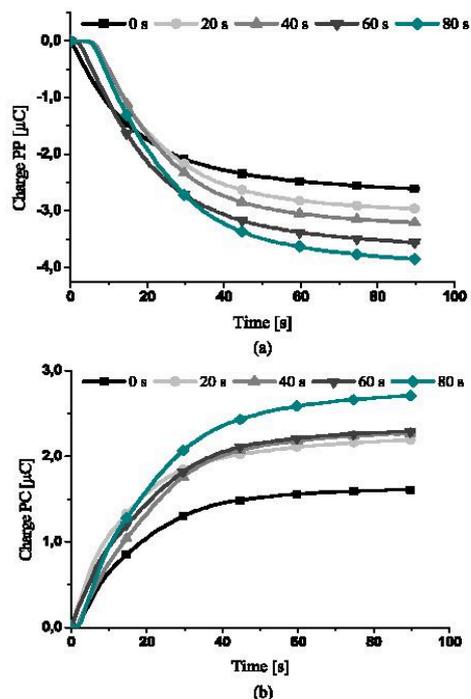


Fig. 4. Variation of the charge of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different durations of the tribocharging process $T = 0$ s; 20 s; 40 s; 60 s; 80 s, at $U = \pm 8$ kV and $n_b = 750$ r/min.

the PMMA walls of the chamber so that they get charged by the triboelectric effect. The charged particles are then attracted to the two disk electrodes and stick to them. At the end, the less-charged particles remain in the fluidized bed.

The separator is equipped with a control panel allowing direct reading or instantaneous acquisition of all the operating data: the high voltages applied to the electrode system; the rotation speeds of the two disks; the speed of the air blower; and the flow rate of the fluidization air [33], [36], [38].

In all the experiments, the distance between the disks was fixed at 120 mm, a value which represents a good compromise between two contradictory objectives: generate an intense electric field at a low voltage applied to the electrodes and provide enough space for processing larger quantities of materials in the fluidized bed where the particles get tribocharged in view of electrostatic separation. For this distance, the applied voltage was varied from 4 to 20 kV.

The separated products were recovered in two Faraday cage collectors connected to two electrometers (KEITHLEY, model 6514) and placed on two electronic scales (KERN, model 440-47N) with a resolution of 0.1 g and an upper limit of 2 kg. The electrometer and the two scales were connected to a PC via GPIB and RS232. The charges and masses measured by the instruments were recorded using a data acquisition program piloted by Lab View.

TABLE I
CALIBRATION TABLE FOR MIXTURES OF PRODUCTS RANGING FROM 0% TO 100%

| PP (%) | | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Parameter | L | 51.1 | 52.9 | 55.0 | 56.4 | 60.0 | 62.7 | 65.6 | 69.6 | 73.9 | 81.3 | 95.3 |
| | a | 29.2 | 27.6 | 25.2 | 24.6 | 19.8 | 19.3 | 17.8 | 14.4 | 12.0 | 8.9 | 0.2 |
| | b | -28.0 | -26.8 | -25.2 | -25.1 | -21.1 | -20.5 | -18.9 | -15.3 | -12.5 | -7.5 | 3.7 |
| | C | 40.4 | 38.5 | 35.6 | 35.1 | 28.9 | 28.2 | 26.0 | 21.0 | 17.4 | 11.7 | 3.7 |
| h | | 316.2 | 315.8 | 314.9 | 314.4 | 313.1 | 313.2 | 313.4 | 313.1 | 313.9 | 320.0 | 87.5 |
| PP (%) from (1) | | 99.85 | 91.8 | 81.4 | 72.2 | 62.6 | 49.7 | 40.7 | 32.2 | 21.1 | 9.3 | 0.8 |

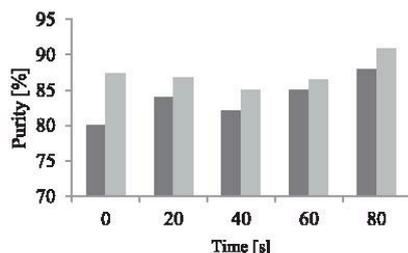


Fig. 5. Purities of the products for different durations of the tribocharging process $T = 0$ s; 20 s; 40 s; 60 s; 80 s, at $U = \pm 8$ kV, and $n_b = 750$ r/min.

III. MATERIALS AND METHOD

The powdery material mixture used in this study was composed of two types of particles, PP (mauve) and PC (white), supplied by APR2, a French company specialized in recycling WEEE. The size of these particles was typically between 250 and 500 μm . They were stored in 5-kg plastic boxes.

The experiments were all duplicated and carried out by the same operators, using similar samples and under quasi-constant climatic conditions: room temperature (23.2 to 25 $^{\circ}\text{C}$) and air relative humidity (58.5% to 65%).

The experimental procedure consisted of the following steps: 1) introduce the PP/PC mixture in the separation chamber; 2) switch on the measuring devices: the electronic scales and the electrometers to which are connected the Faraday cages; 3) switch on the electrical equipment: the air blower, the electric motors, and the high-voltage power supplies; 4) start the data acquisition software Lab VIEW 6; 5) turn OFF the electrical equipment; 6) stop the data acquisition; and 7) clean the electrostatic separator. The purity is measured using a portable NH-310 colorimeter, which was specifically calibrated for evaluating the percentage of PP and PC in a binary mixture [38]. The colorimeter provides measurements in several modes: L , a , b , C , and h .

The results of the calibration procedure of the colorimeter (see Table I) enabled the formulation of mathematical models for the purity of the products, as a function of the five parameters L , a , b , C , and h [38]. For example, the purity of the PP product was expressed as follows:

$$\text{PP (\%)} = 477 - 5.83L + 1.1a + 13.4b + 5.8C + 0.092h. \quad (1)$$

In order to measure the purity of a product, five 2-g samples were examined, and the standard deviation was less than 2%.

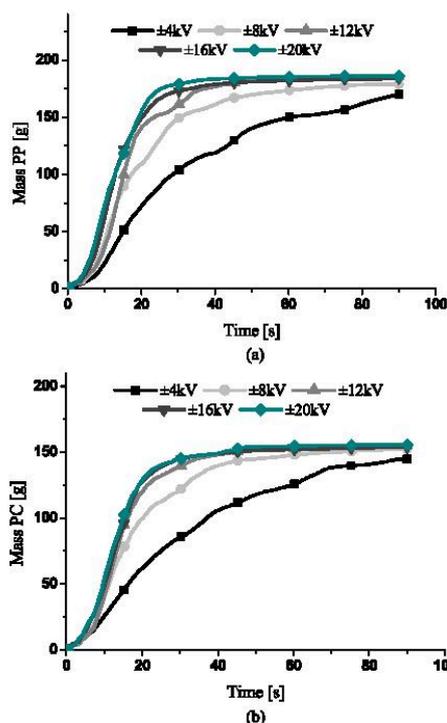


Fig. 6. Variation of the mass of separated. (a) PP, (b) PC granules as function of time, for different voltage values $U = \pm 4$ kV; ± 8 kV; ± 12 kV; ± 16 kV; ± 20 kV, at $T = 20$ s and $n_b = 750$ r/min.

The effects of the various factors that influence the electrostatic separation process were examined in a first series of experiments (A), carried out on a mixture containing 200 g of PP and 200 g of PC, with the disk rotation speed n set at a value $n = 50$ r/min. In the experiments designated further on as (A1), the duration T of the tribocharging process (i.e., the interval between the start of the fluidization process and the moment when the electrodes are simultaneously connected to the high-voltage supplies and put into motion) was successively adjusted at $T = 0$ s, 20 s, 40 s, 60 s, and 80 s, with the two disks energized at $U = \pm 8$ kV, and the blower turning at a speed $n_b = 750$ r/min. The effect of the high voltage was evaluated in the experiments (A2), carried out at constant $T = 20$ s, and $n_b = 750$ r/min, for $U = \pm 4$ kV, ± 8 kV, ± 12 kV, and ± 16 kV. Finally, in the experiments (A3), the fluidization air flow rate was varied by

