

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Électrique

Département d'Électrotechnique



Thèse présentée par :

Kimi Imad Eddine

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3ème Cycle en Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Intitulé de la thèse :

Conception et réalisation d'un nouveau séparateur à électrodes rotatives pour la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants.

Présentée devant le jury composé de :

Miloua Farid	Pr	Président	UDL sidi bel abbés
Miloudi Mohamed	Pr	Directeur de thèse	UDL sidi bel abbés
Bendaoud Abdelber	Pr	Examineur	UDL sidi bel abbés
Daho Omar	MCA	Examineur	Université de Mascara
Rezoug Mohammed	MCA	Examineur	UDL sidi bel abbés
Tilmatine Amar	Pr	Membre invité	UDL sidi bel abbés

Remerciements

La thèse est une période pleine d'enseignements, de découvertes, de remises en question, d'espoirs, de difficultés et de rencontres. Ces toutes ces choses qui font la richesse d'une thèse...

Avant tout je tiens à rendre grâce à DIEU qui nous a octroyé la raison qui place l'être humain au sommet du piédestal et qui le prédispose à domestiquer la nature à travers la science. «Louanges à DIEU, notre Créateur, notre Guide, notre Protecteur et notre Bienfaiteur».

*Un grand merci à mon directeur de thèse Professeur **Miloudi Mohamed**, qui m'a mis sur la voie du présent travail, m'a fait l'honneur de diriger mes travaux, et pour son soutien, sa confiance et de m'avoir toujours poussé pour aller plus loin et pour votre expertise précieuse dans vos domaines respectifs qui ont donné à ces travaux une vraie dimension pluridisciplinaire.*

*En outre, j'adresse mes remerciements à monsieur **Miloua Farid** pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance à messieurs **Bendaoud Abdelber, Daho Omar** et **Rezzoug Mohamed** pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail et je remercie infiniment Professeur **Amar Tilmatine** et **Mr Touhami** pour leurs soutien durant la réalisation et la publication de ce travail.*

*Par ailleurs j'aimerais tout particulièrement remercier ma mère, la femme la plus forte que je connaisse, qui a été toujours présente pour moi tout au long de mon parcours, qui a toujours fait de son mieux pour que je puisse mener à bien mes études. Je la remercie pour son soutien sans faille et pour la confiance qu'elle m'a toujours accordé. A mon frère Amine, mes soeurs : **Houda, Majda et Douaa**, à Mebarka qui m'a toujours soutenu. Votre présence et la confiance que vous m'avez donné étaient une des raisons qui m'ont poussé à continuer jusqu'au bout malgré tous les moments durs.*

Tout au long de ces 5 ans, j'ai eu conscience de la chance que j'aie eu de réaliser mon doctorat dans une si bonne ambiance et c'est pour cela que je remercie tous les membres du laboratoire APELEC et IRECOM.

Imad Eddine

Table des Matières

Table des Matières

Chapitre I: ETAT DE L'ART

INTRODUCTION GENERALE	1
I.1 Classification des déchets d'équipement électrique et électronique DEEE.....	5
I.2 Les métaux	5
I.3 Les matières plastiques	6
I.3.1 Les branches des matières plastiques	7
I.3.1.1 Thermoplastiques à grande diffusion :	7
I.3.1.2 Les thermodurcissables :	7
I.3.1.3 Les élastomères ou caoutchoucs.....	8
I.4 Techniques de Chargement électrostatique et triboélectrique des matériaux isolants.....	8
I.4.1 Chargement par effet couronne.....	9
I.4.2 Chargement par effet tribo-électrique	10
I.4.2.1 Série tribo-électrique	11
A. Forces exercés sur les matériaux granulaires.....	12
A.1 Forces électrostatiques	14
A.2 Forces aérodynamiques.....	15
A.3 Force de la pesanteur.....	16
A.4 Forces de London-Van der Waals.....	16
B. Cohésion due aux forces électrostatiques	17
C. Adhésion due aux forces électrostatiques	18
I.4.2.2 Dispositifs de chargement tribo-électriques	18
I.4.2.2.1 Dispositif de chargement statique.....	19
I.4.2.2.2 Chargement par vibreur	19

I.4.2.2.3	Chargement par cyclone	20
I.4.2.2.4	Dispositif à cylindre rotatif	21
I.4.2.2.5	Dispositif à ventilateur.....	21
I.5	Techniques de séparation électrostatique des matériaux granulaires	22
I.5.1	Séparation électrostatique des matériaux granulaires isolant-isolant	23
I.5.1.1	Séparateur à chute libre.....	23
I.5.1.2	Séparateur à électrodes concentriques	23
I.5.1.3	Séparateur tribo-aéro électrostatique à deux bandes transporteuses	24
I.5.2	Séparation des matériaux granulaires isolant-conducteur.....	25
I.5.2.1	Séparateur électrostatique à électrode plaque	25
I.5.2.2	Séparateur électrostatique à tambour	26
I.6	Conclusion.....	28

Chapitre II: Etude numérique et simulation de L'installation à Electrodes Cylindriques Rotatives

II.1	Programmes informatiques de modélisation et de simulation	31
II.1.1	Introduction au Logiciel Matlab	31
II.1.2	Introduction au logiciel SolidWorks	32
II.2	Modélisation géométrique de l'installation chargement et séparation par SolidWorks	34
II.2.1	Le dispositif de chargement tribo-électrique [60]	34
II.2.2	Le moteur à courant continu entrainant les cylindres.....	35
II.2.3	Les cylindres (électrodes).....	36
II.2.4	Les collecteurs des produits séparés.....	36
II.3	Modèle physique utilisé dans l'étude	37

II.3.1	Présentation du ToolBox PDE.....	37
II.3.2	Modèle du champ électrostatique	38
II.3.3	Discretisation de l'équation de Laplace	39
II.3.4	Méthode des éléments finis	39
II.3.4.1	Démarche de la méthode des éléments finis	39
II.3.5	Equation de mouvement	42
II.3.5.1	La force de gravitation	42
II.3.5.2	La force Electrostatique	43
II.3.5.3	La force de résistance de l'air	44
II.3.6	Modèle mécanique de collision particule-électrode	44
II.4	Programme de simulation de la trajectoire.....	46
II.4.1	Description de la géométrie.....	46
II.4.2	Maillage de la géométrie	47
II.4.3	Déroulement de la méthode FEM dans un problème électrostatique.....	48
II.4.3.1	L'analyse du problème.....	48
II.4.3.2	Choix du modèle.....	48
II.4.3.3	Choix du type d'élément.....	48
II.4.3.4	Choix du maillage	49
II.4.3.5	Exécution du calcul.....	49
II.4.4	Processus de simulation de la trajectoire	49
II.4.4.1	Initialisation des paramètres contrôlables	51
II.4.4.2	Résolution de l'équation de mouvement	51
II.4.4.3	Prédiction du point d'impact.....	53
II.4.4.4	Choix des paramètres de la particule	54
II.4.4.5	Intégration de l'équation de mouvement	56

II.5 Résultats de simulation	57
II.5.1 Influence du rapport Charge/Masse.....	58
II.5.2 Influence du potentiel	59
II.5.3 Influence de la vitesse de rotation	60
II.6 Conclusion.....	62

Chapitre III: Réalisation de la nouvelle installation de séparation à électrodes rotatives et essais préliminaires

III.1 Principes et originalité de la nouvelle installation expérimentale	63
III.2 Etapes de réalisation de l'installation géométrique	65
III.2.1 Réalisation de l'installation.....	65
III.2.2 Partie électrostatique	67
III.2.3 Partie mécanique	67
III.3 Contraintes de réalisation et solutions choisies	68
III.4 Protocole de mise au point de la mise en marche de l'installation réalisée.....	70
III.5 Procédure expérimentale.....	70
III.5.1 Introduction à la conception des expériences et la validation expérimentale	71
III.5.2 Présentation des matériaux granulaires isolants.....	71
III.5.3 Contexte des matériaux plastiques	71
III.5.4 Structure et propriétés des plastiques	73
III.5.4.1 Propriétés mécaniques	74
III.5.4.2 Propriétés thermiques	74
III.5.4.3 Propriétés électriques.....	75
III.6 Présentation des matériaux utilisés	76

III.6.1 Polyamide – PA.....	77
III.6.2 Polycarbonate – PC	78
III.6.3 Polychlorure de vinyle – PVC.....	78
III.7.4 Polypropylène – PP	79
III.7 Techniques de mesure des paramètres.....	80
III.7.1 Mesure de la charge	80
III.7.2 Mesure de la masse du mélange	81
III.7.3 Mesure de la température et l’humidité relative	82
III.7.4 Mesure de vitesse de rotation.....	83
III.8 Essais préliminaires pour l’étude de l’influence des variables de contrôle	84
III.8.1 Influence de la vitesse de rotation des électrodes	84
III.8.2 Influence de la haute tension appliquée	85
III.9 Conclusion	86

Chapitre IV: Etude expérimentale paramétrique et optimisation de l'installation à électrodes rotatives

IV.1 Procédure expérimentale.....	87
IV.1.1 Effet Des électrodes en rotation sur la séparation électrostatique d’un mélange binaire	88
IV.2 Simulation numérique et Validation expérimentale	96
IV.2.1 Résultats du mélange PA-PP	97
IV.2.2 Modélisation expérimentale du séparateur électrostatique.....	102
IV.2.2.1 Modélisation du système et domaine d’étude des variables influents.....	103
IV.2.2.2 Plan d’expériences et Effets des facteurs sur les réponses : Pureté et récupération	104
IV.3 Conclusion	109

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	110
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	112

Table des Figures

Table des Figures

Chapitre I

Figure I.1 Déchets électriques et électroniques de type métallique.....	6
Figure I.2 Formes de marchandise des matières plastiques premières	7
Figure I.3 Aperçu des matières en élastomères	8
Figure I.4 Photographie d'un phénomène corona à plusieurs électrodes aiguilles	9
Figure I.5 les deux mécanismes de transfert de charge: (a) Transfert électronique; (b) transfert ionique.....	11
Figure I.6 Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs: a [34] , d [35], c [36], d [37]].....	12
Figure I.7 Représentation schématique des forces appliqués à une particule sphérique	14
Figure I.8 forces de coulomb exercés par deux charges q_1 et q_2 de signe opposé (attraction) constante k dépend du milieu. Dans le vide elle vaut :	15
Figure I.9 Force attractive de London-Van der waals entre deux atomes distantes de r	17
Figure I.10 Force de London-Van der Waals entre deux sphères matérielles	17
Figure I.11 représentation des forces intervenant dans l'interaction particule électrode	18
Figure I.12 Représentation schématique d'un chargeur tribo-statique.....	19
Figure I.13 Représentation schématique d'un chargeur tribo-électrique à vibrations.....	20
Figure I.14 Représentation schématique d'un chargeur tribo-cyclone.....	20
Figure I.15 Représentation schématique du chargement triboélectrique par cylindre tournant. .	21
Figure I.16 Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur: (1) à flux ascendant, (2) à flux descendant	22
Figure I.17 Représentation schématique d'un séparateur à chute libre (électrodes inclinés)	23
Figure I.18 Vue de coupe du séparateur à électrodes concentriques.	24
Figure I.19 Représentation schématique du séparateur tribo-aero-électrostatique à bandes	25
Figure I.20 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque [68].....	26
Figure I.21 Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour	27
Figure I.22 Photographie de l'électro-séparateur réalisé au laboratoire IRECOM [59].....	28

Chapitre II

Figure II.1. Construction de base et principe de fonctionnement du nouveau séparateur à électrodes rotatifs	31
Figure II.2. Interface de Base du Logiciel Matlab.....	32
Figure II.3. Interface du logiciel SolidWorks.....	33
Figure II.4. Géométrie du dispositif de chargement triboélectrique conçu dans SolidWorks.....	35
Figure II.5. Géométrie du moteur à courant continu réalisé dans SolidWorks	35
Figure II.6. Géométrie des deux cylindres réalisés dans SolidWorks	36
Figure II.7. Géométrie des collecteurs réalisés dans SolidWorks	37
Figure II.8. Grille de Discrétisation 2D.....	39
Figure II.9. Organigramme d'un logiciel éléments finis.....	41
Figure II.10. Représentation d'une particule en chute libre	43
Figure II.11. Schéma descriptif de la collision particule-électrode statique et rotative	45
Figure II.12. Géométrie des deux électrodes cylindriques réalisées dans le modelleur géométrique.....	46
Figure II.13. Conditions aux limites appliqués et maillage de la géométrie	47
Figure II.14. Les erreurs de discrétisation géométrique	47
Figure II.15. Organigramme du programme de simulation.....	50
Figure II.16. Intersection de la trajectoire de la particule avec les limites de l'électrode.....	53
Figure II.17. Tailles des particules adaptées pour la simulation	54
Figure II.18 organigramme du programme de simulation.....	57
Figure II.19 Calcul des trajectoires de la particule en fonction de différents rapports Charge/Masse.....	59
Figure II.20 Calcul des trajectoires des particules en fonction de différentes valeurs du potentiel.	60
Figure II.21 calcul des trajectoires des particules en fonction de différentes vitesses de rotation.	61

Chapitre III

Figure III.1 Schéma descriptif (vue de face) du séparateur électrostatique (B) associé à un chargeur triboélectrique (A).....	64
Figure III.2 Installation de séparation électrostatique en phase de réalisation.....	66
Figure III.3 Vue d'ensemble de l' Installation de séparation électrostatique à Electrodes rotatives.....	66
Figure III.4 Image du moteur d'entrainement.....	68
Figure III.5 Voies de fabrication des plastiques.....	72
Figure III.6 Structure chimique des différents matériaux plastiques	73
Figure III.7 Comparatif des Propriétés mécaniques Métal/Plastique.....	74
Figure III.8 caractéristiques thermiques des matériaux diélectriques	75
Figure III.9 Bandes d'énergie des différents matériaux existants.....	76
Figure III.10 Echantillon des granules utilisés dans l'étude	77
Figure III.11 Physionomie et taille des granules PA.....	78
Figure III.12 Physionomie et taille des granules PC	78
Figure III.13 Physionomie et taille des granules PVC	79
Figure III.14 Physionomie et taille des granules PP	79
Figure III.15 Technique de mesure par cage faraday	80
Figure III.16 Electromètre Keithley model 6514 utilisé pour la mesure.....	81
Figure III.17 Balance numérique de précision 0.1: 600g.....	82
Figure III.18 Thermo hygromètre numérique Amprobe	83
Figure III.19 Tachymètre numérique RPM 82	83

Chapitre IV

Figure IV.1.A: Représentation de variation des masses relatives des produits récupérés dans les bacs du PP et du Mixte selon différentes tensions appliquées entre les deux états Statiques et rotatives (30 tr/min)	92
---	----

Figure IV.2.B: Représentation de variation des masses relatives des produits récupérés dans les bacs du PP et du Mixte selon différentes tensions appliquées entre les deux états Statiques et rotatives (30 tr/min)	92
Figure IV.3 Pureté du PP et PA pour différent potentiels appliqués (Statiques-rotatives).....	93
Figure IV.4. Taux d'augmentation de pureté pour PP – 30 tr / min	94
Figure IV.5. Taux d'augmentation de pureté pour PA – 30 tr / min	95
Figure IV.6. Taux d'augmentation de pureté pour PP – 45 tr / min	95
Figure IV.7. Taux d'augmentation de pureté pour PA – 45 tr / min	96
Figure IV.8 Répartition des cellules en 3 BACS de récupération	98
Figure IV.9 récupération de la masse et la charge des produits suivant le N° de la cellule	100
Figure IV.10 Modèle de distribution obtenu pour l'échantillon de masse des particules	100
Figure IV.11 Modèle de distribution obtenu pour l'échantillon de masse des particules	101
Figure IV.12 Modèle de distribution obtenu pour l'échantillon du rapport charge/masse des particules	101
Figure IV.13 environnement du système expérimental étudié	103
Figure IV.14 Pureté et récupération du PP prédites en fonction des trois facteurs : Moteur = 37.5 tr/min, Tension = 28 kV, Chargeur = 3000 tr / min. les limites de confiance supérieures et inférieures sont maintenues à 95%.	106
Figure IV.15 Pureté et récupération du PA prédites en fonction des trois facteurs : Moteur = 37.5 tr/min, Tension = 28 kV, Chargeur = 3000 tr / min. les limites de confiance supérieures et inférieures sont maintenues à 95%.	106
Figure IV.16 les réponses de récupération prédites en fonction des paramètres de vitesse de chargeur, la tension et vitesse de moteur par logiciel MOODE5.0 pour PA	107
Figure IV.17 les réponses de pureté prédites en fonction des paramètres de vitesse de chargeur, la tension et vitesse de moteur par logiciel MOODE5.0 pour PP.....	108

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Travail d'extraction et constante diélectrique des polymères classée par: (Van Krevelen 1990). [33].....	12
---	----

Chapitre III

Tableau III.1 influence de la vitesse de rotation des électrodes sur la récupération du mélange PC/PVC.....	84
Tableau III.2 influence de la vitesse de rotation sur la récupération (PP/PA)	85
Tableau III.3 influence de la tension appliquée sur la récupération de (PC/PVC)	85
Tableau III.4 influence de la tension appliquée sur la récupération du mélange (PP/PA).....	86

Chapitre IV

Tableau IV.1 Comparaison de la récupération du PP pour électrodes statiques VS électrodes rotatives.....	90
Tableau IV.2 Comparaison de la récupération du PA pour électrodes statiques VS électrodes rotatives.....	90
Tableau IV.3 Comparaison de la récupération du PP pour électrodes statiques VS électrodes rotatives.....	91
Tableau IV.4 Comparaison de la récupération du PA pour électrodes statiques VS électrodes rotatives.....	91
Tableau IV.5 Concordance de la masse mesurée entre le model expérimental et de simulation	99
Tableau IV.6 Concordance de la charge mesurée entre le model expérimental et de simulation	99
Tableau IV.7. Les résultats des 17 du plan d'expérience composite.....	105

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les d'équipements électriques et électroniques (ordinateurs, imprimantes, téléphones portables, appareils photos numériques, réfrigérateurs, ou télévisions) hors usage sont devenus l'un des flux de déchets les plus rapides à l'échelle mondiale, Ils augmentent trois fois plus vite que les déchets municipaux moyens, ces équipements contiennent des matériaux pouvant être dangereux pour l'environnement ou la santé humaine ; C'est la raison pour laquelle ils doivent être collectés séparément et traités par des méthodes efficaces du recyclage, Les plastiques représentent environ 30% de la quantité totale de ces déchets [1].

Le plus véritable combat contre cette augmentation se pose dans la gestion environnementale et sociale de ces déchets, les approches traditionnelles de gestion des déchets sont souvent attaquées sans coordination et d'une façon fragmentaire [2, 3].

Afin de répondre aux besoins de l'industrie du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques, multiples recherches ont été réalisées par des laboratoires américains, japonais, européens, canadiens et algériens sur la séparation électrostatique des matériaux plastiques granulaires ainsi que les principaux mécanismes de charge impliqués [4].

Les méthodes de tri au niveau industriel sont nombreuses comme le tri densimétrique ou par installations optiques, ils sont caractérisés par une consommation gourmande d'énergie et leur limite de ne pas séparer tous les types des plastiques.

Au cours des deux dernières décennies, la séparation électrostatique des matériaux plastiques a prouvé son efficacité et fiabilité comme moyen contre ce problème. Elle représente à la fois une bonne pureté des matériaux récupérés et aussi une approche solide qui minimise la consommation de l'énergie électrique lors de la séparation contrairement aux autres méthodes du tri sélectif [5, 6].

Il existe plusieurs séparateurs électrostatiques : séparateurs à chute libre, à tambour, bande transporteuse, à double tapis roulants, à disques..., chacun d'eux présente ses propres atouts mais

ils utilisent tous les forces du champ électrique intense généré entre deux électrodes pour attirer des matériaux chargés préalablement [7].

Pour la finalisation de cette thèse dans ce contexte, on a conçu et réalisé un nouveau séparateur à électrodes rotatives associant les avantages de deux autres séparateurs suscités : celui à chute libre et à tambours ; l'idée de la conception de la nouvelle installation est née suite à un ensemble de constats sur le séparateur à chute libre et le séparateur à deux tambours horizontaux ou le premier exploite l'inertie des particules dans la séparation électrostatique mais présente l'inconvénient de la collision des particules fortement chargées sur les parois ou soient elles se collent sur les électrodes ou bien elles font des rebonds pour tomber dans les bacs non appropriés entraînant la dégradation de la pureté des produits récupérés à la sortie de la zone de séparation; pour le second séparateur, les particules collées sont enlevées par un racleur mais le poids de ces particules (surtout de grande taille) présente une grande contrainte pour leurs séparation.

Pour la réalisation de cette nouvelle installation, on a fait une étude globale sur les différents dispositifs existants pour analyser leurs avantages et inconvénients puis on a entamé la conception par le recours aux outils informatiques dont on cite le Matlab, le SolidWork qui nous ont été d'une grande aide pour se lancer dans la phase de réalisation et l'expérimentation.

Le contenu de la thèse a été ainsi réparti en quatre chapitres :

Une première partie a été réservé à la présentation des matériaux plastiques, les mécanismes de chargement des plastiques, et les installations de séparation électrostatique déjà existantes.

Le deuxième chapitre est consacré à la conception et l'implémentation d'un modèle assisté par ordinateur de cette nouvelle installation ainsi que la présentation des parties constructives et la méthode d'analyse numérique ou on a présenté à la fin de ce chapitre une série de résultats numérique.

La troisième partie de cette thèse traite essentiellement la réalisation de la nouvelle installation, ainsi que les problèmes rencontrés lors de cette tâche, comme on a présenté une démarche essentielle qui est la description de la procédure expérimentale et les moyens de mesure suivis de quelques résultats préliminaires.

Le dernier chapitre (Chapitre quatre) est subdivisé en deux parties la première est réservée à une étude approfondie de la fiabilité de l'installation et la recherche du point optimal en utilisant la méthodologie des plans d'expériences et la deuxième partie se penche sur la concordance des deux modèles théorique et empirique de l'installation réalisée.

Une **conclusion générale** clôture la présente thèse et s'accompagne d'une synthèse des principales **contributions** que ce travail apporte dans le domaine étudié, ainsi que de l'énoncé des **perspectives** ouvertes pour une future exploitation et amélioration de cette nouvelle installation d'électroséparation .

Chapitre I : ETAT DE L'ART

Chapitre I : ETAT DE L'ART

Les déchets électroniques forment un véritable problème de société qui requiert une solution et une attention à l'échelle mondiale. Le recyclage pourrait être l'un des principaux moyens de réduire la production de déchets électroniques. Bien que le recyclage réduise les émissions de gaz à effet de serre, ainsi que la pollution de l'eau et du sol associée à la fabrication de nouveaux produits à partir de matières premières, la sécurité et la qualité du recyclage constituent un problème environnemental majeur [8-10].

La sensibilisation des gens aux méthodes de recyclage, de réutilisation et d'élimination des produits électroniques à tous les niveaux, la combinaison de nouvelles solutions technologiques et la sensibilisation accrue du public aux effets environnementaux des déchets électroniques leur apprendront à adopter un comportement plus responsable en matière de recyclage.

Les plastiques représentent au moins 30% du poids des déchets informatiques. La grande majorité de ces déchets sont soumis à un traitement mécanique comprenant le broyage, la granulation, la séparation et la catégorisation électrostatique. Dans la mesure du possible, les plastiques doivent être triés manuellement avant le recyclage mécanique en fonction du type et/ou de la couleur du polymère. De nouvelles technologies ont été introduites pour le tri automatique des plastiques granulaires, utilisant notamment la spectroscopie par fluorescence X, la spectroscopie infrarouge et proche infrarouge, la séparation électrostatique et la flottation [11].

Cette thèse s'intéresse au tri-sélectif des matériaux plastiques, qui présentent la majorité des composants utilisés par l'être humain, l'importance de ces matériaux est due premièrement à leur faible prix (multitude des formes des produits plastiques). De plus, les procédés de fabrication sans moins complexes que d'autres matériaux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu des notions et généralités sur les familles des matières plastiques et sur l'effet et la série tribo-électrique. Puis nous allons entamer une partie qui décrit les différents dispositifs de chargement triboélectrique [12].

Finalement, une partie est consacrée à la description et la présentation des principes de fonctionnement des dispositifs de séparation électrostatique [13, 14] pour la séparation des matériaux granulaires isolants.

I.1 Classification des déchets d'équipement électrique et électronique DEEE

L'union européenne a classé les déchets d'équipement électrique et électroniques en dix catégories soulignées :

- Gros appareils électriques domestiques
- Petits appareils électriques domestiques
- Équipements informatiques
- Médias/divertissements/équipements d'enregistrement
- Appareils d'éclairage
- Outils de construction électriques en bois et en métal
- Jouets/équipements de loisirs et articles de sport
- Équipements médicaux
- Équipements de surveillance et distributeurs électriques de boissons chaudes et froides
- Produits solides et d'argent

Ainsi que toutes les autres machines utilisées pour la distribution automatique de différents produits. Près de 8% des déchets municipaux contiennent des déchets électroniques. Il s'agit de l'une des catégories de déchets dont la croissance est la plus rapide à l'heure actuelle (Widmer et al. 2005). Les constituants des déchets électroniques présentent un état alarmant en raison de leur toxicité et de leur quantité.

I.2 Les métaux

Le Nigeria est l'un des pays les plus touchés par la pratique du recyclage des déchets électroniques, car il s'agit d'une source de pollution métallique dans leur pays. Malheureusement, 25 à 75 % des PC usagés importés par le Nigeria en 2005 étaient non fonctionnels ou non réparables. Partout, les métaux ferreux sont présents en plus grande quantité dans les déchets électroniques, par rapport au cuivre et aux autres métaux précieux.



Figure I.1 Déchets électriques et électroniques de type métallique

I.3 Les matières plastiques

Le mot « plastique » ou en langage scientifique « matière plastique » décrit un matériau qui contient une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé ou façonné sous pression et à haute température. Cette matière vient essentiellement du pétrole, dont la matière entièrement synthétique et la plus ancienne qui est « la bakélite » a été découverte en (1909) [15].

Les matières plastiques couvrent une large gamme des matériaux polymères naturels (synthétiques) et artificiels (par usinage) dont les matières polymères sont utilisées en état « miscible » avec une matière non-polymère.

L'exploitation des matériaux plastiques a grandi devant l'utilisation des matières métalliques qui sont souvent plus lourdes, sensibles à la corrosion et plus onéreuses. Les propriétés des matières plastiques ne cessent de s'améliorer avec le temps d'où plusieurs caractéristiques les distinguent des métaux :

- Densité faible
- Faible température de transformation (entre 100 et 300°)
- Elasticité élevée
- Grande résistance à l'impact
- Matières plus stables (peuvent durer des siècles)

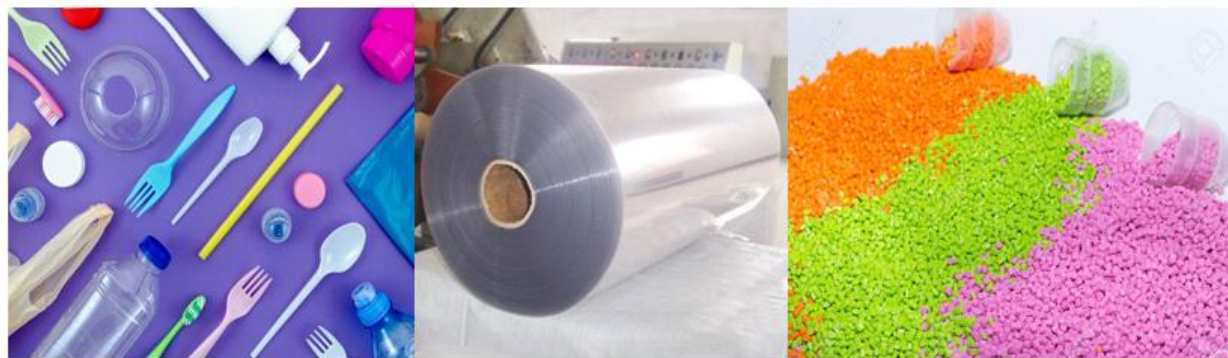


Figure I.2 Formes de marchandise des matières plastiques premières

I.3.1 Les branches des matières plastiques

A l'échelle industriel les matières plastiques utilisés sont diverses, elles peuvent être distingués selon leurs couleurs, ou masse volumique mais elles peuvent aussi être classés en trois branches essentielles:

I.3.1.1 Thermoplastiques à grande diffusion :

Cette branche de matières plastiques représente la famille la plus utilisé dans l'industrie du plastique (plus de 90% des applications industrielles) [16]. Ils sont plus faciles à fabriquer, moins fragiles que les thermodurcissables et présentés sous deux différentes formes (feuilles à faible épaisseur, compactés grande épaisseur). Les principales familles de cette branche sont : les thermoplastiques de grande diffusion, les thermoplastiques techniques et les thermoplastiques haute performance.

I.3.1.2 Les thermodurcissables :

Ce type des plastiques ne se déforme pas sous l'action de la chaleur (bonne tenue de température $>200^{\circ}\text{C}$), ils se ramollissent le temps de leur production puis ils durcissent d'une façon irréversible. Le majeur inconvénient de ce type des plastiques et leur mise en œuvre qui est plus lente et difficile que les simples thermoplastiques.

I.3.1.3 Les élastomères ou caoutchoucs

Ce type des plastiques est obtenu par traitement chimique (synthèse) pour obtenir des matières qui possèdent des propriétés similaires aux matières naturelles tel que le caoutchouc. Parmi les domaines d'application de ces matériaux, on trouve : les pièces pneumatiques, les amortisseurs, les pièces d'étanchéités et les chaussures.



Figure I.3 Aperçu des matières en élastomères

I.4 Techniques de Chargement électrostatique et triboélectrique des matériaux isolants

Vue la diversité des matériaux et la multitude des déchets des équipements hors usage, les matériaux plastiques constituent une large proportion qui ne cesse d'augmenter d'année en année ; la communauté internationale et les laboratoires de recherche se sont penchés sur la problématique de récupération et de recyclage de ce type de matériaux pour un second usage.

La séparation électrostatique constitue l'une des meilleures solutions pour cette tâche nécessitant dans une première phase le chargement électrostatique suivi de la séparation des mélanges sous formes granulaires.

Les phénomènes de génération de ces charges aux surfaces de matériaux sont divers [17, 18]. Deux phénomènes sont couramment employés pour charger les matériaux granulaires : 1- l'effet couronne [19] qui assure la charge par « bombardement ionique » et l'effet tribo-électrique qui assure la charge des matériaux par transfert de charge entre de matériaux de différente nature.

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord faire une revue des deux concepts de chargement. Ensuite, nous allons présenter et traiter les différents dispositifs de chargement les plus connus et leurs principes de fonctionnement.

I.4.1 Chargement par effet couronne

Lors des phénomènes météorologiques précipités, l'effet couronne se manifeste en forme d'une gaine lumineuse bleu qui apparaît autour des fils électriques lorsque le potentiel électrique devient suffisant pour générer un champ qui dépasse le champ d'ionisation de l'air ($E_c = 30 \text{ kV/cm}$). D'un point de vue physique l'effet couronne se produit autour de tous les conducteurs si le champ dépasse cette valeur, dans ce cas une avalanche électronique aura lieu à proximité de la zone active du conducteur provoquant l'ionisation de l'air [20, 21].

Cet effet a fait l'objet de multiples recherches scientifiques dans le domaine de l'électrostatique, il est utilisé généralement pour la précipitation des matières pulvérulentes [22] et la séparation des mélanges granulaires [23, 24]. Pour une installation de recherche le phénomène est créé en faisant la combinaison de deux électrodes métalliques l'une est dite active reliée à une source HT, et l'autre électrode dite passive reliée à la terre.

Les électrons libérés à la zone active près de l'électrode active vont avoir une attitude choquante pour les molécules présentes dans l'air. Ces électrons vont libérer d'autres électrons créant un canal qui commence de l'électrode active et se termine vers l'électrode passive. Le phénomène reste limité entre deux électrodes caractérisé par un champ électrique intense. Ce phénomène est exploité pour le chargement des particules en les mettant près de l'électrode passive dont l'acquisition de charge est définie par la polarité de l'électrode active [25-27].

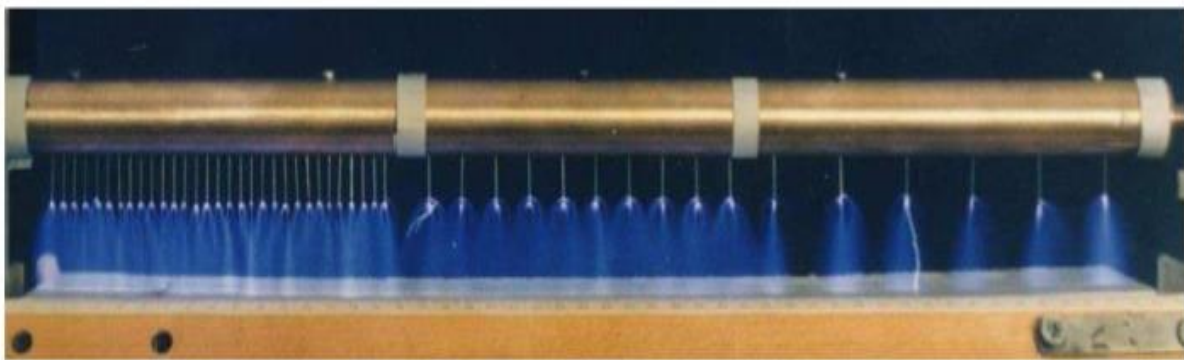


Figure I.4 Photographie d'un phénomène corona à plusieurs électrodes aiguilles

I.4.2 Chargement par effet tribo-électrique

L'effet triboélectrique a été le premier sujet d'étude de la tribologie. Depuis plus de 2000 ans, sa généralité et ses phénomènes intéressants ont attiré des intérêts de recherche significatifs. En résumé, l'effet triboélectrique est intéressant mais complexe, principalement pour les raisons suivantes : (1) Même pour une surface fortement chargée, la densité de charge ne peut atteindre qu'une unité d'électron par 10⁵ atomes de surface [9]. (2) Il est encore difficile de répondre avec certitude à des questions fondamentales, notamment celle de savoir quelle surface sera chargée positivement et quelle surface aura des charges négatives lorsque deux surfaces sont mises en contact, et les exceptions (c'est-à-dire les séries triboélectriques cycliques) de différentes théories semblent exclusives les unes des autres. (3) Plusieurs facteurs peuvent agir sur le même processus triboélectrique, ce qui ajoute aux analyses complètes en découplant chaque paramètre dominant pour modéliser l'effet triboélectrique. Compte tenu de ces aspects ésotériques de l'effet triboélectrique, de nombreuses expériences ont été menées. Bien que tous ces résultats soient appréciables, leur signification souffre grandement, en raison du manque de déductions théoriques plus solides pour interpréter leurs phénomènes dans le processus triboélectrique [28].

On parle de l'effet tribo-électrique lorsque deux matériaux sont mis en contact (frottement), un transfert de charges se crée au niveau surfacique d'un matériau vers l'autre dont il résulte deux matériaux différemment chargés [29-31]. Le temps de séjour de ces particules dépend fortement de la nature de ces matériaux: si le matériau est de nature conductrice la charge va être facilement évacuée (perte de charge), si le matériau est isolant les charges acquises persistent et permettent d'exploiter les forces électriques pour la séparation des mélanges granulaires isolants.

Les concepts théoriques adoptés pour ce phénomène sont plusieurs dont quelques chercheurs ont reporté cet effet au concept de localisation ou délocalisation des électrons, dans ce cas des effets sur la conductivité du matériau apparaît pour augmenter ou diminuer la résistivité du matériau par des vibrations thermiques.

Les travaux récemment effectués [32] ainsi que la plupart des chercheurs ont expliqué le phénomène de tribo-électricité au transfert de charges électriques (électrons), d'autres considérations s'opposent et proposent que l'effet tribo-électrique est en relation avec l'acidité et la basicité des matériaux granulaires isolants.