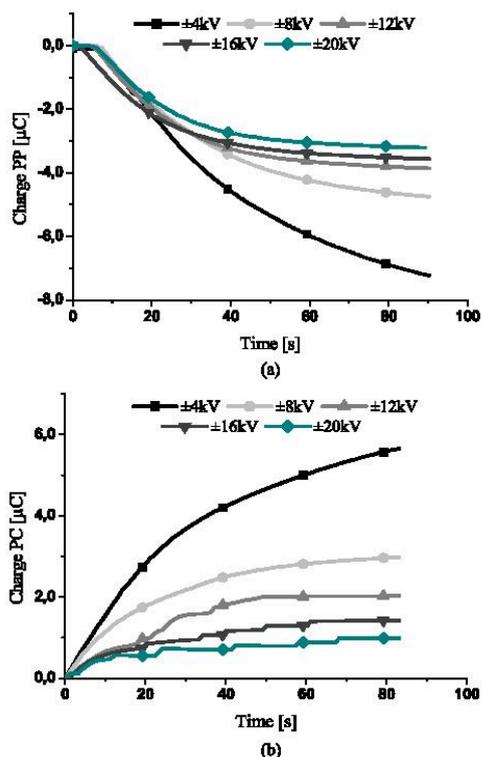


Fig. 7. Variation of the charge of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different voltage values $U = \pm 4$ kV; ± 8 kV; ± 12 kV; ± 16 kV; ± 20 kV, at $T = 20$ s and $n_b = 750$ r/min.

adjusting the speed of the blower $n_b = 500$ r/min, 750 r/min, 1000 r/min, 1250 r/min, 1500 r/min to vary the fluidization air feedrate from roughly $3 \text{ m}^3/\text{h}$ to about $9 \text{ m}^3/\text{h}$, at constant $T = 20$ s and $U = \pm 4$ kV.

Each experiment in this and following series was duplicated and the average of the values was represented on the graphs. The range of the values measured in each point of the graphs was 6% or less. The plots in graphs were used just to identify the various curves that were experimentally obtained by continuous recording of the charge and the mass of the two collected products.

A second series of experiments were performed with nonbalanced mixtures: 80% PP + 20% PC, 20% PP + 80% PC, 60% PP + 40% PC, 40% PP + 60% PC, and 50% PP + 50% PC, for $m = 1300$ g, $n = 50$ r/min.

The third series of experiments simulated the continuous separation regime and was carried out with a mixture containing 650 g of PP and 650 g of PC, which was processed as follows: 1000 g were initially stored in the hopper of the vibratory feeder and 300 g in the fluidized bed. The "standard" operating conditions were the optimal values obtained by a series of preliminary experiments carried out on the same machine, with the same class of materials. The disk rotation speed was set at $n =$

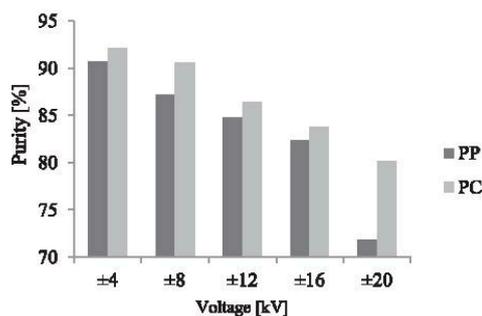


Fig. 8. Purities of the products obtained at different voltage values $U = \pm 4$ kV; ± 8 kV; ± 12 kV; ± 16 kV; ± 20 kV, at $T = 20$ s and $n_b = 750$ r/min.

50 r/min, the mass flow rate Q was successively adjusted at the constant values $Q = 2.5$ g/s, 6 g/s, and 10 g/s.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

A. Effect of Separation Parameters

1) *Effect of the Duration of the Tribocharging Process:* The effect of the duration T of the tribocharging process on the electrostatic separation of the collected granules is illustrated by the results represented on Figs. 3 and 4, which show the evolution in time of the mass and charge of the products collected at the electrodes. The nonsmooth aspect these curves is due to the fact that a tiny proportion of charged particles that detach from the electrodes adhere to some parts of the ducts that transfer them to the Faraday cages; from time to time, certain amounts of these particles slide all at one into the Faraday cage and produce an abrupt change in both charge and mass graphs.

These curves point out that roughly 75% of the particles are collected in less than 20 s, no matter how long is the tribocharging process. Indeed, the duration of the tribocharging process has a little effect, if any, on the mass of the particles collected at the two electrodes (see Fig. 3). The output mass flow is limited by the quantity of material that can adhere to the surface of the disk electrodes at any instant of time. The increase of the charge acquired by the granular materials when subjected to a longer tribocharging process (see Fig. 4) has not significantly increased the probability of a particle to be collected at the electrode, as only a limited number of them can adhere to them, at a given disk speed.

From these results, the optimum value of the tribocharging-induration was obtained. It was found that at $T = 80$ s, the purity of PP was 87.5% and that of PC: 90.1% (see Fig. 5). The mass and the electric charges of the products were $m_{PP} = 180.2$ g, $q_{PP} = -3.82 \times 10^{-6}$ C, and $m_{PC} = 163.3$ g, $q_{PC} = +2.72 \times 10^{-6}$ C. The dissymmetry in the behavior of PP and PC particles is due to their position in the triboelectric series: (-) PP - PC - PMMA (+). Thus, the PP particles get negatively charged in contact with both the PC particles and the PMMA wall. At their turn, the PC particles charge positively when colliding with PP particles, and negatively after each impact with the PMMA wall of the fluidized bed. This is one explanation of

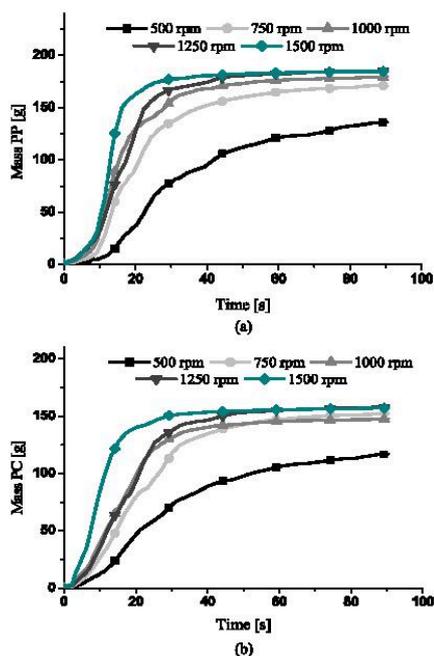


Fig. 9. Variation of the masse of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different air blower speeds $n_b = 500$ r/min, 750 r/min, 1000 r/min, 1250 r/min, and 1500 r/min, for $T = 20$ s and $U = \pm 4$ kV.

the fact that in this and all the other experiments described hereafter: 1) the PP particles attained higher levels of charge than the PC particles; and 2) the mass of the PP product was higher and its purity was lower than those of the PC product, as it contained a number of PC particles that had been negatively charged in contact with the PMMA wall. The mass of collected PC particles is smaller also because their specific weight is higher than that of PP and they need more elevated levels of charge to be attracted to the electrodes by the electric forces, which are in competition with the centrifugal and gravitational forces that tend to detach them from the rotating disks.

The rest of the experiments were conducted using a tribocharging duration of 20 s, which was considered more appropriate for an industry application of the technology.

2) *Effect of the High Voltage:* The increase of the high-voltage U intensifies the electric field and facilitates the separation (see Figs. 6 and 7).

Higher values of U favor the rapid separation of the two products but with poor purity as shown in Fig. 8. The best results in terms of purity (i.e., 90.7% for the PP and 92.1% for the PC products) were obtained for the voltage applied to the electrodes $U = \pm 4$ kV. The mass and electric charges values of the collected products were $m_{PP} = 161.7$ g, $q_{PP} = -7.32 \times 10^{-6}$ C, and $m_{PC} = 139.6$ g, $q_{PC} = 5.73 \times 10^{-6}$ C.

This rather unexpected result can be explained by the fact that at an applied voltage $U = \pm 4$ kV, the electric field was weak and only the well-charged particles were attracted to the

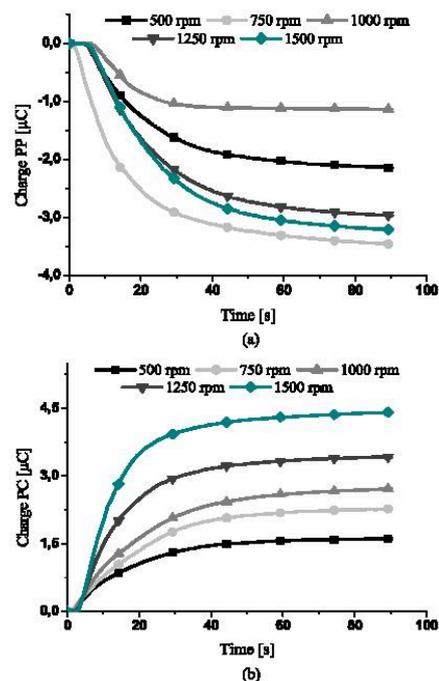


Fig. 10. Variation of the charge of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different air blower speeds $n_b = 500$ r/min, 750 r/min, 1000 r/min, 1250 r/min, 1500 r/min, for $T = 20$ s and $U = \pm 4$ kV.

electrodes. At higher voltages, aggregates formed of particles of different polarities (and different natures) and presenting a small global charge are attracted to the electrode having an opposite polarity. However, at voltages lower than 4 kV, the electric field intensity is not enough to ensure the effective separation, even for particles charged to saturation.