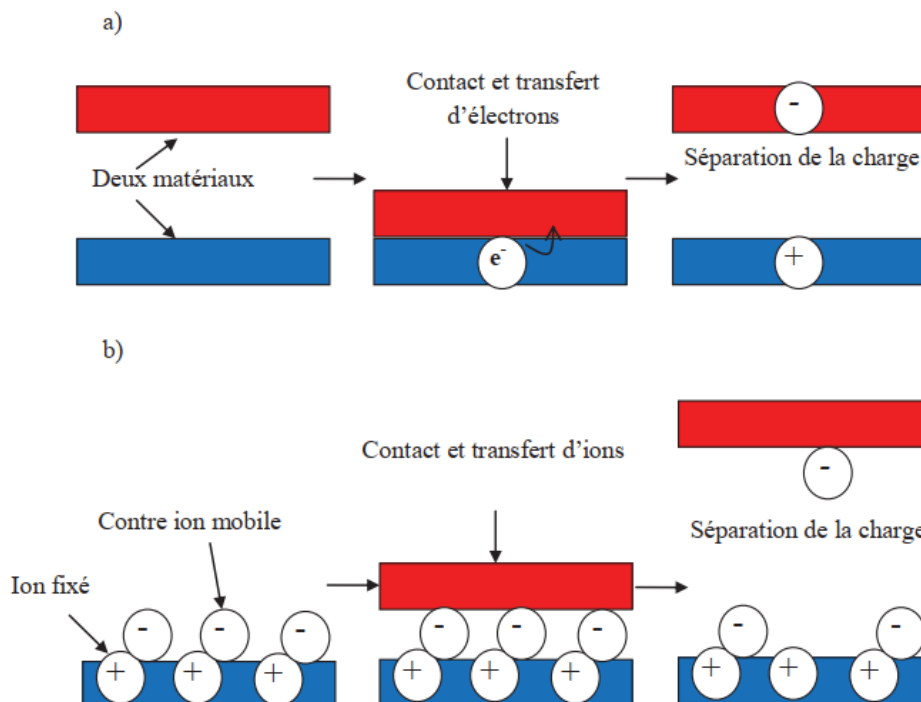


Figure I.5 les deux mécanismes de transfert de charge: (a) Transfert électronique; (b) transfert ionique

I.4.2.1 Série tribo-électrique

Une série dite : tribo-électrique présente un classement des matériaux par ordre de sorte qu'un frottement entre deux matériaux qui se suivent aboutit à charger le premier positivement et le deuxième négativement. La charge acquise pour chaque matériau dépend fortement de leur position d'une façon que le matériau (1) est loin du matériau (2) dans la série plus la charge acquise est élevée.

Le matériau qui a une affinité plus forte pour la charge négative c'est le matériau qui prend les électrons, le matériau qui a une affinité plus forte à se charger négativement c'est le matériau qui donne des électrons. Donc, le système des deux matériaux va agir comme un émetteur-récepteur d'électrons. Le tableau I.1 présente une série tribo-électrique classée par (Van Krevelen 1990) et indique que plus le travail d'extraction est grand plus le matériau tend à se charger négativement.

Tableau I.1 Travail d'extraction et constante diélectrique des polymères classée par: (Van Krevelen 1990). [33]

<i>Polymère</i>	<i>Travail d'extraction (eV)</i>	ϵ
<i>Polytétrafluoroéthylène (PTFE)</i>	5.75	2.1
<i>Polychlorure de vinyle (PVC)</i>	5.13	2.8-3.05
<i>Polystyrène (PS)</i>	4.90	2.55
<i>Polyéthylène (PE)</i>	4.90	2.5
<i>Polycarbonate (PC)</i>	4.8	2.6-3.0
<i>Poly méthacrylate de méthyle (PMMA)</i>	4.68	2.6-3.7
<i>Polyamide 6.6 (PA)</i>	4.3	4

D'autres chercheurs ont ensuite poursuivi des recherches sur différents matériaux plastiques dont ils introduisent des séries plus ou moins différentes.

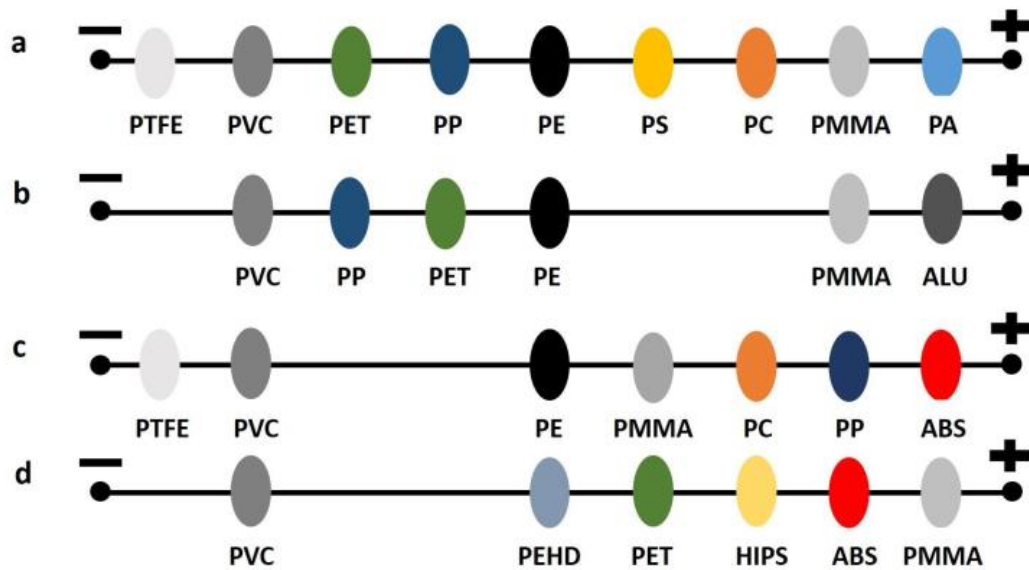


Figure I.6 Série triboélectrique expérimentale pour différents matériaux plastiques utilisés dans la fabrication des équipements informatiques et électriques selon différents auteurs: a [34], d [35], c [36], d [37]

A. Forces exercés sur les matériaux granulaires

Les matériaux granulaires sont constitués d'un grand nombre de particules dont la taille typique varie du micromètre au centimètre. Ces particules interagissent par des forces à faible portée, c'est-à-dire uniquement par contact mécanique. Les forces à grande distance, telles que les forces électrostatiques, sont aussi considérés ici. La dynamique d'un matériau granulaire est régie

par l'équation du mouvement de Newton pour les coordonnées du centre de masse et les angles d'Euler de ses particules i ($i = 1, \dots, N$).

A l'absence d'un champ électrique E , le mouvement d'une particule dans un entonnoir ou en chute libre est régi par deux paramètres : 1- les forces qui agissent dans le système, 2- le moment d'inertie qui agit dans certaines situations (plus difficiles).

$$\frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} \vec{F}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (I.1)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{\varphi}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \vec{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j), (j = 1, \dots, N) \quad (I.2)$$

La force et le moment, qui agissent sur une particule i de masse et un moment d'inertie tensiométrique, sont quelques fois des fonctions plus complexes du rayon de la particule, son orientation angulaire, et leurs vitesses. Le calcul des forces et des moments est la partie centrale de chaque simulation de la dynamique de granules, un système de séparation électrostatique est caractérisé par deux interactions essentielles : 1- forces inter particulaires lors de leurs déplacement ou électrostatiques due à leur charge, 2- des forces particule-électrodes due au forces électrostatiques due au potentiel appliqué aux électrodes.

Les trois forces inter-particulaires qui agissent sur les matériaux granulaires sont :

- Les forces électrostatiques
- Les forces aérodynamiques
- La force de la pesanteur

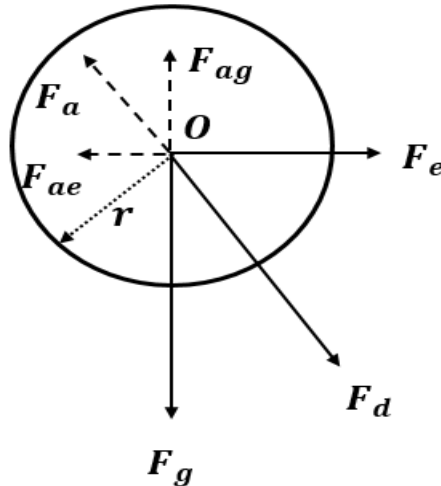


Figure I.7 Représentation schématique des forces appliquées à une particule sphérique

Le déplacement horizontal de la particule par rapport à l'axe de symétrie de l'installation dépend de sa charge initiale et de l'intensité et la durée de l'application de la force électrique. Donc, pour avoir un déplacement horizontal important on a deux possibilités: la première consiste à augmenter l'intensité de la force électrique appliquée sur la particule par l'augmentation de l'intensité du champ électrostatique et/ou la charge acquise par la particule. La deuxième consiste à augmenter la durée de l'application de la force électrique par l'augmentation de la hauteur des électrodes. L'application de l'ensemble de ces solutions nous permet d'augmenter l'écart entre les points de collecte des particules chargées différemment

A.1 Forces électrostatiques

Charles-Augustin de Coulomb découvre expérimentalement l'expression de la force électrique que s'exercent sur deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères. L'interaction entre particulaire ou entre particule système est due aux charges électriques qui sont décrits par la loi de coulomb.

La loi de coulomb décrit l'interaction entre deux charges électriques ponctuelles immobiles dans le vide. Soit la charge q_1 , placée dans le point M1, et la charge q_2 , placée dans le point M2.

La force exercée par la charge ponctuelle q_1 sur la charge ponctuelle q_2 à pour expression :

$$\vec{F}_{12} = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{1 \rightarrow 2} \quad (I.3)$$

$\vec{F}_{12}$ Force de Newton (N)

q_1 et q_2 Charges en Coulomb (C)

$r_{12} = M_1 M_2$ distance en mètre (m)

$u_{1 \rightarrow 2}$ Vecteur unitaire (sans dimension)

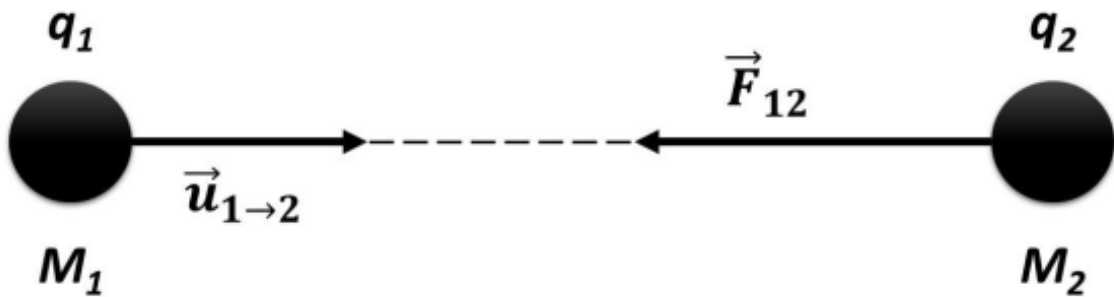


Figure I.8 forces de coulomb exercés par deux charges q_1 et q_2 de signe opposé (attraction) constante k dépend du milieu. Dans le vide elle vaut :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2, \text{ ou } \epsilon_0 \text{ est la permittivité absolue du vide.}$$

Le vecteur unitaire $\vec{u}_{1 \rightarrow 2}$ est orienté de M_1 vers M_2 sur la droite $(M_1 M_2)$

A.2 Forces aérodynamiques

Lors de l'étude de mouvement des particules dans un procédé de chargement triboélectrique en présence ou en l'absence de champ électrique, il faut étudier les forces aérodynamiques agissant sur ces particules.

Une particule chargée sous un champ électrostatique a pour équation de force la formule suivante :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (I.4)$$

F_i : Force d'inertie

F_{el} : Force exercé par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule de charge

Q : située à une distance r de l'électrode.

La force aérodynamique s'écrit :

C_d étant en fonction du nombre de Reynolds : $Re = \frac{VL}{\nu}$

ν :

V : vitesse du fluide [m/s] ;

L : dimension du fluide [m] ;

ν : viscosité du fluide [m²/s] ;

v_r : vitesse relative d'une particule dans l'air

A.3 Force de la pesanteur

Le poids d'un objet est égal à la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre. Cette force de pesanteur est caractérisée par une origine : le centre de gravité G (ou centre d'inertie) du corps, une direction : la verticale passant par G , un sens : vers le bas et une valeur $P = m \cdot g$ avec P en Newton (N), m en kg et $g = 9.81 \text{ N} \cdot \text{Kg}^{-1}$ [38].

A.4 Forces de London-Van der Waals

Il s'agit de forces attractives (Figure I.9) selon l'équation (I.5). Si on considère deux atomes distants de r , la force d'interaction F [N] entre moments dipolaires instantanés [35] s'écrit :

$$F = -\frac{\alpha^2}{r^7} \frac{4}{3} \frac{hc}{\lambda_i} \quad (\text{I.5})$$

Où α est la polarisabilité de l'atome, $\frac{hc}{\lambda_i}$ son énergie d'ionisation, sachant que :

h : constante de Planck

c : vitesse de la lumière

λ_i : longueur d'onde

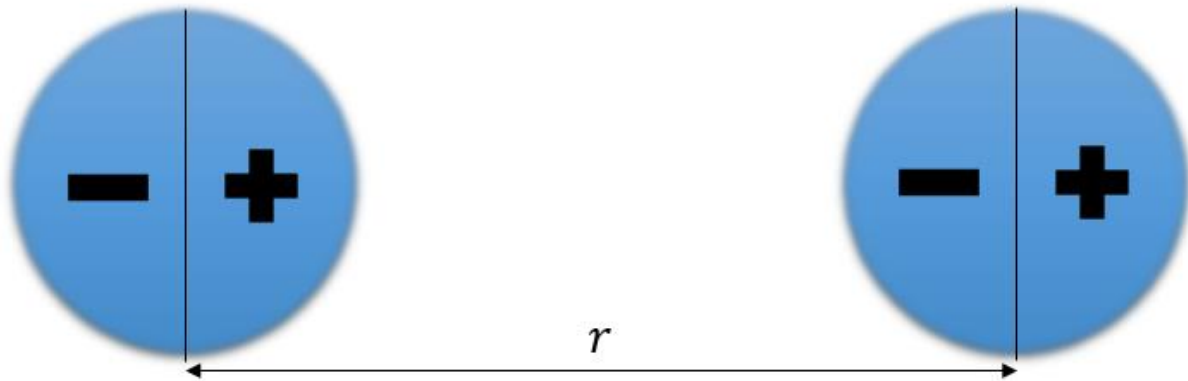


Figure I.9 Force attractive de London-Van der waals entre deux atomes distantes de r

La figure I.10 montre la force d'interaction entre deux sphères matérielles : c'est la somme de toutes les forces d'interaction de London-Van der Waals relatives aux paires constituées d'un atome dans chaque sphère.

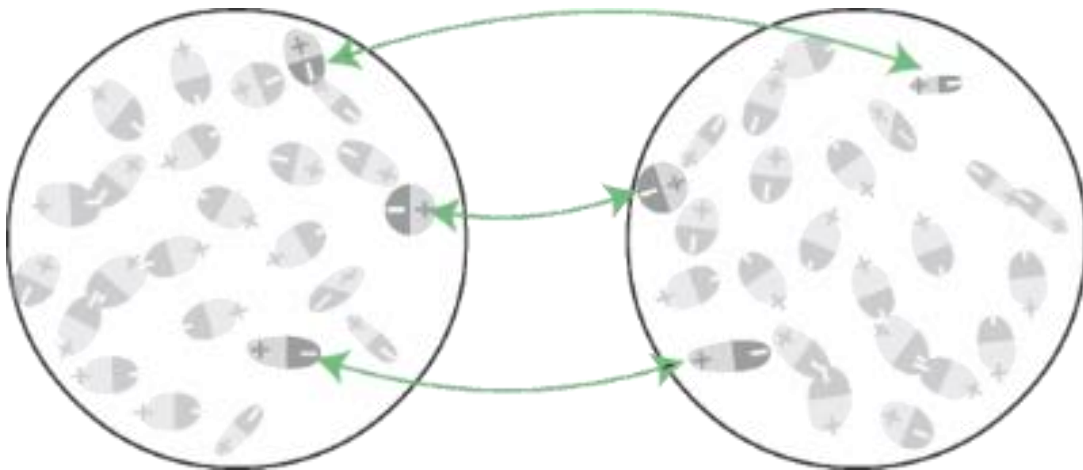


Figure I.10 Force de London-Van der Waals entre deux sphères matérielles

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

B. Cohésion due aux forces électrostatiques

La cohésion entre particules est due aux forces d'attraction de nature électrostatique qui prennent naissance lors du contact ou de la friction. Les charges électrostatiques formées au niveau des surfaces de contact se comporteront de diverses façons en fonction de la nature du matériau: conducteur ou isolant.

Lorsque deux isolants chargés de signe opposé se rencontrent, la cohésion a lieu et persiste. Les électrons ne peuvent pas se répartir et les forces d'attraction ne s'annulent pas. Les charges restent localisées aux points de contact et de friction avec le matériau responsable de l'électrisation. Ces points sont souvent des arrêtes et protubérances.

C. Adhésion due aux forces électrostatiques

L'adhésion des particules sur une paroi dépend des forces capillaires d'adhésion, des forces d'interaction électrostatique et de Van der Waals. Le mouvement d'une particule dans un système d'écoulement est donc le résultat des forces d'adhésion F_1 et de la force de pesanteur F_2 .

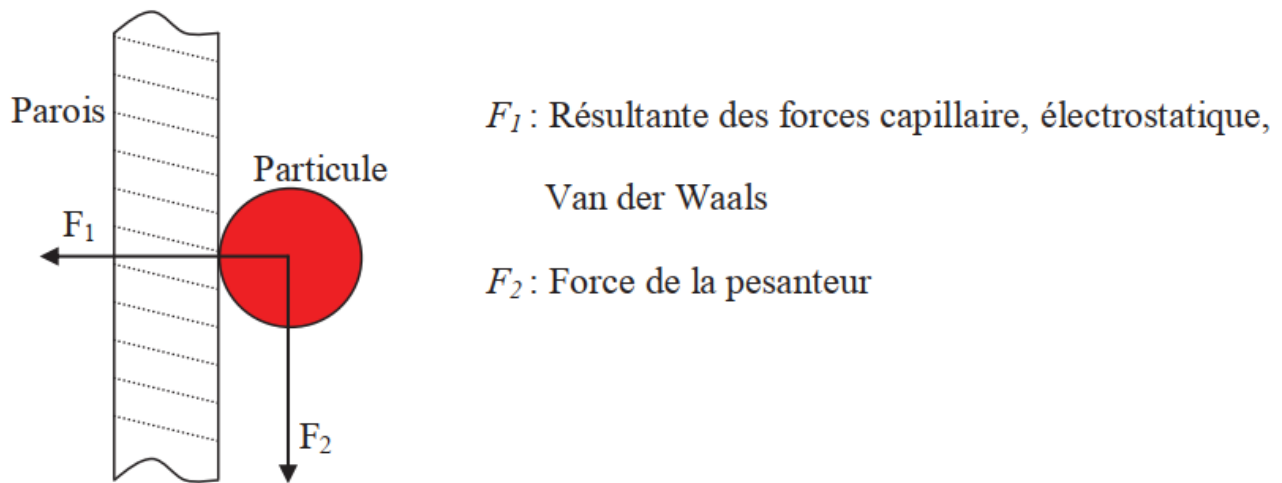


Figure I.11 représentation des forces intervenant dans l'interaction particule électrode

I.4.2.2 Dispositifs de chargement tribo-électriques

Plusieurs travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique, qui utilisent essentiellement : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des soufflantes ou des compresseurs), des micro-cyclones, ou des chargeurs statiques [39-43]. Cette partie décrit les différentes installations de chargement tribo-électrique réalisés au sein des laboratoires d'électrostatique algériens et français.

I.4.2.2.1 Dispositif de chargement statique

Le dispositif de chargement statique est présenté par une enceinte parallélépipédique en matière isolante ou métallique (Figure I-10), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci (effet tribo-électrique) [44], [45]

La simplicité de la construction est remarquable. L'autre atout de ce dispositif : la possibilité de le doter de plusieurs sets de plaques, de matériaux différents, interchangeables. Ainsi, le dispositif peut être équipé des plaques assurant une charge positive pour un constituant du mélange à séparer et négative pour l'autre. La cinématique des particules à l'intérieur du dispositif favorise aussi les collisions entre particules.

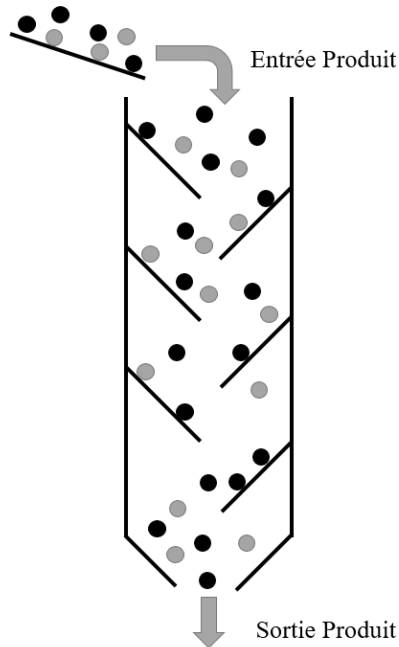


Figure I.12 Représentation schématique d'un chargeur tribo-statique

I.4.2.2.2 Chargement par vibreur

Ce dispositif a été développé par *Blajan et al* [46] au sein du laboratoire d'électrostatique d'Angoulême en France. L'idée consiste à charger le matériau granulaire par glissement dans les canaux en zigzag mis en mouvements vibratoires [47, 48] sur les deux axes X et Y. Le dispositif se compose d'un moteur à vitesse variable, couplé à un bac par un mécanisme bielle à plusieurs positions. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En

changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

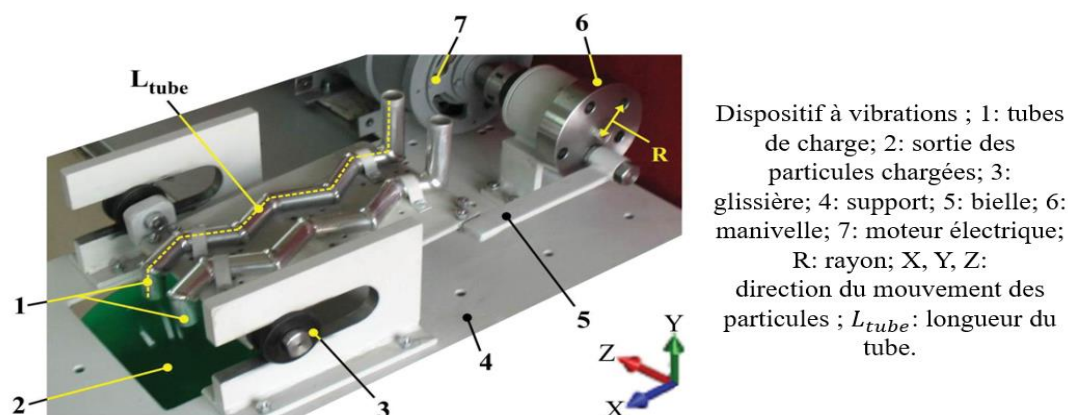


Figure I.13 Représentation schématique d'un chargeur tribo-électrique à vibrations

I.4.2.2.3 Chargement par cyclone

Un cyclone peut être utilisé comme dispositif de tribo-chargement pour la séparation électrostatique en chute libre de mélanges plastiques granulaires. L'opération "standard" d'un tel dispositif est la séparation des matériaux granulaires, afin que le cyclone participe au processus de chargement des granulés. Ainsi, le produit granulaire est introduit à travers un entonnoir dans le cyclone, puis soufflé dans le cyclone. Lorsqu'il est traité indépendamment dans le cyclone, la charge acquise par les granulés est significativement plus élevée que dans un dispositif à lit fluidisé.

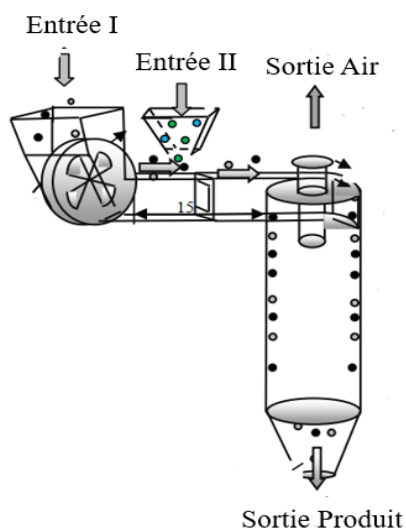


Figure I.14 Représentation schématique d'un chargeur tribo-cyclone

I.4.2.2.4 Dispositif à cylindre rotatif

Le dispositif consiste en un cylindre tournant où les particules entrent d'un côté du cylindre et sortent de l'autre côté totalement chargées, la rotation du cylindre à une vitesse bien définie provoque des collisions à l'intérieur du cylindre entre les particules et entre les particules et les parois, comme l'explique si bien la figure I.15 qui résume le fonctionnement du chargement triboélectrique par cylindre rotatif. [49, 50]

Un flux de matériau granulaire isolant est introduit dans le cylindre en rotation où à l'intérieur les particules culbutent ce qui engendre leur chargement par contacts répétés : c'est le phénomène de tribo-électrisation.

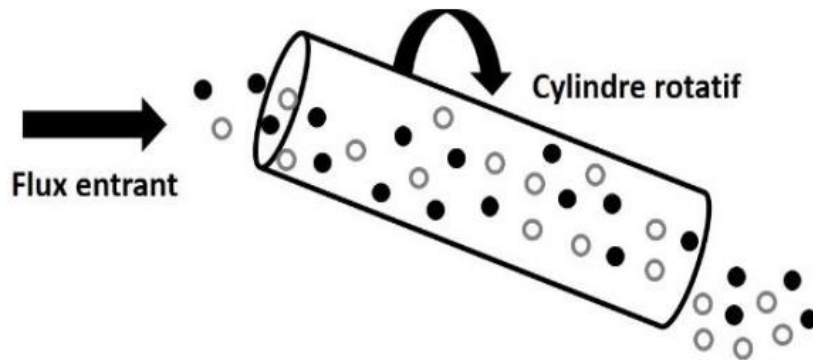


Figure I.15 Représentation schématique du chargement triboélectrique par cylindre tournant.

I.4.2.2.5 Dispositif à ventilateur

Le dispositif consiste dans une chambre cylindrique en polyvinyle chlorure (PVC). A son extrémité inférieure, la chambre est munie d'une hélice coaxiale, entraînée par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable. Ce dispositif entraîne les matériaux granulaires en un mouvement hélicoïdal qui est censé favoriser leur charge triboélectrique par collision entre granulés, entre granulés et hélice et collision granules et paroi. Le signe et l'ampleur de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces trois mécanismes physiques comme l'explique si bien la figure II.16 qui résume le fonctionnement du dispositif à chargement par hélice. [51]

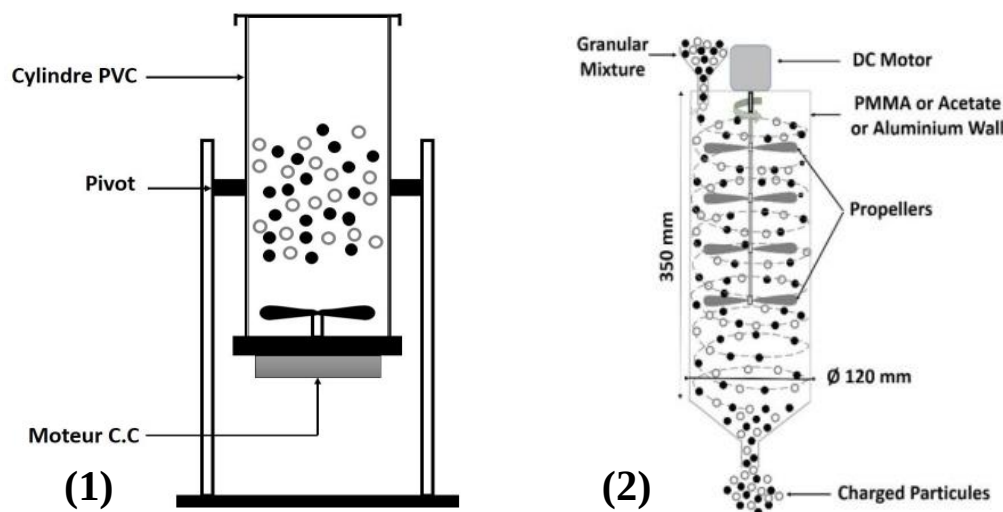


Figure I.16 Représentation schématique du dispositif d'un chargement par ventilateur: (1) à flux ascendant, (2) à flux descendant

I.5 Techniques de séparation électrostatique des matériaux granulaires

La séparation électrostatique des matériaux granulaires représente de nos jours, une technologie économiquement viable pour la concentration des minerais, le recyclage des déchets électriques et électroniques [52]. Son utilisation dans ces industries nécessite le développement de nouvelles technologies afin d'améliorer les résultats, tout en respectant une réglementation de plus en plus sévère pour la protection de l'environnement. Les recherches entreprises dans ce sens ont été très fructueuses lorsqu'il s'agissait de la séparation des particules de tailles millimétriques, dites granulaires [53], [54].

Des multiples installations destinées à la séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires plastiques ont été conçues et construites comme le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages, le séparateur à deux disques métalliques tournant et un autre à deux électrodes tournant. Le point commun entre ces dispositifs est de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique des particules et leur séparation.

I.5.1 Séparation électrostatique des matériaux granulaires isolant-isolant

I.5.1.1 Séparateur à chute libre

Le séparateur à chute libre fait partie des installations les plus emblématiques dans ce domaine de récupération qui a constitué l'élément moteur de propulsion et le développement de ce type d'installations.

Il est composé de deux plaques conductrices disposées en « V » inversé dont l'inclinaison de l'une par rapport à l'autre est réglable selon le type de matériaux à séparer. [55, 56]

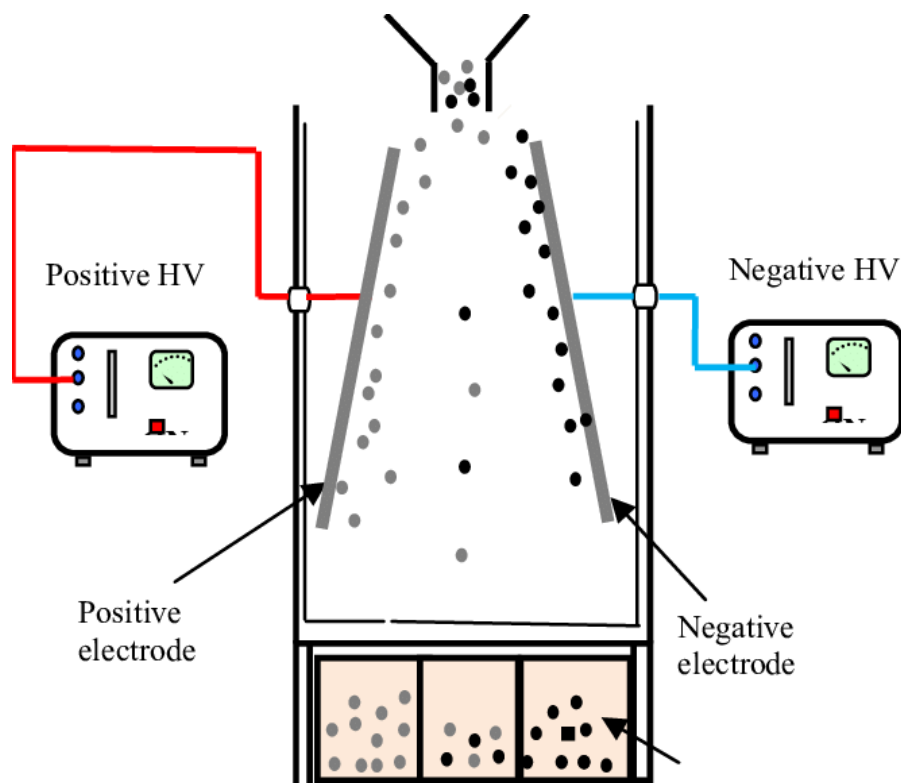


Figure I.17 Représentation schématique d'un séparateur à chute libre (électrodes inclinées)

I.5.1.2 Séparateur à électrodes concentriques

Ce dispositif de séparation électrostatique à électrodes concentriques pour mélanges granulaires isolant a été conçu et réalisé en 2016 au sein du laboratoire d'électrostatique IRECOM, à l'université de Sidi Bel Abbés, ALGERIE, et a fait l'objet d'un brevet [57]. Le dispositif expérimental (Figure I.18) est constitué de deux électrodes concentriques cylindriques en Aluminium.

Ce séparateur a le même principe qu'un séparateur à chute libre, le dispositif est représenté dans la figure I.18. L'objectif est d'obtenir un champ électrique intense dans toute la surface inter électrodes afin de changer la trajectoire des granules selon leur charge acquise et vers l'électrode adéquate, ce qui constitue le principe de base de la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants binaires ou ternaires.

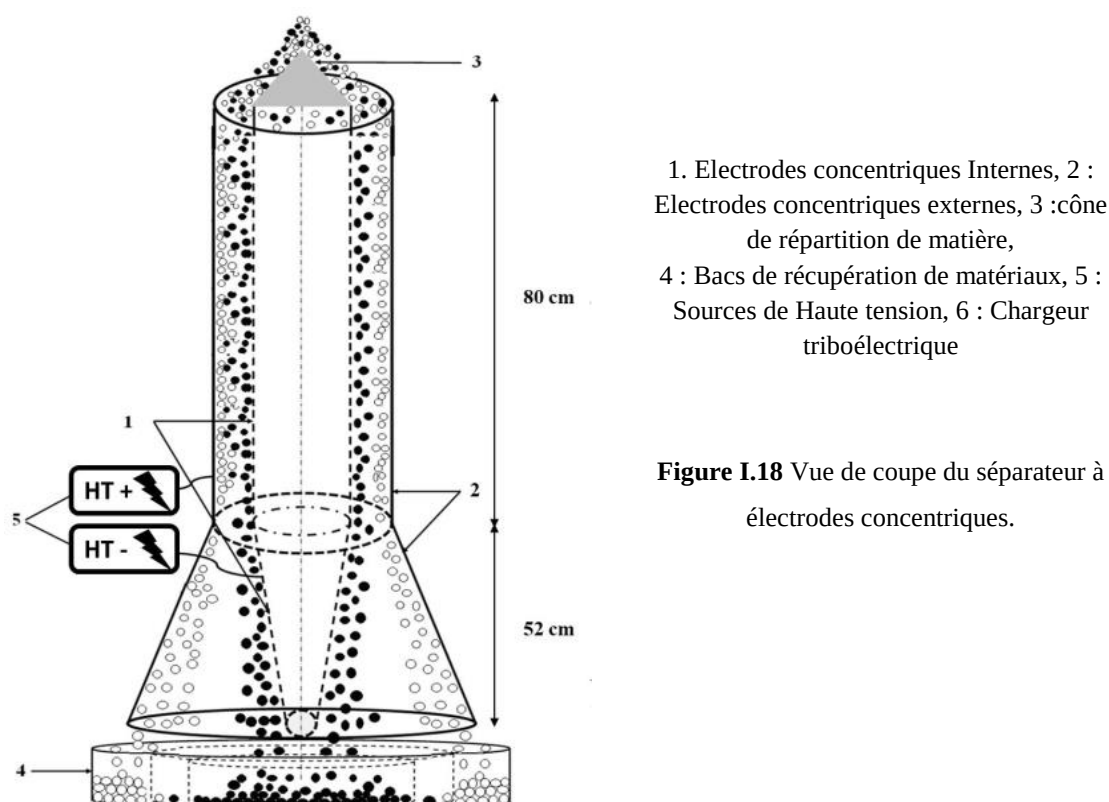


Figure I.18 Vue de coupe du séparateur à électrodes concentriques.

I.5.1.3 Séparateur tribo-aéro électrostatique à deux bandes transporteuses

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique permet de réaliser le tri sélectif de matériaux isolants granulaires mélangés dans un lit fluidisé affecté par un champ électrique orienté orthogonalement à la direction de l'air de fluidisation.

L'effet triboélectrique assure l'homogénéité de la charge électrique acquise par les granules dans un lit fluidisé ayant la forme d'une pyramide tronquée inversée. Les particules chargées se déplacent dans le champ électrique généré entre deux électrodes haute tension de type tapis roulant à la surface desquelles elles sont entraînées par la force de Coulomb, et à laquelle elles restent clouées par la force d'image électrique.