3) *Effect of the fluidization Air Flow Rate:* The air flow has a great influence on the separation rate of the products (percentage of mass separated after a definite time since startup) as shown in Figs. 9 and 10, because it modifies the dynamics of the particles the fluidized bed. The higher flow rates are accompanied by more numerous and more intense particle–particle collisions. When the blower turned at less than 1000 r/min, a large amount of product remained in the separation chamber.

The best separation was obtained for $n_b = 1000$ r/min, with the purity of the PP and PC products being, respectively, 81.7% and 87.5%, as shown in Fig. 11. The mass and electric charges values of the two products were $m_{PP} = 171.8$ g, $q_{PP} = -1.14 \times 10^{-6}$ C and $m_{PC} = 152.9$ g, $q_{PC} = 2.71 \times 10^{-6}$ C.

B. “One-Shot” Separation of Nonbalanced Mixtures

The results of the third series of experiments, performed with nonbalanced mixtures composed of: 80% PP + 20% PC, 20% PP + 80% PC, 60% PP + 40% PC, 40% PP + 60% PC, and 50% PP + 50% PC, are represented in Figs. 12 to 14.

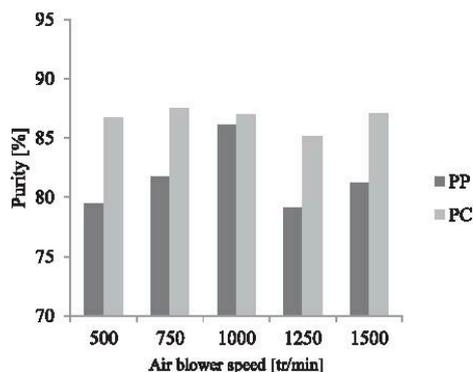


Fig. 11. Purities of the two products obtained for different rotation speeds of the blower $n_b = 500$ r/min, 750 r/min, 1000 r/min, 1250 r/min, 1500 r/min, for $T = 20$ s and $U = \pm 4$ kV.

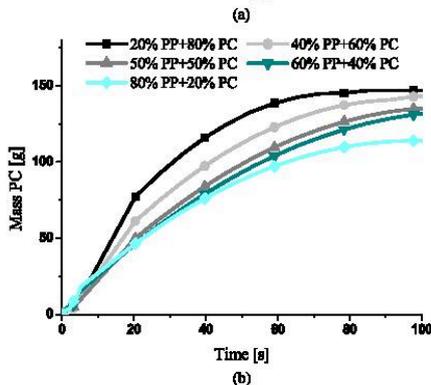
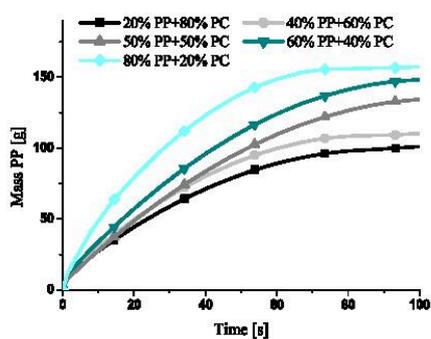


Fig. 12. Variation of the mass of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different mixture compositions ($T = 20$ s; $n_b = 1000$ r/min and $U = \pm 4$ kV).

When the mixture was balanced (50% PP + 50% PC), the purities of the two products were 89.9% for PP and 80.3% for PC. However, when the mixture was nonbalanced, more than 90% purity can be obtained for the majority polymer. For instance, in case of 20% PP + 80% PC mixture, the purity of the PC product was more than 97%. This could also

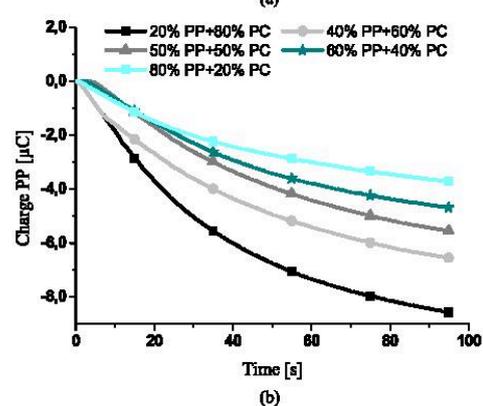
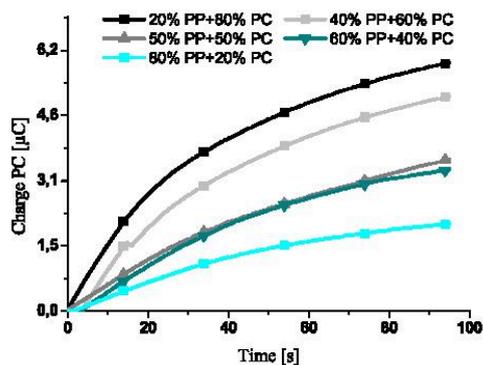


Fig. 13. Variation of the charge of separated. (a) PC. (b) PP granules as function of time, for different mixture compositions ($T = 20$ s; $n_b = 1000$ r/min and $U = \pm 4$ kV).

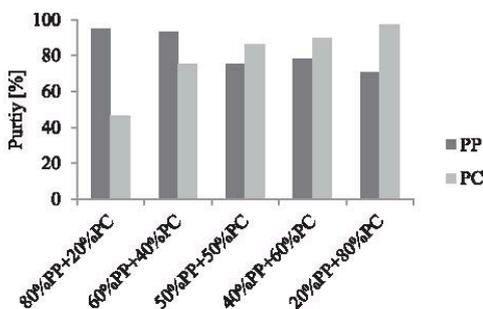


Fig. 14. Purities of separated products, for different mixture compositions ($T = 20$ s; $n_b = 1000$ r/min and $U = \pm 4$ kV).

been seen in 80% PP + 20% PC and 60% PP + 40% PC mixtures.

This can be explained by the fact that the minority polymer has much better charging conditions than the majority one. Therefore, very few particles of the minority polymer fail to be attracted to the appropriate electrode and impurity the majority

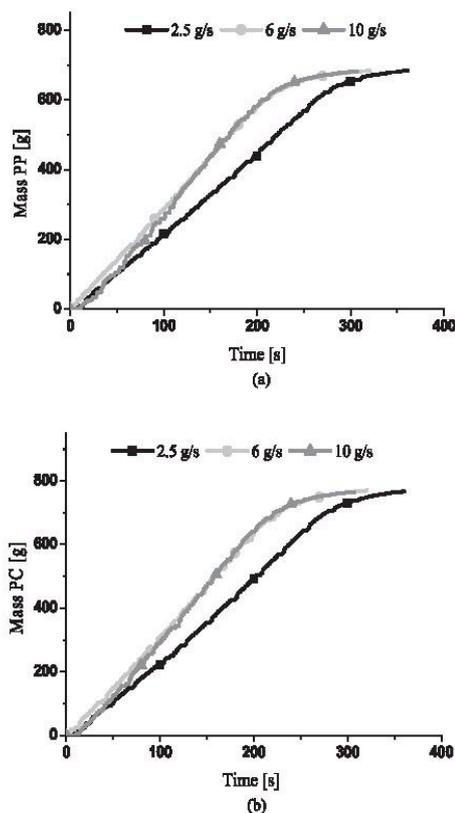


Fig. 15. Variation of the mass of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different mass flow rate $Q = 2.5$ g/s, 6 g/s, 10 g/s ($T = 20$ s; $n_b = 1000$ r/min and $U = \pm 4$ kV).

polymer. Having fewer chances to meet a particle of different nature, some of the majority particles get charged of the same polarity as the minority particles and are collected with them. As a consequence, the minority product of an electrostatic separation process involving an unbalanced raw material is characterized by relative low purities.