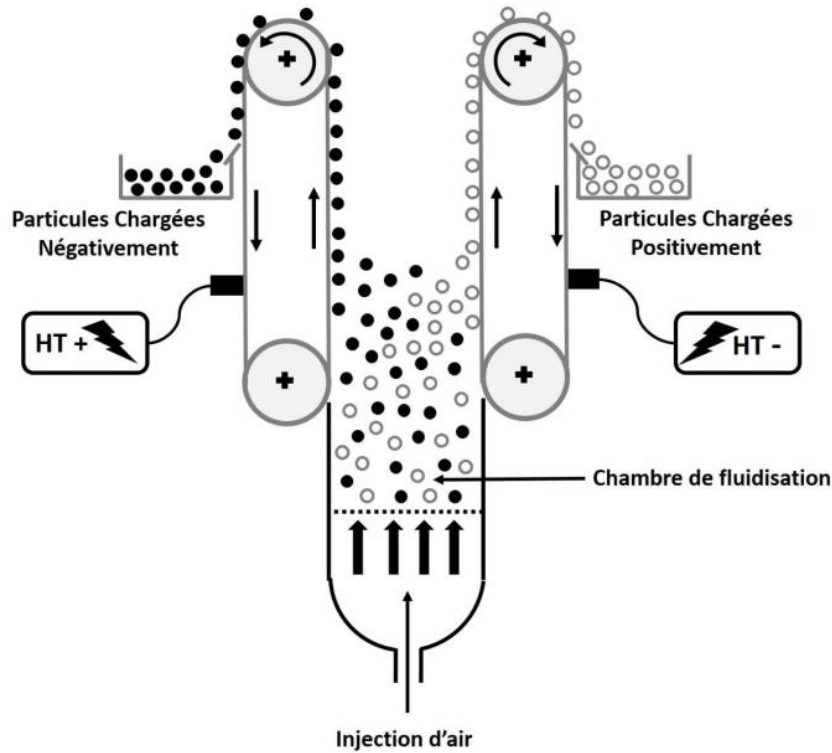


Figure I.19 Représentation schématique du séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes

I.5.2 Séparation des matériaux granulaires isolant-conducteur

Deux types de séparateurs sont cités ci-dessous qui peuvent être utilisés pour séparer des matériaux conducteurs-isolants comme le séparateur à tambour et des matériaux conducteurs comme le séparateur à électrode plaque.

I.5.2.1 Séparateur électrostatique à électrode plaque

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur à plaque peut être décrit comme suit : les granules semi-conducteurs (mauvais et bons conducteurs) sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique (1) et déposés sur l'électrode plaque reliée à la terre (2). Les particules « glissent » ensuite à la surface de la plaque et se comportent différemment suivant qu'elles sont électriquement plus ou moins bonnes conductrices [58].

- **Les granules conducteurs**, en arrivant dans la zone du champ électrique généré par l'électrode statique de forme elliptique (3), acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension continue. Ils subissent alors une force d'attraction électrique exercée par cette électrode et se déposent dans la partie droite du collecteur (4).
- **Les granules non conducteurs**, vu leur constante de relaxation élevée, n'acquièrent pas de charge par induction électrostatique. Ils ne sont donc pas attirés par l'électrode elliptique et tombent sous l'action de leur poids et de leur vitesse dans la partie gauche du collecteur qui leur est destinée.

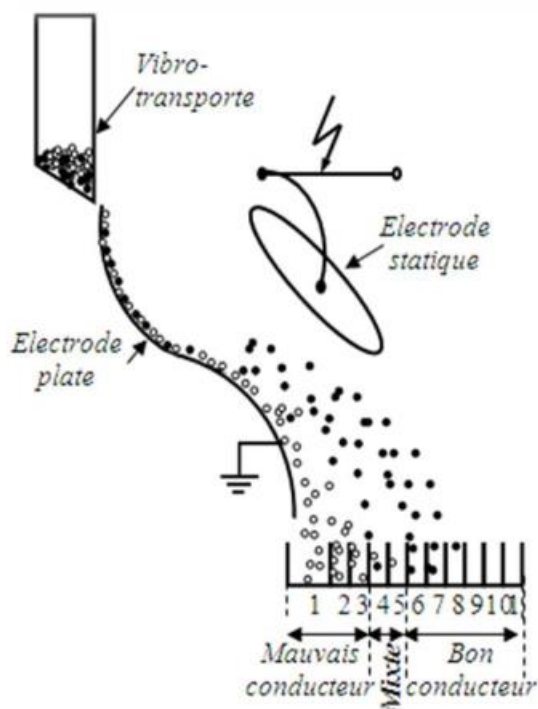


Figure I.20 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque [68].

I.5.2.2 Séparateur électrostatique à tambour

Le séparateur à tambour, comme celui montré sur la figure I.21, est le modèle le plus utilisé. Son principe de fonctionnement consiste en la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode (1) et ainsi les granules déposées par le vibro-transporteur (4) sur le cylindre tournant (tambour) (3) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel HT.

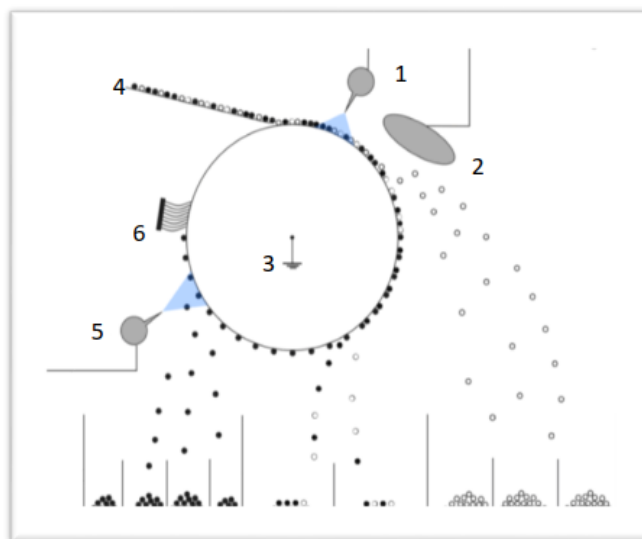


Figure I.21 Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour

Les granules conducteurs perdent rapidement leur charge à travers le tambour relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (2), ils acquièrent par influence électrique une charge de signe opposée au potentiel HT. Ils sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et déposés dans la partie droite du collecteur.

Il existe des installations regroupant en série et en parallèle plusieurs unités de séparation de ce type. Ainsi, la société américaine CARPCO [59] propose une installation où le montage de deux ou trois séparateurs en série (l'alimentation d'un séparateur est constituée d'un des produits obtenus dans le séparateur qui le précède) permet à l'utilisateur d'améliorer la pureté des produits obtenus. En mettant en parallèle deux ou plusieurs unités de séparation (parfois même des dizaines d'unités), on obtient une installation capable de traiter des quantités plus importantes de matériaux.

La figure I.22 représente un projet réalisé dans le cadre d'un Projet National de Recherche PNR, entre les laboratoires IRECOM & APELEC de l'université Djillai Liabes de SidiBel-Abbes, pour l'installation d'un séparateur électrostatique de particules métal/plastique en collaboration avec l'entreprise de récupération de l'ouest ERO, spécialisée dans l'industrie de récupération et de recyclage.



Figure I.22 Photographie de l'électro-séparateur réalisé au laboratoire IRECOM [59]

I.6 Conclusion

Dans le présent chapitre nous avons présenté l'origine et la classification des déchets issus des produits hors usages ainsi que les différentes techniques de chargement et de séparation électrostatique, qui ont fait l'objet de plusieurs études lors des dernières décennies.

La séparation électrostatique constitue actuellement l'une des meilleures alternatives de récupération des produits purs pour un éventuel recyclage de ces déchets ; les modèles réalisés précédemment ont montré l'efficacité de certains séparateurs tel que celui à chute libre qui pourrait présenter une solution prometteuse pour la séparation électrostatique des matériaux granulaires si d'autres améliorations lui seront faites.

Les dispositifs à électrodes rotatifs ont aussi bien montré une grande fiabilité pour des installations de séparation des matériaux granulaires isolants ou conducteurs d'où l'idée est venue

de faire une construction d'une nouvelle installation combinant deux séparateurs à chute libre et à cylindre rotatif en exploitant les points forts de chacune des deux installations, Cette approche a fait l'objet de conception et de simulation de plusieurs paramètres de fonctionnement du nouveau électro séparateur dans le chapitre suivant ...

**Chapitre II : Etude numérique et
simulation de L'installation à
Electrodes Cylindriques Rotatives**

Chapitre II : Etude numérique et simulation de L'installation à Electrodes Cylindriques Rotatives

L'étude du comportement des particules granulaires isolants dans la présence d'un champ électrostatique représente un défi pour l'industrie de recyclage des déchets plastiques. Les travaux présentés dans ce chapitre s'inscrivent dans le cadre de l'amélioration du processus de séparation électrostatique utilisé pour le traitement des DEEE.

L'idée de cette nouvelle conception est parvenu suite à une analyse de fonctionnement de deux séparateurs, le premier est le séparateur à chute libre qui est caractérisé par la déviation de la trajectoire des particules selon leurs charges acquises sauf que dans la région où le champ est intense ces particules soit ils se collent contre l'électrode ou ils font un rebond et dévient vers les bacs non appropriés ; le second séparateur est celui à électrode tambour rotatif qui canalise les produits récupérés vers la zone désirée ou un racleur les détache de cette électrode sauf que la zone de séparation est très réduite ce qui permet à certaines particules, surtout celle de petites tailles, d'être entraîné par les particules de polarité inverse vers les bacs non appropriés.

La nouvelle construction doit pallier aux deux inconvénients des deux séparateurs sus cités, à savoir d'avoir une zone de champ intense assez longue pour laisser le temps aux particules de revenir vers leurs zones de récupération et l'emploi de racleurs pour décoller les particules collées sur les électrodes combinant ainsi les avantages des deux installations d'où la conception d'un nouveau séparateur à deux cylindres verticaux rotatifs (figure II.1).

Dans une première phase le recours aux outils informatiques est primordial pour l'étude numérique détaillée afin de nous permettre l'analyse et la compréhension des phénomènes qui se produisent dans la zone inter-électrodes. Une prévision des paramètres optimaux du processus de séparation électrostatique dans la nouvelle installation sera effectuée afin de déterminer les points de fonctionnement les plus efficaces et les moins coûteux.

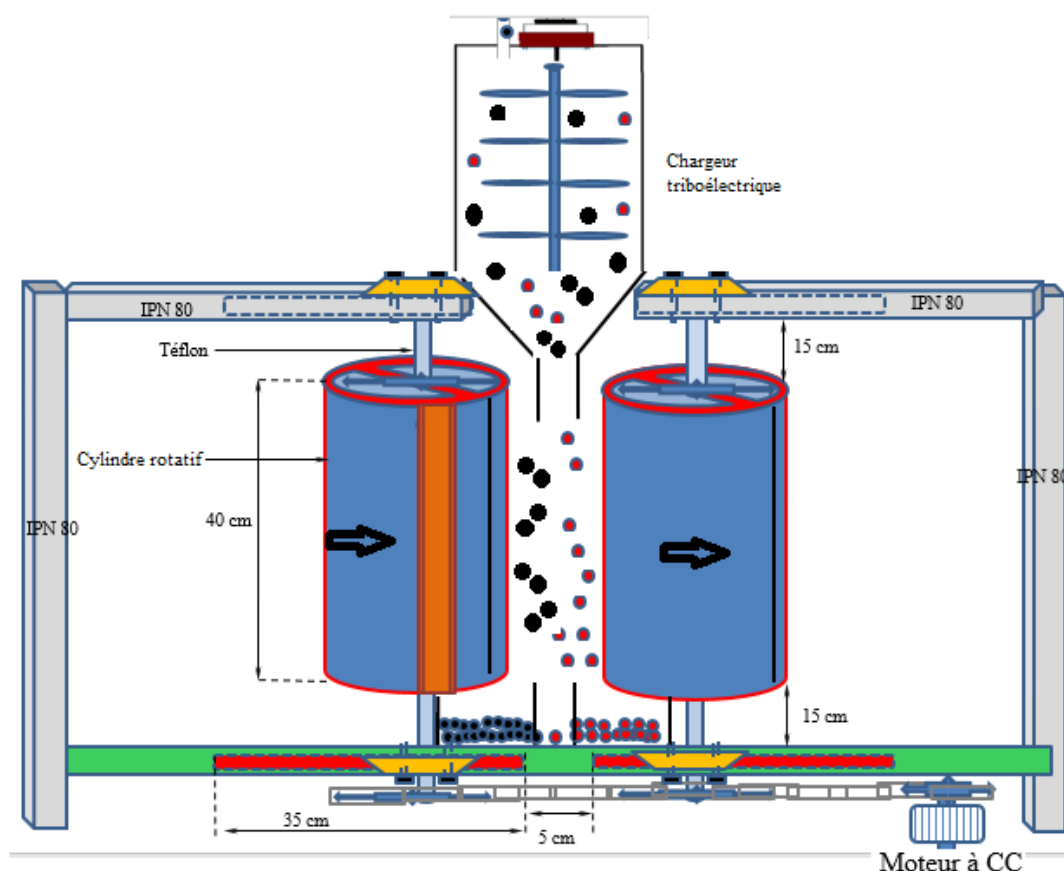


Figure II.1. Construction de base et principe de fonctionnement du nouveau séparateur à électrodes rotatifs

Un ensemble des modèles physiques combinés a été élaboré pour prévoir les trajectoires des particules dans ce séparateur électrostatique à électrodes cylindriques tournantes ou un choix des paramètres cinématiques de la particule a été effectué afin de définir la meilleure gamme de particules isolantes à séparer. A la fin une série de simulations a été effectuée pour prévoir les trajectoires des particules en fonction des paramètres choisis.

II.1 Programmes informatiques de modélisation et de simulation

II.1.1 Introduction au Logiciel Matlab

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un

problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique.

L'écran de base comprend l'écran de contrôle Command Windows ainsi que des fenêtres complémentaires permettant de suivre le fonctionnement général d'une application. Les instructions frappées (ou collées) dans la Command Windows s'exécutent directement.

Matlab est un logiciel interprété (donc sans phase préliminaire de compilation) qui exécute les opérations demandées séquentiellement, avec possibilité de boucle, test et saut. Il ne manipule que des données numériques et ne sait effectuer aucun calcul formel à priori.

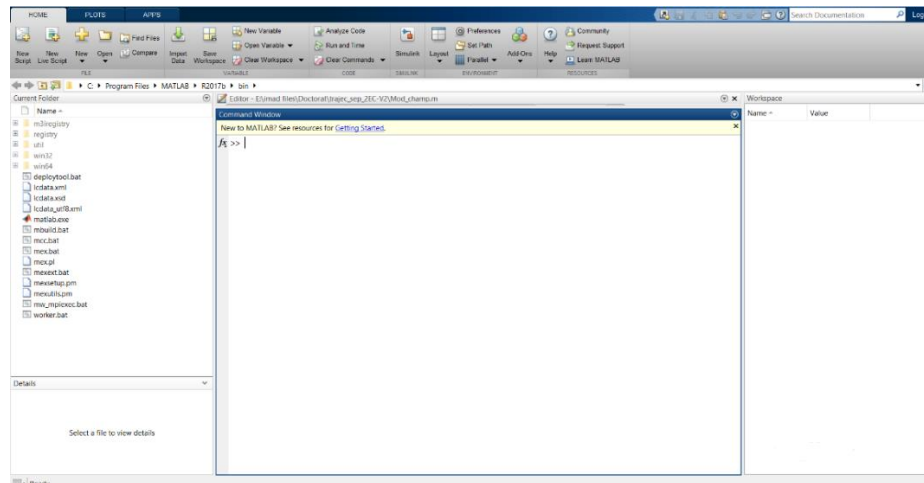


Figure II.2. Interface de Base du Logiciel Matlab

II.1.2 Introduction au logiciel SolidWorks

Le logiciel de CAO SOLIDWORKS est une application d'automatisation de la conception mécanique qui permet aux d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des caractéristiques et des dimensions et de produire des modèles et des dessins détaillés. Dans cette étude nous avons utilisé SOLIDWORKS 2014 pour concevoir les différentes géométries cités ci-dessous.

SolidWorks permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D, ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation et se veut intuitif.

Le logiciel SolidWorks permet de :

- Concevoir des objets en 3D de manière très précise
- Développer des produits
- Faire une conception 2D
- Mettre en place des mises en plan 2D
- Estimation du cout de fabrication des objets

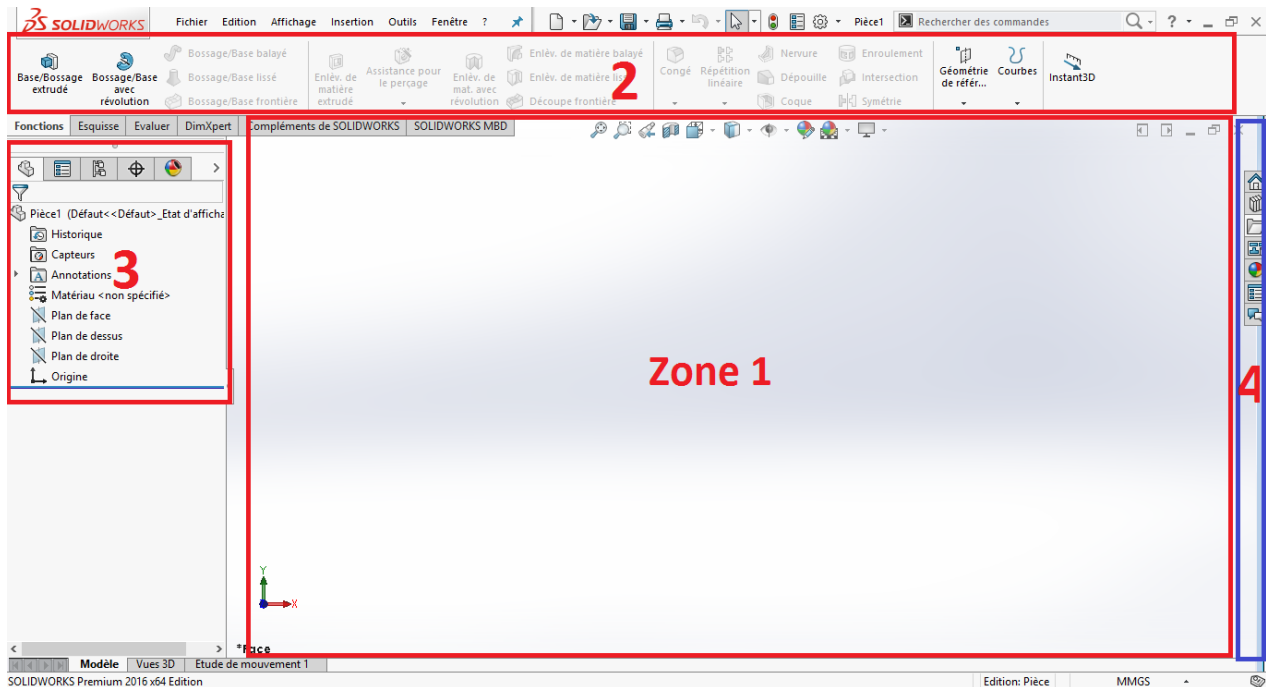


Figure II.3. Interface du logiciel SolidWorks

- **Zone 1 :**

La zone graphique vous permet de manipuler les pièces, les assemblages et les mises en plan. on trouve aussi dans cette zone le réticule qui va vous donner l'origine (0,0).

- **Zone 2 :** Gestionnaire de commandes

- **Zone 3 :**

Le panneau situé sur la gauche de la fenêtre SOLIDWORKS gère les conceptions de pièce et d'assemblage, les feuilles de mise en plan, les propriétés, les configurations et les applications de tierces parties. Le Gestionnaire de commandes donne accès aux outils SOLIDWORKS.

- **Zone 4 :**

Le volet des tâches permet d'accéder aux ressources, aux bibliothèques d'éléments de conception réutilisables et aux vues de SOLIDWORKS à faire glisser sur les feuilles de mise en plan, ainsi qu'à d'autres objets et informations utiles.

II.2 Modélisation géométrique de l'installation chargement et séparation par

SolidWorks

La modélisation géométrique de l'installation a été réalisé par le logiciel SolidWorks dédié à la conception des formes géométriques et mécaniques. Quatre éléments essentiels ont été conçus :

- 1- Le dispositif de chargement tribo-électrique,
- 2- Le moteur à courant continu entraînant les cylindres,
- 3- Les cylindres,
- 4- Les collecteurs des produits séparés.

II.2.1 Le dispositif de chargement tribo-électrique [60]

La conception du dispositif de chargement des matériaux granulaires constitue trois éléments essentiels :

- Le cylindre qui présente la chambre de chargement de matériaux granulaires (rayon : 60 mm ; longueur : 350 mm).
- Un axe de rotation qui porte quatre hélices coaxiales.
- Un moteur à courant continu d'entraînement lié à l'extrémité supérieure de l'axe portant les hélices.

Un assemblage primaire est effectué pour unir les trois parties dans un seul objet.

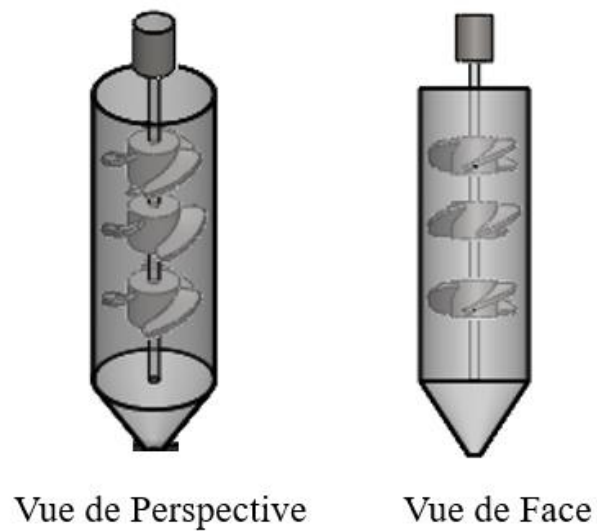


Figure II.4. Géométrie du dispositif de chargement triboélectrique conçu dans SolidWorks

II.2.2 Le moteur à courant continu entraînant les cylindres

La conception du moteur à courant continu dans le logiciel « SolidWorks » est plus ou moins difficile à cause des replis à la surface extérieure du moteur. Le moteur construit a les dimensions suivantes : longueur : 300 *mm* ; largeur : 180 *mm* ; hauteur : 185 *mm*, un engrenage de liaison est conçu pour assurer la liaison (moteur-cylindres).

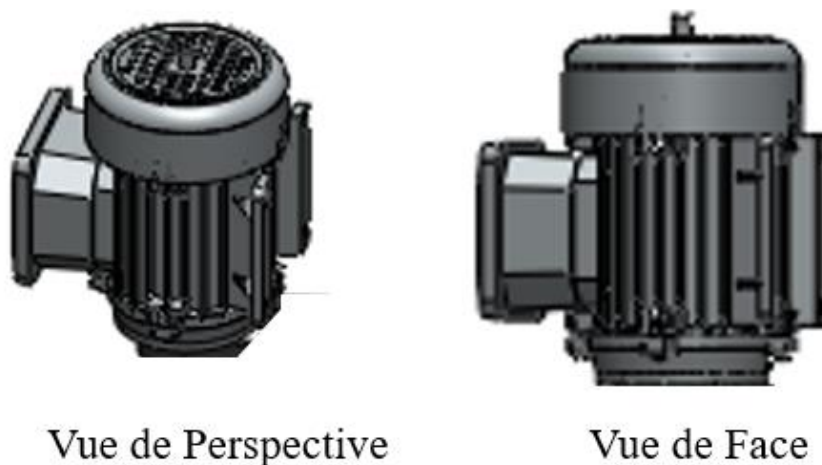


Figure II.5. Géométrie du moteur à courant continu réalisé dans SolidWorks

II.2.3 Les cylindres (électrodes)

Les deux cylindres sont conçus en se basant sur la forme circulaire, en faisant le dessin d'un cercle de rayon : 80 mm puis en fait l'extrusion du cercle en haut avec 350 mm de hauteur avec une distance de 250 mm par rapport au sol. Des trous de 20 mm chacun son formés à l'extrémité supérieure des deux cylindres afin que nous puissions les connecter à la chaine d'entraînement.

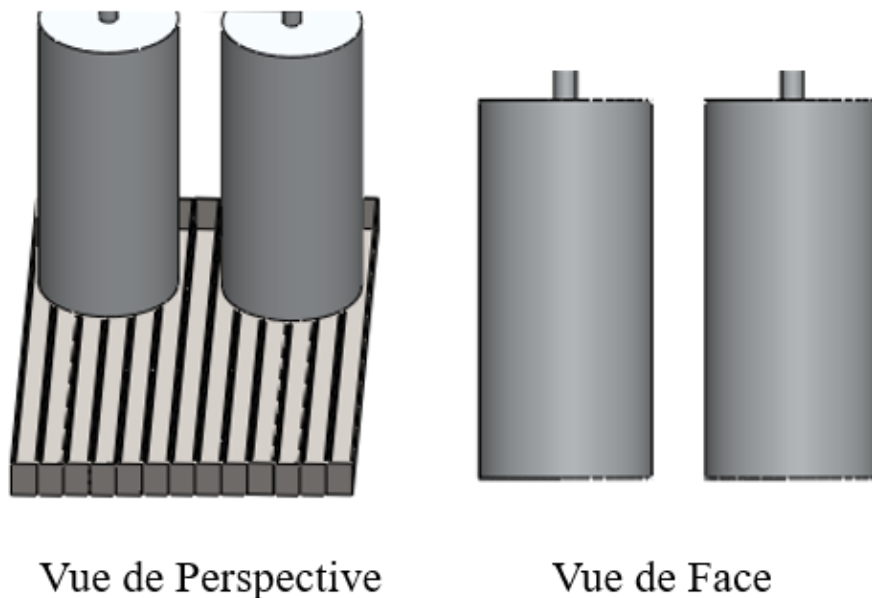


Figure II.6. Géométrie des deux cylindres réalisés dans SolidWorks

II.2.4 Les collecteurs des produits séparés

Le collecteur est un élément nécessaire qui est destiné à la récupération des produits granulaires après séparation. Pour assurer une bonne précision des masses récupérés, la taille des compartiments doit être identique.

Dans notre installation 14 collecteurs sont mis en place à la sortie de la zone de séparation (partie inférieure des cylindres). Les collecteurs ont une forme parallélépipédique avec les dimensions suivantes : longueur : 550 mm , largeur : 35 mm , hauteur : 45 mm .

Tous les parties sont assemblés à la fin formant la zone d'électro-séparation des dimensions : longueur : 550 mm ; largeur : 470 mm ; hauteur : 700 mm . Les 14 collecteurs sont divisés en trois parties:

- Partie de la récupération des granules attirées par l'électrode positive
- Partie de la récupération des granules attirées par l'électrode négative
- Partie de la récupération du produit mixte (non séparé)

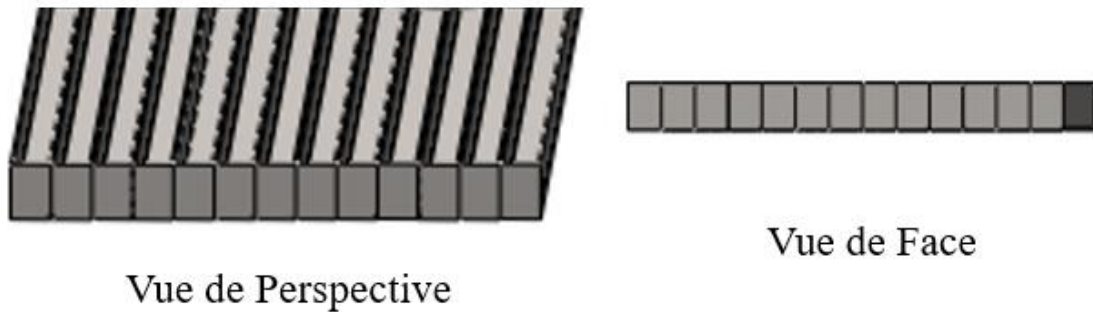


Figure II.7. Géométrie des collecteurs réalisés dans SolidWorks

II.3 Modèle physique utilisé dans l'étude

Le développement d'un modèle de simulation de trajectoire de particules dans un processus de séparation électrostatique nécessite des informations sur la magnitude et la direction du champ électrostatique dans la zone de séparation, la taille et les paramètres des particules, et la géométrie utilisée dans la simulation.

La résolution des équations qui régissent le système étudié a été effectuée en utilisant PDETOOL dans la bibliothèque MATLAB.

II.3.1 Présentation du ToolBox PDE

La boîte à outils PDE (Partial Differential Equation) fournit un environnement puissant et flexible pour l'étude et la résolution des équations différentielles partielles. Environnement puissant et flexible pour l'étude et la résolution d'équations différentielles partielles en deux dimensions spatiales et temporelles. Les équations sont discrétisées par la méthode des éléments finis (FEM). Méthode des éléments finis (FEM). Les objectifs de la PDE ToolBox sont de vous fournir des outils qui :

- Définit un problème d'EDP, c'est-à-dire définit les régions 2-D, les conditions aux limites et les coefficients d'EDP.

- Résoudre numériquement le problème d'EDP, c'est-à-dire générer des mailles non structurées, discrétiser les équations, et produire une approximation de la solution.
- Visualiser les résultats

Le programme élaboré est constitué de plusieurs sous programmes (orienté objet) dont cette méthode permet de faciliter la résolution des équation ordinaires complexes et présente une meilleure pratique dans le domaine de l'ingénierie.

II.3.2 Modèle du champ électrostatique

La déviation des particules granulaires isolants dans un séparateur électrostatique nécessite l'existence du champ électrique dans la zone d'électro-séparation. Un modèle physique du champ électrique est utilisé pour remplir les valeurs du champ électrique nécessaire au domaine d'étude.

Dans le cas d'une charge d'espace négligeable (nuage électronique inter-électrodes négligeable) la distribution du potentiel peut être obtenue par la résolution de l'équation de Laplace définie par la relation (II.1) :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Il est évidemment impossible de résoudre numériquement l'équation de Laplace en tout point de l'espace : on se restreint à un domaine D fini, discrétisé sous forme d'une grille de dimensions $N_x \times N_y$.

Les conditions aux limites étant fixées, on utilise ensuite une méthode de résolution par éléments finies. L'idée est exactement la même que pour résoudre une équation différentielle par la méthode d'Euler : les dérivées spatiales du potentiel sont approximées par des différences entre les valeurs du potentiel entre deux points voisins de la grille [61].

La nouveauté par rapport à la méthode d'Euler est la résolution itérative : partant d'une « condition initiale » arbitraire (valeur de V fixée arbitrairement et « aléatoirement » en tout point de la grille), on améliore par récurrence la précision du résultat pour qu'il soit conforme à l'équation de Laplace [62].

II.3.3 Discrétisation de l'équation de Laplace

On rappelle qu'on se place sur une grille à deux dimensions de taille $N_x \times N_y$, schématisée figure II.2. Le pas spatial de la grille est noté δ , si bien que le point (i, j) de la grille a pour coordonnées $(x_i, y_j) = (i\delta, j\delta)$. La discrétisation se fait dans un plan 2d puis on fait la généralisation de la solution.

À trois dimensions cartésiennes, le laplacien s'écrit :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \Delta V \quad (\text{II.2})$$

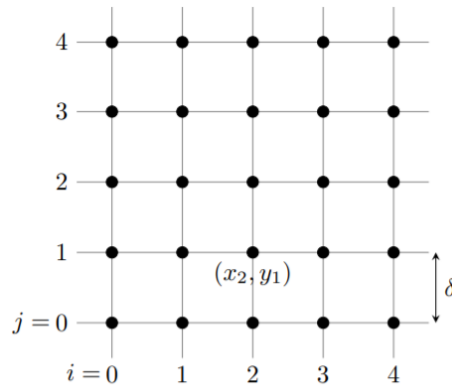


Figure II.8. Grille de Discrétisation 2D.

Lorsqu'il vérifie l'équation de Laplace, le potentiel en un point est donc une moyenne des potentiels aux points voisins : c'est ainsi qu'il sera possible de construire par récurrence les valeurs de V en tout point de la grille en partant des bords où les conditions aux limites sont connues.

II.3.4 Méthode des éléments finis

Les codes éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels. Les outils d'aide à la modélisation devenant de plus en plus perfectionnés, l'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée et peut sembler de moins en moins une affaire de spécialistes.

II.3.4.1 Démarche de la méthode des éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle éléments finis, qui sont détaillées par la suite, sont les suivantes :

1. Discrétisation du milieu continu en sous domaines ;
2. Construction de l'approximation nodale par sous domaine ;
3. Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème ;
4. Assemblage des matrices élémentaires ;
5. Prise en compte des conditions aux limites ;
6. Résolution du système d'équations ;

Les étapes précédentes nécessitent l'utilisation d'un logiciel capable de résoudre un problème compliqué de grande taille par la méthode des éléments finis. Tout logiciel de calcul par la méthode de éléments finis contient les étapes suivantes (MATLAB dans notre cas).

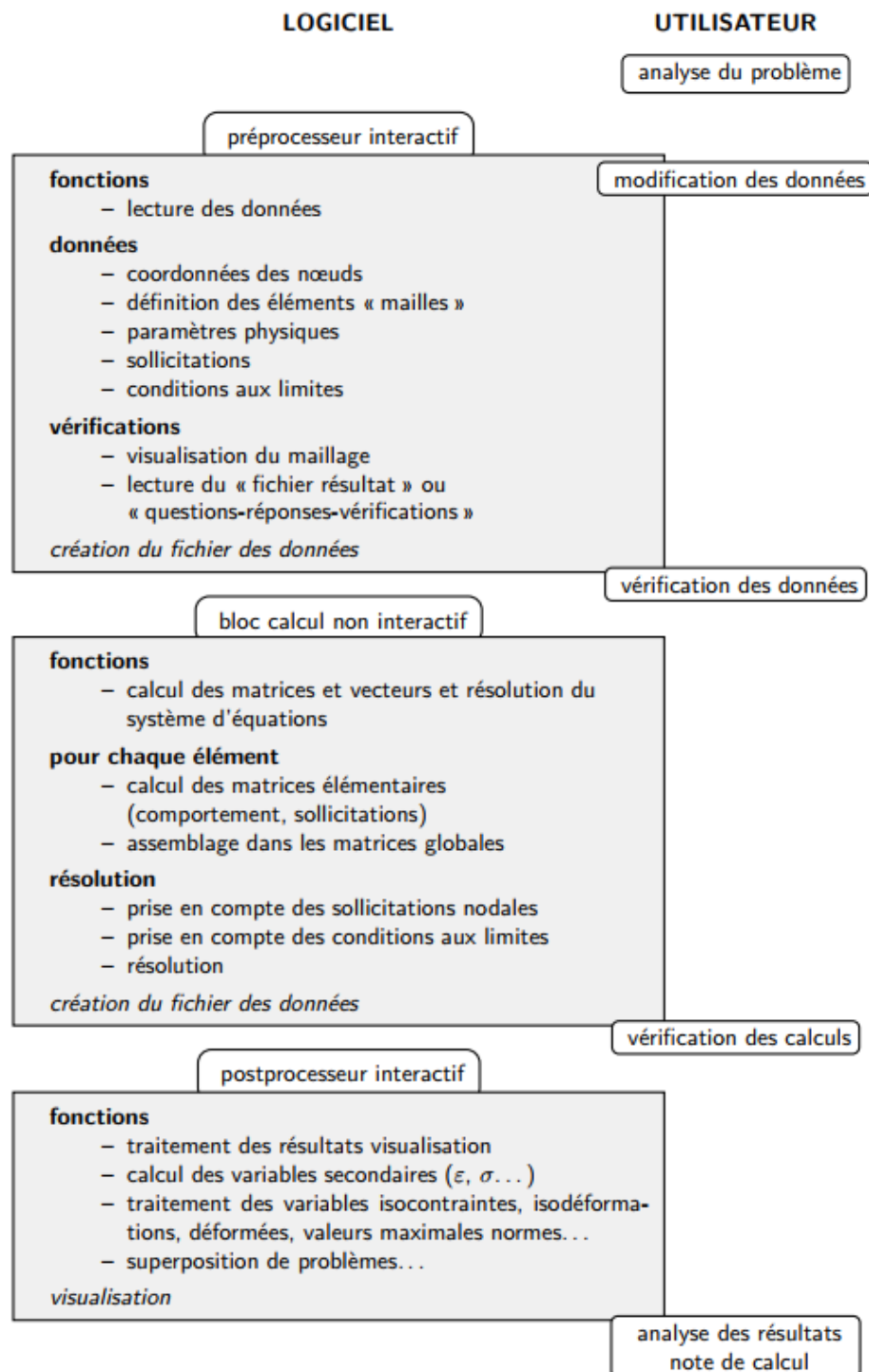


Figure II.9. Organigramme d'un logiciel éléments finis

II.3.5 Equation de mouvement

La modélisation du mouvement d'une particule à la zone de séparation consiste à faire la combinaison de plusieurs phénomènes physiques à chaque instant de déplacement de la particule. Les grandeurs sont présentées par : la position, la vitesse, et l'accélération de la particule.