C. Effect of Mass Flow Rate in Continuous Separation Regime

The effect of the mass flow rate Q on the electrostatic separation of the collected granules is illustrated by the results represented on Figs. 15 and 16. The operating conditions were the optimal values obtained by a series of preliminary experiments: $T = 20$ s, $U = \pm 4$ kV, and $n_b = 1000$ r/min.

For each experiment, the purities of the materials in the two collecting boxes were calculated as the average value of five measurements (see Fig. 17). The standard deviation of purity measurements was less than 2%.

The mass flow rate has a great influence on the separation rate of the products. For $Q = 6$ g/s, the input mass flow rate was well correlated with the output flow rate, which means that the

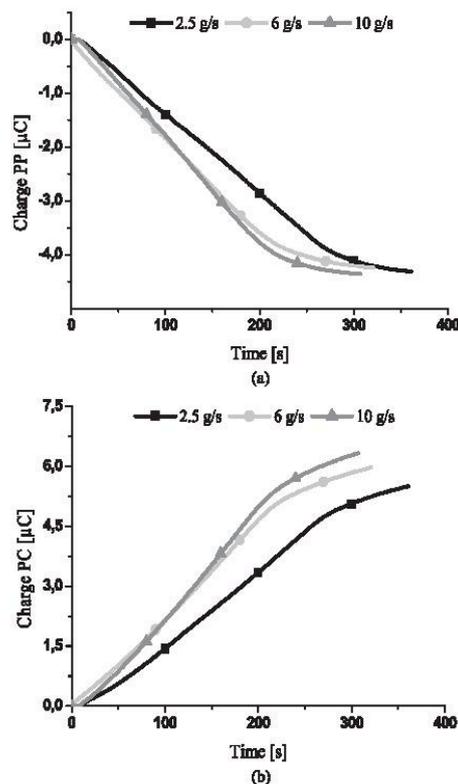


Fig. 16. Variation of the charge of separated. (a) PP. (b) PC granules as function of time, for different mass flow rate $Q = 2.5$ g/s, 6 g/s, 10 g/s ($T = 20$ s; $n_b = 1000$ r/min and $U = \pm 4$ kV).

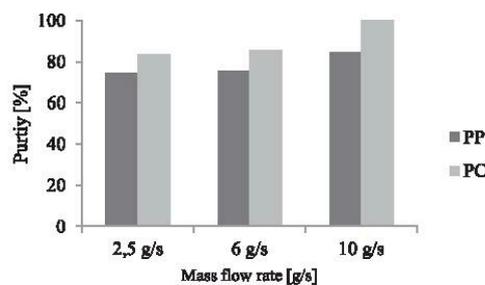


Fig. 17. Purities of the two products at different mass flow rate values: $Q = 2.5$ g/s, 6 g/s, 10 g/s ($T = 20$ s; $n_b = 1000$ r/min and $U = \pm 4$ kV).

mass of material in the fluidized bed remains constant. This is the ideal situation for the continuous operation of the separator. The best purities of the two products (85.5% for the PC and 95% for the PP) were obtained for $Q = 10$ g/s, as shown in Fig. 17. This can be explained by the fact that the mass of material in the fluidized bed tends to increase in time; as a consequence, the number of particle-to-particle collisions increases, the particles get better charged (as shown by the results in Fig. 16) and the

purities of the products improve. However, this regime cannot be recommended in continuous operation, as it would imply an unacceptable continuous increase of the mass of the particles in the fluidized bed.

V. CONCLUSION

The two-rotating disk-type tribo-aero-electrostatic separator developed on the site of Angoulême of the PPRIME Institute of Poitiers is a multifunctional installation. It enabled the study of the feasibility of electrostatic separation on a PP/PC powdery mixture (less than 500 μ). The main conclusion of this study can be formulated as follows.

- 1) The efficiency of the separation depends on several factors including the type of mixture (balanced or nonbalanced).
- 2) The higher voltages applied to the electrodes does not necessarily lead to better separation.
- 3) The purity of the separated products can be conveniently evaluated using a colorimetric method.
- 4) Purities higher than 90% can be obtained for both collected products.

Further research work will focus on other particulate mixture and other size classes.

REFERENCES

- [1] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use and fate of all plastics ever made," *Sci. Adv.*, vol. 3, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [2] N. Menad, S. Guignot, and J. A. van Houwelingen, "New characterization of electrical and electronic equipment wastes (WEEE)," *Waste Manage.*, vol. 33, pp. 706–713, 2013.
- [3] S. P. Gundupalli, S. Hait, and A. Thakur, "A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling," *Waste Manage.*, vol. 60, pp. 56–74, 2017.
- [4] F. Pita and A. Castilho, "Separation of plastics by froth flotation. The role of size, shape, and density of the particles," *Waste Manage.*, vol. 60, pp. 91–99, 2017.
- [5] M. J. Pearce and T. J. Hickey, "The separation of mixed plastics using a dry triboelectric technique," *Resour. Conservation Recycling*, vol. 3, pp. 179–190, 1978.
- [6] N.-E. Menad, "Physical separation processes in waste electrical and electronic equipment recycling," in *WEEE Recycling, Research, Development, and Policies*, A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, and T. Retegan, Eds. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2016, pp. 53–74.
- [7] K. Haga, "Applications of the electrostatic separation technique," in *Handbook of Electrostatic Processes*, J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, Eds. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 1995, pp. 365–386.
- [8] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology," *Particulate Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 77–90, 1998.
- [9] I. I. Inculet and G. S. P. Castle, "Electrostatic separation of plastics for recycling," *Particulate Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 91–100, 1998.
- [10] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 5, pp. 1476–1483, Oct. 2011.
- [11] A. Iuga, A. Samuila, R. Morar, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment," *Particulate Sci. Technol.*, vol. 34, pp. 45–54, 2016.
- [12] A. Tilmatine, S. Bendimerad, F. Boukhoulda, K. Medles, and L. Dascalescu, "Electrostatic separation of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste Manage.*, vol. 29, pp. 228–232, 2009.
- [13] L. Dascalescu, T. Zeghloul, and A. Iuga, "Electrostatic separation of metals and plastics from waste electrical and electronic equipment," in *WEEE Recycling, Research, Development, and Policies*, A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, and T. Retegan, Eds. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2016, pp. 75–106.
- [14] T. X. Li, H. Ban, J. C. Hower, J. M. Stencil, and K. Saito, "Dry triboelectrostatic separation of mineral particles: A potential application in space exploration," *J. Electrostat.*, vol. 47, pp. 133–142, 1999.
- [15] J. D. Bittner, K. P. Flynn, and F. J. Hrach, "Expanding applications in dry triboelectric separation of minerals," in *Proc. Int. Min. Process. Congr.*, 2014.
- [16] G. Dodbiba, A. Shibayama, T. Mizazaki, and T. Fujita, "Triboelectrostatic separation of ABS, PS and PP plastic mixture," *Mater. Trans.*, vol. 44, no. 1, pp. 161–166, 2003.
- [17] C. H. Park, H. S. Jeon, H. S. Yu, O. H. Han, and J. K. Park, "Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: separation of PVC, PET, and ABS," *Environm. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 249–255, 2008.
- [18] G. Wu, J. Li, and Z. Xu, "Tribo-electrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review," *Waste Manage.*, vol. 33, pp. 585–597, 2013.
- [19] Y. Hemery, X. Rouau, V. Lullien-Pellerin, C. Barron, and J. Abecassis, "Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality," *J. Cereal Sci.*, vol. 46, pp. 327–347, 2007.
- [20] L. Dascalescu, C. Dragan, M. Bilici, R. Belega, Y. Hemery, and X. Rouau, "Electrostatic basis for separation of wheat bran tissues," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 2, pp. 659–665, Mar./Apr. 2010.
- [21] J. Wang, M. de Wit, R. M. Boom, and M. A. I. Schutyser, "Charging and separation behavior of gluten-starch mixtures assessed with a custom-built electrostatic separator," *Separation Purification Technol.*, vol. 152, pp. 164–171, 2015.
- [22] M. Remadnia, M. Kachi, S. Messal, A. Oprean, X. Rouau, and L. Dascalescu, "Electrostatic separation of peeling and gluten from finely grounded wheat grains," *Particulate Sci. Technol.*, vol. 32, pp. 608–615, 2014.
- [23] H. Daiku, T. Inoue, M. Tsukahara, H. Maehata, and K. Kakeda, "Electrostatic separation technology for waste plastics-development of a high-purity type separator for plastics," in *Proc. Eco-Dex. Conf.*, Tokyo, Japan, Dec. 11–15, 2001, doi: 10.1109/ECODIM.2001.992424.
- [24] M. Zenkiewicz and T. Zuk, "Physical basis of tribocharging and electrostatic separation of plastics," *Polimery*, vol. 59, no. 4, pp. 314–323, 2014, doi: dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.314.
- [25] J. Kacerovsky, J. Brabec, F. Mach, P. Karban, and I. Dolezel, "Experimental electrostatic separator for plastic mixture," in *Proc. Conf. Rec. Adv. Meth. Theory Electr. Eng.*, Trebic, Czech Republic, Sep. 6–8, 2015.
- [26] J. K. Lee and J. H. Shin, "Triboelectrostatic separation of pvc materials from mixed plastics for waste plastic recycling," *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 19, pp. 267–272, 2002.
- [27] C. Park, H. Jeon, and J. Park, "PVC removal from mixed plastics by triboelectrostatic separation," *J. Hazardous Mater.*, vol. 144, pp. 470–476, 2007.
- [28] G. Bedeković, B. Salopek, and I. Sobota, "Electrostatic separation of PET/PVC mixture," *Tech. Gazette*, vol. 18, pp. 261–266, 2011.
- [29] L. Dascalescu, A. Tilmatine, F. Aman, and M. Mihailescu, "Optimisation of electrostatic separation processes using response surface modeling," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 1, pp. 53–59, Jan./Feb. 2004.
- [30] K. Medles *et al.*, "Set point identification and robustness testing of electrostatic separation processes," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 3, pp. 618–626, May/June 2007.
- [31] A. Mekhalef *et al.*, "Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 4166–4172, Sep.–Oct. 2015.
- [32] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahami, A. Bendaoud, M. Miloudi, and L. Dascalescu, "Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 4245–4250, Nov./Dec. 2014.
- [33] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef-Benhafssa, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental study of a tribo-aero-electrostatic separator for finely-grinded matter," *J. Electrostat.*, vol. 89, pp. 59–68, 2017.
- [34] Y. Brahami, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Bendaoud, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for micronized plastics," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 4145–4150, Sep./Oct. 2015.
- [35] Y. Brahami, A. Tilmatine, S. E. Bendimerad, M. Miloudi, M. Zelmat, and L. Dascalescu, "Tribo-aero-electrostatic separation of micronized mixtures of insulating materials using 'back-and-forth' moving vertical electrodes," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 699–704, Apr. 2016.
- [36] T. Zeghloul, A. Mekhalef, G. Richard, K. Medles, and L. Dascalescu, "Effect of particle size on the tribo-aero-electrostatic separation of plastics," *J. Electrostat.*, vol. 88, pp. 24–28, 2017.

- [37] I. E. Achouri, T. Zeghloul, K. Medles, G. Richard, H. Nouri, and L. Dascalescu, "Tribo-aero-electrostatic separation of micronized waste plastics," in *Proc. Annu. Meet. Electrostat. Soc. Amer.*, Ottawa, Canada., Jun. 13–15, 2017.
- [38] I. E. Achouri, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, H. Nouri, and L. Dascalescu, "Premises for industrial application of a two-rotating-disks-type tribo-aero-electrostatic separator for micronized WEEE," in *Proc. Conf. Rec. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet.*, Cincinnati, OH, USA, Oct. 1–5, 2017, doi: [10.1109/IAS.2017.8101697](https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101697).



Imed Eddine Achouri was born in Setif, Algeria. He received the B.Eng. and M.S. degrees in electrical engineering (with first-class Hons.) from the University Ferhat Abbas of Setif, Setif, in 2011 and 2013, respectively, where he is currently working toward the Ph.D. degree in electrical engineering.

His current research interests include power systems, high-voltage engineering, application of corona discharge, and electrostatics.



Thami Zeghloul was born in Casablanca, Morocco, on December 25, 1962. He received the M.S. degree in mechanical engineering from the Fundamental and Applied Sciences Faculty and the Ph.D. degree with a thesis on the stick-slip phenomena between solids from the University of Poitiers, Angoulême, France, in 1987 and 1991, respectively.

During his doctoral studies, he started teaching mathematics and physics, at first to high school pupils, and then to university students, as a Teaching Assistant. From 1991 to 1995, he was an Associate

Researcher with the University Institute of Technology, Angoulême, University of Poitiers, where since 1995, he has been an Assistant Professor, and then, an Associate Professor. From 2001 to 2007, he was the Head of the Quality, Industrial Logistics, and Organization Department. An elected Director of the University Institute of Technology, in 2007, he stood for the creation of an expertise center dedicated to ecodesign, to train students, and to favor the transfer of sustainable technologies to small- and medium-sized businesses. Since September 2010, he has also been the Manager of a technological platform dedicated to image and sound industry, sponsored by the University Institute of Technology, and the local authorities. He is a Researcher with the PPRIME Institute, CNRS–University of Poitiers–ENSMA. He is the author of more than 40 papers on dry contacts and lubrication problems. He currently supervises several Ph.D. theses in the field of triboelectrostatics.



Gontran Richard was born in Chartres, France, in 1991. He received the Technical University Diploma in thermal and energy engineering, the B.Sc. degree in mechanics, and the M.Sc. degree in energy management from the University of Poitiers, Angoulême, France, in 2011, 2012, and 2014, respectively, where he defended the Ph.D. degree in electrical engineering cosponsored by CITF Company, St Cybardeaux, Charentes, in April 2018.

His current research interests include the electrostatic separation of granular materials, with applications in the recycling industry.



Karim Medles (M'11) was born in Tipaza, Algeria, in 1972. He received the M.S. degree and the Magister (Dr. Eng.) degree in electrical engineering from the University of Sidi Bel Abbes, Sidi Bel Abbes, Algeria, in 1994 and 1999, respectively, and the Ph.D. degree from the Electrical Engineering Department, University Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, in 2006, with a thesis he partly prepared at the University Institute of Technology, Angoulême, France, with a 18-month research scholarship awarded by the French Government.

In 1999, he joined the Institute of Electrical Engineering, University of Sidi Bel Abbes, as a Senior Lecturer, where he is currently a Full Professor. He is a member of the Electrostatics and High-Voltage Engineering research Unit of IRECOM Laboratory, University of Sidi-Bel-Abbes. He was invited several times as a Visiting Scientist in France. He has published more than 60 scientific papers in international and national journals, as well as in conference proceedings. His current research interests include power systems, high-voltage engineering, and electrostatics.



Hamou Nouri received the Ph.D. degree in electrical engineering from Bejaia University, Béjaïa, Algeria, in 2010, and then, the "Habilitation à Diriger de Recherches" Diploma degree in electrical engineering in 2012.

He is currently a Professor with the Department of Electrical Engineering, Setif University, Setif, Algeria. His research interests include the application of corona discharge, nonthermal plasma technology, and air pollution control, as well as the mathematical modeling of electrostatics systems.

Dr. Nouri is a member of the Laboratoire de Génie Electrique of the University A. Mira of Bejaia and the French Society of Electrostatics.



Lucian Dascalescu (M'93–SM'95–F'09) received the graduate degree (with first class Hons.) from the Faculty of Electrical Engineering, Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, Romania, in 1978, the Dr. Eng. degree from the Polytechnic Institute of Bucharest, Bucharest, Romania, in 1991, and the Dr. Sci. degree in 1994, and then, the "Habilitation à Diriger de Recherches" Diploma in physics both from the University "Joseph Fourier," Grenoble, France.

His professional career began with CUG (Heavy Equipment Works), Cluj-Napoca. In 1983, he moved to the Technical University of Cluj-Napoca, as an Assistant Professor, later becoming an Associate Professor of electrical engineering. From 1991 to 1992, he received a Research Fellowship at the Laboratory of Electrostatics and Dielectric Materials, Grenoble, where he returned in 1994, after one year as an Invited Research Associate and Lecturer with Toyohashi University of Technology, Japan, and three months as a Visiting Scientist with the University of Poitiers, France. For four years, he taught a course in electromechanical conversion of energy with the University Institute of Technology, Grenoble. In 1997, he was appointed as a Professor of electrical engineering with the University Institute of Technology, Angoulême, France. He is the author of several textbooks in the field of electrical engineering and ionized gases. He holds 16 patents, has written more than 240 papers, supervised more than 40 Ph.D. theses, is a member of the editorial board of several scientific journals and international conferences, and was invited to lecture on the electrostatics of granular materials at various universities and international conferences all over the world.