Deux types de mouvement sont pris en compte lors du mouvement de la particule :

- Mouvement libre (en chute libre)
- Mouvement sous contraintes

On s'intéresse dans cette étude au mouvement libre à la présence des forces à grande portée (forces électrostatiques). La trajectoire des particules dans la zone de séparation électrostatique est obtenue en résolvant l'équation (II.3) [63].

$$m \frac{d\vec{V}(x, y, z)}{dt} = \vec{f}_g + \vec{f}_{el}(x, y) - \vec{f}_{air}(v_x, v_y, v_z) \quad (II.3)$$

L'équation (II.3) tient compte de l'influence de la force gravitationnelle $\vec{f}_g$, de la force électrostatique $\vec{f}_{el}(x, y)$ et de la force de résistance de l'air $\vec{f}_{air}(v_x, v_y, v_z)$.

II.3.5.1 La force de gravitation

Au point d'injection et à l'entrée de la zone de séparation les particules seront soumises à la force de gravitation terrestre :

$$\vec{F}_g = m \vec{g} \quad (II.4)$$

m : représente la masse de la particule ;

$\vec{g}$ représente le vecteur gravitation dont son module est ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

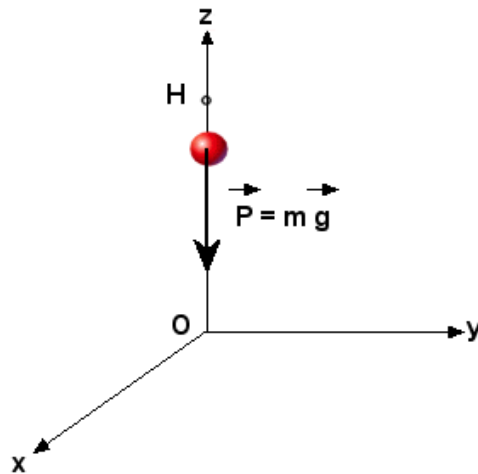


Figure II.10. Représentation d'une particule en chute libre

II.3.5.2 La force Electrostatique

Dans cette simulation, la force électrostatique appliquée à une particule est prédite par un modèle simple défini par l'équation (II.5):

$$\vec{F}_{el}(x, y) = q \vec{E}(x, y) \quad (II.5)$$

Où q [C] est la charge de la particule acquise par effet triboélectrique et $\vec{E}(x, y)$ le champ électrostatique généré dans la position occupée par la particule.

Le choix du modèle (5) repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La charge de la particule est localisée au centre de gravitation de la particule, qui est considérée dans ce cas comme un point géométrique.
- La charge q de la particule est considérée constante le long de la simulation.
- L'impact entre la particule et le système d'électrodes n'a aucun effet sur la charge de cette dernière. En effet, un impact à vitesse faible peut changer légèrement la charge mais sans impact visuel sur la trajectoire.
- La charge des particules dans la zone de séparation électrostatique ne provoque aucune distorsion du champ électrostatique.

II.3.5.3 La force de résistance de l'air

Suivant la loi de Stokes, la force de frottement appliquée à une particule sphérique est proportionnelle à sa vitesse de déplacement :

$$\vec{F}_{el}(x, y) = -6 \pi \eta_{air} r \vec{V} \quad (II.6)$$

Où r représente le rayon de la particule sphérique ; $\vec{V}$ la vitesse de la particule et η_{air} le coefficient de viscosité dynamique de l'air. Pour simuler la force appliquée à une particule de forme irrégulière, r est considéré comme le rayon du corps sphérique de surface équivalente.

II.3.6 Modèle mécanique de collision particule-électrode

Dans cette étude, la collision entre la particule et l'électrode est considérée comme un choc parfaitement élastique dont l'énergie cinétique est conservée et aucune déformation se produit à la surface des matériaux.

L'impact de la particule sur la surface de l'électrode se produit avec un vecteur vitesse v_i dont les composantes vn_i et vt_i sont portées par les axes X et Z (Figure II.12). D'autre part, la particule est réfléchiée par l'électrode avec un vecteur vitesse v_r porté par les 3 axes X, Y et Z . Notons que la composante selon la direction Y , qui est imposée par la rotation du cylindre, est responsable de l'atténuation de la vitesse selon l'axe horizontal X entre les deux électrodes empêchant ainsi la particule réfléchiée de tomber dans le compartiment de l'autre produit.

Les cylindres en rotation étant supposés rigides, le cylindre peut être divisé en un grand nombre de portions plus petites, chaque portion ayant une vitesse de translation autour de l'axe de rotation du cylindre. De plus, comme la particule a une taille négligeable par rapport au cylindre, sur la base des conditions aux limites cinétiques et de réflexion, chaque particule qui entre en collision avec l'électrode inversera sa vitesse par deux composantes :

- Une composante sur l'axe X , perpendiculaire à la surface du cylindre.
- Une composante sur l'axe Y , parallèle à la surface du cylindre.

Ainsi, la vitesse angulaire ω est liée à la grandeur de la vitesse de translation v_t par la relation suivante:

$$v_t = \omega \cdot r \quad (II.7)$$

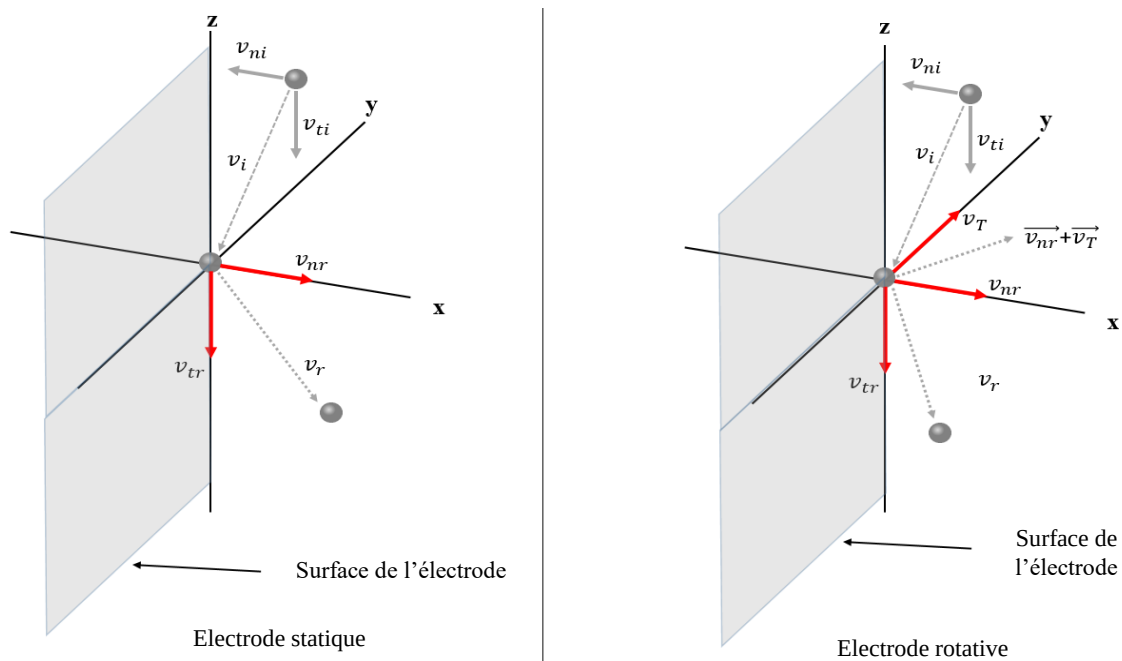


Figure II.11. Schéma descriptif de la collision particule-électrode statique et rotative

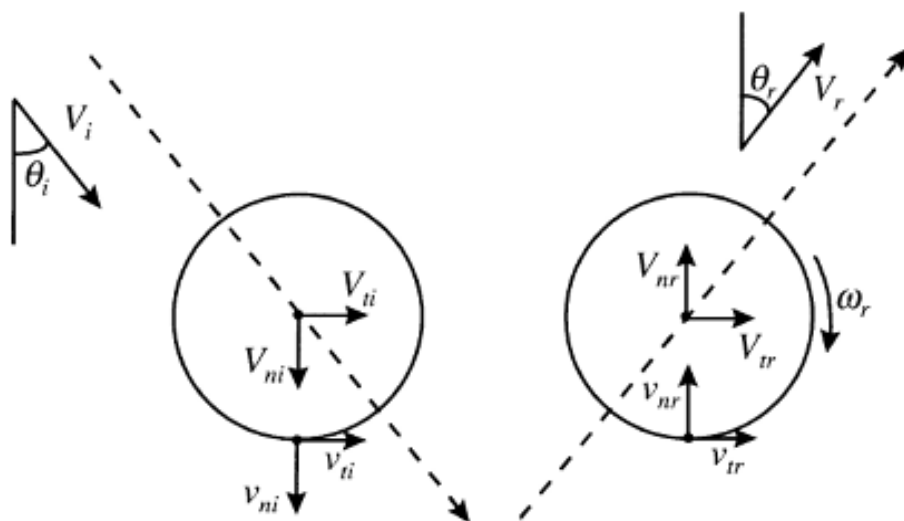


Figure II.12 : schéma 2d du phénomène de collision

II.4 Programme de simulation de la trajectoire

Dans notre étude nous avons utilisé le logiciel MATLAB, l'utilité d'utiliser ce logiciel est les méthodes diverses de résolution des équations différentielles en utilisant la méthode des éléments finis. MATLAB dispose une bibliothèque de fonctions (MATLAB TOOLBOX) qui permet la modélisation numérique de plusieurs phénomènes mécaniques, et électrostatiques.

La modélisation du phénomène électrostatique de la séparation des matériaux granulaires isolants nécessite l'acquisition de plusieurs paramètres géométriques et physiques avant la résolution finale de l'équation de mouvement.

II.4.1 Description de la géométrie

Pour la modélisation de la géométrie composée de deux cylindres, une fonction géométrique tridimensionnelle a été programmée en utilisant les paramètres réels des cylindres en utilisant un ensemble de surface, volumes, et des lignes. La fonction « *trisurf* » permet le dessin d'une fonction triangulaire 3D définie par les point vecteurs x , y , z et une matrice de connexion triangulaire. Enfin, en utilise une fonction « *Plot3* » pour afficher la figure II.13 dessinée en 3D.

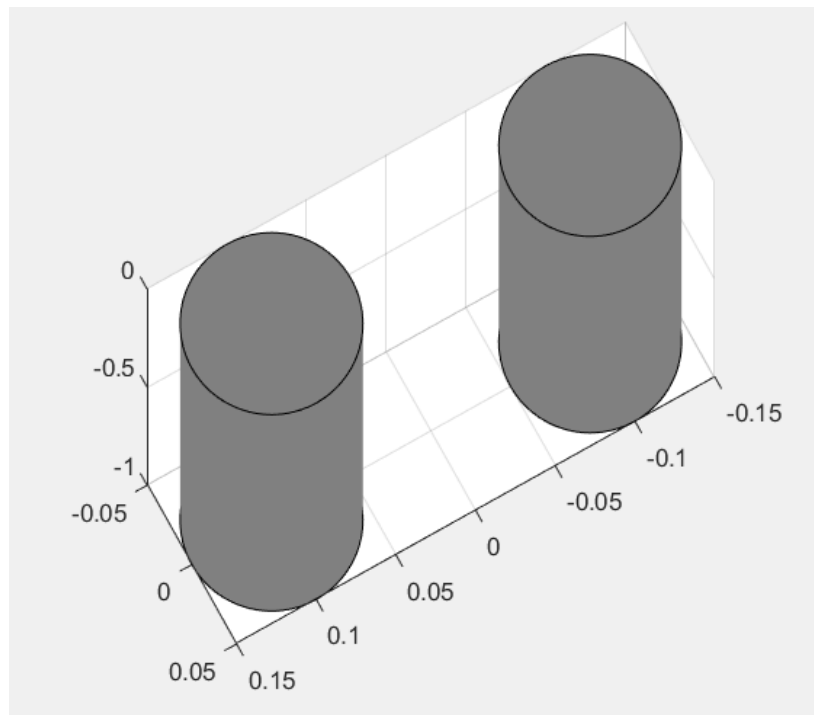


Figure II.12. Géométrie des deux électrodes cylindriques réalisées dans le modelleur géométrique

II.4.2 Maillage de la géométrie

Le maillage de la géométrie consiste à définir un ensemble des éléments pour former un domaine d'étude. La forme du maillage doit être convenable à la forme et les limites du l'objet à discrétiser. Les conditions aux limites appliqués sont :

- Conditions de Neumann appliqués à la zone qui entoure les deux cylindres (zone de calcul).
- Conditions de Dirichlet appliqués à la surface extérieure des cylindres.

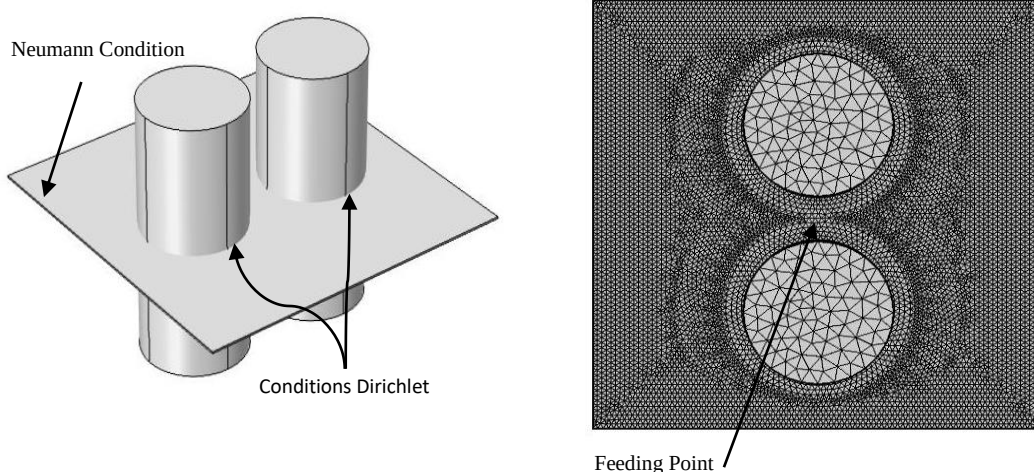


Figure II.13. Conditions aux limites appliqués et maillage de la géométrie

La discrétisation géométrique consiste à procéder à un découpage du domaine continu en sous domaines :

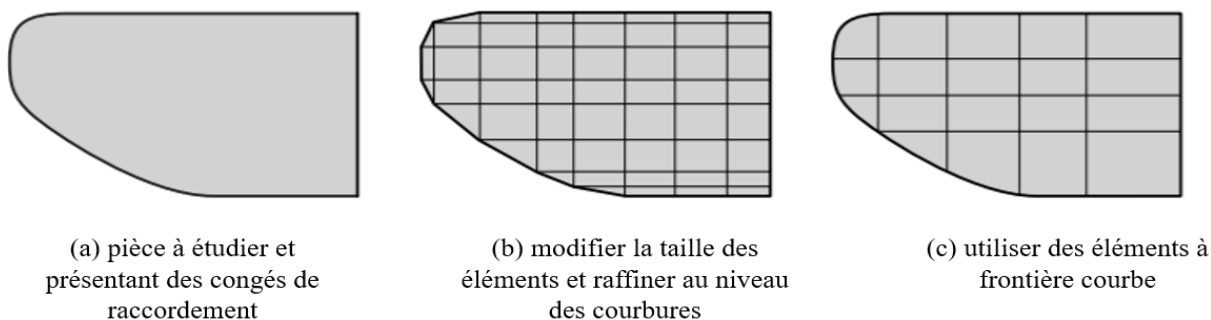


Figure II.14. Les erreurs de discrétisation géométrique

Lorsque la frontière du domaine est complexe, une erreur de discrétisation géométrique est inévitable. Cette erreur doit être estimée, et éventuellement réduite en modifiant la forme ou en diminuant la taille des éléments concernés comme proposé sur la (figure II.15). Sur chaque élément nous allons chercher à définir une approximation de la fonction solution.

Après discrétisation du domaine d'étude, un module de calcul et d'affichage est élaboré pour déterminer et visualiser les différentes grandeurs tel que les forces appliquées, la position, et la charge d'une particule à chaque instant t .

II.4.3 Déroulement de la méthode FEM dans un problème électrostatique

Pour réaliser une étude par éléments finis, il faut que les objectifs de l'étude soient bien définis [64]. Le cadre de l'étude, c'est-à-dire le temps et les moyens disponibles, doit être compatible avec les objectifs et la précision cherchée. Supposons toutes ces conditions remplies, l'étude proprement dite est organisée de façon logique selon les étapes suivantes :

II.4.3.1 L'analyse du problème

Cette analyse doit fixer les paramètres du calcul et conduire à la réalisation d'un maillage. Cette phase basée sur l'expérience personnelle acquise et dépend de nombreuses considérations. La difficulté essentielle est de trouver un bon compromis entre les paramètres propres au problème et ceux relatifs à l'environnement de travail. L'analyse du problème nous conduit à préciser un certain nombre d'hypothèses, et à effectuer des choix qui conditionnent les résultats.

II.4.3.2 Choix du modèle

En calcul des structures, les plus classiques sont de type : poutre, élasticité plane, axisymétrique, coques mince ou épaisse, tridimensionnel. Ces modèles mathématiques correspondent des familles d'éléments finis.

II.4.3.3 Choix du type d'élément

Il est fonction de la précision voulue, de la nature du problème, mais aussi du temps disponible. On choisira les éléments les mieux adaptés dans les familles disponibles.

II.4.3.4 Choix du maillage

Il dépend essentiellement de la géométrie, des sollicitations extérieures, des conditions aux limites à imposer, mais aussi des informations recherchées : locales ou globales. Sans oublier bien entendu le type d'outils dont on dispose pour réaliser ce maillage.

II.4.3.5 Exécution du calcul

Ce bloc, le plus coûteux en temps machine est souvent exécuté en tâche de fond. Un fichier de résultats permet de vérifier que les différentes phases de calculs se sont correctement déroulées :

- Interprétation des données et vérification des données manquantes.
- Construction des matrices, espace utile pour les gros problèmes.
- Singularité de la matrice raideur, problème de conditions aux limites ou de définition des éléments.
- Convergence, nombre d'itérations, etc.

II.4.4 Processus de simulation de la trajectoire

La simulation de la trajectoire d'une particule dans un séparateur à électrodes cylindriques rotatives est effectuée par la résolution de l'équation de mouvement (II.3), l'objectif de fragmenter le programme de simulation en sous-programmes est de faciliter et diminuer le temps de calcul. Les étapes de simulation sont les suivantes :

- Initialisation des paramètres contrôlables.
- Résolution de l'équation de mouvement.
- Prédiction du point d'impact (particule/électrode)
- Extraction des paramètres de la particule au point de collision
- Calcul de la position finale et la sauvegarde des données dans un fichier.

L'organigramme suivant résume les points précédents :

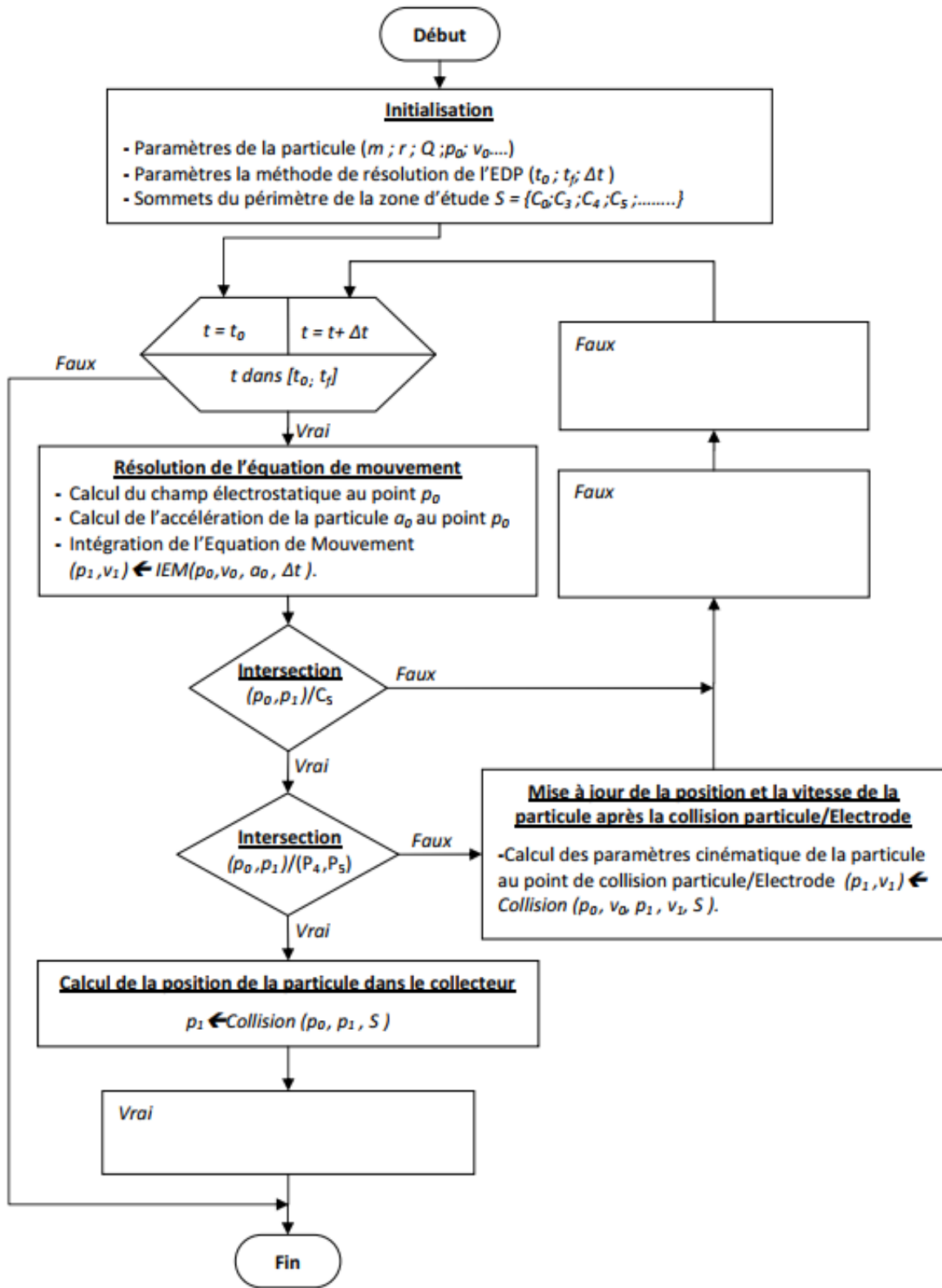


Figure II.15. Organigramme du programme de simulation

II.4.4.1 Initialisation des paramètres contrôlables

Avant l'exécution de la simulation, un ensemble des paramètres est nécessaire pour atteindre l'objectif du programme. Dans cette étude un ensemble des paramètres sont définis et communiqués au fichier "*Trajectoire*" pour initialiser le calcul.

L'ensemble des paramètres définis est comme suite :

1. Le module de gravitation terrestre
2. Le temps de simulation et le pas de calcul
3. Le niveau de collecteur par rapport à l'extrémité inférieure des cylindres
4. Le rayon équivalent de la particule en (m)
5. Le rapport charge/masse de la particule en (nC/g)
6. La masse de la particule en (kg)
7. La vitesse et la position initiale de la particule
8. L'évaluation du champ E au point initial
9. Les paramètres de l'air
10. Le coefficient de restitution

II.4.4.2 Résolution de l'équation de mouvement

L'équation de mouvement dite de Newton (II.3) est une équation différentielle ordinaire avec condition initial. Ce type d'équations peut être résolu par plusieurs méthodes différentes. Ces méthodes fournissent généralement une solution approchée de l'équation de mouvement en certains points $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ de l'intervalle d'intégration.

La méthode la plus simple utilisé actuellement est connue sous le nom de la méthode d'Euler. L'application de cette méthode exige la présentation de l'équation de mouvement sous forme de deux équations différentielles ordinaires du premier ordre :

$$\frac{dv}{dt} = a(t) \quad (II.3.1)$$

$$\frac{dp}{dt} = v(t) \quad (II.3.2)$$

D'où : a, v, p représentent respectivement l'accélération, la vitesse et la position de la particule. Le but de la méthode d'Euler consiste à déterminer la valeur de v_{n+1}, p_{n+1} à l'instant $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ à partir des valeurs de a_n, v_n, p_n à l'instant t_n . Le schéma itératif de cette méthode est obtenu à partir du développement de (II.3.1) et (II.3.2) en série de Taylor :

$$v_{n+1} = v_n + a_n \Delta t \quad (\text{II.3.1.1})$$

$$p_{n+1} = p_n + v_n \Delta t \quad (\text{II.3.2.1})$$

La méthode d'Euler-Cromer [65] est obtenue par une simple modification du schéma itératif (II.15). Cette méthode est représentée par le système d'équations (II.7) :

Dans cette étude la méthode de résolution de l'équation de mouvement est implantée sous forme d'une équation MATLAB. L'exécution de la fonction dans chaque itération exige la disponibilité l'accélération a_n , la vitesse v_n et la position p_n de la particule à l'instant t_n . La fonction renvoie la valeur de la vitesse v_{n+1} et la position p_{n+1} à l'instant t_{n+1} .

Une autre méthode peut être utilisée pour améliorer les résultats obtenus par la méthode d'Euler-Cromer cette méthode consiste à utiliser la vitesse moyenne dans chaque intervalle du temps pour obtenir la nouvelle position de la particule. Cette méthode est connue sous le nom de l'algorithme du point milieu.

La résolution numérique de l'équation différentielle (3) nécessite la disponibilité de certaines informations sur la position et la vitesse initiales des particules qui sont spécifiées par les équations suivantes :

$$x^{n+1} = x^n + v_x^{n+1} \cdot \Delta t \quad (\text{II.7.1})$$

$$y^{n+1} = y^n + v_y^{n+1} \cdot \Delta t \quad (\text{II.7.2})$$

$$z^{n+1} = z^n + v_z^{n+1} \cdot \Delta t \quad (\text{II.7.3})$$

$$v_x^{n+1} = v_x^n + a_x^n \cdot \Delta t \quad (\text{II.7.4})$$

$$v_y^{n+1} = v_y^n + a_y^n \cdot \Delta t \quad (\text{II.7.5})$$

$$v_z^{n+1} = v_z^n + a_z^n \cdot \Delta t \quad (\text{II.7.6})$$

II.4.4.3 Prédiction du point d'impact

Lors de son déplacement dans la zone inter-électrodes la particule sera exposée à de nombreux collisions avec les électrodes, dans la simulation numérique cette collision est considérée comme une contrainte si la particule dépasse les limites physiques de l'électrode.

Un module de collision sera exécuté chaque fois cette condition est satisfaite pour l'estimation des différents paramètres cinématiques de la particule au moment d'impact. La figure (II.17) présente l'intersection de la trajectoire de la particule avec l'électrode.

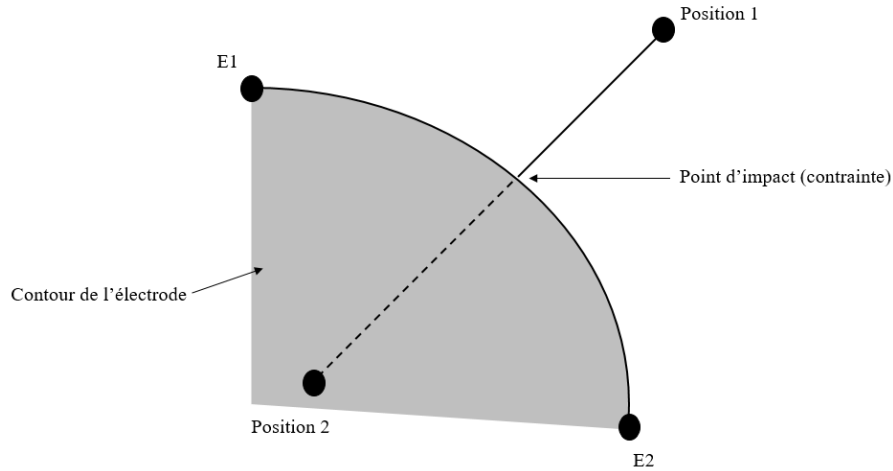


Figure II.16. Intersection de la trajectoire de la particule avec les limites de l'électrode

Lorsqu'une particule entre en collision avec l'électrode le programme collision s'exécute et calcule les quantités suivantes :

$$\begin{aligned} dx &= A_x + B_x & dx_1 &= P_{1x} + A_x & dx_2 &= P_{2x} + B_x \\ dy &= A_y + B_y & dy_1 &= P_{1y} + A_y & dy_2 &= P_{2y} + B_y \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

La quantité $W_1 = (dx dy_1 - dy dx_1)$ et $W_2 = (dx dy_2 - dy dx_2)$ possèdent des signe opposé lorsque P1 et P2 se trouvent dans deux cotés différents par rapport à la ligne AB. Donc lorsque la particule traverse la contrainte (Si) la quantité $W_1 \cdot W_2$ prend une valeur négative (c'est-à-dire $W_1 \cdot W_2 \leq 0$). Dans ce cas le module intersection renvoi l'indice de la contrainte violée [66].

II.4.4.4 Choix des paramètres de la particule

Les paramètres d'une particule dans une simulation numérique doivent être choisies à la base des produits granulaires présents dans laboratoire. Les mélanges granulaires présents dans le laboratoire sont de diverses tailles, et le choix du meilleur intervalle correspondant est indispensable afin de garantir une étude numérique de degrés d'erreur acceptable.

L'adaptation du modèle numérique a été effectuée en calculant la moyenne entre trois tailles (grande, petite, et moyenne), de même cette procédure a été suivie dans l'évaluation du rapport charge masse et le poids de chaque particule utilisée dans l'étude.

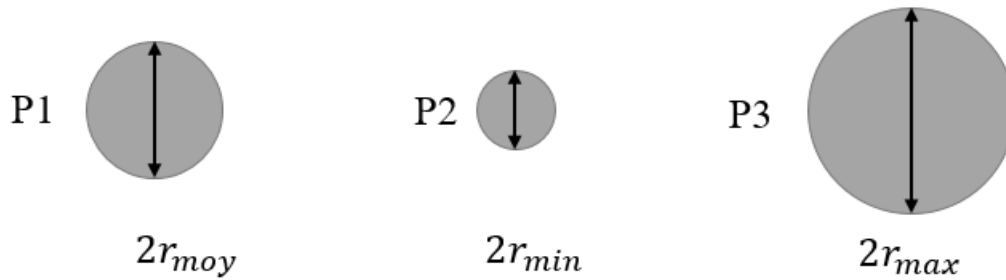


Figure II.17. Tailles des particules adaptées pour la simulation

Le développement d'un modèle de simulation de trajectoire de particules dans un processus de séparation électrostatique nécessite des informations sur la magnitude et la direction du champ électrostatique dans la zone de séparation. Dans ce mémoire, le modèle du champ électrostatique dans les deux configurations est obtenu en utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre l'équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{II.9})$$

Où $U [V]$ est le potentiel électrique. Une solution particulière de (II.1) est illustré à la Fig. II.19.

La solution satisfait les conditions aux limites de Dirichlet imposée à la surface des électrodes ($U = \pm 15 \text{ kV}$) et aux parois de la chambre de séparation ($U = 0 \text{ kV}$). (La figure II.19) représente le potentiel électrique dans un plan $z = -L/2 [m]$ où $L [m]$ est la longueur des électrodes de l'installation. Les courbes noires superposées à la distribution potentielle représentent le champ électrique $E [V / m]$ lignes calculé du potentiel électrique :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}U \quad (\text{II.10})$$

L'analyse des résultats montre que la valeur du potentiel comme ainsi que l'amplitude et la direction du champ électrostatique dans l'ensemble de plans $z = 0$ à $z = -L$ est presque identique. Par conséquent, pour réduire l'espace mémoire et le temps de calcul un modèle 2D de l'électrode le champ électrostatique obtenu dans le plan $z = -L/2$ est utilisé tout au long des autres étapes de la procédure de simulation.

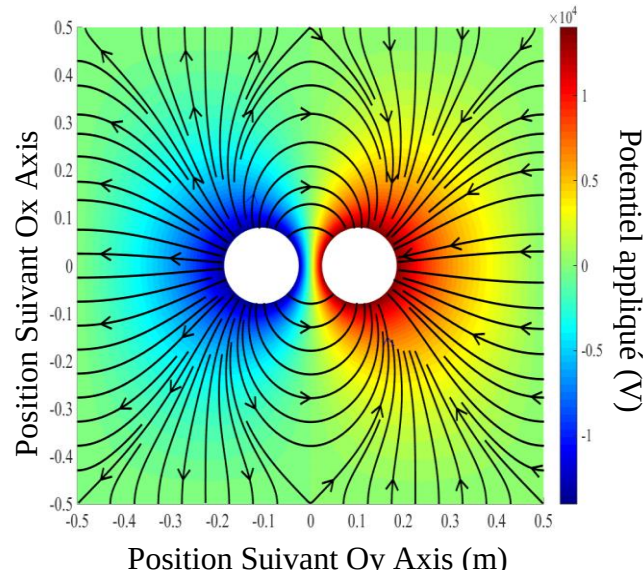


Figure II.19 : Répartitions des Lignes du champ électrique pour les deux électrodes cylindriques selon les axes Ox and Oy

La simulation des collisions particules-électrodes est considérée comme l'un des problèmes les plus compliqués dans cette étude. La résolution du problème commence généralement par la détection de la présence d'une violation de contrainte [67]. A partir de $p(t)$, $v(t)$ et $a(t)$ le solveur

calcule une nouvelle position $p(t + \Delta t)$. Si la particule se trouve à l'instant $t \in [t, t + \Delta t]$ dans une position invalide, le programme de simulation fournit une valeur de $(t + \Delta t)$ qui représente l'instant du premier contact. Afin de réduire la difficulté de calcul dans cette phase, on considère que la particule a une forme sphérique de rayon r_p .

II.4.4.5 Intégration de l'équation de mouvement

La résolution numérique de l'équation différentielle (II.3) présentée dans le chapitre II nécessite la disponibilité de certaines informations sur la position initiale et la vitesse des particules. Dans ce travail, l'intégration numérique de (II.3) est effectuée en appliquant la méthode Euler-Cromer représentée par le schéma itératif présenté dans le chapitre précédent. Cette méthode fournit une solution approximative de (II.3) aux instants $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ équidistants dans l'intervalle de simulation.

La méthode utilisée pour l'intégration de l'équation de mouvement est implémentée en tant que module dans le programme de simulation représenté par l'organigramme de la (Figure II.19). L'exécution du programme commence par l'initialisation des paramètres de simulation et importation du modèle de champ électrostatique par la méthode des éléments finis implémenté dans la bibliothèque d'outils PDE du logiciel MATLAB. Dans la deuxième étape, le programme de simulation calcule la grandeur du champ électrostatique dans la position actuelle de la particule. Cette valeur est obtenue à partir du modèle numérique du champ électrostatique. Ces informations sont utilisées dans le calcul de la force électrostatique appliqué à une particule. Dans cette position, la force de frottement entre les particules et l'air est calculé à partir de la vitesse actuelle de la particule. Le calcul de la somme des forces appliquées à une particule permet de calculer l'accélération de la particule à partir de (II.3). Dans l'étape suivante, le programme de simulation calcule la vitesse et la position de la particule après un temps d'intégration Δt par la méthode d'Euler-Cromer (II.3.1). Le calcul continue tant que l'heure actuelle est inférieure à la valeur finale. Temps de simulation. Le programme passe ensuite aux données du post-processeur étape.