Prof. Dascalescu was the Chair of the Electrostatics Processes Committee, and the Vice-Chair of the IEEE France Section. He is a member of the French Society of Electrostatics and Club Electrotechnique, Electronique, Automatique, France.

Références Bibliographiques

- [1] J-S. Chang, A. J. Kelly, J. M. Crowley, *Handbook of electrostatic processs*, Mercel Dekker Inc, New York, USA, pp. 1 - 49, 1995.
- [2] N. Bouguila, R. Coelho, and D. Navarre, "Electrostatic Painting of Insulating Surfaces," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 4, pp. 798–801, 1993.
- [3] F. Henrotte and K. Hameyer, "Finite Element Modeling of an Electrostatic Painting Device," vol. 39, no. 3, pp. 1432–1435, 2003.
- [4] S. Singh, "Charging Characteristics of Some Powders Used in Electrostatic Coating," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-17, no. 1, pp. 121–124, 1981.
- [5] J. F. Hughes, "Electrostatic Powder Coating", *Electrostatics and Electrostatic Applications*. Wiley, Vol. 9, 1984.
- [6] S. Oglesby and G. B. Nichols, "Electrostatic precipitation," vol. 7, no. 5, 1978.
- [7] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, V. Neamtu, and I. Suarasan, "Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 27, no. 6, pp. 1242–1251, 1994.
- [8] L. Dascalescu, A. Mihalcioiu, A. Tilmatine, M. Mihailescu, A. Iuga, and A. Samuila, "A linear-interaction optimization model using Taguchi's experimental design technique," pp. 19–25, 2004.
- [9] H. Nouri, H. A. Said, Y. Zebboudj, N. Zouzou, and L. Dascalescu, "Analysis of electric field and current density in an electrostatic precipitator", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 665–670, 2016.
- [10] H. Nouri , N. Zouzou, E. Moreau, L. Dascalescu, Y. Zebboudj, "Effect of relative humidity on the collection efficiency of a wire-to-plane electrostatic precipitator", The IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, Tx, ISSN: 0197-2618, Print ISBN: 978-1-4244-6393-0 3-7 October, 2010.
- [11] H. Pang, "Dépoussiérage Electrostatique pour Les Particules Submicroniques en Atmosphère Usuelle (Terre) et Raréfiée (Planète Mars) "Thèse de doctorat, Universite Joseph Fourier - Grenoble 1, 2006.
- [12] J. M. Crowley, G. S. Wright, J. C. Chatto, "Selecting a Working Fluid to Increase the Efficiency and Flow Rate of an EHD Pump," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 26, pp. 42–49, 1990.
- [13] P. Walzel, "Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry," *Ullmann's Encycl. Ind. Chem.*, p. 25.1-25.40, 2012.
- [14] A. Chagnes, G. Cote, C. Ekberg, M. Nilsson, and T. Retegan, *WEEE recycling: Research, development, and policies*. 2016.
- [15] A. D. Moore, "Electrostatics and its Applications", Wiley, New York, 1973.
- [16] Y. Hemery, U. Holopainen, A.-M. Lampi , P. Lehtinen, T. Nurmi, V. Piironen, M. Edelmann, X. Rouau, "Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: Electrostatic separation of particles", *J. Cereal Sci.*, vol. 53, no. 1, pp. 9–18, 2011.
- [17] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progress in electrostatic separation technology," *Part. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 77–90, 1998.
- [18] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 4, pp. 1564–1569, 2010.

-
- [19] L. Calin and L. Dascalescu, "Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en oeuvre," *French Pat. FR2943561*, 2010.
- [20] A. S. and L. D. A.luga, R.Morar, "Electrostatic separation of metals and plastics from gran", *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, vol. 148, 2001.
- [21] I. I. Inculet, F. T. Tanasescu, and R. Cramariuc, "*The modern problems of electrostatics with applications in environment protection*". Springer Science + Business Media Dordrecht, 1999.
- [22] H. Ait Said, "Influence de l' humidité sur la décharge couronne dans un précipitateur électrostatique d' aérosols", Thèse de doctorat, Université de Béjaia, Algérie, 2016.
- [23] C. Gary, *Effet couronne sur les réseaux électriques aériens*. Techniques de l'Ingénieur, D4440, 1998.
- [24] Z. Anane, "Modèle dynamique de l'effet couronne pour l'étude de la propagation de la surtension le long des lignes de transmission HT en utilisant l'EMTP," Thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018.
- [25] F. W. Peek, "Dielectric phenomena in high voltage engineering," 1920.
- [26] L. B. Loeb, *Electrical coronas, their basic physical mechanisms*. Univ of California Press, 1965.
- [27] H. Ait Said, H. Nouri, and Y. Zebboudj, "Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator," *J. Electrostat.*, vol. 73, pp. 19–25, 2015.
- [28] L. Parissi, "Etude d'un procede de traitement d'air charge en composés organiques volatils par decharge moyenne frequence avec barriere dielectrique: mecanismes mis en oeuvre et recherche d'optimisation." Thèse de doctorat, université Paris 6, France, 1999.
- [29] G. Hartmann, "Spectrographie de la décharge couronne: étude des mécanismes de collisions dans le dard," Thèse de doctorat, Université Paris XI, France, 1977.
- [30] D. Lacoste, D. Pai, and C. Laux, "Ion Wind Effects in A Positive DC Corona Discharge in Atmospheric Pressure Air," *42nd AIAA Aerosp. Sci. Meet. Exhib.*, January, 2004.
- [31] J. F. Loiseau, J. Batina, F. Noël, and R. Peyrous, "Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 10, pp. 1020–1031, 2002.
- [32] M. Goldman, A. Goldman, and R. S. Sigmond, "The corona discharge, its properties and specific uses," *Pure Appl. Chem.*, vol. 57, no. 9, pp. 1353–1362, 1985.
- [33] M. Goldman, R.S.Sigmond, Corona insulation. *IEEE Trans. Elec. Ins.*, EI. 12/2, pp.90-105, 1982.
- [34] L. Dăscălescu, *An Introduction to Ionized Gases: Theory and Applications*. Toyohashi University of Technology, 1993.
- [35] A. Labergue, " Etude de décharges électriques dans l' air pour le développement d' actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, France, 2005.
- [36] K. C. Kao, *Dielectric phenomena in solids with emphasis on physical concepts of electronic processes*. ScienceDirect , Academic Press, 2004.
- [37] K. L. Kaiser, *Electrostatic discharge*. CRC Press, 2005
- [38] D. M. Taylor, "Measuring techniques for electrostatics," *J. Electrostat.*, vol. 51–52, no. 1–4, pp. 502–508, 2001.
- [39] R. Kacprzyk and C. Stec, "Measurements of the surface charge density on moving webs", *Journal of Electrostatics*, vol. 41, pp. 455–461, 1997.
- [40] T. HAMMI, "Etude de methodes de mesures et realisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés electrostatiques des textiles" , Thèse de doctorat, université S. T. de Lille, 2005.
-