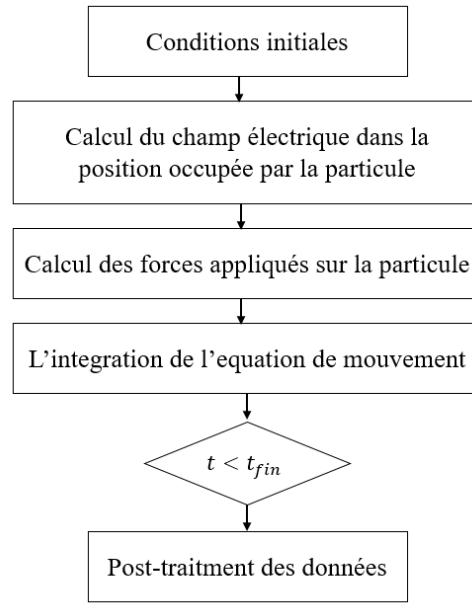


Figure II.18 organigramme du programme de simulation

II.5 Résultats de simulation

A $t = 0$, une particule passe par l'espace inter-électrodes, la position de cette particule est calculée le long de la trajectoire chaque Δt jusqu'à sa position finale dans la cellule collectrice où Δt est fixé à 0,02 s. Pour plus de commodité, les paramètres du modèle numérique ont été ajustés aux conditions expérimentales. La tension électrique a été fixée à 14 kV, la masse de la particule a été choisie dans l'intervalle $\{1/100, 1/12\} g$, la charge de la particule a été choisie dans l'intervalle $\{-35, 35\} \mu C/kg$, le rayon de la particule a été choisi dans l'intervalle $\{0.5, 5\} m$, les vitesses des particules le long des axes x et y ont été choisies dans l'intervalle $\{0,05, 0,2\} m/s$, les positions initiales des particules le long des axes x, y et z ont été choisies dans l'intervalle $\{0, [-0,005, 0,005], 0\} m$, les paramètres de l'air ont été pris comme $\rho_{air} = 1,292 kg/m^3$, $\mu_{air} = 1,82 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$.

La confrontation entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux a été effectuée en mesurant simultanément la masse m et la charge Q récupérées dans chaque cellule de récupération, 5 cellules sont considérées dans cette partie pour effectuer une validation numérique des résultats obtenus, l'intervalle de calcul le long de l'axe Ox a été divisé en 5 sous-domaines ; chaque domaine représente une seule cellule de récupération. Numériquement, la masse m et la charge Q ont été

quantifiées en sauvegardant les positions des particules et en ajoutant la masse et la charge de chaque particule à chaque fois qu'une particule tombe dans la même cellule.

Le champ électrique est une fonction linéaire de la tension électrique appliquée, son augmentation conduit à un champ électrique plus élevé. Les projections du champ électrique E sur les axes du domaine de simulation (x, y, z) ont permis de comprendre l'influence du champ électrique dont la direction est proportionnelle aux résultats calculés.

II.5.1 Influence du rapport Charge/Masse

La charge d'une particule est un paramètre déterminant pour une parfaite trajectoire de la particule. La figure II.20 montre la trajectoire d'une particule à différents rapports charge/masse, les résultats montrent que l'augmentation de la charge de la particule conduit à un rebond élevé qui entraîne la particule vers les cellules de récupération composites. Cependant, une élévation supérieure à $15nC/g$ entraîne une amélioration de la position finale de la collecte dans le plan (x, y) avec une position finale de particule dans l'intervalle $[-10, -5]$ pour un rapport charge/masse de $25nC/g$ en supposant que la charge de la particule reste la même tout au long de la simulation.

Une charge de $15nC/g$ conduit à un rebond excessif qui déplace la position finale de -5 à l'intervalle $[-5, 0]$ en passant de $10nC/g$ à $15nC/g$.

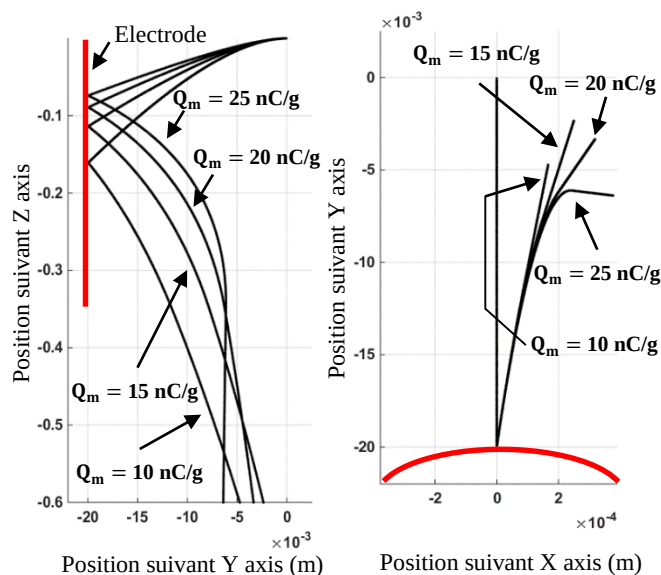


Figure II.19 Calcul des trajectoires de la particule en fonction de différents rapports Charge/Masse.

II.5.2 Influence du potentiel

Le potentiel appliqué aux électrodes présente un paramètre important dans la séparation électrostatique des matériaux granulaires, son influence est désirable pour avoir une bonne déviation de la particule vers le compartiment dont elle est distinguée. Les résultats nous montrent qu'une élévation du potentiel engendre une force électrostatique plus grande et par conséquent une meilleure déviation de la particule. Cependant un dépassement de la valeur optimale provoque des phénomènes indésirables tel-que la forte collision de la particule avec l'électrode, ceci a été amorti par l'effet mécanique de rotation. Le passage d'une tension de 10 kV à 14 kV conduit à une amélioration de la position finale, une tension de 18 kV est suffisante pour déplacer la particule du compartiment mixte au compartiment voisin qui lui est destiné.

Un ensemble de simulations a été exécuté à différentes valeurs de tension afin de comprendre l'effet du potentiel sur les trajectoires des particules tout en maintenant les autres paramètres à des valeurs correspondant à la moyenne de leurs intervalles de variation. (La figure II.21) présente la trajectoire caractéristique d'une particule et montre que le potentiel a un effet considérable et positif sur les trajectoires des particules dans le plan (x, y) , alors qu'un potentiel élevé conduit à une bonne direction vers la cellule de récupération, cependant, tout dépassement de la valeur optimale du potentiel conduit à un rebond significatif, on remarque également qu'un réajustement vers la

meilleure cellule de récupération pour une tension supérieure à 14 kV n'est considéré comme valide que si la charge de la particule reste constante tout au long de la simulation.

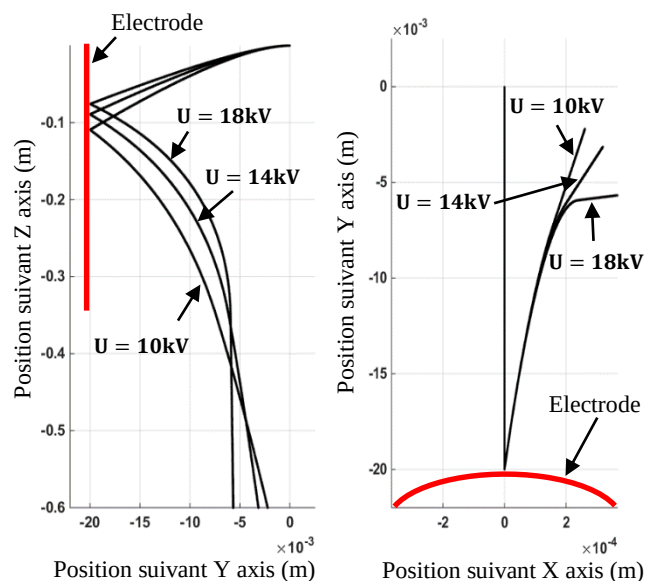


Figure II.20 Calcul des trajectoires des particules en fonction de différentes valeurs du potentiel.

II.5.3 Influence de la vitesse de rotation

Les trajectoires à différentes vitesses angulaires sont présentées sur (la Figure II.22). Depuis le point de départ, toutes les particules ont la même trajectoire jusqu'à ce qu'elles atteignent le point d'impact, la réorientation correspondante à chaque vitesse montre que la vitesse normale d'impact diminue avec l'augmentation de la vitesse angulaire ω ce qui montre clairement une atténuation du rebond avec l'électrode.

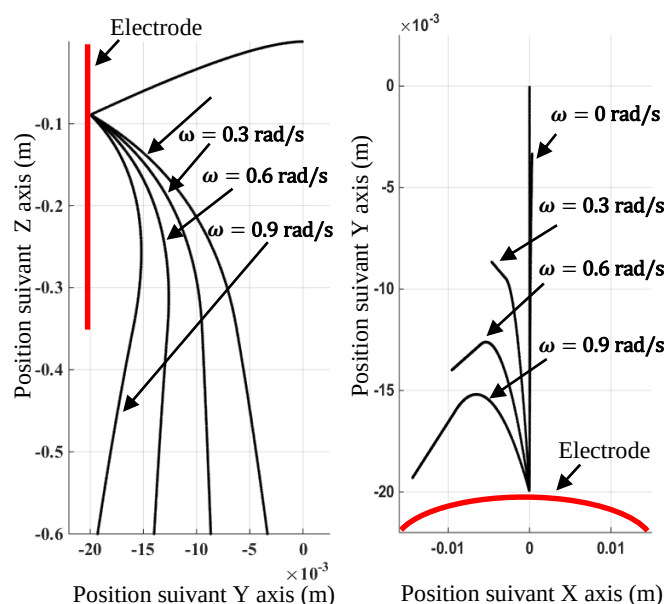


Figure II.21 Calcul des trajectoires des particules en fonction de différentes vitesses de rotation.

Dans série de simulations en variant la vitesse de rotation et fixant les autres paramètres, comme le montre la (Figure II.22), la trajectoire d'une particule a été calculée pour différentes valeurs de la vitesse de rotation des électrodes (0 *tr/min*, 30 *tr/min*, 40 *tr/min* et 45 *tr/min*). Les trajectoires des particules après impact sur l'électrode dépendent significativement de la vitesse de rotation des électrodes. Les trajectoires sont significativement " amorties " pour des vitesses de rotation élevées car la rotation du cylindre atténue la vitesse normale de la particule qui a alors plus de chance de tomber dans son compartiment prévu. Lorsque l'électrode est statique ($\omega = 0$), l'impact est plus fort provoquant un angle d'incidence plus important ; par conséquent, la particule aura plus de chance d'être récupérée dans le compartiment réservé à l'autre produit. A noter que l'effet de l'augmentation de la vitesse affecte également la position de la particule le long de l'axe X ; une plus grande rotation de l'électrode entraîne l'augmentation de l'abscisse le long de X ce qui n'a aucun effet sur la pureté des produits.

II.6 Conclusion

La simulation numérique lors d'une première phase de conception d'une nouvelle installation constitue un tournant important pour sa réalisation ; le recours aux outils informatique (Matlab et SolidWorks) est inévitable dans la prédiction des anomalies de fonctionnement et l'efficacité de son rendement.

Plusieurs variables ont été prises en considération dans notre étude, on cite notamment la charge massique des particules, leurs trajectoires, le niveau de haute tension et la vitesse de rotation des deux électrodes, l'ensemble des résultats obtenus nous a permis de se fixer sur la dimension des différents composants de ce nouveau séparateur à électrodes rotatives.

Le chapitre suivant sera consacré à la construction de cette nouvelle installation et le lancement des essais préliminaires.

Chapitre III : Conception de la nouvelle installation de séparation électrostatique et essais préliminaires

Chapitre III : Réalisation de la nouvelle installation de séparation à électrodes rotatives et essais préliminaires

Le résultat de la séparation électrostatique dépend de plusieurs paramètres contrôlables et incontrôlables, parmi eux il existe des paramètres qui sont liés à la nature du matériau et son rapport charge/masse tandis que d'autres sont liés à la géométrie de l'installation de séparation.

Multiplés installations ont été réalisés dans des laboratoires de recherche algériens et français dans le but d'améliorer l'efficacité de séparation électrostatique, ainsi que l'optimisation des géométries de ces installations.

Dans ce chapitre nous allons présenter les principes et considérations prises en compte lors de la réalisation de notre installation ou certaines phases de conception et de réalisation ont été aussi décrites.

III.1 Principes et originalité de la nouvelle installation expérimentale

L'idée de la conception de la nouvelle installation est née suite à un ensemble de constats sur le séparateur à chute libre et le séparateur à deux tambours horizontaux ou le premier exploite l'inertie des particules dans la séparation électrostatique mais présente l'inconvénient de la collision des particules fortement chargées sur les parois ou soient elles se collent sur les électrodes ou bien elles font des rebonds pour tomber dans les bacs non appropriés entraînant la dégradation de la pureté des produits récupérés à la sortie de la zone de séparation; pour le second séparateur , les particules collées sont enlevées par un racleur mais le poids de ces particules (surtout de grande taille) présente une grande contrainte pour leurs séparation.

La base de réalisation de ce nouveau séparateur devrait associer les avantages des deux séparateurs suscités à savoir avoir un champs électrique intense sur tout le long de la trajectoire des granules, exploiter l'inertie des particules dans la séparation et avoir des électrodes rotatives équipées de racleurs pour enlever les particules collées après séparation.

Le modèle qui peut grouper ces avantages est un nouveau dispositif de séparation électrostatique à base d'électrodes cylindriques rotatives verticales ou on va faire des études sur le comportement des particules à l'intérieur de la zone de séparation dont on cite principalement : la vitesse de rotation des cylindres, le niveau du potentiel appliqué, et le taux de charge des matériaux granulaires isolants.

Le nouveau dispositif de séparation électrostatique à deux électrodes cylindriques rotatives a été conçu et réalisé au sein de laboratoire d'électrostatique IRECOM en novembre 2018, à l'université de Sidi Bel Abbés, Algérie. Le dispositif expérimental (**Figure III.1, Figure III.2**) est composé de deux cylindres métalliques (*longueur : 35 cm, rayon du cylindre : 8 cm*), les deux cylindres sont maintenus par un support (*largeur : 63 cm, hauteur : 70 cm*) à l'intermédiaire de deux vises à creux métalliques.

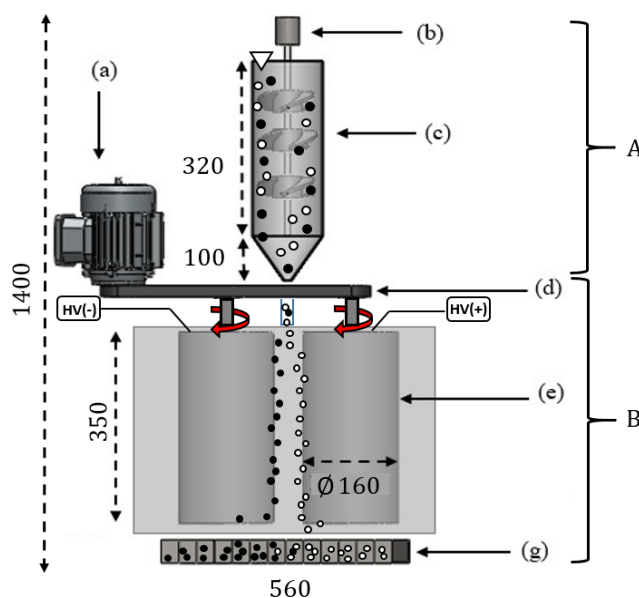


Figure III.1 Schéma descriptif (vue de face) du séparateur électrostatique (B) associé à un chargeur triboélectrique (A)

Les deux cylindres constituant le séparateur électrostatique, sont entraînés par un moteur à courant continu pour varier leur vitesse de rotation. La charge du mélange granulaire est assurée par un chargeur tribo-électrique aérodynamique qui a fait l'objet d'un brevet en juin 2016 [9], le mélange est introduit dans un entonnoir à la base supérieure du dispositif de chargement.

Les éléments présentés de (a) à (g) sont décrits comme suit et toutes les dimensions sont en *mm*:

(a) Moteur à courant continu entraînant les électrodes, (b) moteur à courant continu entraînant les hélices du tribo-chargeur, (c) chambre du chargeur tribo-électrique aérodynamique, (d) chaîne d'accouplement et d'entraînement des deux cylindres, (e) électrodes cylindriques rotatives, (g) Collecteurs des produits, (A) zone de chargement triboélectrique, (B) zone d'électro-séparation.

III.2 Etapes de réalisation de l'installation géométrique

Les phénomènes liés au processus de la séparation électrostatique dépendent fortement de l'environnement (température et humidité), taille des particules et de leurs chargements qui sont eux aussi liés aux nombres de collisions entre matériaux granulaires eux-mêmes et entre les granules avec les parois de l'installation ou plusieurs études ont déjà fait l'objet [10].

La construction mécanique constitue un tournant important lors de la réalisation de cette nouvelle installation d'électro-séparation ou l'alignement et les fixations doivent être parfaites car il y a des éléments mobiles et des accouplements ou les ajustements sont nécessaires.

Notre étude et l'évaluation de l'effet mécanique se base sur la rotation des deux cylindres ou plusieurs phénomènes apparaissent doivent être suivis tel que l'influence la trajectoire des particules dans cette installation, le niveau de tension appliqué, le taux de charge des matériaux granulaire ainsi que leurs vitesses initiales.

III.2.1 Réalisation de l'installation

Le séparateur est composé de deux cylindres verticaux en Inox fixés sur un support isolant par des paliers afin d'assurer l'uniformité de leurs rotations (figure III.2). L'installation utilisée pour effectuer les expériences est représentée dans la figure III.2. Elle peut être divisée en quatre parties distinctes : la partie d'alimentation en HT et les moteurs d'entraînement, la partie de chargement tribo-électrique des matériaux granulaires, la zone de séparation électrostatique, et enfin la partie de récupération des produits séparés.

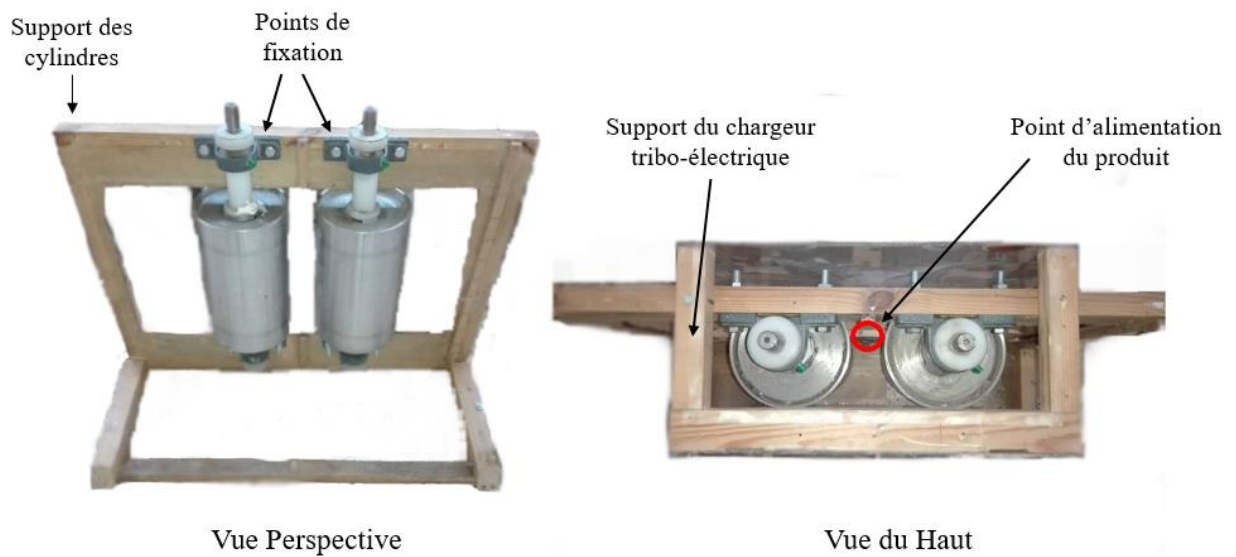


Figure III.2 Installation de séparation électrostatique en phase de réalisation

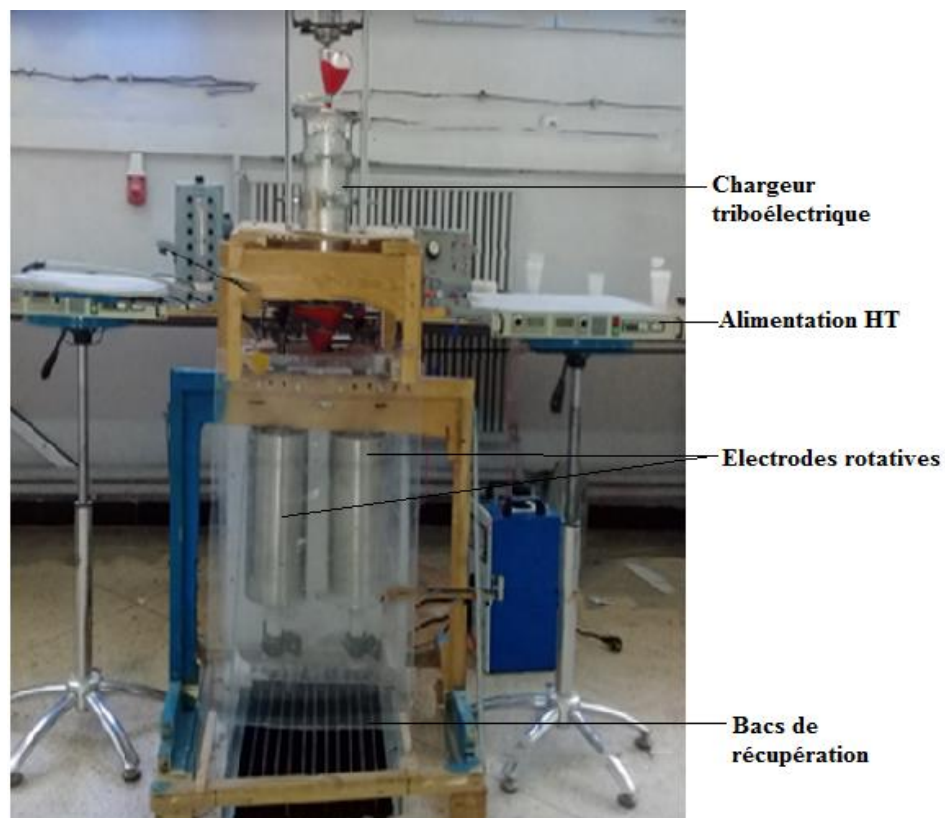


Figure III.3 Vue d'ensemble de l' Installation de séparation électrostatique à Electrodes rotatives

L'admission des matériaux granulaires est assurée par un vibreur à flux constant et un entonnoir assurant la concentration du flux granulaire au milieu de la zone de séparation électrostatique.

L'installation réalisée comprend les éléments constitutifs suivants :

- Partie électrostatique comportant deux électrodes cylindriques verticales
- La partie mécanique comportant les éléments essentiels d'entraînement

III.2.2 Partie électrostatique

Cette partie s'appuie sur des phénomènes physiques statiques indépendant du temps, munie de deux électrodes cylindriques de rayon $r : 80 \text{ mm}$, et une hauteur de chute $h : 350 \text{ mm}$ portés par des roulements à rouleaux cylindriques qui sont caractérisés par une haute capacité de charge radiale et une capacité de charge en butée modérée. Les roulements sont fixés à la carcasse par des vises à creux assurant un bon serrage.

L'alimentation en HT est effectuée par l'intermédiaire des contacts mobiles disposés à la partie supérieure des cylindres assurant leur rotation sans provoquer des vibrations ou des frottements excessifs. Les contacts mobiles sont constitués d'une extrémité métallique supporté par un ressort recouvert par une couche solide du PTFE assurant une bonne isolation du contact par rapport à la carcasse.

III.2.3 Partie mécanique

Cette partie constitue la partie essentielle ajoutée à l'installation comportant un moteur d'entraînement, un engrenage du vélo et une chaîne pour assurer une rotation plus flexible et éviter les vibrations de l'installation lors de la rotation.

L'alimentation du moteur à courant continu 110 V est assurée par une source de tension continue variable 1000 w pour varier la vitesse de rotation des deux cylindres dont ces spécifications sont citées ci-dessous :

- N° série SE 26-62-1A

- Type KM 94-60 12 806
- Tension inducteur = 115 V
- Courant Induit = 0,63 A
- Puissance moteur = 0,1 KW
- Vitesse max = 2000 tr/min



Figure III.4 Image du moteur d'entrainement

III.3 Contraintes de réalisation et solutions choisies

L'idée après cette installation vient d'une série de problèmes rencontrés à des installations de séparateurs électrostatiques à chute libre déjà réalisées dont les principales solutions présentent aussi des points faibles dont les majeures faiblesses de ces installations sont cités ci-dessous :

- Malgré qu'il présente une solution contre le rebond des granules avec les électrodes le séparateur à chute libre (électrodes inclinés) présente un problème d'uniformité de champ entre le point d'entrée et le point de sortie de l'installation (fort à l'entrée et faible à la sortie) [11].

- Le séparateur à chute libre à électrodes verticales a le point fort d'uniformité du champ le long de la zone de séparation, mais ceci conduit à des rebonds excessifs des granules qui peut influencer sur l'efficacité de séparation [12].

Chaque procédure de réalisation a ses propres limites, qui doivent être pris en compte et gérer cette étape suivant des contraintes afin d'assurer la réussite de l'installation à effectuer sa fonction principale qui est la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants.

Les contraintes sont liés les uns aux autres, donc une bonne planification des solutions est essentielle pour définir les objectifs et les achèvements de ce travail. Dans cette partie nous allons présenter les différentes contraintes rencontrés lors de la réalisation de ce dispositif ainsi que les solutions proposées.

La première contrainte était la décision de la hauteur de la chute qui doit garantir que la taille de l'installation prototype soit miniaturisée afin d'économiser de l'espace. Le choix de la hauteur de la chute était suivant cette contrainte, aussi pour éviter que la granule atteigne une grande vitesse de chute libre ce qui rend difficile son attraction vers le bac qui lui est destinée.

Durant la réalisation de l'installation de séparation électrostatique, le choix du système qui permet la rotation des deux cylindres a été basé sur deux principaux phénomènes :

- La rotation des deux cylindres doit être verticale par rapport au plan horizontal (sans vibrations).
- Le système d'entraînement ne doit pas empêcher le processus de séparation électrostatique et aussi de permettre une rotation flexible des cylindres sans contraintes mécaniques.

Le troisième problème était la fixation du tribo-chargeur à hélices à l'entrée dont il situe la chaîne d'entraînement des cylindres. La première vision a été basée sur l'utilisation de seulement deux supports de chaîne d'entraînement mais l'effet de positionner le chargeur a été difficile dont on a opté d'utiliser trois supports au lieu de deux, le premier fixé sur l'arbre du moteur d'entraînement et les deux autres sur les arbres des cylindres.

De plus, le problème majeur rencontré durant la réalisation était l'équilibre horizontal des engrenages de chaque cylindre par rapport à l'engrenage du moteur d'entraînement pour le décollage de la partie des cylindres du moteur.

III.4 Protocole de mise au point de la mise en marche de l'installation réalisée

Après l'étape de la réalisation de la nouvelle installation de séparation électrostatique, une première mise en marche est nécessaire pour garantir le fonctionnement normal de toute l'installation. Un nettoyage des cylindres est effectué en premier temps pour assurer que la surface est propre pour éviter des distorsions au niveau du champ électrique.

Nous plaçons le chargeur dans sa position au-dessus de la zone de séparation, en veillant à ce qu'il soit au milieu des cylindres pour que le mélange soit versé correctement. Après la mise en marche du moteur du tribo-chargeur l'axe portant les hélices tourne et entraîne lui-même l'air à l'intérieur du cylindre. La direction des hélices crée un flux descendant pour que les particules soient entraînées à l'intérieur de la chambre de chargement.

Après la mise en marche du moteur à courant continu lié au deux cylindres et l'alimentation de ces derniers en HT le mélange granulaire est versé au chargeur tribo-électrique puis tombe à la zone d'électro-séparation pour être séparé tout en combinant les deux phénomènes électrostatique et mécanique.

III.5 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale suivie doit justifier l'hypothèse adopté dans cette étude, et aussi permet à trouver une réponse à la question suivante : La rotation des cylindres augmentera-t-elle l'efficacité de la séparation et comment se fait-elle au niveau microscopique ?, le résultat prédit doit-nous conduit à une validation de l'hypothèse suivante :

Pour une particule de forme géométrique sphérique une collision avec une surface statique se diffère d'une collision avec une surface en rotation, la prise en considération de tous les formes géométriques ne peuvent être effectuées en raisons de limitations du programme de simulation.

Pour répondre à cette question une procédure analytique et expérimentale ont été mise en place pour atteindre l'objectif de cette étude.

III.5.1 Introduction à la conception des expériences et la validation expérimentale

Le tracé des expériences mis en place doit démontrer par observation et par quantification des paramètres de sortie que l'efficacité de séparation est améliorée en passant de l'état statique à l'état dynamique des cylindres.

Pour ce faire, les expériences ont été divisés en deux parties :

- Expériences avec électrodes statiques (variation des paramètres électriques, variété de produits)
- Expériences avec électrodes rotatives (variation des paramètres électriques, variété de produits, et variation de la vitesse de rotation des cylindres)

Chaque série d'expériences comporte tous les combinaisons possibles des facteurs contrôlables Pour s'assurer que tous les résultats attendus sont corrects. Après cette étape, nous passons à l'étape de validation en faisant la concordance des deux modèles expérimental et numérique.

III.5.2 Présentation des matériaux granulaires isolants

III.5.3 Contexte des matériaux plastiques

De nombreux plastiques sont maintenant utilisés dans de telles quantités qu'ils ont atteint le statut de matériaux de base ; en effet, l'utilisation en volume des plastiques dépasse désormais largement celle des métaux. Une grande partie de cette croissance a eu lieu au cours des trente-cinq dernières années, et l'industrie des plastiques continue de se développer deux fois plus vite que l'économie dans son ensemble. Cette croissance rapide s'explique par l'aptitude des plastiques à la production de masse, qui dépend principalement de leur facilité de mise en forme et de leur reproductibilité, ainsi que de leur capacité à être utilisés dans des applications industrielles. La raison de cette croissance rapide est l'aptitude des plastiques à la production de masse, qui dépend principalement de leur mise en forme facile et reproductible et de leur faible coût en volume,

associés à certaines propriétés attrayantes. Le façonnage à basse température en formes complexes est une caractéristique de la plupart des plastiques, et assure leur utilisation croissante en dépit de certains inconvénients. L'industrie manufacturière a répondu très positivement à la demande croissante de plastiques et de diversification des propriétés. La principale matière première est le pétrole ; l'industrie pétrochimique, qui en dépend, fournit les monomères pour la production de plastiques et fabrique une large gamme d'additifs pour modifier leur comportement.

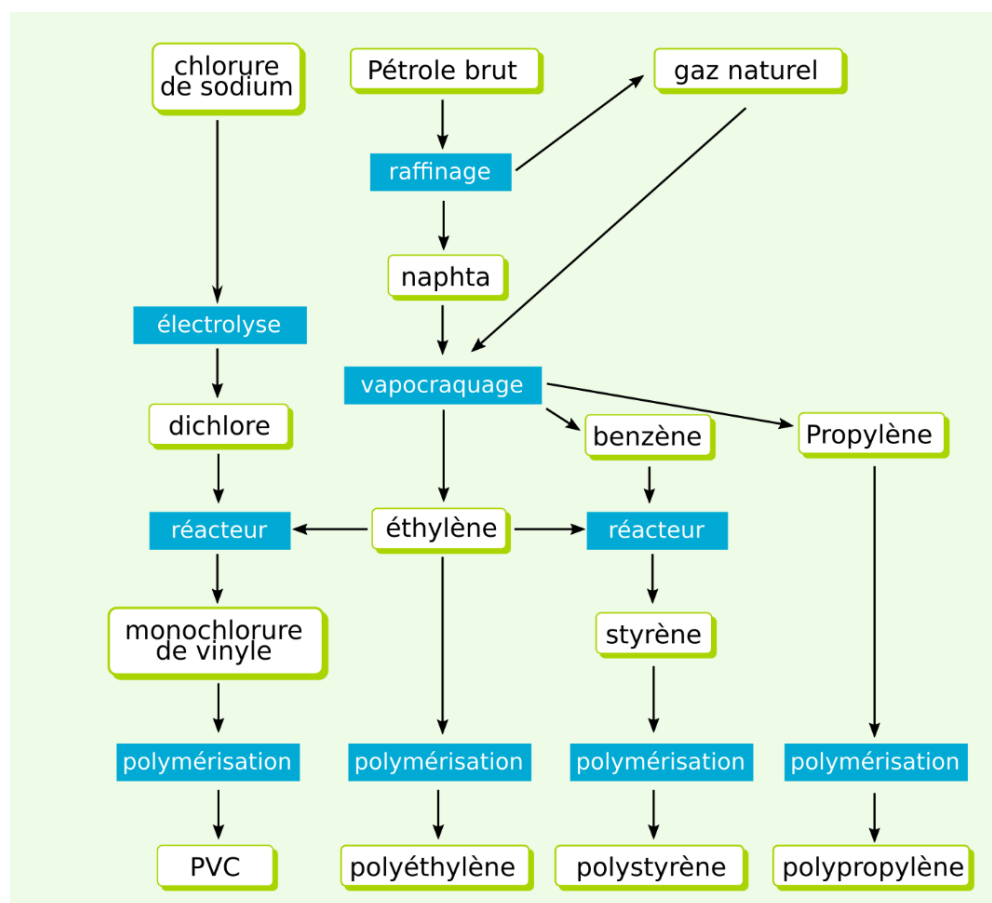


Figure III.5 Voies de fabrication des plastiques

La principale caractéristique structurale de la plupart des plastiques est qu'une unité, est liée chimiquement de nombreuses fois (poly). Le processus chimique de formation de ces matériaux est connu sous le nom de **polymérisation** et les produits sont des polymères. Les plastiques ne peuvent pas être définis avec précision, bien qu'ils soient indubitablement des polymères et que, selon la définition du dictionnaire, ils doivent pouvoir être façonnés à un moment donné de leur

histoire. Les plastiques sont généralement rigides, contrairement aux caoutchoucs (élastomères), qui sont très flexibles.

III.5.4 Structure et propriétés des plastiques

Il existe deux sous-groupes de matières plastiques : les thermoplastiques et les plastiques réticulés. Les premiers sont des polymères à chaîne linéaire qui se ramollissent à la chaleur et se solidifient à nouveau au refroidissement, tandis que les seconds sont des structures en réseau (en trois dimensions) qui, une fois formées, ne sont pas ramollies par la chaleur. La répétition des unités dans un polymère peut entraîner une régularité de structure qui peut avoir des conséquences importantes ; dans les cas favorables, un certain nombre de chaînes peuvent s'aligner et s'aligner sur une certaine distance, un état qui est favorisé pour des raisons énergétiques et qui est appelé cristallinité.

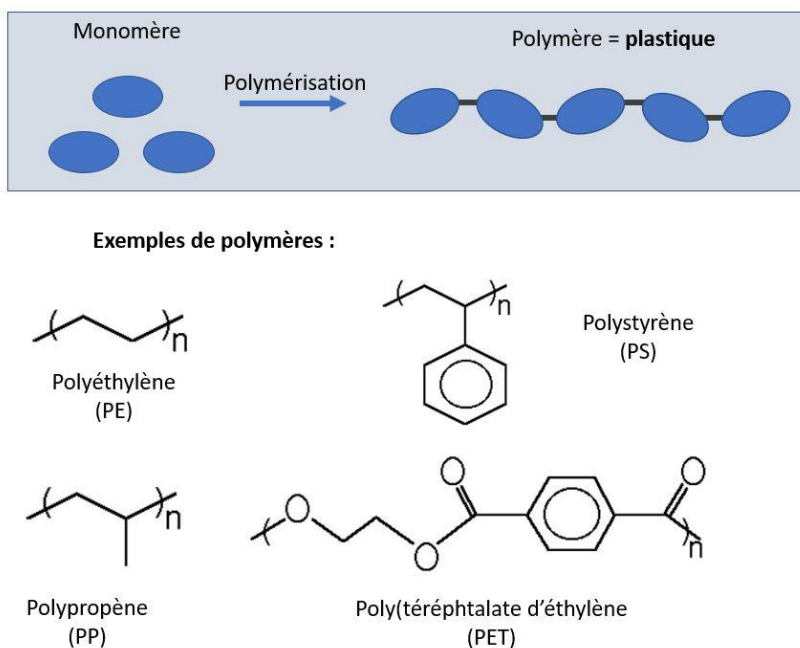


Figure III.6 Structure chimique des différents matériaux plastiques

Les passages suivants représentent les différentes propriétés des produits plastiques utilisés dans l'industrie :

III.5.4.1 Propriétés mécaniques

Des propriétés mécaniques adéquates sont une condition préalable à la plupart des applications des plastiques ; la réponse aux contraintes par rupture ou déformation est généralement d'une importance cruciale, tandis que le frottement, l'usure, l'amortissement des vibrations, etc. peuvent être pertinents dans des applications particulières. Pour les métaux, il est communément admis que le comportement peut être prévu par l'analyse des contraintes, puis en utilisant le module ou la contrainte de conception dans la formule appropriée.

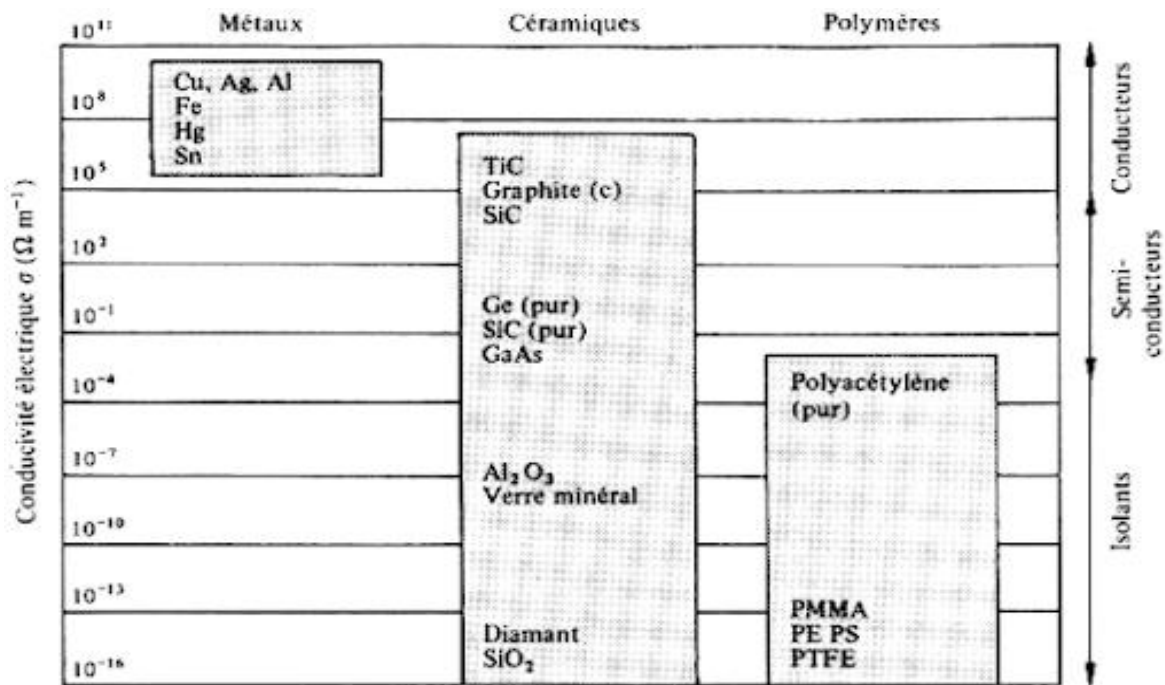


Figure III.7 Comparatif des Propriétés mécaniques Métal/Plastique

III.5.4.2 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des plastiques sont généralement celles attendues pour les substances organiques, modifiées dans certains cas par la structure du polymère. Ainsi, les plastiques partiellement cristallins ont des points de fusion, bien que le processus de fusion soit

progressif. La conductivité thermique est faible ; à l'inverse, la dilatation et la contraction thermiques sont élevées. La relation entre l'énergie thermique appliquée et l'augmentation de température qui en résulte, l'enthalpie ou le contenu thermique, est généralement conforme aux attentes.

Les propriétés thermiques sont importantes tant pour la transformation que pour le comportement à l'état solide. Pour les plastiques partiellement cristallins, la température de fusion définit la limite supérieure de la stabilité de la forme, bien que le plastique puisse se ramollir de manière inacceptable à des températures inférieures.

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)	Diffusivité thermique (m ² /s)	Effusivité thermique (J/m ² .K.s ^{1/2})	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Air	0.025	1.94E-05	5.7	1.29	1004
Polystyrène	0.033	7.65E-07	38	38	1130
Téflon (PTFE)	0.250	1.15E-07	740	2170	1004
Polyéthylène	0.420	1.93E-07	944	2301	935
Verre	1.05	5.43E-07	1419	2300	837
Porcelaine	5.86	2.56E-06	3658	3900	586
Acier inoxydable	13.4	3.42E-06	7241	7800	502
Plomb	34.3	2.33E-05	7107	11350	130
Aluminium	226	9.10E-05	23688	2690	921
Cuivre	398	1.16E-04	36983	8940	385

Figure III.8 caractéristiques thermiques des matériaux diélectriques

III.5.4.3 Propriétés électriques

Comme on peut s'y attendre en raison de leur structure, la plupart des plastiques, du moins à l'état solide, sont de très mauvais conducteurs d'électricité ; en fait, certains sont parmi les meilleurs isolants connus. Les propriétés diélectriques - la permittivité relative et le facteur de puissance (ou facteur de perte) - sont typiques de celles que l'on trouve dans les matériaux organiques de faible poids moléculaire, bien que la structure fine de ces propriétés soit affectée par des caractéristiques associées à la structure.

L'isolation offerte par les matières plastiques aux propriétés les plus médiocres, comme le polyamide 6.6 ou le PVC plastifié, est encore plus qu'adéquate, sauf pour les utilisations les plus critiques. C'est ce qu'illustre l'utilisation du premier par British Rail comme isolant dans la signalisation automatique des voies, et du second dans l'isolation des câbles domestiques [13].

La résistance électrique intrinsèque de la plupart des plastiques est supérieure d'un facteur de mille à la résistance au claquage de l'air, de sorte que dans la plupart des situations pratiques, le claquage est dominé par le claquage de l'air.

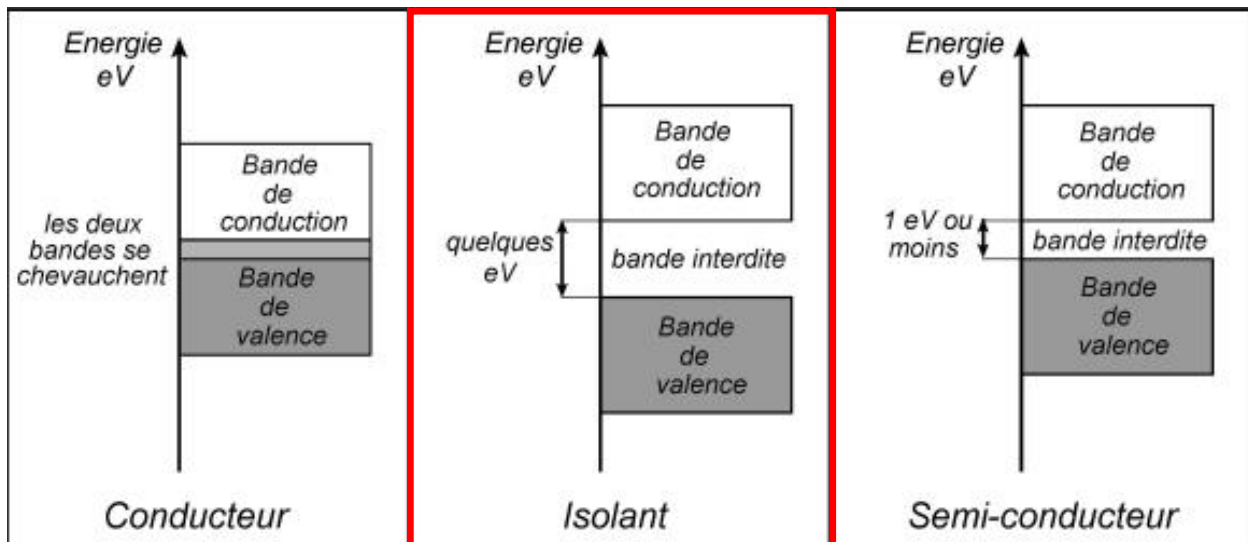


Figure III.9 Bandes d'énergie des différents matériaux existants

III.6 Présentation des matériaux utilisés

Les matériaux traités dans cette partie sont les membres cristallins de la famille des "thermoplastiques techniques". Ils sont rigides et robustes, mais un peu plus chers que les plastiques de base, PA, PP, PC, et le PVC. Les polyamides et les polyesters saturés sont principalement utilisés dans la production de fibres, mais les applications plastiques sont importantes.

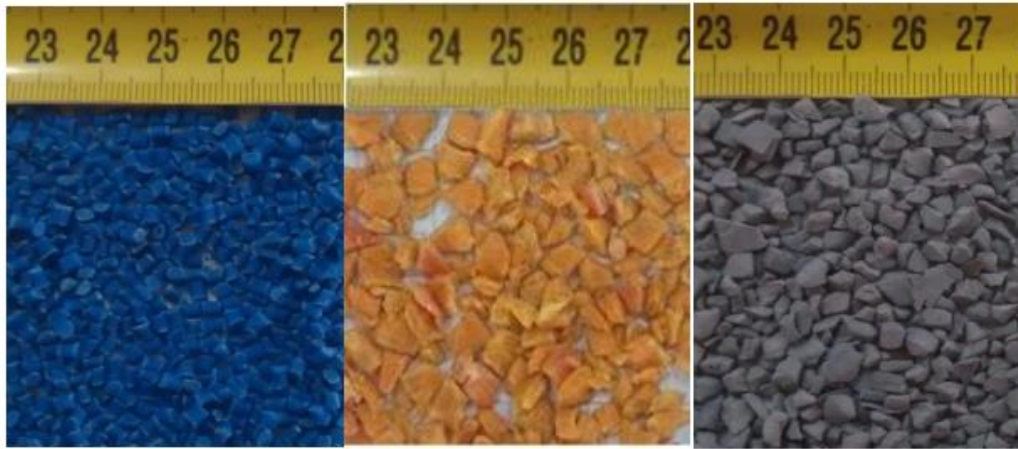


Figure III.10 Echantillon des granules utilisés dans l'étude

III.6.1 Polyamide – PA

Les principaux membres de la famille des polyamides, également connus sous le nom de nylons, ainsi que les grandes lignes des méthodes de fabrication, sont présentés ci-dessous.

- Polyamide 6.6 (P A 6.6). Obtenu à partir d'hexaméthylène diamine et d'acide adipique ; la stœchiométrie de la réaction est assurée par l'isolement du "sel de nylon". La température de fusion du PA 6.6 est de 265°C.
- Polyamide 6 (PA 6). Fabriqué par la polymérisation par ouverture de cycle du caprolactame : contient encore 6% de monomère à l'équilibre, qui est éliminé par extraction. La température de fusion du PA 6 est de 225°C.
- Polyamide 11 (PA 11). Obtenu par auto-condensation de l'acide ω -aminoundécanoïque (obtenu à partir de l'huile de ricin). A noter que la structure cyclique ne se forme pas : température de fusion 185°C [14]

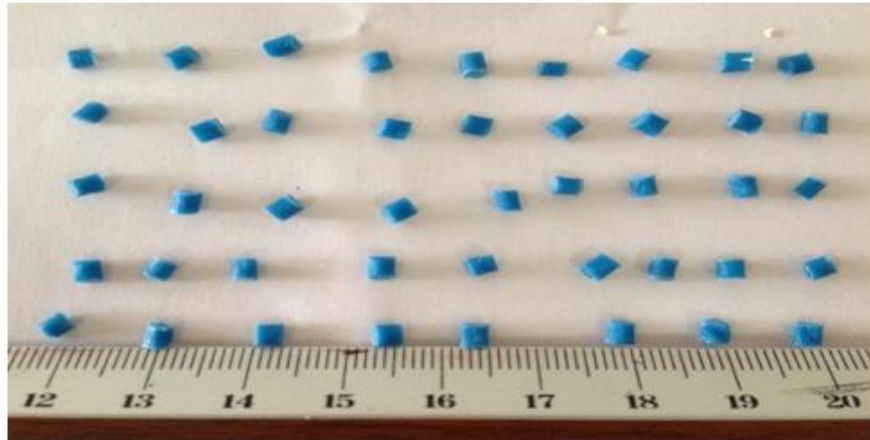


Figure III.11 Physionomie et taille des granules PA

III.6.2 Polycarbonate – PC

Les polycarbonates comportent le simple groupe de liaison carbonate - CO_3 - bien qu'un seul de ces matériaux, celui à base de bisphénol A (diphénylpropane), soit important sur le plan commercial. Structuellement, il s'agit d'un polyester mais, contrairement aux polyesters aliphatiques, il est raisonnablement résistant à l'hydrolyse.

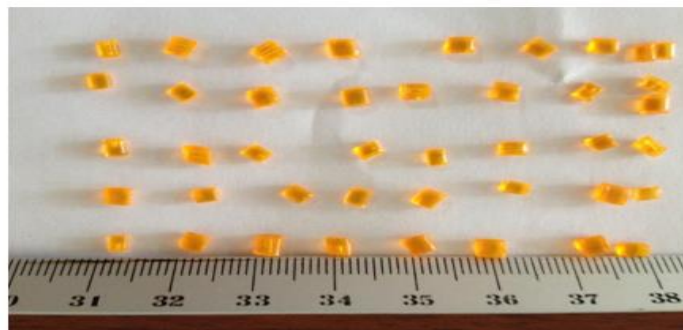


Figure III.12 Physionomie et taille des granules PC

III.6.3 Polychlorure de vinyle – PVC

Le polychlorure de vinyle - PVC, est l'un des polymères les plus polyvalents, et les formes suivantes ont des applications importantes : grades rigides (non plastifiés), composés plastifiés, copolymères et mélanges. Ceci est peut-être surprenant car c'est l'un des polymères les moins

stables, raison pour laquelle une grande partie du développement initial a porté sur les copolymères et les compositions plastifiées.



Figure III.13 Physionomie et taille des granules PVC

III.7.4 Polypropylène – PP

Les plastiques à base de propylène ont toujours connu une croissance très rapide, tant au niveau national qu'international ; rien ne semble indiquer qu'ils aient atteint leurs limites. Le polypropylène est obtenu par la polymérisation du propylène gazeux en présence d'un système catalytique, généralement le catalyseur de Ziegler-Natta ou un métallocène. Les conditions de polymérisation (température, pression et concentrations de réactifs) sont fixées par le grade de polymère désiré [15].

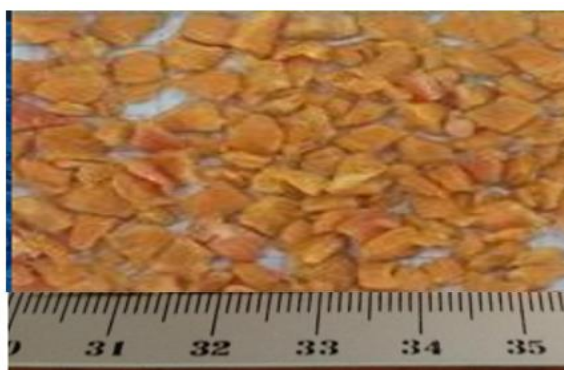


Figure III.14 Physionomie et taille des granules PP

III.7 Techniques de mesure des paramètres

Pour réaliser les expériences de séparation électrostatique des mélanges granulaires, il est indispensable de passer par la technique de mesure des paramètres de sortie contrôlables (masse, charge) et celles incontrôlables (température, humidité). La description de chaque méthode de mesure est comme suite :

III.7.1 Mesure de la charge

La mesure de la charge est une opération essentielle dans le procédé de séparation électrostatique afin de quantifier et évaluer la polarité des charges présentes à la surface des matériaux isolants. Cette mesure est effectuée par le biais d'une cage faraday.

Une cage faraday consiste à mesurer la charge statique présente dans les matériaux granulaires chargés par effet tribo-électrique. Le principe de la cage faraday est basé sur l'isolation des charges et perturbations électriques à l'extérieur de la cage en mettant la partie extérieure de la cage à la terre, le cylindre à l'intérieur est isolé par un milieu diélectrique et connecté à un électromètre pour la quantification des charges circulant à la surface intérieure du cylindre par principe de répartition des charges à l'intérieur de la cage [16].

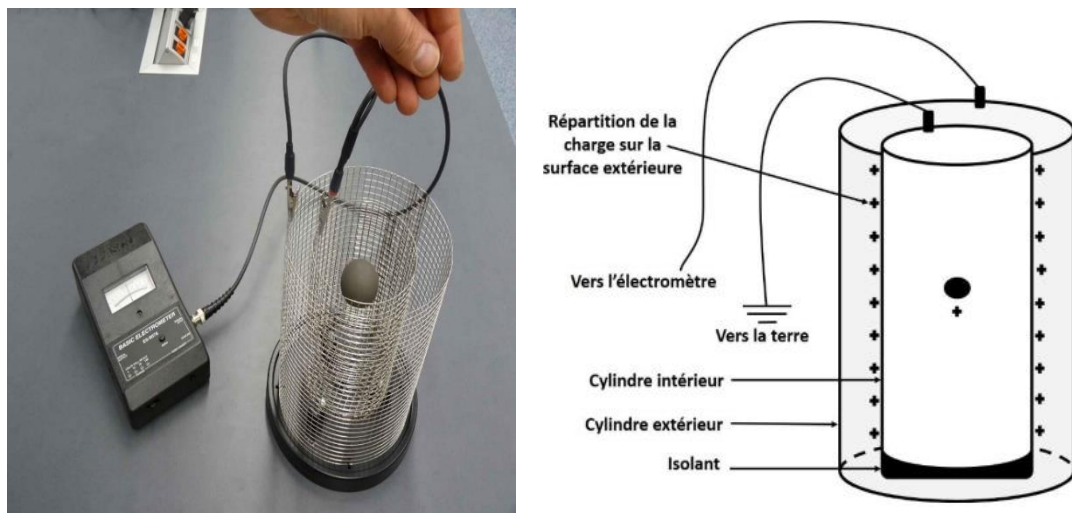


Figure III.15 Technique de mesure par cage faraday

La mesure de la charge électrique acquise a été effectuée à l'aide d'un électromètre numérique Keithley model 6514 [17] (Figure III.16) qui a les caractéristiques suivantes :

- Mesure de charge de 10 fC à 20 μ C.
- Mesure rapide - jusqu'à 1200 mesures/seconde
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants
- Annule les décalages de tension et courant facilement.
- Impédance d'entrée 200T Ω pour les mesures de tension.



Figure III.16 Electromètre Keithley model 6514 utilisé pour la mesure.

III.7.2 Mesure de la masse du mélange

La masse du mélange granulaire doit être mesurée avant chaque expérience à l'aide d'une balance électronique de haute précision afin d'avoir des résultats plus précis, la balance utilisée a les caractéristiques suivantes :

- Une précision de 0.1 g par mesure
- Différentes unités de mesure
- Mesure par unité fondamentale et par pourcentage
- Alarme de charge maximale (600 grammes Max)

- Mise hors tension automatique après 1 minute d'utilisation (économie d'énergie)



Figure III.17 Balance numérique de précision 0.1: 600g

III.7.3 Mesure de la température et l'humidité relative

La mesure de l'humidité relative est un élément essentiel et un des paramètres principaux avant chaque série d'expériences pour une étude expérimentale en utilisant un thermo hygromètre numérique [18] (Amprobe TH-3) (Figure III.18), qui présente les caractéristiques principales suivantes :

- Assurer une fonction double de mesure : Température et Humidité
- Mesure effectuée en plusieurs unités
- Une sonde mince permet la mesure à l'intérieur des installations
- Sonde de mesure mobile (à pile)



Figure III.18 Thermo hygromètre numérique Amprobe

III.7.4 Mesure de vitesse de rotation

Le tachymètre est un instrument de mesure permettant de déterminer la vitesse de déplacement d'un objet en mouvement. On retrouve la fonction de tachymètre sur certains modèles de montre chronographe. La vitesse de rotation des cylindres est mesurée par le billais d'un tachymètre électronique, mis en dessus des cylindres.



Figure III.19 Tachymètre numérique RPM 82

III.8 Essais préliminaires pour l'étude de l'influence des variables de contrôle

Ce dispositif offre la possibilité du réglage de plusieurs paramètres de chargement et de séparation y compris :

- La valeur de la haute tension appliquée aux deux électrodes.
- La vitesse des électrodes tournantes .
- La vitesse du chargeur tribo-électrique.

Le réglage de la valeur de chaque paramètre influe de façon significative sur le rendement de séparation, et vu l'interdépendance de tous ces éléments entre eux, il est nécessaire de trouver le réglage optimal afin d'assurer une efficacité maximale.

L'influence du tribo-chargeur sur l'efficacité de séparation a été déjà étudiée [19] et les intervalles optimaux sont basés sur cette étude.

III.8.1 Influence de la vitesse de rotation des électrodes

Premièrement on fixe les autres paramètres pour étudier l'influence de la vitesse de rotation des électrodes sur la récupération du mélange PA/ PP et PC/ PVC:

- La vitesse de chargement 2500tr/min
- La tension appliquée est fixée à 30 kv
- La quantité du produit 40g (20g de PC et 20g de PVC ou de PA et PP)

Les résultats obtenus sont représentés sur les tableaux suivants :

Tableau III.1 influence de la vitesse de rotation des électrodes sur la récupération du mélange PC/PVC

Vitesse (tr/min)	Bac 1 PC [g]	Mixte [g]	Bac 3 PVC [g]
0	9.3	22	8.7
30	10,9	17.6	11,5
45	12,8	14.7	12,5

Tableau III.2 influence de la vitesse de rotation sur la récupération (PP/PA)

Vitesse (tr/min)	Bac 1 PC[g]	Mixte [g]	Bac 3 PVC[g]
0	9.7	19	11.3
30	10.5	16.5	13
45	13.5	11	15.5

Dans la première série d'expériences on a essayé de varier la vitesse de rotation des deux cylindres pour pouvoir quantifier l'effet de la rotation, ce facteur a présenté une considérable différence de 7.61 % passant de l'état statique à l'état rotatif avec une vitesse de 30 tr/ min.

Allant à une vitesse de 45 tr/min donnera une augmentation de 22.36 %, cette augmentation de la vitesse de rotation conduit en même temps à augmenter la récupération au niveau des bacs 1 et 3 et aussi diminuer la masse collectée au niveau du bac mixte.

III.8.2 Influence de la haute tension appliquée

On fixe les paramètres suivant pour étudier l'influence de la haute tension appliquée

- La vitesse de rotation des électrode 30 tr/min
- La vitesse de chargeur 2500 tr/min
- La quantité du produit 40g (20g de PVC et 20g de PC)

Les résultats obtenus sont représentés sur les tableaux suivants :

Tableau III.3 influence de la tension appliquée sur la récupération de (PC/PVC)

Tension (kV)	Bac 1 PC[g]	Bac 2 (Mixte) [g]	Bac3 PVC[g]
24	11,8	14,6	13,6
26	12,3	13,8	13,9
28	12,5	13,5	14
30	12	13,9	14,1
32	12,6	13	14,4

Tableau III.4 Influence de la tension appliquée sur la récupération du mélange (PP/PA)

Tension (kV)	Bac 1 PP[g]	Bac 2 (Mixte)[g]	Bac 3 PA[g]
24	14,1	15,2	10,1
26	14,3	12,2	12,9
28	15,3	10,7	13,8
30	15,5	10,1	14,1
32	16,1	8,8	14,8

L'influence du niveau de tension sur l'efficacité de séparation a été déjà prouvé (tout en gardant le niveau de tension a des niveaux pour ne pas rendre l'effet négatif à cause du rebond excessif). En vue générale on voit qu'il y a une augmentation de la masse récupérée chaque fois le niveau de tension augmente. Les interactions des paramètres de contrôle de l'installation vont être détaillés dans le chapitre 4.

III.9 Conclusion

Les recherches sur la séparation électrostatique des matériaux isolants ont été réalisées sur plusieurs matériaux granulaires isolants issus des déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE). L'étude en cours adopte l'étude de la nouvelle installation d'électro-séparation à base d'électrodes cylindriques rotatives qui a été présentée dans ce chapitre.

La phase de conception des installations à base des logiciels DAO (design assisté par ordinateur) a permis d'identifier plusieurs points de difficulté et d'éviter les erreurs de réalisation surtout mécaniques.

Des expériences de séparation électrostatique seront réalisées avec les matériaux présentés dans ce chapitre dont plusieurs techniques de mesure seront mises en œuvre pour évaluer l'efficacité de l'installation réalisée.

Dans le chapitre suivant on va présenter une étude numérique détaillée de la nouvelle installation de séparation électrostatique ainsi que le modèle physique adopté afin de montrer la robustesse et l'efficacité de l'installation réalisée.

Chapitre IV : Etude expérimentale paramétrique et optimisation de l'installation à électrodes rotatives

Chapitre IV : Etude expérimentale paramétrique et optimisation de l'installation à électrodes rotatives

Dans un séparateur électrostatique à chute libre [78, 79], le tri des granules et les mélanges provenant de déchets d'équipements électriques et électroniques sont réalisés par l'action des forces électrostatiques appliquées aux particules qui ont été précédemment chargés par effet triboélectrique [80-4]. Dans une installation conventionnelle, les particules du mélange granulaire récupérées à la sortie d'un appareil triboélectrique sont introduites d'une façon continue dans l'espace délimité par deux électrodes parallèles à un plan vertical. Dans cette zone, les particules chargées sont attirées vers les électrodes de polarités opposées.

Dans ce chapitre un modèle de simulation a été utilisé en se basant sur des phénomènes et modèles théoriques, le modèle développé est implanté dans le logiciel « MATLAB » pour étudier le comportement des particules en fonction des paramètres liés à la géométrie et aux particules. Cette simulation permet la compréhension de l'influence de chaque paramètre sur les résultats de séparation électrostatique.

IV.1 Procédure expérimentale

La caractéristique principale du séparateur à électrodes cylindriques rotatives consiste à l'exploitation de la combinaison des deux phénomènes physiques : mécanique et électrique en utilisant à la fois deux cylindres en disposition verticale chacun ayant un diamètre de 160 *mm*. La configuration est directement liée à un moteur à courant continu 110 *V* monté verticalement sur un support et raccordé aux deux cylindres via une chaîne métallique.

L'électrode haute tension attire les particules chargées d'une polarité opposée tandis que la rotation des cylindres aide à bien rediriger les particules en collision avec l'électrode vers le compartiment correspondant. L'installation réalisée au sein du laboratoire IRECOM à l'université de Sidi Bel Abbès a permis l'obtention de meilleurs résultats par rapport aux celles statiques sans effectuant des changements sur la configuration elle-même ou sur sa disposition (inclinaison, espacement, ... etc.) [85].

Les formes des produits granulaires isolants sont de diverses formes (cylindriques, compactés et sphériques), pour une bonne estimation de l'effet de rotation sur l'efficacité de séparation électrostatique un échantillon de matériaux composé de PA, PP a été utilisé.

Pour chaque banc d'expériences une série de mesure est effectuée dans des conditions météorologiques similaires en changeant les paramètres contrôlables (niveau de tension, vitesse de rotation, et taux de charge).

Dans un premier temps, on va procéder aux tests de séparation de deux échantillons des mélanges granulaires comportant deux types de particules (PA-PP) avec le séparateur à chute libre à électrodes cylindriques rotatives. On mesure après le processus de séparation la masse récupérée dans chaque collecteur. On garde les mêmes conditions pour toutes les expériences :

La masse du mélange granulaire 40 g comprenant 20 g de chaque type de plastique. La vitesse de rotation des cylindres est variée de 0 à 45 *tr/min*. Après avoir séparé le produit granulaire, la masse des granules récupérés dans les compartiments, a été mesurée en utilisant une balance électronique avec une résolution de 0,01 g puis on fait le calcul de la récupération et la pureté des produits.

Les paramètres de contrôle sont :

- Niveau de tension [*kV*] ;
- Etat des électrodes (statiques, rotatives)
- Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 36 % à 48 %.

Après chaque expérience, le produit séparé est passé sur un neutralisateur pour utiliser le produit pour une autre combinaison, un seul mode de chargement a été utilisé pour le chargement des produits binaires dont le paramètre variable lié à la charge est la vitesse de rotation des hélices du tribo-chargeur.

IV.1.1 Effet Des électrodes en rotation sur la séparation électrostatique d'un mélange binaire

Une première séparation des matériaux en variant la différence de potentiel appliqué de 24 à 30 *kV* a été effectuée pour les deux configurations : Electrodes en état statique et

électrodes en rotation ou on a examiné la variation des masses pour l'un des produits purs et le mixte et l'ensemble des résultats est groupé dans les tableaux et graphes suivants :

Les tableaux VI. 1 et VI. 3 représentent la récupération du PP dans le compartiment qui lui est destiné ainsi que la récupération du PA dans le même compartiment pour pouvoir calculer les puretés dans chaque compartiment ainsi que pouvoir déterminer la différence entre l'état statique et l'état rotatif.

Le passage de l'état statique à l'état rotatif des électrodes c'est accompagné d'une variation de masse des produits récupérés selon les bacs qui lui sont destinés et cette variation de masse peut être déterminée selon l'équation suivante :

$$V_m \% = 100 * (m_{Recup\ Rotatif} - m_{Recup\ Stat}) / m_{Recup\ Stat} \quad (12)$$

Ou : $m_{Recup\ Rotatif}$: masse récupéré pour électrodes rotatifs

$m_{Recup\ Stat}$: masse récupéré pour électrodes statiques

Les tableaux IV.1 et IV.3 représentent une comparaison entre l'état statique et l'état rotatif pour deux vitesse de rotation (30 tr / min, 45 tr / min) pour la récupération PP, et es tableaux IV.2 et IV.4 représentent une comparaison entre l'état statique et l'état rotatif pour deux vitesse de rotation (30 tr / min, 45 tr / min) pour la récupération PA.

L'augmentation de la récupération en passant de l'état statique à l'état rotatif des cylindres est bien claire pour les tensions (U= 32 kV) et (U= 34 kV) avec une amélioration de 52.08% accompagnée par une forte diminution du produit mixte ainsi que la masse indésirable du PA dans le Bac du PP avec des rapports respectifs de -43.33 et -54.55 %.

Les valeurs atypiques observés comme diminutions dans les variations pour les niveaux de tension 34 kV et 36 kV sont dues au champ fort crée dont la pratique nous oblige à travailler avec une tension maximale de 32 kV dans la phase d'optimisation de l'installation.

Tableau IV.1 Comparaison de la récupération du PP pour électrodes statiques VS électrodes rotatives

U(k V)	Etat						Passage de l'Etat statique vers rotatif		
	Electrodes Statiques			Electrodes Rotatives (30 tr/min)			Variation		
	Bacs PP		Bac Mixte (g)	Bacs PP		Bac Mixte (g)	masse (PP) (%)	masse (PA) (%)	masse (Mixte) (%)
	PP (g)	PA (g)		PP (g)	PA (g)				
24	14.8	1.3	4.8	15.2	0.6	4	2.70%	-53.85%	-16.67%
26	14.6	1	5.2	15.1	0.8	3.9	3.42%	-20.00%	-25.00%
28	13.3	0.7	4.5	13.7	0.6	3.8	3.01%	-14.29%	-15.56%
30	13.5	1.2	4	14.3	0.5	3.5	5.93%	-58.33%	-12.50%
32	9.6	4.4	4.1	14.6	2	3.2	52.08%	-54.55%	-21.95%
34	12.8	1.6	5	14.1	0.9	4.2	10.16%	-43.75%	-16.00%
36	13	1.4	4.2	14	0.7	4.4	7.69%	-50.00%	4.76%

Tableau IV.2 Comparaison de la récupération du PA pour électrodes statiques VS électrodes rotatives

U(k V)	Etat						Passage de l'Etat statique vers rotatif		
	Electrodes Statiques			Electrodes Rotatives (30 tr/min)			Variation		
	Bacs PP		Bac Mixte (g)	Bacs PP		Bac Mixte (g)	masse (PP) (%)	masse (PA) (%)	masse (Mixte) (%)
	PP (g)	PA (g)		PP (g)	PA (g)				
24	2.7	12.5	4.8	1.5	14.5	4	-44.44%	16.00%	-16.67%
26	2	12.8	5.2	1.7	14.4	3.9	-15.00%	12.50%	-25.00%
28	4	11.5	4.5	2.1	14.1	3.8	-47.50%	22.61%	-15.56%
30	4.2	11.8	4	2.5	14	3.5	-40.48%	18.64%	-12.50%
32	3.3	12.6	4.1	1.9	14.9	3.2	-42.42%	18.25%	-21.95%
34	2.8	12.2	5	2.3	13.5	4.2	-17.86%	10.66%	-16.00%
36	3.8	12	4.2	2.8	12.8	4.4	-26.32%	6.67%	4.76%

Pour les tableaux IV.2 et IV.4 l'augmentation en masse du PA est maximale atteignant 22.61% pour $U = 28$ kV, et minimale pour $U = 36$ kV. De la même façon la rotation a contribué à la diminution du PP dans le même Bac avec une valeur maximale de -47.5 % pour 30 tr / min et 64.29% pour une vitesse de 45 tr / min.

Tableau IV.3 Comparaison de la récupération du PP pour électrodes statiques VS électrodes rotatives

U(kV)	Etat						Passage de l'Etat statique vers rotatif		
	Electrodes Statiques			Electrodes Rotatives (30 tr/min)			Variation		
	Bacs PP		Bac Mixte (g)	Bacs PP		Bac Mixte (g)	masse (PP) (%)	masse (PA) (%)	masse (Mixte) (%)
	PP (g)	PA (g)		PP (g)	PA (g)				
24	14.8	1.3	4.8	15.1	0.75	3.8	2.03%	-42.31%	-20.83%
26	14.6	1	5.2	15	0.5	3.5	2.74%	-50.00%	-32.69%
28	13.3	0.7	4.5	15.3	0.85	3	15.04%	21.43%	-33.33%
30	13.5	1.2	4	15.3	0.6	3.9	13.33%	-50.00%	-2.50%
32	9.6	4.4	4.1	15.6	0.9	3.5	62.50%	-79.55%	-14.63%
34	12.8	1.6	5	15	1	3.1	17.19%	-37.50%	-38.00%
36	13	1.4	4.2	14.2	1.1	4.3	9.23%	-21.43%	2.38%

Tableau IV.4 Comparaison de la récupération du PA pour électrodes statiques VS électrodes rotatives

U(kV)	Etat						Passage de l'Etat statique vers rotatif		
	Electrodes Statiques			Electrodes Rotatives (30 tr/min)			Variation		
	Bacs PP		Bac Mixte (g)	Bacs PP		Bac Mixte (g)	masse (PP) (%)	masse (PA) (%)	masse (Mixte) (%)
	PP (g)	PA (g)		PP (g)	PA (g)				
24	2.7	12.5	4.8	2	12.6	3.8	-25.93%	0.80%	-20.83%
26	2	12.8	5.2	1.8	13.2	3.5	-10.00%	3.12%	-32.69%
28	4	11.5	4.5	1.7	14.4	3	-57.50%	25.22%	-33.33%
30	4.2	11.8	4	1.5	14.2	3.9	-64.29%	20.34%	-2.50%
32	3.3	12.6	4.1	1.3	15.6	3.5	-60.61%	23.81%	-14.63%
34	2.8	12.2	5	1.8	14.2	3.1	-35.71%	16.39%	-38.00%
36	3.8	12	4.2	1.6	13.8	4.3	-57.89%	15.00%	2.38%

Dans un premier constat, on peut bien voir que la rotation des électrodes améliore le rendement et la pureté des produits récupérés mais au-delà d'une tension de 32 kV apparaît une dégradation de ces valeurs à cause des grandes forces d'attraction des électrodes sur les granules ou leurs forts impacts les fait dévier vers les bacs de récupération non appropriés.

La trajectoire des particules dans la zone de séparation électrostatique changera selon les paramètres choisis précédemment et tombent finalement aux bacs de récupération, les particules fortement chargés vont être attirées soit vers le bac qu'il leurs est destiné soit repoussées par l'électrode et se redirigent vers le mauvais emplacement (cas de niveau de tension élevé).