-
- [41] R. Bansal, *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, vol. 2, no. 1. Taylor & Francis Group, 2006.
- [42] W. E. Vosteen, "A Review of Current Electrostatic Measurement Techniques and Their Limitations", *Electrical overstress exposition*, San Jose, California, April 24-26, 1984.
- [43] M. A. Noras, "Trek electrostatic voltmeters Setup, environment, working conditions," *Trek Appl. Note*, no. 3003, pp. 1–5, 2002.
- [44] D. C. Faircloth and N. L. Allen, "High resolution measurements of surface charge densities on insulator surfaces," *IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulation*, vol. 10, no. 2, pp. 285–290, 2003.
- [45] R. S. Blacker and A. W. Birley, "Electrostatic charge occurrence, significance and measurement," *Polym. Test.*, vol. 10, no. 4, pp. 241–262, 1991.
- [46] J. Chubb, "Measurement of tribo and corona charging features of materials for assessment of risks from static electricity", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, issue 6, 2000.
- [47] M. Brière and J. Weill, "L'électromètre à condensateur vibrant", *le journal de physique et le radium*, Tome 16, pp. 695–703, 1955.
- [48] A. Fritsch, "Potentiomètre à lame vibrante pour la mesure et l'enregistrement des potentiels de surface de couches monomoléculaires", *le journal de physique et le radium physique appliquée*, supplément au n° 11, Tome 22, p. 183 A, 1961.
- [49] L. M. Dumitran, "Collection des fines particules dans un dépoussiéreur électrostatique". Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2001.
- [50] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials," *J. Electrostat.*, vol. 69, no. 6, pp. 631–637, 2011.
- [51] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahami, A. Bendaoud, M. Miloudi, and L. Dascalescu, "Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 4245–4250, 2014.
- [52] L. Hakima, "Simulation des trajectoires des particules isolantes dans les séparateurs triboélectriques à chute libre et à cylindre tournant", Thèse de doctorat, Université Djilali Liabès Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [53] S. Das, A. Samuila, C. Dragan, and L. Dascalescu, "Behaviour of charged insulating particles in contact with a rotating roll electrode," *J. Electrostat.*, vol. 67, no. 2–3, pp. 189–192, 2009.
- [54] M. Rezoug, R. Ouiddir, W. Aksa, K. Medles, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol 51 no. 2, pp. 1161-1167, March-April 2015.
- [55] S. Touhami, "Etude et mise au point des stratégies et des systèmes de contrôle destinés au pilotage des processus de séparation électrostatique", Thèse de doctorat, Université Djilali Liabès Sidi-Bel-Abbès, 2016.
- [56] Sara MESSAL, "Procédés de séparation électrostatique des matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2016.
- [57] Y. Matsushita, N. Mori, and T. Sometani, "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades," *Electr. Eng. Japan (English Transl. Denki Gakkai Ronbunshi)*, vol. 127, no. 3, pp. 33–40, 1999.
- [58] S. Bendimerad, A. Tilmatine, M. Ziane, and L. Dascalescu, "Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator," *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 66, no. 5, pp. 529–538, 2009.
- [59] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Optimization of belt-type electrostatic separation of triboaerodynamically charged granular plastic mixtures," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 4, pp. 1781–1786, 2013.
-

-
- [60] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Improvement of the Industrial Pilot of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Binary Mixtures of Granular Insulating Materials," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 4, pp. 3479–3484, 2015.
- [61] Y. Brahami, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Bendaoud, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Micronized Plastics," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 4145–4150, 2015.
- [62] M. F. Boukhoulda, K. Medles, M. Miloudi, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, "Effect of Ambient Humidity on the Outcome of electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers" , *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 6, pp. 2375–2381, 2013.
- [63] A. Mekhalef Benhafssa, "Etude d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux," Université Djilali Liabès Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [64] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, and A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 5, pp. 1476–1483, 2011.
- [65] G. Le_Roy and C. Gary, *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*. Eyrolles, 1984.
- [66] J. A. B. Faria, Electromagnetic foundations of electrical engineering, *A John Wiley and Sons, Ltd, Publication.* , pp. 95 - 129, 2008.
- [67] R. T. Waters, T. E. S. Rickard, and W. B. Stark, "Electric field and current density in the impulse corona discharge in a rod/plane gap," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 304, no. 1477, pp. 187–210, 1968.
- [68] J. M. Meek and M. M. C. Collins, "Measurement of electric fields at electrode surfaces," *Electron. Lett.*, vol. 1, no. 4, p. 110, 1965.
- [69] J. M. Meek and J. D. Craggs, "Electrical Breakdown of Gases", *Wiley-Interscience Publ. New York*, vol. 129, p. 140, 1978.
- [70] O. J. Tassicker, "Boundary probe for measurement of current density and electric-field strength—with special reference to ionised gases," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 121, no. 3, p. 213, 1974.
- [71] I. E. Achouri, N. Hamou, and F. Achouri, "Numerical analysis of the different parameter corona discharge in an electrostatic precipitators," *Proc. 2016 8th Int. Conf. Model. Identif. Control. ICMIC 2016*, pp. 133–137, 2017.
- [72] E. O. Selim and R. T. Waters, "Static Probe for Electrostatic Field Measurement in the Presence of Space Charge," vol. I, no. 3, pp. 458–463, 1980.
- [73] D. A. Spence, "A Wiener-Hopf Solution to the Triple Integral Equations For the Electrified Disc in a Coplanar Gap," *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 68, no. 2, pp. 529–545, 1970.
- [74] M. AISSOU, "Influence des paramètres physiques de l'air sur la décharge couronne bipolaire," Thèse de doctorat, Université Abderahmane Mira, Bejaia, 2013.
- [75] M. Abdel-Salam, "Influence of humidity on charge density and electric field in electrostatic precipitators," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 9, pp. 1318–1322, 1992.
- [76] Y. Zebboudj and G. Hartmann, "Current and electric field measurements in coaxial system during the positive DC corona in humid air," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 7, no. 2, pp. 167–176, 1999.
- [77] N. Zouzou, E. Moreau, and G. Touchard, "Précipitation électrostatique dans une configuration pointe-plan," *J. Electrostat.*, vol. 64, no. 7–9, pp. 537–542, 2006.
- [78] L. Goldstein, "Electrical Discharge in Gases and Modern Electronics," *Adv. Electron. Electron Phys.*, vol. 7, no. C, pp. 399–503, 1955.
- [79] J. S. Townsend, *Electricity in Gases*, Oxford university press, 1915.
-

-
- [80] B. L. Henson, "A space-charge region model for microscopic steady coronas from points," *J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 2, pp. 709–715, 1981.
- [81] P. Krempf, *Électromagnétisme PCSI*. Editions Bréal, 2003.
- [82] F. Gardiol, *Electromagnétisme*, vol. 3. PPUR presses polytechniques, 2002.
- [83] J. B. et J. M. Michel Saint-Jean, *Électrostatique Et Magnétostatique*, 2011.
- [84] D. C. Giancoli, *Physique générale: Electricité et magnétisme*, Collection bleue: Traités, De Boeck Supérieur, vol. 2., 1993.
- [85] K. Adamiak, "Adaptive approach to finite element modelling of corona fields," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 2, pp. 387–393, 1994.
- [86] B. Khaddour, "Modélisation du champ électrique modifié par la charged'espace injectée", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [87] K. R. Spangenberg, "Vacuum tubes", McGraw-Hillelectrical and electronicengineering series, 1948.
- [88] M. A. Salam, H. Anis, A. El Morshedy, and R. Radwan, "High-Voltage Engineering, Theory and Practice." Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [89] M. Abdel-Salam and Z. Al-Hamouz, "Finite-element analysis of monopolar ionized fields including ion diffusion," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 26, no. 12, pp. 2202–2211, 1993.
- [90] A. Bouziane, K. Hidaka, J. E. Jones, A. R. Rowlands, M. C. Taplamacioglu, and R. T. Waters, "Paraxial corona discharge", *IEE Proc - Sci. Meas technol.*, vol. 141, no. 3, 1994.
- [91] J. R. McDonald, W. B. Smith, H. W. Spencer III, and L. E. Sparks, "A mathematical model for calculating electrical conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices," *J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 6, pp. 2231–2243, 1977.
- [92] Z. M. Al-Hamouz, "Corona power loss, electric field, and current density profiles in bundled horizontal and vertical bipolar conductors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 5, pp. 1182–1189, 2002.
- [93] X. Deng and K. Adamiak, "The electric corona discharge in the triode system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 767–773, 1999.
- [94] A. J. Medlin, C. A. J. Fletcher, and R. Morrow, "A pseudotransient approach to steady state solution of electric field-space charge coupled problems," *J. Electrostat.*, vol. 43, no. 1, pp. 39–60, 1998.
- [95] A. J. Medlin, R. Morrow, and C. A. J. Fletcher, "Calculation of monopolar corona at a high voltage DC transmission line with crosswinds," *J. Electrostat.*, vol. 43, no. 1, pp. 61–77, 1998.
- [96] M. P. Sarma and W. Janischewskyj, "D.C. corona on smooth conductors in air. Steady-state analysis of the ionisation layer," *Electr. Eng. Proc. Inst.*, vol. 116, no. 1, pp. 161–166, 1969.
- [97] M. P. SARMA and W. JANISCHEWSKYJ, "Analysis of Corona Losses on DC Transmission Lines: 1-Unipolar Lines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88 , Issue: 5, pp. 718–731, 1969.
- [98] M. P. SARMA and W. Janischewskyj, "Analysis of Corona Losses on DC Transmission Lines Part II Bipolar Lines," *IEEE TRANSMISSIONS POWER Appar. SYSTMS*, no. 10, pp. 1476–1491, 1969.
- [99] A. A. Elmoursi and G. S. Peter Castle, "The Analysis of Corona Quenching in Cylindrical Precipitators Using Charge Simulation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-22, no. 1, pp. 80–85, 1986.
- [100] N.A. Kapzow, *Elektrische Vorgänge in Gasen und im Vakuum. Gebundenes Buch* ", VEB Deutscher Verlag für Wissenschaften, Berlin , 1955.
- [101] E. Ferret and C. Iaconelli, "Utilisation de Comsol Multiphysics dans la réalisation de modèles numériques : une aide au calcul et à l'interprétation de phénomènes physiques complexes," 2011.
-