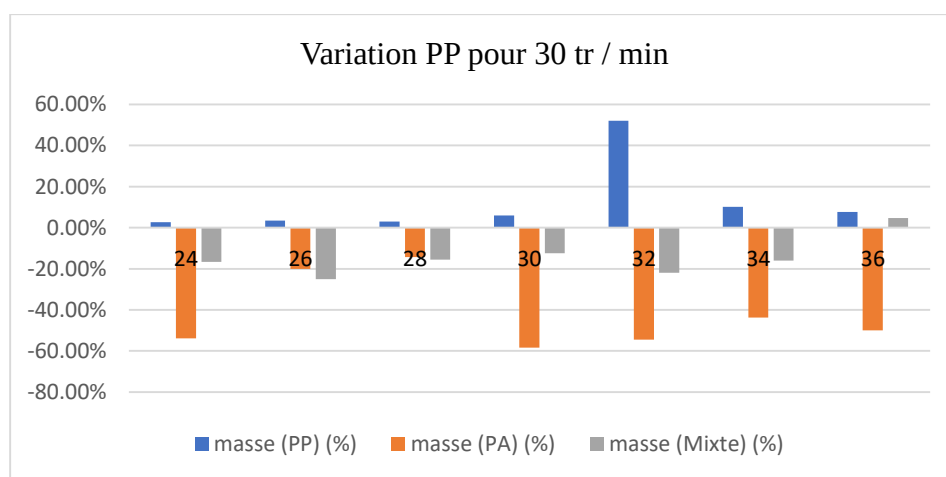


Figure IV.1.A: Représentation de variation des masses relatives des produits récupérés dans les bacs du PP et du Mixte selon différentes tensions appliquées entre les deux états Statiques et rotatives (30 tr/min)

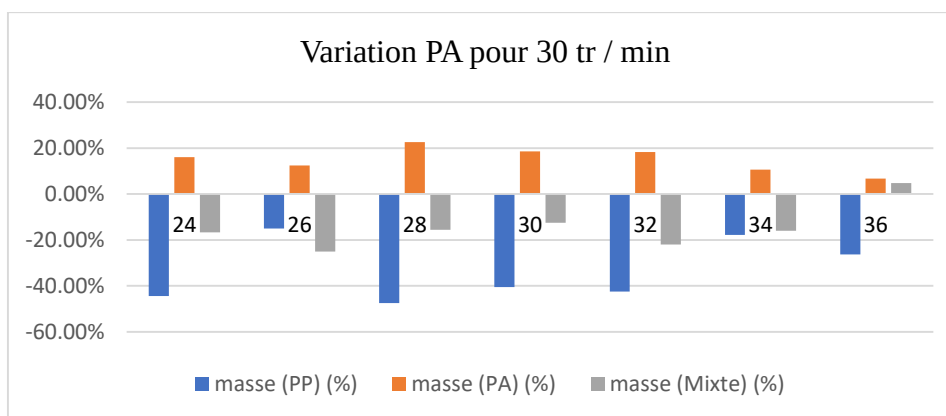


Figure IV.2.B: Représentation de variation des masses relatives des produits récupérés dans les bacs du PP et du Mixte selon différentes tensions appliquées entre les deux états Statiques et rotatives (30 tr/min)

La figure IV.1 représente la variation de la pureté PP en passant de l'état statique à l'état rotatif. D'après les figures qui représentent les pourcentages de pureté du produit binaire PP-PA, on remarque que :

Le passage de l'état statique à l'état rotatif des électrodes a amélioré la masse récupérée du PP de plus de 40 % pour $U = 32$ kV, et en même temps a diminué la masse du PA qui s'échappe au Bac destiné au PP de plus de 50% par rapport à la masse récupérée en état statique.

Avec l'augmentation de la vitesse de rotation à 45 tr / min les variations ont augmenté pour atteindre une amélioration de plus de 60% de la masse récupérée du PP et presque les 80% comme diminution de la masse PA dans le Bac du PP.

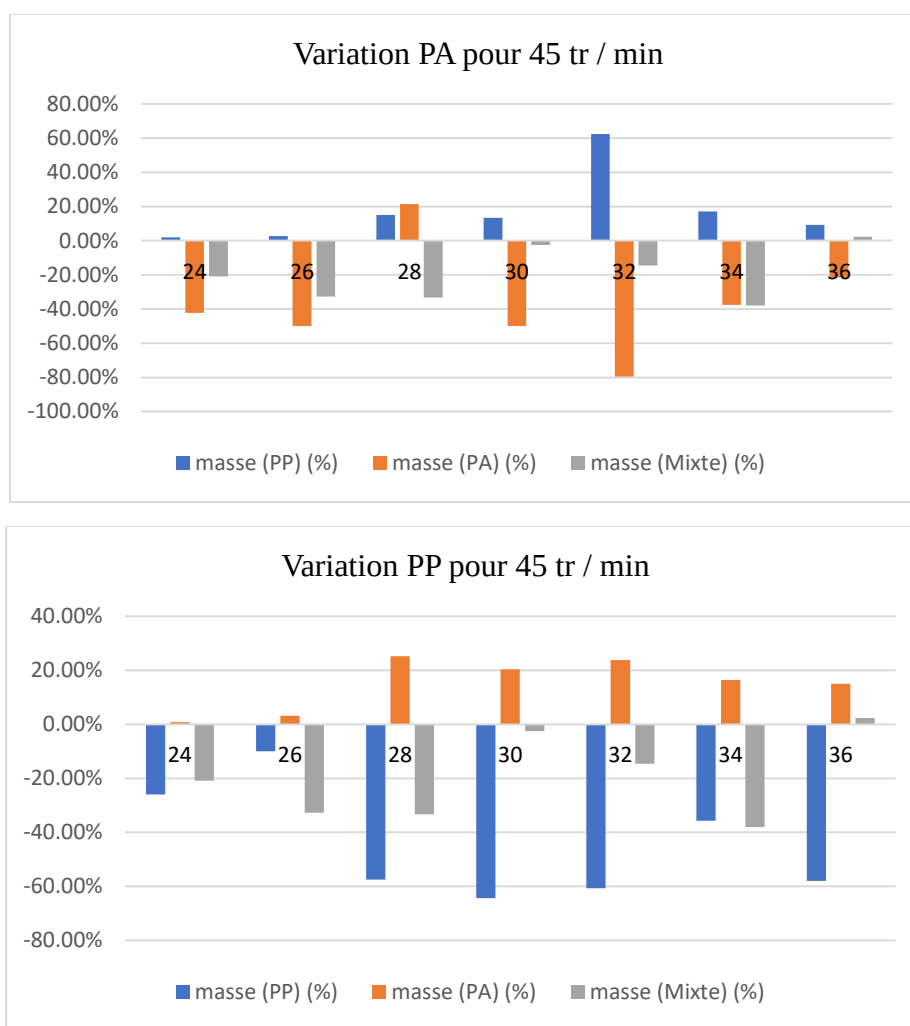


Figure IV.3 Pureté du PP et PA pour différent potentiels appliqués (Statiques-rotatives)

La position du PP et du PA dans la série tribo-électrique présente aussi un facteur très important sur les résultats de la séparation électrostatique, la faible récupération du PA par rapport au PP est expliquée par le taux de charge de chaque produit ainsi que la forme du granulat (plat, cylindrique).

Une forme proche à la forme sphérique (cylindrique) tend à rebondir plus fortement qu'une particule de forme plate ce qui justifie les meilleurs résultats du PP par rapport au PA. La décision de mettre les cylindres en rotation a été profitable en vue des résultats obtenus.

L'approche expérimentale consiste à faire varier un seul paramètre à la fois en fixant les autres facteurs, les figures suivantes représentent la pureté et la récupération des mélanges (PP-PA) et pour trois variations de la vitesse de rotation (statiques, 30 *tr/min*, 45 *tr/min*) la vitesse maximale de rotation a été maintenue à 45 *tr/min* pour des raisons de vibrations et de stabilité mécanique.

La pureté de chaque produit récupéré a été calculée en utilisant la relation suivante :

$$Pureté (\%) = \frac{M_d}{M_d + M_i} \times 100 \quad (13)$$

M_d : Masse du produit récupéré dans le Bac qui lui est destiné

M_i : Masse du produit récupéré dans le mauvais Bac

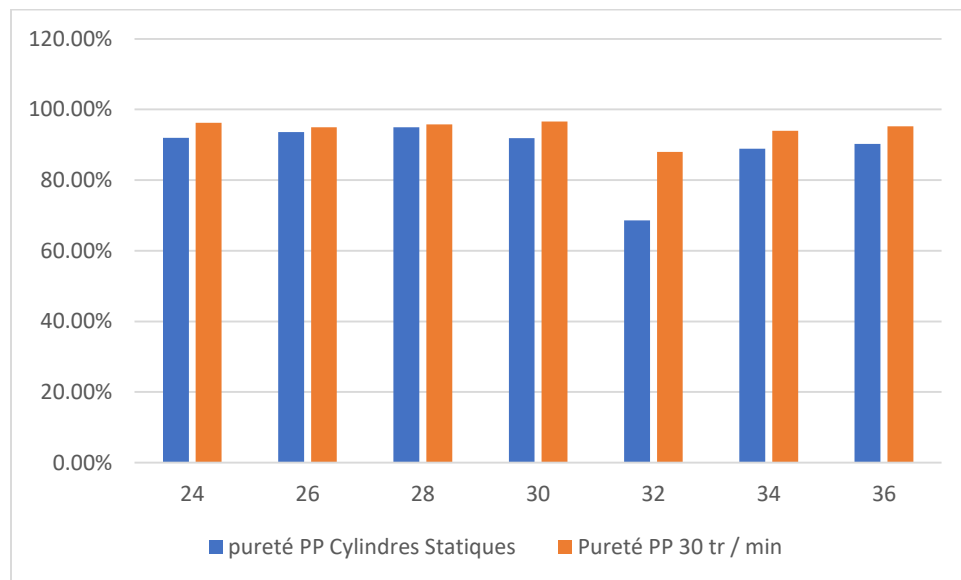


Figure IV.4. Taux d'augmentation de pureté pour PP – 30 *tr / min*

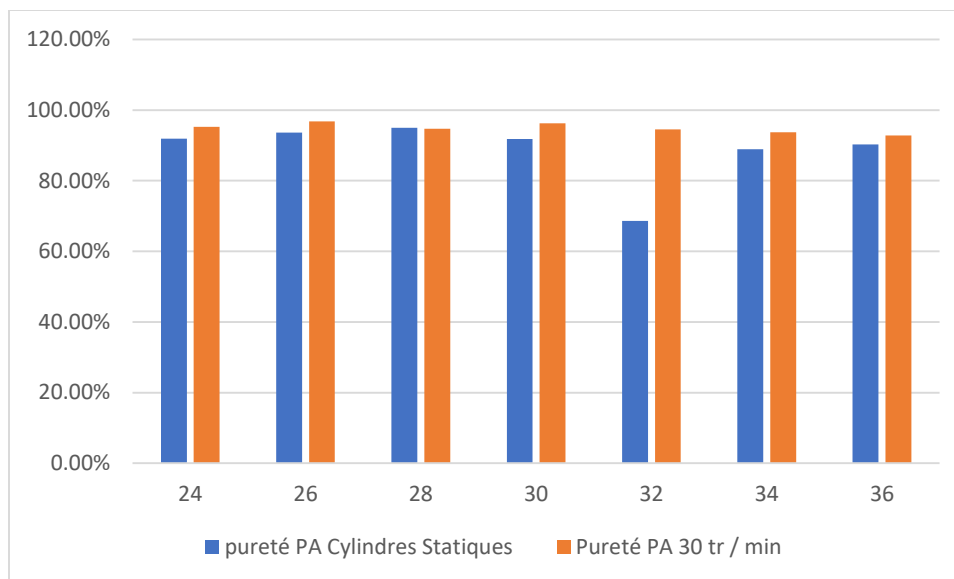


Figure IV.5. Taux d'augmentation de pureté pour PA – 30 tr / min

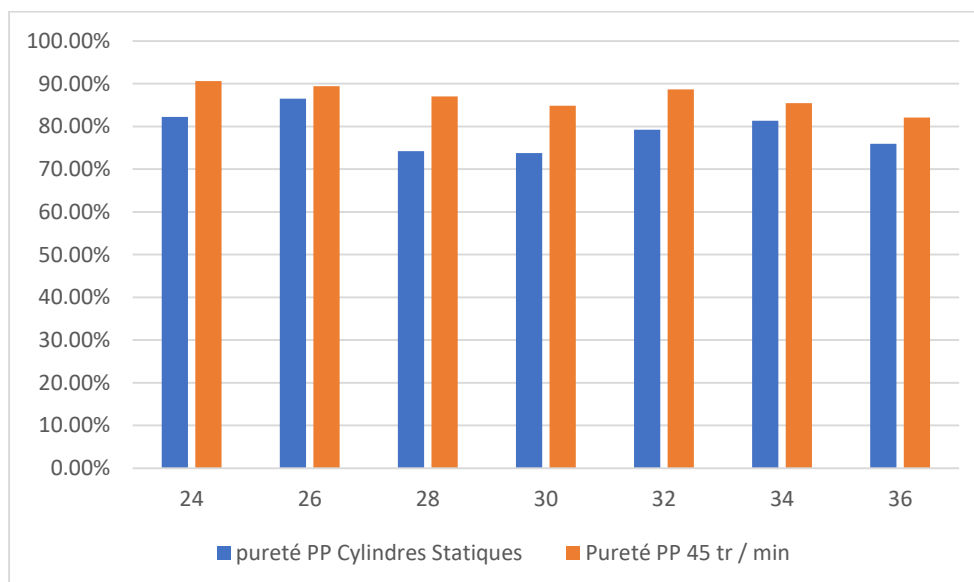


Figure IV.6. Taux d'augmentation de pureté pour PP – 45 tr / min

D'après les figures citées ci-dessus on remarque que :

- Pour $U = 32$ kV, une forte différence a été observée dans l'augmentation en pureté allant de 68.57% jusqu'à 87.95 % avec une augmentation de 19.38%.
- Pour le mélange binaire PA-PP une augmentation a été observée pour le PA de 68.57% à 94.55% correspondant à une tension de 32 kV.

L'exploitation de la rotation des cylindres qu'on a supposée au début de cette étude est plus avantageuse ; vu que la récupération et la pureté des produits récupérés a augmenté. La confirmation de cette hypothèse nécessite de se référer à un modèle de comparaison (théorique-expérimental) qui fera l'objet du titre de la suite de notre étude.

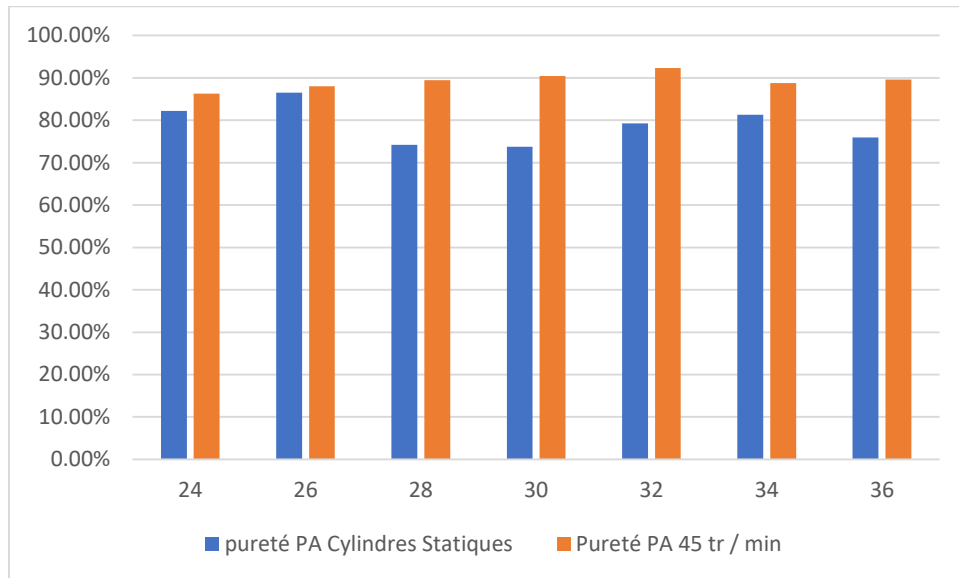


Figure IV.7. Taux d'augmentation de pureté pour PA – 45 tr / min

IV.2 Simulation numérique et Validation expérimentale

La présente partie traite principalement les matériaux et les méthodes utilisées dans l'étude expérimentale de la trajectoire des particules en plastiques dans un séparateur électrostatique à chute libre à électrodes cylindriques rotatives.

Cette partie consiste à faire un suivi de quantités mesurées et celle du modèle physique développé dans la simulation, la qualité des deux modèles est obtenue par un rapport de concordance charge/masse des deux modèles afin de valider le modèle théorique.

Sachant que les résultats du PP-PA sont meilleurs on va les choisir pour cette étape de l'étude, en mesurant le déplacement horizontal des particules par rapport à l'axe milieu (symétrie) de l'installation réalisée. Les quantités mesurables en laboratoire et en simulation sont (la masse, et la charge).

En premier temps, on quantifie les masses et les rapports charge/masse obtenues dans chaque bac de récupération, et pour faciliter cette tâche les 14 bacs sont réduits à 5 bacs en faisant la somme des masses des compartiments latéraux.

IV.2.1 Résultats du mélange PA-PP

Dans l'ensemble des expériences, nous avons utilisé un mélange granulaire de deux produits constitué de 20 (g) de Polyamide (PA) rigide et 20 (g) de Polypropylène (PP), la densité volumique de PA est de (1140 kg/m^3) et celle du PP est de l'ordre de (900 kg/m^3).

Pour obtenir la distribution de la masse des particules de chaque produit nous avons mesuré la masse de 1500 particules. Dans chaque mesure la masse d'une particule (m) et la charge (Q/m) est estimée à partir de la masse totale de particules choisies aléatoirement à partir d'un gisement de particules de même nature.

Pour quantifier la charge des particules en fonction de leurs déviations par rapport à l'axe de symétrie de l'installation, nous avons mesuré la masse et la charge totale du produit récupéré dans chaque cellule en utilisant un électromètre Keithley6514 et une balance électronique de précision.

Le problème du rebond a été pris en compte dans ce travail, et comme les parois de l'électrode ont été considérées comme "élastiques" et qu'aucune déformation ne se produit à la surface des particules (pas de dépassement), aucune perte d'énergie n'est prise en compte.

Le traitement des résultats obtenus a été effectué en mettant en œuvre un programme de comparaison. Notons que l'erreur de mesure a été considérée comme étant de 5% pour la masse et le rapport charge/masse et la concordance (Con) entre le modèle expérimental et le modèle développé a été calculée en utilisant l'expression suivante :

$$Con_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^5 (\hat{M}_{sim} - M_{exp})^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{M}_{sim} - \overline{M}_{moy}| + |M_{exp} - \overline{M}_{moy}|)} \quad (14)$$

$$Con_Q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^5 (\hat{Q}_{sim} - Q_{exp})^2}{\sum_{i=1}^5 (|\hat{Q}_{sim} - \overline{Q}_{moy}| + |Q_{exp} - \overline{Q}_{moy}|)} \quad (15)$$

Con_m, Con_Q : Concordance de la masse et la charge.

$\hat{M}_{sim}, \hat{Q}_{sim}$: valeurs de la masse et la charge obtenues par simulation.

$\overline{M}_{moy}, \overline{Q}_{moy}$: la moyenne des valeurs de la masse et la charge de la simulation.

M_{exp}, Q_{exp} : valeurs de la masse et la charge obtenues par simulation.

La différence entre les valeurs simulées et expérimentales peut être estimée par le niveau d'accord entre les deux modèles en utilisant les expressions (12) et (13). Dans les tableaux IV.5 et IV.6 est résumée la différence entre les valeurs mesurées et calculées de la masse et du rapport charge/masse. Les résultats obtenus montrent une faible différence entre la masse récupérée par les expériences et la masse obtenue par simulation par rapport au rapport charge/masse, où la différence maximale a été notée pour la première cellule dédiée aux particules chargées négativement.

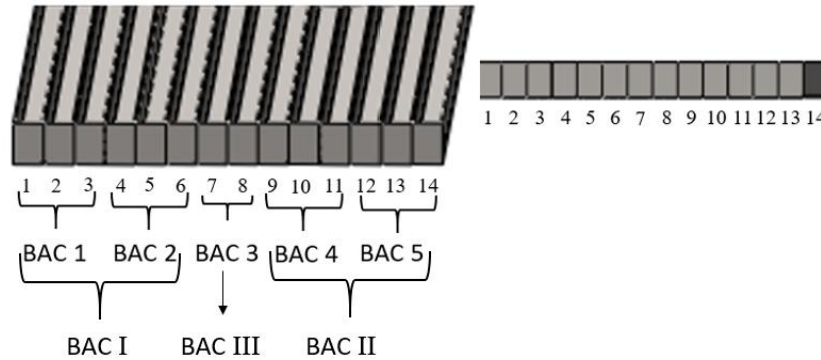


Figure IV.8 Répartition des cellules en 3 BACS de récupération

Pour simplifier la lecture des résultats on a divisé les 14 cellules en 3 bacs (BAC I, BAC II, BAC III), le choix de cette configuration a été basé sur deux critères : 1- la masse récupérée doit être supérieure à 5 g dans chaque bac pour que la concordance sera significative, 2- les masses récupérés dans les cellules (1, 2, 3) et (12, 13, 14) est faible par rapport aux autres cellules mais avec une pureté élevée.

Tableau IV.5 Concordance de la masse mesurée entre le model expérimental et de simulation

Produit	Arrangement des cellules par N°	N° du BAC	M_{exp} (g)	M_{sim} (g)	Différence algébrique	Degrés de Concordance
Produit A	(1, 2, 3)	1	9	8.1	0.9	94.84%
	(4, 5, 6)	2	9.2	9.2	0	
Mixte	(7, 8)	3	6.1	6.1	0	
Produit B	(9, 10, 11)	4	7	5.75	1.25	
	(12, 13, 14)	5	5.4	5.41	0.01	

Tableau IV.6 Concordance de la charge mesurée entre le model expérimental et de simulation

Produit	Arrangement des cellules par N°	N° du BAC	Q_{exp} (nC/g)	Q_{sim} (nC/g)	Différence algébrique	Degrés de concordance
Produit A	(1, 2, 3)	1	-68	-57.4	10.6	99.73%
	(4, 5, 6)	2	-37	-32.4	4.6	
Mixte	(7, 8)	3	7	1.15	5.85	
Produit B	(9, 10, 11)	4	24.22	24.18	0.04	
	(12, 13, 14)	5	39.3	41.52	2.2	

Les résultats de la masse récupérée montrent que le modèle expérimental est bien adapté et adéquat avec le modèle de simulation où la différence a été importante dans les BACS 1 et 4. Cependant, l'adéquation du modèle de rapport charge/masse était faible par rapport à celle de la masse récupérée. La distribution de la masse des particules a révélé que la majorité de la masse des particules simulées était comprise entre 4.10^{-2} g et 6.10^{-2} g pour les particules positives et entre 4.10^{-2} g et $5,5.10^{-2}$ g pour les particules chargées négativement.

Le degré de concordance entre les expériences et les modèles de simulation était supérieur à 92 % pour la masse récupérée et supérieur à 99 % pour le rapport charge/masse. Ces valeurs indiquent la robustesse du modèle théorique utilisé ainsi que la précision des résultats obtenues par expérimentation.

Les figures suivantes montrent une comparaison entre les résultats obtenus dans l'ensemble des essais de concordance.

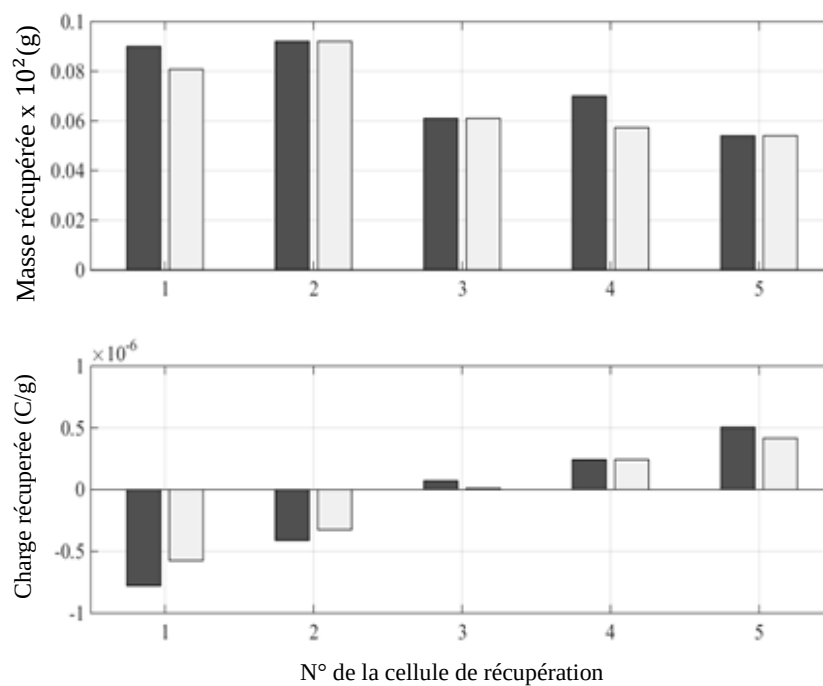


Figure IV.9 récupération de la masse et la charge des produits suivant le N° de la cellule

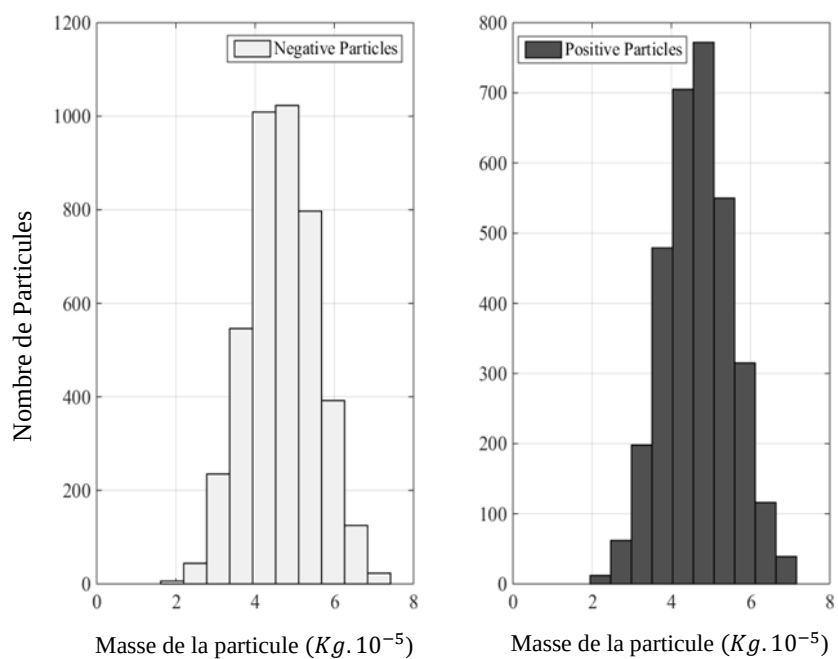


Figure IV.10 Modèle de distribution obtenu pour l'échantillon de masse des particules

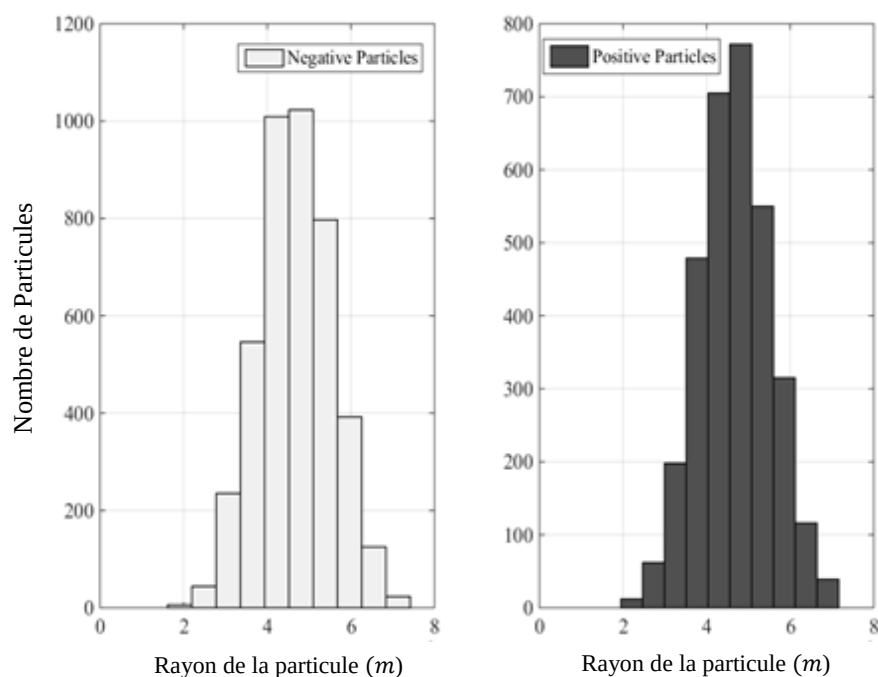


Figure IV.11 Modèle de distribution obtenu pour l'échantillon de masse des particules

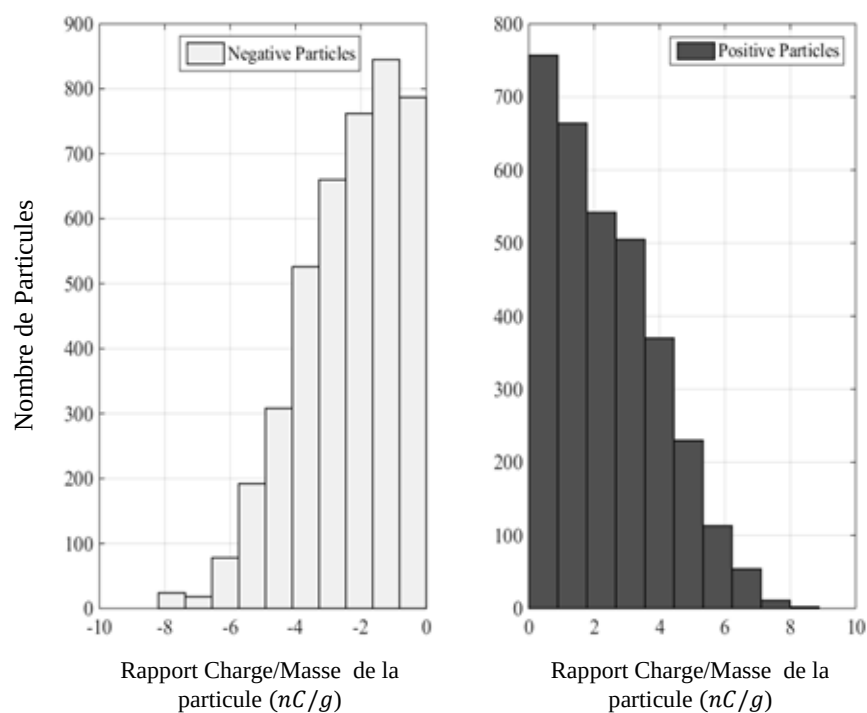


Figure IV.12 Modèle de distribution obtenu pour l'échantillon du rapport charge/masse des particules

La taille des particules est un facteur influent sur le processus d'électro-séparation et l'analyse de la taille des particules montre que les particules négatives étaient plus dominantes avec plus de 1000 particules de 4 à 5 *mm*.

Le rapport charge/masse dépend de la fréquence de charge, du nombre de collisions et du temps de charge. Le rapport charge/masse moyen se situe entre -4 nC/g et -1 nC/g pour les particules chargées négativement et entre 0 nC/g et 3 nC/g pour les particules chargées positivement, ces intervalles conduisent techniquement à un taux de récupération élevé de l'électro-séparation et aller au-delà de ces intervalles conduit à des collisions inter-particules et particule-électrode indésirables qui affecteront négativement la pureté de l'électro-séparation et les taux de récupération.

Les résultats obtenus ont révélé qu'une bonne récupération des particules de PA nécessite des tensions plus élevées par rapport à la récupération du PP qui est plus léger en terme de masse et la majeure partie de la masse récupérée est composée de particules de charge négative. Cependant, la masse d'une particule est liée à son rayon pour le même matériau, ce qui n'est pas pris en considération dans cette simulation, ce qui entraîne des combinaisons arbitraires avec un rayon plus élevé et une faible masse de particule, et une masse plus élevée et un faible rayon, ce qui affecte la validité du modèle d'électro-séparation.

IV.2.2 Modélisation expérimentale du séparateur électrostatique

Dans le secteur d'activité, le technicien ou l'ingénieur est amené à comprendre comment réagit un système en fonction des différents facteurs qui sont susceptibles de le modifier. Pour vérifier l'évolution du processus, il mesure une réponse, et à partir de différents essais, il va tenter d'établir des relations de cause à effet entre la (ou les) réponse(s) et les différents facteurs.

Dans cette partie on s'intéresse à optimiser le fonctionnement du nouveau séparateur électrostatique à électrode cylindriques rotatives, ceci est effectué en étudiant la séparation électrostatique suivant un système constitué de facteurs contrôlables, et incontrôlables afin de déduire le meilleur intervalle de fonctionnement.

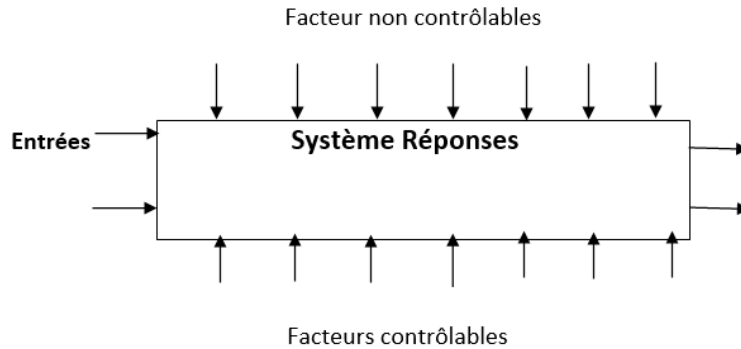


Figure IV.13 Environnement du système expérimental étudié

Parmi les facteurs qui sont pris en considération dans le processus d'optimisation on distingue les suivants :

- Les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix.
 - Les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment des choix (condition climatiques, environnement d'utilisation...).
 - Les facteurs d'entrées telles que la matière première dans un processus de fabrication.
- Il n'est pas simple de réaliser de telles relations entre réponse et facteur, surtout s'il existe des interactions entre les facteurs, en minimisant le nombre d'expériences tout en maximisant la précision du résultat.

IV.2.2.1 Modélisation du système et domaine d'étude des variables influents

La modélisation expérimentale du système de séparation électrostatique commence par le choix des intervalles de variation des facteurs, les intervalles d'étude des différents facteurs doivent être choisis selon les résultats des essais préliminaires effectués au début de cette étude.

Nous avons fixé une certaine consigne (un choix dicté par les essais préliminaires) valable pour toutes les réponses des trois facteurs étudiés (tension, vitesse de chargeur et vitesse de rotation des cylindres).

L'intervalle d'étude de la tension est donné par :

$$24 \text{ KV} \leq U \leq 32 \text{ KV}$$

La valeur centrale de l'intervalle d'étude de la tension est donnée par la moitié de la somme des valeurs des extrémités:

$$U_C = (U_{max} + U_{min})/2$$

$$\text{D' où } U_C = 28 \text{ KV}$$

L'intervalle d'étude de la vitesse de chargeur est :

$$2500 \text{ tr/min} \leq U \leq 3500 \text{tr/min}$$

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

$$V_{C_{chr}} = (V_{max} + V_{min})/2$$

$$\text{D' où } V_{C_{chr}} = 3000 \text{ tr/min}$$

L'intervalle d'étude de la vitesse de moteur est :

$$30 \text{ tr/min} \leq U \leq 45 \text{tr/min}$$

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

$$V_{C_{cyl}} = (V_{max} + V_{min})/2$$

$$\text{D' où } V_{C_{cyl}} = 37.5 \text{ tr/min}$$

IV.2.2.2 Plan d'expériences et Effets des facteurs sur les réponses : Pureté et récupération

Le recours à l'emploi du plan d'expériences est incontournable dans de telle situation ou l'outil mathématique permet d'obtenir des modèles déterminant l'influence de chaque facteur sur chacune des réponses (pureté, récupération).

Les effets de chaque facteur peuvent être obtenus par le logiciel « MODDE » et qui sont représentés par un histogramme dont on peut facilement voir un effet est significatif ou non (il suffit seulement de voir si l'intervalle de confiance passe par zéro ou non, si oui il n'est pas significatif). Après une première étude des différents facteurs qui ont une influence sur les critères de performance de récupération, on a essayé d'établir une relation entre les grandeurs d'entrée et

les grandeurs de sortie, on a fait les 11 expériences, les facteurs n'étaient pas globalement tous significatifs alors on est passé au plan composite et le modèle du second degré :

L'intérêt des plans composites réside dans le fait qu'ils prennent facilement la suite d'un premier plan factoriel dont les résultats sont inexplicables par un modèle du premier degré. Il suffit d'effectuer les expériences qui correspondent aux points en étoile et de faire les calculs sur l'ensemble des expériences.

Dans ce plan on doit faire 17 expériences composites données ou les résultats sont groupés dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7. Les résultats des 17 du plan d'expérience composite

Exp N°	Ordre	Vitesse du chargeur [tr/min]	Tension [kv]	Vitesse du moteur des électrodes [tr/min]	Récupération PP [g]	Pureté PP [%]	Récupération PA [g]	Pureté PA [%]
1	1	2500	24	45	13,5	72,93	7,80	47,56
2	12	3500	24	45	14,4	82,87	11,20	68,29
3	15	3000	28	30	15,2	76,24	13,80	81,25
4	5	2500	28	37,5	15	77,35	11,50	70,12
5	6	3000	32	37,5	15,8	74,59	13,00	75,61
6	2	3500	24	30	15	83,95	12,50	79,27
7	7	3000	28	37,5	16,1	78,45	13,50	82,32
8	3	3500	32	30	16	81,64	14,10	86,22
9	11	3000	28	37,5	16	77,35	13,00	81,10
10	8	2500	32	45	15,8	86,85	13,00	73,15
11	13	2500	24	30	13,7	64,64	8,00	60,98
12	16	3500	28	37,5	16,5	87,29	14,60	85,33
13	4	3500	32	45	17,6	88,9779	15,30	91,33
14	17	3000	28	37,5	16	81,2356	13,40	80,65
15	9	3000	24	37,5	1038	69,06	10,30	56,71
16	10	2500	32	30	14	71,82	11,00	70,12
17	14	3000	28	45	16,5	81,77	13,5	79,53

En traçant la variation des réponses en fonction de ces facteurs choisis. Si on veut par exemple déterminer l'influence d'un facteur choisi. En procédant de la même manière, on peut faire facilement le suivi de l'influence de chaque facteur sur la masse du PA et PP. Les figures suivantes

représentent les effets de chaque facteur sur la réponse de récupération pour un mélange binaire (PP-PA).

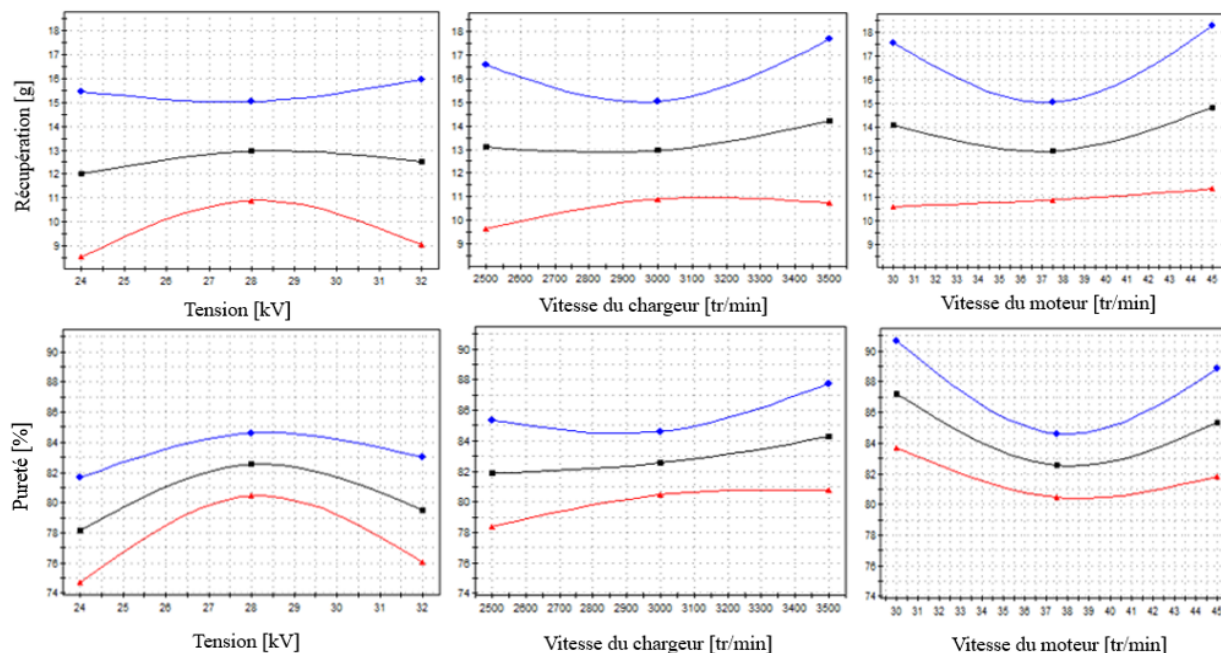


Figure IV.14 Pureté et récupération du PP prédites en fonction des trois facteurs : Moteur = 37.5 tr/min, Tension = 28 kV, Chargeur = 3000 tr / min. les limites de confiance supérieures et inférieures sont maintenues à 95%.

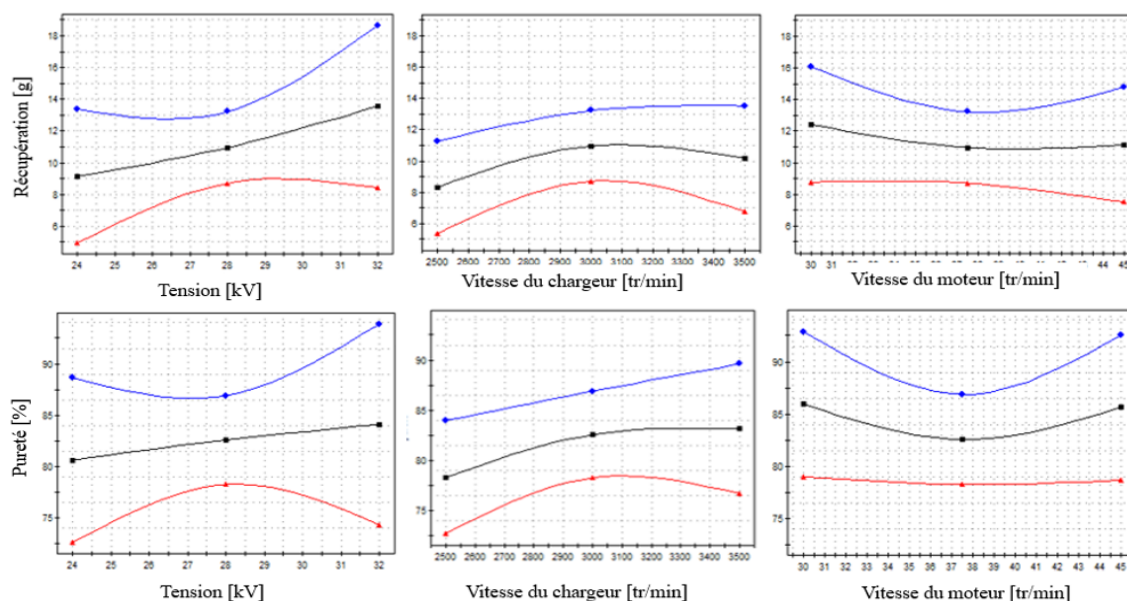


Figure IV.15 Pureté et récupération du PA prédites en fonction des trois facteurs : Moteur = 37.5 tr/min, Tension = 28 kV, Chargeur = 3000 tr / min. les limites de confiance supérieures et inférieures sont maintenues à 95%.

On remarque bien pour les figures (IV. 14 et IV. 15) que la prédiction des résultats en fonction des trois facteurs pour la récupération et pureté du PP et PA est à la limite supérieure et inférieure et ne dépasse pas la marge de confiance qui est définie par les 5%.

En analysant les figures IV. 14 et IV. 15, on constate que :

- Les taux de récupération et de pureté croient avec l'augmentation de la vitesse de chargeur
- En augmentant la tension, les taux de récupération et de pureté sont proportionnels.
- La vitesse de moteur n'influe pas sur le taux de récupération et sur celui de pureté

On remarque :

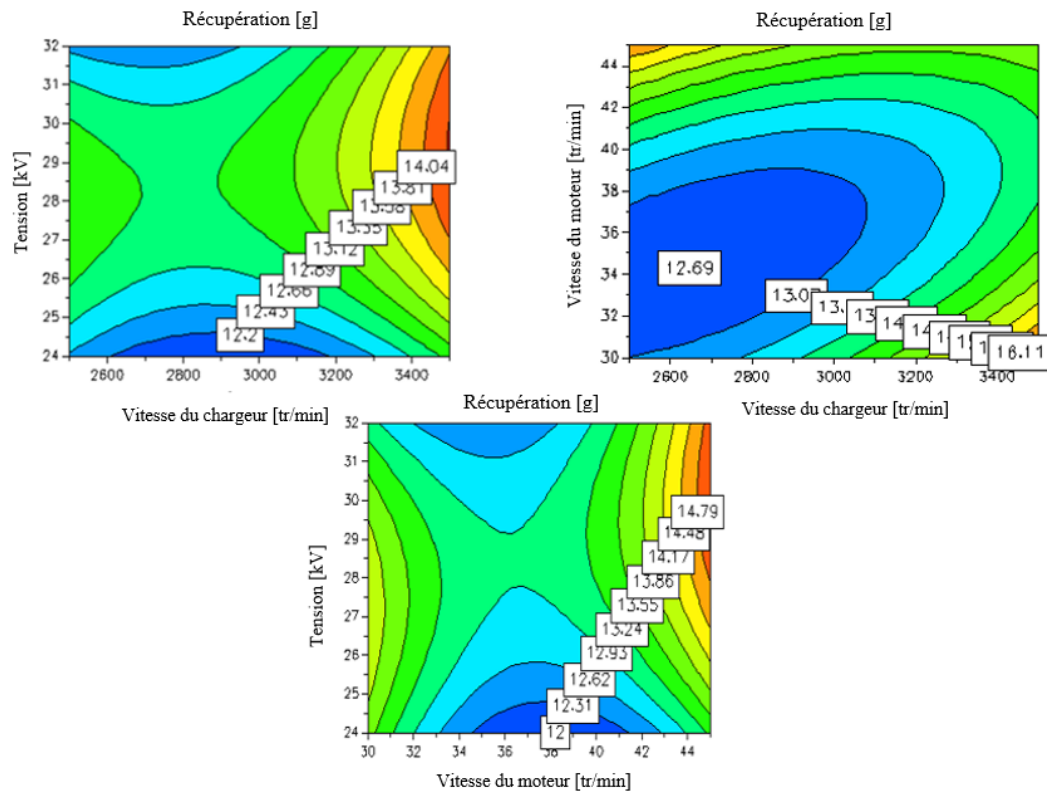


Figure IV.16 les réponses de récupération prédites en fonction des paramètres de vitesse de chargeur, la tension et vitesse de moteur par logiciel MOODE5.0 pour PA

La figure montre les surfaces de réponses prédites en fonctions des paramètres de vitesse de chargeur, la tension et vitesse de moteur qui entraîne les cylindres en utilisant logiciel MODDE 5.0.

La surface de réponse de la récupération et la pureté en fonction des trois facteurs montre clairement que la récupération et la pureté est prépondérante aux trois facteurs et d'une façon significative pour la tension.

Quand on varie la valeur de la haute tension dans l'intervalle de 24 kV à 36 kV en gardant les autres paramètres fixes, nous remarquons que cette variation influe que les quantités des produit PA et PP récupérés.

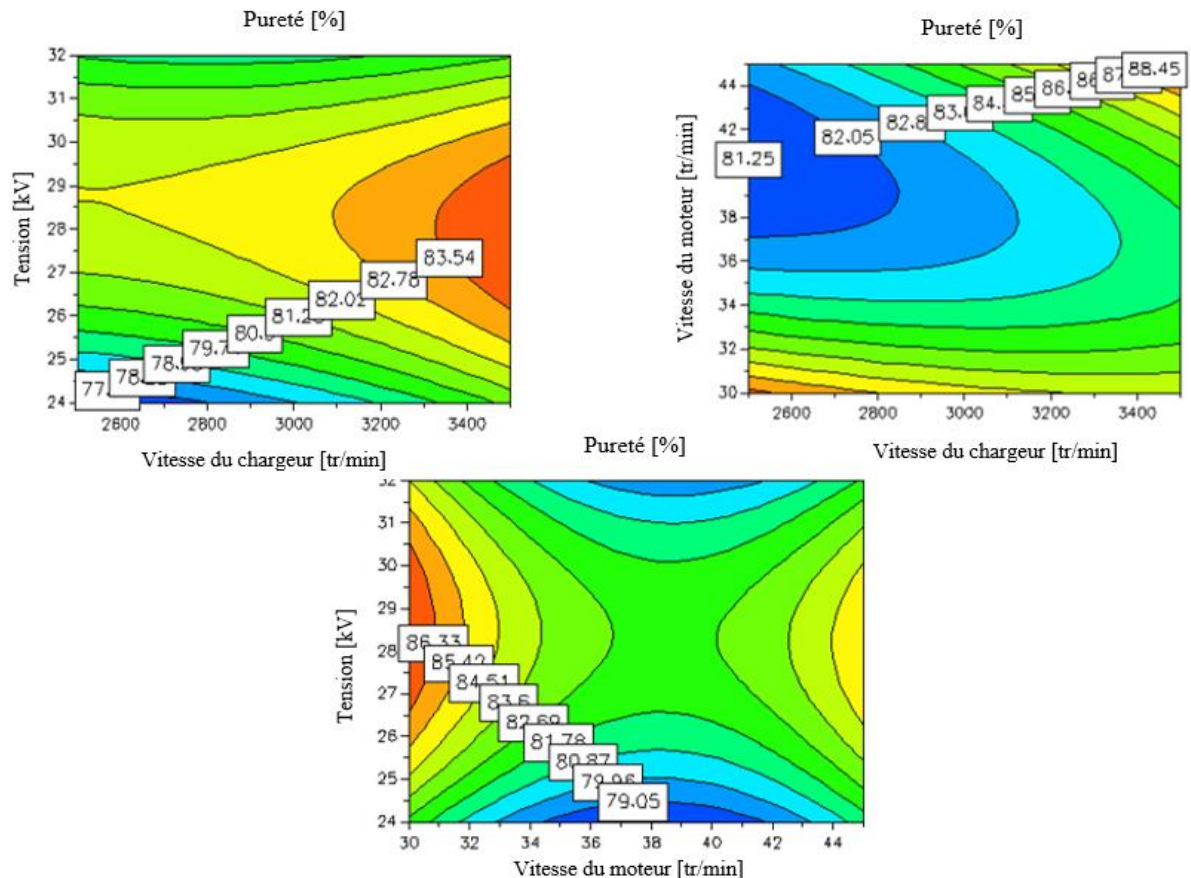


Figure IV.17 les réponses de pureté prédites en fonction des paramètres de vitesse de chargeur, la tension et vitesse de moteur par logiciel MOODE 5.0 pour PP.

Les résultats présentés dans la figure *IV.16 et IV.17* montrent que l'effet de la vitesse de rotation des cylindres est très important, par conséquent l'augmentation du binôme (chargeur-moteur) influe fortement en passant de 80 à 89% de pureté.

L'augmentation de la tension et la vitesse de rotation des cylindres (moteur) influe négativement sur la pureté et positivement sur la récupération dont nous avons pu récupérer 2.79 grammes de plus en passant d'une vitesse de 38 à 44 *tr/min*. la meilleure masse récupérée a été obtenue pour une vitesse de chargement maximale (3500*tr/min*) et une vitesse de rotation minimale des cylindres (30 *tr/min*).

IV.3 Conclusion

Dans le présent chapitre, une nouvelle configuration de séparateur à électrodes cylindriques rotatives a été expérimentée pour la séparation des matériaux granulaires isolants.

L'effet rotatif a considérablement amélioré les taux de récupération et la pureté des produits séparés, allant de 79 à 86 % pour le PA et de 90 à 92 % pour le PP.

Cette amélioration est due aux forces mécaniques tangentielles créées sur la surface des cylindres. Une validation expérimentale avec le modèle théorique a démontré une forte concordance entre le modèle empirique et la théorie. Cette concordance démontre la solidité et la robustesse de l'approche utilisée.

Conclusion Générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'augmentation exponentielle des déchets électriques et électroniques présente un signe d'utilisation exagérée des ressources primaires, ce qui nous oblige à se diriger vers d'autres ressources dont le recyclage des produits hors usage.

Cette thèse s'inscrit dans cet engagement de réduction des factures des matières premières qui ne cesse de flambés d'année en année et la protection de l'environnement par la conception et la réalisation d'une nouvelle installation de séparation électrostatique à électrodes rotatives des mélanges granulaires isolants.

L'installation a été réalisée au sein du laboratoire IRECOM et APELEC de l'université de Sidi Bel-Abbès ; l'ensemble des résultats obtenues n'est qu'une première mise en marche de ce dispositif qui a été sujet d'une attention particulière pour une évaluation de la faisabilité de l'électro-séparation dont certains problèmes reste à résoudre dont on cite le rebond des particules d'un bac de récupération à un autre qui nous a causé beaucoup de problème sur la pureté des produits récupérés mais n'empêche que pour une première mise en marche les résultats obtenus sont prometteurs et peuvent faire l'objet d'améliorations future.

La première partie de conception et de simulation a été élaboré dans cette étude dans le but d'obtenir les points optimaux de fonctionnement et d'améliorer le rendement de cette installation par l'analyse de la trajectoire des particules dans le champ électrique intense sous différentes situations à savoir niveau de tension appliqué, taille des granules et leurs vitesses initiales.

Le nouveau dispositif à électrodes cylindriques rotatives a prouvé sa bonne capabilité dans le domaine de la séparation électrostatique ; cette conclusion a été le fruit des expériences menées en laboratoire ou on a montré la forte concordance des deux modèles théorique et expérimental avec un taux plus de 95% pour la récupération des matériaux purs.

- Durant les expériences, il a été démontré que la charge des granules a un effet significatif sur l'efficacité de séparation électrostatique.

- L'amélioration des performances est due principalement à la vitesse tangentielle créée à la surface des deux cylindres en rotation qui contribue à la diminution des produits mixtes.
- Les résultats obtenus pour chaque produit ont montré que la forme géométrique des matériaux granulaires a un rôle très important dans la qualité des produits récupérés.
- L'étude comparative de l'état des électrodes cylindriques (statiques ou rotatifs) nous a permis de démontrer que la rotation a un effet positif sur l'efficacité de séparation tout en gardant la forme du champ identique le long de la trajectoire des particules.
- L'uniformité du champ électrique intense le long de la trajectoire des particules est l'un des points forts de cette nouvelle géométrie de conception.

Perspectives de recherche:

Comme perspective du travail à effectuer, il est important de mettre en évidence l'importance des points suivants :

- L'étude de la même installation en effectuant des modifications sur la surface des cylindres (réservé aux matériaux granulaires de forme cylindrique et sphérique).
- Etudier l'influence de la nature des surfaces utilisés pour les cylindres (rigides, lisses, perforés).
- Effectuer des essais sur un banc de grandes dimensions pour le traitement des déchets plastiques industriels.
- Effectuer la même étude sur des mélanges pulvérulents tout en faisant la concordance des modèles théorique et expérimental.

Espérant que cette nouvelle installation portera haut la séparation électrostatique et fera l'objet d'autres études portant à son amélioration afin d'être une valeur ajoutée à la préservation de notre environnement et la protection contre la pollution notre univers.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ADEME, Rapport annuel sur la mise en œuvre de la réglementation relative aux Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) données 2013. Octobre 2014
- [2] C.P. Baldé, F. Wang, R. Kuehr. Transboundary movements of used and waste electronic and electrical equipment, United Nations University, Vice Rectorate in Europe – Sustainable Cycles Programme (SCYCLE), Bonn, Germany. 2016
- [3] Md. Sahadat Hossain, M. Z. F. Sulala. Al-Hamadani, and Md. Toufiquir Rahman. E-waste: A Challenge for Sustainable Development. *Journal of Health and Pollution*: December 2015, Vol. 5, No. 9, pp. 3-11. 2015.
- [5] J. E. Lawver and W. P. Dyrenforth, “Electrostatic separation,” in A.D. Moore (Ed.), *Electrostatics and Its Applications*. New York: Wiley, 1973
- [6] H. Kausch, N. Heymans. C. J. G. Plummer, P. Decroly. *Matériaux Polymères: Propriétés Mécaniques et Physiques*. Editeur PPUR presses polytechniques. 657. 2001.
- [7] A. Tilmatine, S. E. Bendimerad, K. Medles, A. Bendaoud, M. Younes, L. Dascalescu. (2008). Set-Point Identification and Robustness Testing of a Free-Fall Triboelectrostatic Separation Process. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*. 1 - 7. 10.1109/08IAS.2008.102.
- [8] L. Dascalescu, Alin Urs, S. Bente, M. Huzau, A. Samuila. Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices, *Journal of Electrostatics*, Volume 63, Issue 6, 2005, 705-710, ISSN 0304-3886, <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.042>.
- [9] A. F. Diaz, J. Guay. Contact charging of organic materials: Ion vs. electron transfer. *IBM Journal of Research and Development*. Volume: 37, Issue: 2, 249 – 260. March 1993.
- [10] L. Brands, P. M. Beier, I. Stahl. Electrostatic Separation. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag, USA. 2001.
- [11] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, K. Asano. Triboelectrification of Plastic Particles on a Vibrating Feeder Laminated with a Plastic Film. *Journal of Electrostatics* 42 (1997) 63-68.

- [12] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, L. Dascalescu. Triboelectrification of Granular Plastic Wastes in Vibrated Zigzag-Shaped Square Pipes in View of Electrostatic Separation. IEEE Transactions on Industry Applications. Volume: 46, Issue: 4:1558 – 15630. 2010.
- [13] S. Leon Escalante, G. Touchard, G. Dominguez. Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2002.
- [14] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahamia, L. Dascalescu. Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials. Journal of Electrostatics. 69. 631-637. (2011).
- [15] S. Bendimerad , A. Tilmatine , M. Ziane & L. Dascalescu. Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator. International Journal of Environmental Studies. 66:5, 529-538, DOI: 10.1080/00207230902722838. (2009).
- [16] 1. 1. Inculet, G.S.P. Castle, J. D. Brown. Tribo-electrification system for electrostatic separation of plastics. Industry Applications Society Annual Meeting, 1994. Conference Record of the 1994 IEEE.
- [17] C. Gary . Effet couronne sur les réseaux électriques aériens. Techniques de l'ingénieur. Editions T.I. (1998).
- [18] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, L. Dascalescu. (2008). "Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications." IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, pp. 692-698.
- [19] Dascalescu, L., Samuila, A., Das, S., Dragan, C., Medles, K., Gauthier., M., "Etude expérimentale des procédés de séparation électrostatiques en vue de leur utilisation au recyclage des matières plastiques présentes dans les déchets électriques et électroniques", Contrat WKO 730/2006, Bénéficiaire : APR2.
- [20] Liu, C., Bard, A.J. "Electrons on dielectrics and contact electrification". In: Chemical Physics Letter, volume 480, issues 4-6, pp 145-156 (2009).

- [21] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Mihalcioiu, S. Bente et A. Tilmatine, «Robust design of electrostatic separation processes,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 715-720, 2005.
- [22] A. Tilmatine, S. Bendimered, F. Boukhoulda, K. Medles et L. Dascalescu, «Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures» Waste Management, vol. 29, pp. 228-232, 2009.
- [23] J. FOURNIER , N. HAVARD, M. LACRAMPE, M. RYCKEBUSCH et P. KRAWCZAK « Conduite adaptative du procédé d'injection des thermoplastiques» techniques-ingenieur,2006.
- [24] F. ORTMANN, W. SCHMIDT, G. Wolf et F. BECHSTEDT, «Attracted by long-range electron correlation: adenine on graphite» Physical review letters, vol. 95, n° 118, p. 186101, 2005.
- [25] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan et L. Dascalescu., «Separation of fine granular mixtures in S-plate-type electrostatic separators,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, pp. 1137-1143, 2007.
- [26] A. Tilmatine, Z. Azzouz, M. Younes, M. Brahami, L. Dascalescu «Separation electrostatique des particules : une technologie efficace dans l'industrie de recyclage», Sciences & Technologie, B – N°22, pp. 42-46, Décembre (2004).
- [27] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics." Part. Sci. & Technol., Vol.33, pp. 652-658, 2015
- [28] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, V. Neamtu, and I. Suarasan, "Corona charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators," J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 27, pp. 1242-1251, 1994.
- [29] H.J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation." London,U.K.: Addison-Wesley, 1963.
- [30] A. F. Diaza, R. M. Felix-Navarro. (2004). A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials:the influence of chemical structure and properties. Journal of Electrostatics 62 (2004) 277–290.

- [31] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, L. Dascalescu. (2005). Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device. *Journal of Electrostatics*. 63. 937-942. 10.1016/j.elstat.2005.03.064.
- [32] T. Fujita, Y. Kamiya, N. Shimizu and T. Tanaka. (1995). Basic study of polymer particles separation using vibrating feeder and electrostatic high voltage generator. *Proceedings of the Third International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology*, pp. 155–164.
- [33] C. Hyun Park, J. Koo Park, H. Seok Jeon, B. Chul Chun. (2008). Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger. *Journal of Electrostatics*. 66, 578–583.
- [34] A. Antoniu, B. Tabti, M. Plopeanu and L. Dascalescu, "Accelerated discharge of corona-charged non-woven fabrics." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 46, pp. 1188-1193, 2010.
- [35] K. Senouci, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, S. Das and L. Dascalescu, "Multivariate statistical process control of electrostatic separation processes." *IEEE Trans. Ind. Appl*, Vol. 45, pp. 1079 -1085, 2009.
- [36] K. Medles, A. Tilmatine, F. Miloua, A. Bendaoud, M. Younes, M. Rahli, and L. Dascalescu, "Set point identification and robustness testing of electrostatic separation processes." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 43, pp. 618–626, 2007.
- [37] W.R. Harper, "Contact and Frictional Electrification.", Morgan Hill, CA: Laplacian Press, 1998
- [38] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga, and N. Serban, "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose." *Environment and Progress*, Vol. 6, pp.341-346, 2006.
- [39] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and V. Neamtu. "Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes." *Part. Sci. & Technol.*, Vol. 16, pp. 25-42, 1998.

- [40] K. Senouci, K. Medles, and L. Dascalescu, "Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment." *Waste Manag. & Res.*, Vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [41] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol 46, pp.1558 – 1563, 2010.
- [42] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 44, pp. 1044-1051, 2008
- [42] C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized bed device." *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 47, pp. 1922-1928, 2011.
- [43] M. Sarki and A. Masumoto, "Electrostatic separation of chopped waste electric cables." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 2, pp 227-236, 2007.
- [44] M.M. Zelmat, A.T. Rizouga, K. Medles, and L. Dascalescu, "Experimental comparative study of different tri-bocharging devices for triboelectric separation of insulating particles." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [45] H.R. Manouchehri, K.H.K. Hanumantha Rao, and K.S.E. Forssberg, "Review of electrical separation methods. Part 2: Practical considerations." *Min. and Metal. Proc.*, Vol. 17, pp. 139-166, 2000.
- [46] 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." *Part. Sci. & Technol*, Vol. 34, pp. 45 – 54, 2016.
- [47] C.H. Park, H.S. Jeon, H.S. Yu, O.H. Han, and J.K. Park, J.K. "Application of electrostatic separation to the recycling of plastic wastes: separation of PVC, PET and ABS." *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 42, pp. 249–255, 2008.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [48] Lacks D J, Sankaran R M. Contact electrification of insulating materials. J Phys Appl Phys 44: 453001 (2011)
- [49] McCarty L S, Whitesides G M. Electrostatic Charging due to separation of ions at interfaces: Contact electrification of ionic electrets. Angew Chem.Int Ed 47: 2188–2207 (2008)
- [50] Shafeek S, Luo J. Theoretical and numerical analysis of triboelectric nanogenerators for self-powered sensors. In 2016 5th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), 2016: 1–4.
- [51] J.M. Crowley. « Fundamentals of Applied electrostatics », Morgan Hill, California: Laplacian Press, 1999.
- [52] H. Park, N. Subasinghe and H.S. Jeon. « Separation of covering plastics from particulate copper in cable wastes by induction electrostatic separation », Materials Transactions, vol. 56, pp. 1140-1143, 2015.
- [53] Govi, «Quelques expériences sur l’induction électrostatique » J. Phys. Theor. Appl.,Vol. 4, pp.264-266, 1875.
- [54] H. Tarik, « Etude de méthode et réalisation d’un bac de test pour l’évaluation des propriétés électrostatique des textile », Thèse Doctorat, Université de science et technologie de Lille, 2005.
- [55] G. Richard, « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires ». Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2018.
- [56] S. Messal, « Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire ». Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2016.
- [57] C. L.Wadhwa,'High Voltage Engineering'. New Delhi, India: New Age International, (2007).
- [58] N.D, Lawrence ‘ Introduction to numerical electrostatics using MATLAB’, New Jersey, CA, USA: John Wiley & Sons, (2014).

- [59] J. Li, H. Lu, Y. Zhou, A model for computing the trajectories of the conducting particles from waste printed circuit boards in corona electrostatic separators, *J. Hazard Mater.* 151 (2008) 52–57.
- [60] Bathe K.J. *Finite Element Procedures*. Prentice Hall, 1996.
- [61] H. Gould, J. Tobochnik, and W. Christian ‘An Introduction to Computer Simulation Methods’. San Francisco, CA, USA: Addison-Wesley, (2007).
- [62] R. Sedgewick, (1983) ‘Algorithms’, USA: Addison-Wesley.
- [63] Park, C.-H., Jeon, H.-S., Yu, H.-S., Han, O.-H., & Park, J.-K. (2008). Application of Electrostatic Separation to the Recycling of Plastic Wastes: Separation of PVC, PET, and ABS. *Environmental Science & Technology*, 42(1), 249–255. doi:10.1021/es070698h
- [64] Fekir, D. E., Miloudi, M., Miloua, F., Medles, K., & Dascalescu, L. (2017). New Propeller-Type Tribocharging Device With Application to the Electrostatic Separation of Granular Insulating Materials. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 2416–2422. doi:10.1109/tia.2017.2647802.
- [65] M. Miloudi, Djamel Eddine Fekir. « Dispositif de chargement tribo-Aéro- électrique à un seul axe de rotation à flux descendants ». Brevet d’invention N°9611. Institut National de la Propriété Industrielle INAPI. Algérie, (2016).
- [66] R. K. Dwari et K. Rao, «Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator,» *Minerals Engineering*, vol. 22, pp. 119-127, 2009.
- [67] S. Masuda, M. Toragushi, T. Takahashi et K. Haga, «Electrostatic beneficiation of coal, using a cyclone-tribocharger,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 19, pp. 789-793, 1983.
- [68] M. K. Mazumder, R. A. Sims, A. S. Biris, P. K. Srirama, D. Saini, C. U. Yurteri, S. Trigwell, S. Dea et R. Sharma., «Twenty-first century research needs in electrostatic processes applied to industry and medicine,» *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 2192- 2211, 2006.

- [69] A. Tilmatine et L. Dascalescu, «Set-point identification of a free-fall electrostatic process for plastic particles,» *International Journal of Environmental Studies*, vol. 67, pp. 27-40, 2010.
- [70] C. Xiao, L. Allen, M. B. Biddle et M. Fisher, «Electrostatic separation and recovery of mixed plastics,» chez Society of Plastics Engineers (SPE) Annual Recycling Conference (ARC), Dearborn, Michigan (US), 1999
- [71] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine et L. Dascalescu, «Experimental study of the optimum operating conditions of a pilote-scale tribo-aeroelectrostatic separator of mixed granular solids,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 699-706, 2013
- [72] M. Miloudi; L. Dascalescu; J. Li; S. El-Mossouess; K. Medles, «Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, pp. 1510-1515, 2013.
- [73] M. Miloudi, L. Dascalescu, J. Li, K. Medles et A. Tilmatine, «Improved overall performances of a tribo-aero-electrostatic separator for granular plastics from Waste Electric and Electronic Equipment,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 4159-4165, 2015.
- [74] L. Calin, and L. Dascalescu, “method for electrostaticly separating a granular mixture made of different materials, and device for implementing same.” Patent FR2943561/2009, WO2010109096/2010, 2009
- [75] A. Mekhalef, K. Medles, F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, L. Dascalescu, "Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials." *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 51, pp. 4166– 4172, 2015.
- [76] Douglas C. Giancoli. (1993). *Physique générale*. Editions De Boeck Supérieur. 8 - 9.
- [77] F. London, *Z. Physik*. (1930). intermolecular interactions. p63, 245.
- [78] H. C. Hamaker. The London van der waals attraction between spherical particles. *Physica*, Volume 4, Issue 10, Pages 1058-1072.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [79] HAMAKER H. C. (1937). The london--van der waals attraction Between spherical particles. *Physica* 4, 1058-1072.
- [80] Samuilă, A., Dăscălescu, L. (1999). Comportarea materialelor granulare în câmp electric. Cluj-Napoca, Editura Mediamira,
- [81] Elie Lévy. (1988) Dictionnaire de physique. Paris. p 601.
- [82] Matsushita, Y., Mori, N, Sometani, T. “Electrostatic separation of plastics by a friction mixer with rotary blades”. In: *Electrical Engineering in Japan* 127 (3), 33-40 (1999).
- [83] Matsusyama, T., Yamamoto, H. “Impact charging of particulate materials”. In: *Chemical Engineering Science*. 61, 2230-2238 (2006).
- [84] Imad Eddine Kimi, Mohamed Miloudi, Seddik Touhami, Djamel-Eddine Fekir & Amar Tilmatine (2022) Experimental investigation of a modified free-fall tribo-electrostatic separator with rotating electrodes, *Particulate Science and Technology*, 40:2, 243-251, DOI: 10.1080/02726351.2021.1929608

Résumé: Il y a vingt ans, la plupart des préoccupations en matière de recyclage du plastique ne concernaient que la réévaluation de ces matériaux. Aujourd'hui, cette catégorie de matériaux connaît une grande tendance, du fait de son volume croissant. Cette augmentation en terme de volume présente un souci pour l'industrie de récupération et du recyclage. Les méthodes classiques par flottation densimétrique ou gravitationnelle n'ont pas réussi à obtenir des résultats satisfaisants en termes d'efficacité, Jusqu'au moment où la technique électrostatique est apparue comme une technologie viable, efficace, et moins énergétique pour le recyclage des matériaux plastiques.

Plusieurs études de séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants ont été menés. L'objectif de ce travail est la réalisation et l'expérimentation d'une nouvelle installation de séparation électrostatique des mélanges granulaires de taille millimétrique à base d'électrodes rotatives. La différence en efficacité de séparation passant de l'état statique à l'état rotatif a été démontrée. Ceci a été confirmé théoriquement par des simulations qui ont été menées via le programme Matlab, qui ont montré une compatibilité entre les deux modèles à plus de 93 %.

Mots clés : Séparateur électrostatique, chargement triboélectrique, mélanges en plastique; effet rotatif.

ملخص :

قبل عشرين سنة مضت ، كانت أكبر إهتمامات إعادة تدوير المواد البلاستيكية تتمثل في إعادة إستعادة وتقييم هذه المواد فقط. لكن اليوم ، تشهد هذه الفئة من المواد إلتفاته كبيرة نظراً لحجمها المتزايد. تُمثل هذه الزيادة في أحجام المواد مصدر قلق لمصانع الإستعادة والتدوير. فشلت الطرق التقليدية عن طريق التعويم بالكثافة أو الجاذبية في تقديم نتائج مرضية من حيث الكفاءة ، حتى اللحظة التي ظهرت فيها التقنية الكهروستاتيكية كتقنية فعالة عملياً وأقل إستهلاكاً للطاقة خلال عملية تفريق المواد البلاستيكية.

أُجريت العديد من الدراسات حول تقنيات الفصل الكهروستاتيكي للمواد الحبيبية العازلة. الهدف من هذه الدراسة هو تصنيع وتجريب آلة جديدة للفصل الكهروستاتيكي لخليط مزدوج من الحبيبات البلاستيكية ذات أحجام ميلليمترية إعتقاداً على تصميم بأقطاب أسطوانية دوارة. تم خلال هذه لدراسة توضيح الفرق في كفاءة الفصل بالإننتقال من الحالة الساكنة للأقطاب إلى الحالة الدوارة، كما تم تأكيد ذلك نظرياً من خلال المحاكاة التي تم إجراؤها بإستخدام برنامج ماتلاب ، والتي أظهرت توافقاً بين النموذجين التجريبي والنظري بأكثر من 93 بالمئة.

كلمات مفتاحية :

فاصل كهروستاتيكي ، شحن عبر الإحتكاك ، خليط بلاستيكي، تأثير دوراني.