-
- [102] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Experimental Study of the Optimum Operating Conditions of a Pilot-Scale Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Mixed Granular Solids," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 2, pp. 699–706, 2013.
- [103] Service Public de Wallonie (SPW), "Fiche technique n°1.09: Le Polypropylène (PP)," pp. 1–2, 2010.
- [104] . Buitrago, "Polycarbonate PC CE45 " *Introd. to Polym.*, pp. 81–109, 2005.
- [105] G. E. Klinzing, R. D. Marcus, and F. Rizk, *Pneumatic Conveying of Solids. Springer, Series: Particle Technology Series, Vol. 8, 3rd ed.*, 2010.
- [106] G. Artana, G. Touchard, and M. F. Morin, "Contribution to the analysis of the flow electrification process of powders in pneumatic conveyers," *J. Electrostat.*, vol. 40–41, pp. 277–282, 1997.
- [107] K. Saleh and P. Guigon, "Caractérisation et analyse des poudres: Propriétés physiques des solides divisés," *Tech. l'ingénieur. Génie des procédés*, no. J2251, 2009.
- [108] *Model 6514 System Electrometer Instruction Manual*, U.S.A. 2003.
- [109] A. Mihalciou, L. Dascalescu, S. Das, K. Medles, and R. Munteanu, "Virtual instrument for statistic control of powder tribo-charging processes," *J. Electrostat.*, vol. 63, no. 6–10, pp. 565–570, 2005.
- [110] M. A. Bilici, "Séparation électrostatique des mélanges de matériaux isolants granulaires dans des dispositifs à lit fluidisés", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2013.
- [111] N. Instruments, "Measurements Manual - Labview," no. 322661, 2003.
- [112] "NH300 portable colorimeter," *Int. Comm. Illum.*, pp. 0–38.
- [113] L. Calin *et al.*, "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 4, pp. 1045–1051, 2008.
- [114] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikstrom, and S. Wold, "Design of Experiments, Principles and Applications," *J. Chemom.*, vol. 15, no. 5, pp. 495–496, 2001.
- [115] A. B. Umetrics, "Modde 5.0. user guide and tutorial," *Umetrics, Umea, Sweden*, 1999.
- [116] M. F. Boukhoulida, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, "Experimental Modelling of a New Tribo-electrostatic Separation Process for Mixed Granular Polymers," *Electrost. Soc. Am.*, pp. 1–6, 2012.
- [117] I.E. Achouri, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, H. Nouri and L. Dascalescu, "Factors that Influence the Performance of a Two-rotating-disks-type Tribo-aero-electrostatic Separator for Micronized WEEE," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 55, No. 1, pp. 802-811, Jan.-Feb. 2019.
- [118] I. E. Achouri, T. Zeghloul, K. Medles, H. Nouri, L. Dascalescu, "Recherche du point de fonctionnement optimal d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes disques," *11ème conférence de la Société Française d'Electrostatique*, 29-31 août 2018, Grenoble, France. .
- [119] I.E. Achouri, T. Zeghloul, G. Richard, K. Medles, H. Nouri and L. Dscalescu, "Premises for industrial application of a two-rotating-disks-type tribo-aero-electrostatic separator for micronized WEEE," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Cincinnati, OH, doi: 10.1109/IAS.2017.8101697, pp. 1-4, 2017
-

ملخص:

تساهم هذه الدراسة في تعميق المعرفة حول تفريغ الإكليل من أجل تكوين اسطوانة اسطوانية ذات أهمية عملية كبيرة ، من خلال تطبيقاتها (ترسبات الغبار ، الطلاء الكهروستاتيكي ، الفاصل الكهروستاتيكي ، الخ ...). من أجل دراسة فعالية الطريقة المقترحة ، تم بناء نموذج مختبر. تم تكييف المسبار المستقطب الخطي مع هندسة خطية ليتم استخدامها ، لأول مرة. تكون قيم المجال الكهربائي وكثافة التيار القصوى تحت الأقطاب الكهربائية النشطة وتتنوع خصائص الجهد الحالي قانون طاوزن التربيعي ، وأخيرا ، مقارنة هذه النتائج مع تلك التي تم الحصول عليها بواسطة تظهر المحاكاة موافقة جيدة.

يمثل فصل المواد الحبيبية مجالاً مهماً للتطبيقات الصناعية للكهرباء الساكنة ، من أجل تطوير هذه التقنيات التي تهدف إلى فهم أفضل لآليات الشحن والتفريغ الهضمي أو التأثير القلبي الكهربائي ، بالإضافة إلى تصميم عمليات الفصل يركز هذا العمل على فئة من المزيج المسحوق مع تطبيقات إعادة تدوير مخلفات المعدات الكهربائية والإلكترونية. إن نظام القياسات المتزامنة والمستمرة للكتلة والشحنة الكهربائية للمنتجات المجمعة يسهل تحليل الظواهر. إن استخدام منهجية خطط التجارب يجعل من الممكن تحديد تأثير كل عامل وإيجاد نظام التشغيل الأمثل..

كلمات مفتاحية: التفريغ كورونا ، فصل الكهرباء الساكنة ، المرسب الكهروستاتيكي ، التريبوستاتيكي.

Résumé :

Cette étude contribue à l'approfondissement des connaissances sur la décharge couronne pour une configuration fil-cylindre qui est d'une grande importance pratique, par ses applications (précipitation de poussière, peinture électrostatique, séparateur électrostatique, etc. ...). Afin d'étudier l'efficacité de la méthode proposée, un modèle de laboratoire a été construit. La sonde polarisée circulaire a été adaptée à une géométrie cylindrique pour être employée. Les valeurs du champ électrique et de la densité de courant sont maximum sous les électrodes actives et diminuent en s'éloignant d'elles et les caractéristiques courant-tension suivent la loi quadratique de Townsend. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus par la simulation montre une bonne concordance.

La séparation des matériaux granulaires représente un domaine important d'applications industrielles de l'électrostatique, pour faire progresser ces technologies ont visé la meilleure compréhension des mécanismes de charge par décharge couronne ou par effet tribo-électrique, ainsi que la conception de procédés de séparation électrostatique innovants, Ce travail est focalisé sur une catégorie de mélanges de matériaux poudreux avec applications au recyclage des DEEE. Le système de mesures simultanées et continues de la masse et de la charge électrique des produits collectés facilite l'analyse des phénomènes. L'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences permet d'identifier l'influence de chaque facteur et de trouver le régime de fonctionnement optimal.

Mots Clés : Décharge Corona, Séparation Electrostatique, Electrofiltre, Triboélectricité.

Abstract:

This study contributes to the deepening of knowledge about the corona discharge for a wire-cylinder configuration which is of great practical importance, by its applications (dust precipitation, electrostatic painting, electrostatic separator, etc. ...). In order to study the effectiveness of the proposed method, a laboratory model was constructed. The circular polarized probe was adapted to a cylindrical geometry to be used. The values of the electric field and the current density are maximum under the active electrodes and decrease away from them and the current-voltage characteristics follow the Townsend quadratic law. The comparison of these results with those obtained by the simulation shows good agreement.

The separation of granular materials represents an important area of industrial applications of electrostatics, to advance these technologies aimed at the better understanding of charging mechanisms corona discharge or tribo-electric effect, as well as the design of separation processes This work focuses on a category of powder mixes with applications to WEEE recycling. The system of simultaneous and continuous measurements of the mass and the electric charge of the collected products facilitates the analysis of the phenomena. The use of the methodology of the plans of experiments makes it possible to identify the influence of each factor and to find the optimal operating regime.

Key Words : Corona Discharge, Electrostatic Separation, Electrostatic Precipitator, Triboelectricity.